

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



65 19

L. inw.

Prof. Dr. L. Graeb

Die ~~Wissenschaften~~

Elektrizität



18/10/10
Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299272



Geheimlich 28/ XI 904.

Die Elektrizität
und ihre Anwendungen.

D/844.



II 6519

Akc. Nr. 1834 | 51

DIE
ELEKTRIZITÄT

UND
IHRE ANWENDUNGEN.

VON
DR. L. GRAETZ,
PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN.

MIT 540 ABBILDUNGEN.

ZEHNTE VERMEHRTE AUFLAGE.
(Doppelauflage.)

STUTTGART.
VERLAG VON J. ENGELHORN.
1903.

ELEKTROSTAT

LEHRBUCH FÜR ELEKTROSTATIK

ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

Vorwort zur zehnten Auflage.

Die zehnte Auflage dieses Buches, welche kaum 1 $\frac{1}{2}$ Jahre nach der neunten und wiederum in doppelter Höhe erscheint, sucht in allen Kapiteln dem neuesten Stand der Wissenschaft und Technik gerecht zu werden. Abgesehen von vielen Einzelheiten, welche dieses Bestreben erweisen, wurden diesmal insbesondere die Abschnitte über elektrische Messungen, ferner über radioaktive Stoffe und über die Telegraphie ohne Draht nicht unerheblich erweitert. Der Verfasser hofft, daß das Werk die alten Freunde sich erhalten und neue dazu erwerben möge.

München, Februar 1903.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung	Seite XIII—XVI
----------------------	-------------------

I. Abschnitt.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität. S. 1—316

1. Kapitel. Die Reibungselektrizität	3—44
Grunderscheinungen. Anziehung und Abstößung. Positive und negative Elektrizität. Isolatoren und Leiter. Elektroskop. Elektrizitätsmenge. Coulombsches Gesetz. Einheit der Elektrizitätsmenge. Elektrisiermaschine. Gleichgewicht der Elektrizität. Verteilung der Elektrizität auf einem Leiter. Spannungsunterschied. Spannung. Einheit derselben. Kapazität. Einheit derselben. Spannungsmesser von Exner, Braun. Elektrische Energie. Dichtigkeit. Spitzen. Influenz. Änderung der Kapazität durch Influenz. Kondensator. Dielektrika. Dielektrizitätskonstanten. Leydener Flasche. Spitzenwirkung. Influenzmaschine von Holtz. Wimshurstmaschine. Entladungserscheinungen. Quadrantelektrometer. Fernkräfte und vermittelte Kräfte. Maxwellsche Theorie. Dielektrizitätskonstante und Brechungsindex.	
2. Kapitel. Kontaktelektrizität. Der elektrische Strom	45—59
Galvanis Entdeckung. Voltas Auffassung. Spannungsunterschied. Galvanisches Element. Elektrische Scheidungskraft. Elektromotorische Kraft. Leiter erster und zweiter Klasse. Galvanische Elemente. Daniellelement, Ballonelement, Telegraphenelement, Elemente von Bunsen, Leclanché. Braunsteinelement, Beutelement. Trockenelemente. Elektrischer Strom. Galvanoskop.	
3. Kapitel. Die Gesetze des elektrischen Stromes	60—77
Stromstärke. Einheit derselben. Messung derselben. Elektromotorische Kraft. Widerstand. Ohmsches Gesetz. Einheit des Widerstandes. Schaltung von Elementen. Verteilung der Spannung. Spannungsverlust. Stromverzweigung. Brückenverzweigung. Stromverzweigung zwischen zwei Elementen.	
4. Kapitel. Elektrische Apparate und Messungen	78—111
Galvanoskope. Apparate. Tabellen für spezifische Widerstände. Widerstandskoeffizienten. Metalle, Flüssigkeiten, Isolatoren. Selenzellen. Normalohm. Rheostaten. Starkstromrheostaten. Messung des Widerstandes von Drähten. Wheatstonesche Brücke. Einrichtung derselben beim Universalgalvanoskop. Widerstand von Flüssigkeiten. Universalmeßbrücke. Thomsonbrücke für sehr kleine Widerstände. Normalelemente. Messung der elektromotorischen	

- Kraft. Kompensationsmethode. Messung der Klemmenspannung. Voltmeter. Universalgalvanometer. Messung der Stromstärke mit diesen Instrumenten. Kompensationsapparat.
5. Kapitel. Die Wärme- und Lichtwirkungen des elektrischen Stromes. Thermoelektrizität 112—132
- Erwärmung durch den Strom. Joulesches Gesetz. Glühen von Drähten. Elektrischer Effekt. Maß desselben. Davyscher Lichtbogen. Quecksilberbogenlampe. Peltiersche Wirkung. Thermostrome. Thermoelektrische Spannungsreihe. Größe der thermoelektrischen Kräfte. Thermosäulen. Anwendung derselben zu Temperaturmessungen. Thermoelektrisches Pyrometer. Pyrometrische Messungen. Gölchersche Thermosäule.
6. Kapitel. Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. Elektrolyse. Polarisationsströme 133—158
- Elektrolyse. Sekundäre Prozesse. Theorie von Clausius-Arrhenius. Wanderung der Ionen. Faradaysche Gesetze. Voltmeter. Messung der Stromstärke. Knallgasvoltmeter. Kupfer- und Silbervoltmeter. Elektrolyse in galvanischen Elementen. Mit einem Äquivalent verbundene Elektrizitätsmenge. Wärmetönung und elektromotorische Kraft. Osmotischer Druck und Lösungsdruck. Erklärung der Elektrizitätserregung in galvanischen Elementen. Polarisation. Polarisationsstrom. Akkumulatoren. Hochspannungsakkumulatoren. Vermeidung der Polarisation durch Wechselströme. Übergangswiderstand. Aluminiumzellen.
7. Kapitel. Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes . . 159—200
- Magnetische Kräfte. Erdmagnetismus. Horizontalintensität. Magnetisches Moment. Magnetisches Feld. Magnetische Induktion. Permanente und temporäre Magnete. Magnetische Kraftlinien. Elektromagnete. Koerzitivkraft. Wärmeentwicklung beim Ummagnetisieren. Hysteresis. Magnetische Kräfte eines Stromes. Zahl der Kraftlinien. Magnetische Permeabilität. Ohmsches Gesetz für den Magnetismus. Magnetische Wage. Drehende Kräfte zwischen Magneten und Strömen. Biot-Savartsches Gesetz. Elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Solenoide. Wirkung derselben. Drehbare Stromkreise. Wirkung des Erdmagnetismus. Rotation von Strömen um Magnete und von Magneten um Ströme. Linke-Hand-Regel. Neefischer Hammer. Elektrische Klingel. Schaltung derselben. Apparate zur Strommessung. Tangentenbusssole. Multiplikatoren. Wiedemannsches Spiegelgalvanometer. Glockenmagnet. Dämpfung. Astasierung. Thomsongalvanometer. Deprezgalvanometer von Edelman, von Hartmann & Braun, von Siemens & Halske. Magnetischer Nebenschluß. Galvanometer in Zweigleitung als Voltmeter. Präzisionsmeßapparate von Siemens & Halske. Ballistisches Galvanometer. Messung der Kapazität und Dielektrizitätskonstanten mittels des Galvanometers.
8. Kapitel. Die Kraftwirkungen elektrischer Ströme aufeinander (Elektrodynamik) 201—209
- Untersuchungen von Ampère. Parallele Ströme. Astatiche Stromkreise. Gekreuzte Ströme. Rotation von Stromteilen. Elektro-

dynamometer von F. Kohlrausch. Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität. Magnetische Molekularströme. Erklärung der magnetischen Erscheinungen durch die Molekularströme. Umkehrung der elektromagnetischen und elektrodynamischen Erscheinungen.

9. Kapitel. Induktion 210—243
 Faradays Untersuchungen. Induktion durch Öffnen und Schließen des primären Stromes. Anwendung des Neef'schen Hammers. Induktion durch Annäherung und Entfernung des primären Stromes. Magnetoinduktion. Lenz'sches Gesetz. Rechte-Hand-Regel. Elektromotorische Kraft der induzierten Ströme. Schneiden der Kraftlinien. Maxwell'sche Regel. Magnet und Drahtspule. Kontinuierliche Erzeugung von Induktionsströmen. Wechselströme. Magnetelektrische Maschine von Stöhrer. Kommutator derselben. Telephon. Aragosa'sche Scheibe. Wirbelströme. Dämpfung. Extrastrome. Selbstpotential. Einheit desselben. Induktionsfreie Rollen. Drosselspulen. Induktionsapparate. Kondensator. Federunterbrecher. Quecksilberunterbrecher. Motorunterbrecher. Deprezunterbrecher. Turbinenunterbrecher. Elektrolytischer Unterbrecher. Spannungserscheinungen. Schlagweite.
10. Kapitel. Die Wechselströme und Drehströme 244—261
 Erzeugung von Wechselströmen. Alternierende Spannung. Alternierende Stromintensität. Messung der Stromstärke von Wechselströmen. Elektrodynamometer von Siemens. Messung der Spannung. Spannungsdynamometer. Scheinbare Vergrößerung des Widerstandes. Impedanz. Induktionsfreie und induktive Widerstände. Drosselspulen. Zusammensetzung zweier Wechselströme. Phase. Phasenverschiebung. Phasenunterschied zwischen Spannung und Strom. Effekt von Wechselströmen. Wattlose Ströme. Arbeitsdynamometer. Drehströme. Magnetisches Drehfeld. Verkettung von Drehströmen.
11. Kapitel. Die elektrischen Schwingungen 262—285
 Elektrischer Funke. Entladung von Kondensatoren. Elektrische Schwingungen. Periode derselben. Sehr rasche Schwingungen. Versuche von Hertz. Kohärer. Righi'scher Oszillator. Interferenz von elektrischen Wellen. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Induktionskräfte. Elektrische Strahlen. Reflexion und Brechung der elektrischen Wellen. Zusammenhang zwischen Elektrizität und Licht. Elektrische Resonanz. Versuche von Tesla. Teslasche Anordnung. Einfluß des Selbstpotentials. Lichterscheinungen. Physiologische Unwirksamkeit der Teslaströme. Leiter und Nichtleiter.
12. Kapitel. Der Durchgang der Elektrizität durch Gase. Die Röntgenstrahlen und Becquerelstrahlen 286—307
 Elektrischer Funke. Schlagweite und Spannung. Geißleröhren. Schichtung des positiven Lichts. Dunkler Raum. Hittorf-Crookes'sche Erscheinungen. Kathodenstrahlen. Geradlinige Fortpflanzung. Phosphoreszenzerregung. Wärmeerzeugung. Ablenkung durch den Magneten. Mechanische Wirkungen. Theorie der Elektronen. Versuche von Lenard. Röntgenstrahlen. Fokusöhren. Antikathode.

Regulierung des Vakuums. Photographische Versuche. Fluoreszenzschirme. Durchleuchtung. Kryptoskop. Entladung von Körpern durch Röntgenstrahlen. Erzeugung von Leitfähigkeit in der Luft. Mechanische Bewegungen unter dem Einfluß dieser Strahlen. Becquerelstrahlen. Radioaktive Substanzen. Induzierte Aktivität. Elektronen.	
13. Kapitel. Die elektrischen Maßeinheiten	308—316
Zurückführbarkeit aller Messungen auf Messung von Längen, Zeiten und Massen. Grundeinheiten. Absolutes (C.G.S.) System. Abgeleitete Einheiten. Mechanische Größen. Magnetische Einheiten. Elektromagnetisches Maßsystem. Bestimmung des Ampère und Ohm, Volt und Farad.	

II. Abschnitt.

Die Anwendungen der Elektrizität. S. 317—630

1. Kapitel. Die Dynamomaschinen für Gleichstrom	319—361
Verschiedene Arten der Stromerzeugung. Magnetoinduktion. Magnetelektrische Maschinen. Grammescher Ring. Das Dynamoprinzip. Dynamomaschinen. Verschiedene Schaltung derselben. Trommelanker von Hefner. Wickelung desselben. Allgemeine Eigenschaften der magnetoelektrischen und Dynamomaschinen. Funken am Kommutator. Elektrischer Effekt. Absolutes Güteverhältnis. Magnetische Disposition. Zahnanker. Multipolare Maschinen. Maschinen von Siemens & Halske, der A.E.G., von Schuckert, Eßlingen, C. und E. Fein. Klemmenspannung und Stromstärke bei verschiedenem äußeren Widerstand für Hauptstrom-, Nebenschluß-, Compoundmaschinen. Regulierung der Nebenschlußmaschinen. Voltmeter und Ampèremeter der A.E.G. und von Siemens & Halske. Schaltung der Volt- und Ampèremeter.	
2. Kapitel. Die Dynamomaschinen für Wechselstrom und Drehstrom .	362—381
Wechselstrommaschinen. Schleifen- und Wellenwicklung. Selbsterregende Wechselstrommaschinen. Maschinen von Helios. Wechsel- und Drehstrommaschinen von Siemens & Halske, von Schuckert. Mordeyprinzip. Maschinen von Oerlikon. Maschinen der A.E.G. Ampèremeter und Voltmeter für Wechselstrom von Hummel. Hitzdrahtmeßinstrumente. Profillinstrumente. Elektrostatistisches Voltmeter. Vergleich der Dynamomaschinen mit galvanischen Elementen.	
3. Kapitel. Die Akkumulatoren	382—402
Polarisationsströme. Sekundäre Elemente. Elektromotorische Kraft derselben. Plantésches Element. Formierung des Planté-Elementes. Fauresches Verfahren. Chemie der Bleiakkulatoren. Nutzeffekt der Akkumulatoren. Tudor-Akkumulatoren. Pollak-Akkumulatoren. Akkumulatoren für Traktionszwecke. Der Edison-Akkumulator. Benutzung von Nebenschlußdynamos zum Laden. Zellenschalter. Ausschalter, Umschalter. Schaltung von Maschinen, Akkumulatoren und Lampen. Anwendung der Akkumulatoren.	
4. Kapitel. Die Transformatoren und Umformer	403—419
Effekt eines Stromes. Vorzüge hoher Spannung bei Fernleitung. Transformation elektrischer Energie bei Wechselströmen. Sekundärgeneratoren. Parallelschaltung der Transformatoren. Pollose Trans-	

- formatoren von Helios, Schuckert, von der Union E.G. Drehstromtransformatoren von Siemens, der A.E.G. Öltransformatoren. Maschinensätze zur Umformung von Gleichströmen. Wechselstrom-Gleichstromumformer. Rotierende Umformer. Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom durch Drosselzellen.
5. Kapitel. Das elektrische Bogenlicht 420—444
 Entstehung des Bogenlichts. Aussehen des Flammenbogens. Benutzung von gleichgerichteten oder Wechselströmen. Lichtstärke. Photometrie. Lummer-Brodhunsches Photometer. Hefnersche Normallampe. Elektrische Regulierung des Kohlenabstandes. Elektrische Lampen. Lampe für Einzellicht von Hefner-Alteneck. Hauptstromlampe. Nebenschlußlampe. Differentiallampe. Vergleich der drei Regulierungsarten. Kriziksche Stäbe. Lampen von Schuckert. Seillampe von Siemens. Fixpunktnebenschlußlampe der A.E.G. Zusatzwiderstände. Dauerbogenlampen. Effektkohlen. Wechselstromlampen von Helios. Transformatoren und Drosselspulen für Bogenlampen. Allgemeine Eigenschaften des Bogenlichts.
6. Kapitel. Das elektrische Glühlicht und die elektrischen Koch- und Heizapparate 445—470
 Joulesche Wärme. Anwendung der Kohle zum Glühen. Evakuierung der Glasgefäße. Edisonsche Lampen. Präparation der Kohle. Kontakte. Fassungen. Effekt der Lampen. Formen der Glühlampen. Anschlußdosen. Parallelschaltung. Nebenschlußmaschinen. Ausschalter. Serienschalter. Korrespondenzschalter. Bleisicherungen. Nernstlampen der A.E.G. Osmiumlampe. Elektrisches Kochen. Vergleich der elektrischen Wärmeerzeugung mit der durch direkte Verbrennung. Zahl der Wattstunden für eine Kalorie. Berechnung der Drahtwiderstände. Anordnung derselben. Kochapparate. Verschiedene Schaltungen. Kochgefäße von Prometheus. Elektrische Öfen. Leuchtende Heizöfen. Lötkolben mit Lichtbogenheizung.
7. Kapitel. Die Arbeitsleistung durch Elektromotoren 471—488
 Doppelte Verwendung der Dynamomaschinen. Elektromotoren mit Nebenschlußwicklung. Eigenschaften derselben. Stufenschalter. Kleinmotoren. Hauptstrommotoren. Große Anzugskraft derselben. Drehstrommotoren. Anlassen und Regulieren derselben. Gegenschaltung. Wechselstrommotoren. Erklärung der Einphasenmotoren. Einige Anwendungen der Elektromotoren. Verteilung der Arbeit. Parallelschaltung.
8. Kapitel. Die elektrische Kraftübertragung 489—502
 Anwendbarkeit der Kraftübertragung. Vorgänge bei der Kraftübertragung. Nutzeffekt der Kraftübertragung. Beispiel. Kraftübertragung auf große Entfernungen. Hochgespannte Ströme. Kraftübertragung von Lauffen a. N. nach Frankfurt a. M. Sicherung der Hochspannungsanlagen gegen Blitzschlag. Hörnerblitzableiter. Kraftverteilung.
9. Kapitel. Die Verteilung elektrischer Energie 503—516
 Serienschaltung. Parallelschaltung. Konstante Klemmenspannung. Kabel. Verbindungskasten. Wattstundenzähler von Aron. Elektrizitätszähler von Thomson. Zweileitersystem. Dreileitersystem. Spannungsteiler der A.E.G. Verteilung durch Wechselströme mit

	Seite
Transformatoren. Parallelschaltung der Transformatoren und Verbrauchsapparate.	
10. Kapitel. Die elektrischen Bahnen, Boote und Automobile	517—537
Elektrische Trambahnen. Zuleitung des Stromes durch die Schienen. Oberirdische Zuleitung. Trolleysystem. Kontaktrolle. Gleitbügel. Hauptstrommotoren. Wagenuntergestell. Kontroller. Unterirdische Stromzuführung. Akkumulatorbahnen. Gemischtes System. Elektrische Lokomotiven. Fernbahnen. Telpherage. Elektrische Automobile. Elektrische Boote. Schleppschiffahrt. Luftschiffahrt.	
11. Kapitel. Die Elektrochemie.	538—562
Elektrolyse. Gesetz von Faraday. Verschiedene Äquivalentgewichte. Polarisaton. Betriebsspannung. Verringerung der Spannung. Oxydationsarbeit an der Anode. Stromdichtigkeit. Elektrometallurgie. Darstellung von Reinkupfer aus Schwarzkupfer. Elmoresche Kupferrohren. Gewinnung des Reinkupfers aus den Erzen nach Siemens. Gewinnung von Zink. Gewinnung des Zinns aus Weißblechabfällen. Goldgewinnung von Siemens & Halske. Aluminiumgewinnung. Elektrischer Schmelzofen. Versuche von Moissan. Karbide. Calciumkarbid. Acetylen. Bleichverfahren von Hermite. Ozonerzeugung. Apparate von Siemens. Ozonbleichverfahren.	
12. Kapitel. Die Galvanoplastik	563—572
Galvanostegie und Galvanoplastik. Einrichtung der Bäder. Stromdichtigkeit und Spannung. Versilberung. Verkupferung. Vergoldung. Vernickelung. Verstählung. Anwendung von Nebenschlußmaschinen. Anschluß der Bäder an Zentralen. Metallisieren. Herstellung von Klischees. Gravieren und Inkrustieren der Metalle.	
13. Kapitel. Die Telegraphie	573—600
Historisches. Erdleitung. Morsescher Schreibtelegraph. Taster. Morse-Apparat. Relais. Polarisirtes Relais. Morse-Alphabet. Farbschreiber. Selbstauslösung. Typendruckapparat von Hughes. Kopiertelegraphen. Oberirdische Leitung. Unterirdische Leitung. Kabel. Kabeltelegraphie. Verzögerung des Stromes. Entladungsstrom. Mittel zu seiner Beseitigung. Telegraphie ohne Draht. Anordnungen von Marconi. Senderanordnungen von Braun. Empfängeranordnungen von Slaby-Arco. Resonanz. Fortschritte der Funktelegraphie.	
14. Kapitel. Telephon und Mikrophon	601—630
Prinzip des Telephons. Spezielle Art der Kraftübertragung. Telephon von Bell. Tonhöhe, Tonstärke, Klangfarbe. Telephone mit Hufeisenmagneten. Verschiedene Formen des Telephons. Mikrophon. Prinzip desselben. Anwendung des Mikrophons. Stäbchenmikrophone. Körnermikrophone. Lautsprechende Telephone. Schaltung von Telephon, Mikrophon und Klingel. Einrichtung zweier Stationen. Mikrotelephone. Linienwähler. Schaltung der Telephone mit Linienwähler. Anwendung des Telephons in Städten. Zentralstellen. Klappenschränke. Vielfachumschalter von Mix & Genest. Telephonische Fernverbindungen. Telegraphon von Poulsen. Singende Bogenlampe. Rückblick.	
Register	631—636

Einleitung.

Das einzige Gebiet der Physik, welches nur durch eine große Reihe schwieriger Untersuchungen überhaupt bekannt werden konnte, ist das Gebiet der Elektrizität. Für alle anderen Naturerscheinungen, die reinen Bewegungen, den Schall, das Licht, die Wärme haben wir von der Natur selbst schon die einfachsten Hilfsmittel zu ihrer Erforschung mitbekommen, unsere Sinne; wir fühlen, wir sehen, wir hören sie. Wenn auch die Sinne oft uns täuschen, und wenn wir auch zu einer sicheren, gründlichen Kenntnis dieser Erscheinungen uns nicht auf die direkten Angaben unserer Sinne verlassen dürfen, so haben wir durch sie doch wenigstens den Vorteil, daß sie uns in vielen Fällen unmittelbar angeben, ob Erscheinungen vorhanden sind oder nicht. Dieses wichtige Hilfsmittel für die Erforschung der Natur geht uns bei der Elektrizität vollständig ab. Wir haben leider keinen elektrischen Sinn. Zum Glück aber hat die Elektrizität unter anderen die höchst willkommene Eigenschaft, daß sie sich leicht und fast ohne unser Zutun in andere Erscheinungsformen verwandelt. Dadurch erst wird diese Kraft, die, wie man immer mehr einsieht, die größte Rolle in der Natur spielt, unseren Sinnen zugänglich. Der Mangel eigener elektrischer Sinnesorgane verlangt naturgemäß einen Ausgleich. Da wir die Elektrizität nicht ohne weiteres empfinden, so müssen wir statt eigener Sinnesorgane andere Hilfsmittel, Apparate, anwenden, welche uns nicht nur das Vorhandensein der Elektrizität anzeigen, sondern uns auch ihre quantitativen Verhältnisse, ihre größere und geringere Menge, Dichtigkeit, Spannung u. s. w. zu messen gestatten. Die leichte Umwandlungsfähigkeit der Elektrizität dient uns dazu, Apparate zu konstruieren, welche ohne weiteres das Vorhandensein der Elektrizität anzeigen und das Maß für ihre quantitativen Verhältnisse geben.

Aber noch ein anderer Mangel haftet unserer Kenntnis von den elektrischen Erscheinungen auch heute noch an, ein Mangel, der, weil

er geistiger Art ist, sich oft äußerst fühlbar macht. Wir haben noch keine begründete, stichhaltige Vorstellung davon, was eigentlich Elektrizität ist. Wir vermuten zwar mit genügendem Grund und haben eine Reihe Anhaltspunkte dafür, daß das, was wir Elektrizität nennen, im Grunde ein mechanischer Zustand oder eine mechanische Bewegung ist, daß alle die Begriffe, welche in der Elektrizitätstheorie auftreten, Elektrizitätsmenge, Potential, Widerstand, Intensität, Selbstpotential, Impedanz, auf mechanische Größen zurückgeführt werden können, die uns unmittelbar bekannt sind, aber wir haben noch keine allseitig anerkannte Vorstellung davon, welcher Art dieser Zustand oder diese Bewegung ist. Wir wissen zwar, daß die elektrischen Erscheinungen sich in dem Lichtäther abspielen, in welchem, wie in einem großen Ozean, wir alle leben, aber wir wissen auch, daß wir es im Gebiete der Elektrizität nicht bloß mit den Bewegungen und Zuständen des Äthers zu tun haben, sondern daß auch die körperliche Materie, die Moleküle und Atome derselben bei ihnen mitwirken, und gerade dieser Umstand macht es schwierig, sich vollkommene mechanische Bilder von den elektrischen Erscheinungen zu machen. Alle die Bilder, welche wir uns machen, und welche wir zum Teil schon in den Bezeichnungen für die elektrischen Erscheinungen anwenden, sind unvollkommen. Und dies muß man ganz festhalten, um nicht in Irrtümer zu verfallen. Wenn wir von größeren oder geringeren Elektrizitätsmengen sprechen werden, so dürfen wir uns nicht fest vorstellen, daß ein Stoff, Elektrizität, in größerer oder geringerer Menge vorhanden ist, denn die Elektrizität hat nur zum Teil, bei manchen Erscheinungen, die Eigenschaften eines Stoffes, in anderen Erscheinungen verhält sie sich ganz anders. Eben dasselbe gilt von allen anderen Bezeichnungen in der Elektrizitätstheorie, von der Dichtigkeit, der Spannung der Elektrizität, von dem Worte elektrischer Strom, Stromstärke u. s. w. Manche Eigenschaften der Elektrizität sind sehr analogen eines Stromes, andere aber wieder nicht. Deswegen muß man alle diese Bezeichnungen nicht wörtlich nehmen, sondern sie sollen nur kurze Ausdrücke für die beobachteten Erscheinungen sein. Wie weit es uns bisher möglich ist, mechanische Bilder von den elektrischen Erscheinungen zu konstruieren, ist an geeigneten Stellen in dem Werke dargelegt.

Die elektrischen Erscheinungen, die man am frühesten beobachtet hat und am längsten kennt, die Erscheinungen der Reibungselektrizität, sind dem Anschein nach von den galvanischen Erscheinungen durchaus verschieden. Und doch ist der Unterschied zwischen ihnen nur ein gradueller, ein allmählicher. Sie unterscheiden sich nicht qualitativ

voneinander, sondern nur quantitativ. Deswegen ist es auch gleichgültig, mit welchen Erscheinungen man die Lehre von der Elektrizität beginnt. Im Fortschreiten der Einsichten erkennt man den Zusammenhang zwischen ihnen. Historisch aber hat sich unsere Kenntnis der elektrischen Erscheinungen so entwickelt, daß lange Jahrhunderte hindurch die Erscheinungen der Reibungselektrizität allein bekannt waren, daß man nur durch Reibung Elektrizität erzeugen und die Erscheinungen verfolgen konnte, welche die Elektrizität im Gleichgewicht zeigt. Erst als am Ende des vorigen Jahrhunderts, im Jahre der französischen Revolution 1789, Galvani, oder, wie eine Erzählung behauptet, eigentlich seine Frau, ganz zufällig eine elektrische Wirkung beobachtete, bei der jede durch Reibung erzeugte Elektrizität ausgeschlossen war, erst seit dieser Zeit lernte man in den chemischen Prozessen eine Quelle kennen, die in unvergleichlich größeren Mengen Elektrizität liefert, als man durch Reibung erzeugen kann, und die durch ihre besondere Erscheinungsform sofort die Kenntnisse von den Eigenschaften und Wirkungen der Elektrizität um ein Bedeutendes erweiterte. Von dieser Zeit an fand ein stetiger ungehemmter Fortschritt in der Untersuchung der Elektrizität und ihrer Wirkungen statt. Eine glänzende Reihe von Namen hervorragender Männer bezeichnet den Fortschritt der Elektrizitätslehre. Durch ihren Scharfsinn und ihre Experimentierkunst brachten Männer wie Faraday, Ampère, Weber, Ohm, Joule, Davy, Seebeck, Oerstedt, Helmholtz, Maxwell, Hertz die Kenntnisse der elektrischen Erscheinungen zu einer ungeahnten Höhe. Faraday insbesondere war es, der durch die großartigsten Entdeckungen, durch die originellsten Methoden, durch die scharfsinnigsten Untersuchungen nicht nur die breite Grundlage legte zu dem großen Bau, den die Elektrizitätslehre heute einnimmt, sondern der einen großen Teil dieses Baues selbst hoch in die Höhe führte, und Heinrich Hertz war es, der, trotzdem ein neidisches Geschick ihm nur eine sehr kurze Lebenszeit gab, diesen Bau noch ein großes Stück über Faraday hinaus förderte.

Diejenigen Zweige der elektrischen Erscheinungen, welche für die riesig entwickelte moderne Elektrotechnik die Grundlage bilden, die Induktionserscheinungen, gerade ihre Entdeckung und Erforschung ist Faradays zweifelloses und ungeschmälertes Verdienst. Immer ist zwar ein großer Schritt zwischen einem im Laboratorium ausgeführten Versuch und der Anwendung dieses Versuchs für die Praxis, für die Technik, für das Leben. Aber auch hier war es wieder eine Reihe genialer Männer, welche die Anwendbarkeit der Elektrizität für die Technik erkannten und welche ihren Scharfsinn und ihre Geschick-

lichkeit dazu verwendeten, um diese noch immer rätselhafte Naturkraft der Menschheit dienstbar zu machen. Die Namen Steinheil, Jacobi, Siemens, Edison, Bell und Marconi werden stets als Namen von Wohltätern der Menschheit geehrt werden. Steinheil richtete den ersten elektromagnetischen Telegraphen ein. Jacobi lehrte zuerst die Anwendung der Elektrizität zur Abscheidung von Metallen und zur Galvanoplastik, Siemens legte durch seine Erfindung der Dynamomaschine den Grund zu der elektrischen Beleuchtung und zur elektrischen Arbeitsleistung, sowie zu den elektrochemischen Prozessen, Edison gab die Einrichtung des elektrischen Glühlichts, Bell schenkte uns im Telephon einen Apparat, dessen Anwendungsfähigkeit ebenso groß ist, wie die geniale Einfachheit seiner Konstruktionen und Marconi endlich eröffnete durch seine Telegraphie ohne Draht das große Äthermeer dem elektrischen Verkehr.

I. Abschnitt.

**Die Erscheinungsweisen und Wirkungen
der Elektrizität.**

I. Abschnitt.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität.

1. Kapitel.

Die Reibungselektrizität.

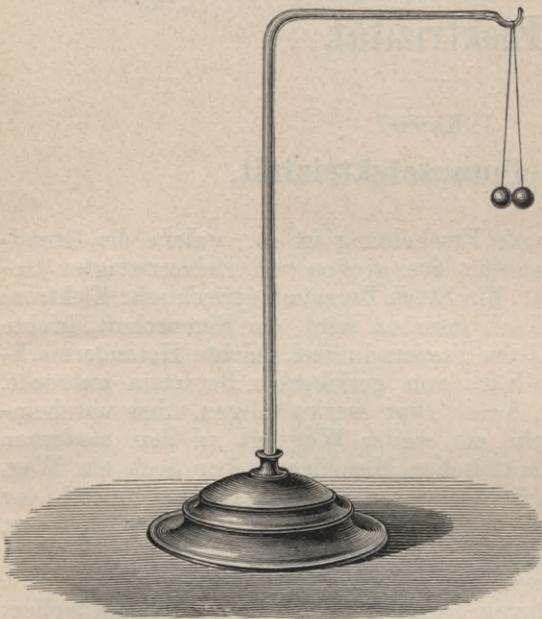
Eine allgemein bekannte Erscheinung ist es, welche die Grundlage für unsere heutige Kenntnis des großen und vielverzweigten Gebietes der Elektrizität bildet. Ein Stück Bernstein (griechisch: Elektron) zeigt, wenn es mit einem Tuch gerieben wird, die Eigenschaft, leichte Körperchen anzuziehen. Kleine Papierschnitzel, leichte Holundermarkkugeln u. s. w. in die Nähe von geriebenem Bernstein gebracht, fliegen an ihn heran. Von dieser zwar merkwürdigen, aber unscheinbaren Wirkung ist es wohl ein weiter Weg bis zu den modernen Riesenwirkungen unserer elektrischen Maschinen, aber doch ein Weg, den, nur wenige zufällige Entdeckungen noch zu Hilfe nehmend, der menschliche Geist gefunden und gebahnt hat, und auf welchem er, langsam aber sicher fortschreitend, nicht nur die Beherrschung, sondern auch die Erkenntnis der gewaltigsten Naturkraft gewonnen hat.

Wenn wir die Erscheinung beim Bernstein kurz ausdrücken wollen, so werden wir sagen können, daß der Bernstein durch das Reiben in einen eigentümlichen Zustand versetzt wird, in welchem er im Stande ist, Kräfte auszuüben, die er sonst nicht zeigt. Diesen eigentümlichen Zustand, den man durch gar nichts sonst erkennt, bezeichnet man als elektrischen. Man sagt, der Bernstein sei elektrisch geworden. Ganz ebenso wie der Bernstein werden aber eine große Reihe anderer fester Körper ebenfalls durch Reiben elektrisch. Es ist ja eine durch Spielversuche schon den Kindern bekannte Tatsache, daß Glas, Siegellack, Kautschuk, Ebonit und andere Stoffe durch bloßes Reiben mit einem Tuch oder mit Pelz die Fähigkeit erlangen, leichte Papierschnitzel, die man auf einen Tisch gestreut hat, anzuziehen. Beobachtet man aber diesen Vorgang genauer, so sieht man, daß er gar nicht so einfach ist. Einzelne von den Papierschnitzeln, die leichteren, fliegen allerdings an eine geriebene Glasstange, an eine geriebene Siegellackstange heran, aber sie bleiben nicht lange an ihr haften, sondern fliegen nach einiger

Zeit wieder von ihr fort. Man kann also aus diesem Experiment bloß schließen, daß um einen durch Reiben elektrisierten Körper herum gewisse Kräfte vorhanden sind, die nicht vorhanden sind, wenn der Körper unelektrisch ist. Ueber die Art dieser Kräfte, ob es anziehende oder abstoßende sind und über die Ursache ihres Auftretens kann man aus diesem Experiment noch gar nichts aussagen, weil die Erscheinungen zu kompliziert sind.

Es zeigt sich aber weiter, daß die Papierschnitzel und ähnliche Körper, wenn sie mit einem elektrisierten Gegenstand nur berührt werden, selbst elektrisch werden, daß sie selbst dadurch in den Stand

Fig. 1.



gesetzt werden, Kräfte auszuüben, die sie sonst nicht zeigen. Man kann dies ganz einfach experimentell nachweisen. Man hänge ein Papierstückchen oder besser ein leichtes Holundermarkkugelchen an einem Seidenfaden auf und berühre es mit einem elektrisierten Glasstab. Durch diese Berührung wird das Holundermarkkugelchen selbst elektrisch. Denn wenn man jetzt ein anderes unelektrisches Kugelchen in seine Nähe bringt, so wird dieses auch zuerst angezogen und nach kurzer Zeit wieder abgestoßen.

Dieses Verhalten gibt nun ein einfaches Mittel, um zu entscheiden, welcher Art die Kräfte sind, die zwei elektrische Körper aufeinander ausüben. Man hänge an ein Gestell zwei Holundermarkkugelchen nebeneinander auf (Fig. 1). Berührt man beide Kugelchen mit einem elektrisch gemachten Glasstab, so werden dadurch beide in gleicher Weise elektrisch und diese beiden in gleicher Weise elektrisierten Kugelchen stoßen sich nun sofort ab und beharren bei dieser Abstoßung. Auch werden beide von dem Glasstab abgestoßen. Ganz dasselbe findet statt, wenn man die Kugelchen nicht mit einem elektrischen Glasstab berührt hat, sondern mit einem elektrischen Siegellackstab, oder Ebonitstab u. s. w. Immer stoßen sich zwei in gleicher Weise elektrisierte Körper ab.

Wenn man aber so verschiedene elektrische Substanzen benutzt, Glas, Siegellack, Ebonit, so findet man doch außer dieser Gleichheit der Wirkung auch einen wesentlichen Unterschied zwischen ihnen. Hat

man die Kügelchen in Fig. 1 z. B. durch Berühren mit einem elektrischen Glasstab elektrisch gemacht, so stoßen sie sich gegenseitig ab und jedes wird auch von dem Glasstab abgestoßen. Dagegen wird jedes der beiden Kügelchen von einer elektrisierten Siegelackstange, die man in die Nähe bringt, angezogen. Auch das Umgekehrte findet statt. Wenn man die Kügelchen durch Berühren mit der geriebenen Siegelackstange elektrisiert, so stoßen sie sich gegenseitig ab und werden auch von der Siegelackstange abgestoßen. Dagegen werden sie von einer geriebenen Glasstange angezogen. Wir erfahren also dadurch, daß das, was wir elektrischen Zustand nennen, noch von verschiedener Art sein kann. Eine geriebene Glasstange ist in anderer Weise elektrisch, als eine geriebene Siegelackstange. Was die eine anzieht, stößt die andere ab. Man hat diese Erfahrungstatsache dadurch ausgedrückt, daß man elektrisierte Körper als positiv und negativ unterschied. Man ist übereingekommen, eine durch Reiben mit Pelz elektrisch gewordene Siegelackstange negativ elektrisch zu nennen, die geriebene Glasstange, die sich entgegengesetzt verhält, also positiv elektrisch.

Die bisher angeführten Tatsachen kann man daher ganz kurz folgendermaßen aussprechen:

Gleichnamig elektrisierte Körper stoßen einander ab, ungleichnamig elektrisierte Körper ziehen einander an.

Die Körper, von denen bisher die Rede war, Glas, Siegelack, Ebonit, Kautschuk, Papier, Holundermark u. s. w., waren lauter unmetallische Stoffe. Diese Körper zeigen in elektrischer Beziehung zwei Eigenschaften. Erstens, sie werden durch Reiben leicht elektrisch, und zwar nur an den Stellen, an denen sie gerieben wurden, und zweitens, sie behalten ihren elektrischen Zustand, wenn er einmal erregt ist. Ganz wesentlich anders verhalten sich die Metalle in elektrischer Beziehung und ebenso wie diese auch eine Reihe anderer Substanzen, viele Flüssigkeiten, feuchtes Holz, Erde u. s. w., ebenso verhält sich insbesondere auch der menschliche Körper. Hält man nämlich einen Metallstab in der Hand und reibt ihn, so findet man keine Spur von elektrischer Wirkung, keine Anziehungen auf Papierschnitzel oder dergl. Trotzdem ist der elektrische Zustand auf ihm erzeugt worden. Aber die Metalle und die anderen erwähnten Körper haben noch die weitere Eigenschaft, daß sie diesen elektrischen Zustand mit der größten Leichtigkeit und Schnelligkeit über ihre ganze Oberfläche verbreiten. Daher bleibt auf einem geriebenen Metallstab der elektrische Zustand nicht an der geriebenen Stelle allein, sondern verbreitet sich sofort über das ganze Metall, über die Hand und den ganzen Körper des Menschen, über den Fußboden und die Wände des Zimmers, in dem man sich befindet, schließlich über die ganze Erde, so daß er auf eine so überaus große Fläche verteilt ist, daß an jeder einzelnen Stelle seine Wirkung zu klein ist, um erkannt zu werden. Man bezeichnet diese Verteilung des elektrischen Zustandes kurz dadurch, daß man sagt, die Elektrizität ist zur Erde abgeleitet.

Daraus folgt: Will man ein Metall in den elektrischen Zustand versetzen, so darf man es nicht direkt in der Hand halten, sondern

man muß es mit einem Griff von Glas, Siegellack, Ebonit u. s. w. versehen. Ebenso überspinnt man aus diesem Grund Drähte mit Seide oder umgibt sie mit Kautschuk. Dann bleibt der elektrische Zustand auf dem Metall, wenn er dort entwickelt wurde, und wird nicht abgeleitet und verbreitet. Man sagt von einem solchen Metall, es sei isoliert. In der Tat kann man ein isoliertes Metallstück durch Reiben elektrisch machen und in diesem Zustand erhalten.

Man unterscheidet also in elektrischer Beziehung zwei Klassen von Körpern. Die Stoffe, wie Glas, Siegellack u. s. w., nennt man Isolatoren, weil sie die Elektrizität auf sich bewahren, isolieren, wenn sie einmal auf ihnen erregt ist. Die Metalle und die erwähnten anderen Stoffe nennt man Leiter oder Konduktoren, weil sie die Elektrizität sofort weiterleiten.

Auf einem unisolierten Leiter kann man also den elektrischen Zustand nicht herstellen, weil er sich sofort über die ganze Erde verbreitet.

Auf einem isolierten Leiter dagegen kann man den elektrischen Zustand durch Reiben oder Berühren leicht herstellen. Derselbe bleibt auf ihm bestehen, weil eben der Leiter isoliert ist. Nicht nur die wirklich geriebenen oder berührten Teile werden elektrisch, sondern der Leiter in seiner ganzen Oberfläche. Die Elektrizität verbreitet sich sofort über die ganze Oberfläche des Leiters. Berührt man einen elektrisierten Leiter mit der Hand, so wird er vollständig unelektrisch, nicht nur an dem berührten Punkte, sondern überall, weil die ganze Elektrizität zur Erde abgeleitet wird.

Während ein Isolator, z. B. Glas, nicht bloß an der Oberfläche, sondern auch im Inneren elektrisch werden kann, wird es ein Leiter bloß an der Oberfläche. Der Gedanke liegt also hier schon nahe, den wir noch weiter bestätigt finden werden, daß es gar nicht die Substanz des Leiters ist, welche dabei elektrisch wird, sondern vielmehr die angrenzenden Isolatoren, daß der Leiter nur scheinbar elektrisch ist, während es vielmehr in Wirklichkeit die angrenzende Luft oder ein anderer angrenzender Isolator ist.

Man sieht aber zunächst rein praktisch aus dem Angeführten, daß ein isolierter Leiter für elektrische Untersuchungen große Vorzüge vor einem Isolator hat. Ein Leiter muß, wenn er bloß an einer Stelle mit einem elektrisierten Körper berührt wurde, überall elektrisch werden, und kann ebenso einfach durch bloßes Ableiten an einer Stelle ganz unelektrisch gemacht werden. Man verwendet deshalb für elektrische Untersuchungen gewöhnlich isolierte Leiter.

Die erste Anwendung, die man von diesem Verhalten der Leiter machen kann, ist die Konstruktion eines zweckmäßigen Apparates, der dazu dient, anzuzeigen, ob ein Körper elektrisch ist oder nicht, eines Elektroskops. Man nimmt (Fig. 2) zwei leichte Streifen von Blattgold als leitende Körper, befestigt diese an einem metallenen Stäbchen, das an seinem anderen Ende eine metallene Kugel, einen Knopf, trägt und steckt das Stäbchen isoliert, durch Kautschuk oder Siegellack, in ein Gehäuse mit Glaswänden. Damit ist ein einfaches Elektroskop konstruiert. Sobald der Knopf des Apparates mit einem

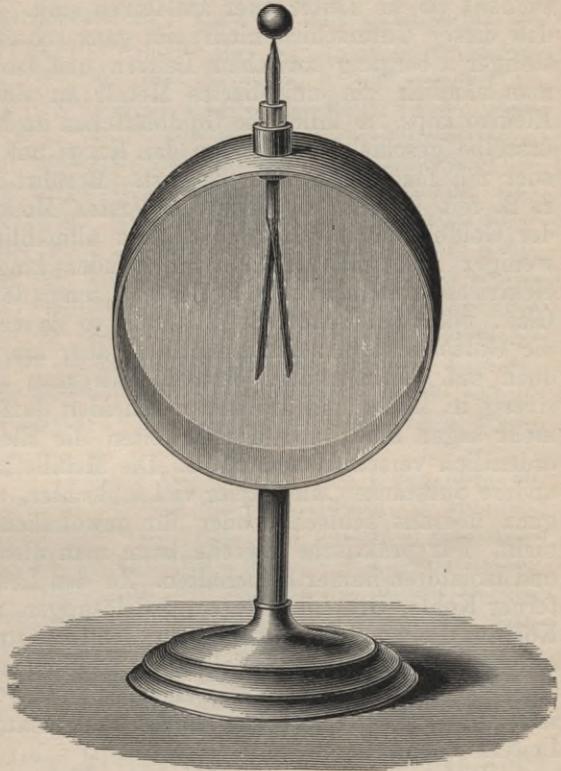
elektrischen Körper berührt wird, wird ihm etwas Elektrizität mitgeteilt; diese verteilt sich über das Stäbchen und die Streifchen von Blattgold, da diese ja Leiter sind, und die beiden leichten Streifchen stoßen einander ab, da sie ja gleichnamig elektrisiert sind. Es zeigt sich also die Elektrizität eines Körpers, mit dem man den Knopf berührt, durch die Divergenz der Goldblättchen an. Man nennt den Apparat ein Goldblattelektroskop. Man kann diesen Apparat sofort dazu benutzen, um auf einfache Weise zu untersuchen, welche

Körper durch Reiben positiv elektrisch werden und welche negativ. Man berührt z. B. den Knopf des Elektroskops mit einer geriebenen Siegellackstange. Dann werden die Goldblättchen negativ elektrisch und stoßen sich ab. Bringt man nun an den Knopf einen anderen negativ elektrischen Körper, so werden die Goldblättchen stärker negativ und divergieren infolgedessen mehr als früher; bringt man aber einen positiv elektrischen Körper heran, so werden die Goldblättchen schwächer negativ und divergieren infolgedessen weniger. Diese Methode besitzt zwar noch viele Mängel, aber schon auf diese Weise kann man untersuchen, welche Körper durch Reiben positiv und welche negativ elektrisch werden.

Auf diese Weise findet man, daß durch Reiben zweier Körper aneinander immer beide Körper elektrisch werden, und zwar der eine immer positiv, der andere negativ. So wird Siegellack durch Reiben mit Pelzwerk negativ, das Pelzwerk selbst positiv elektrisch. Glas wird durch Reiben mit Zinnamalgalam (das man auf Leder aufstreicht) positiv, das Amalgam negativ elektrisch. Harze und Schwefel werden durch Reiben mit Wolle oder Seide oder Leinen negativ elektrisch, die Wolle u. s. w. werden dabei positiv elektrisch.

Eine zweite, wichtige Anwendung des Goldblattelektroskops besteht darin, zu untersuchen, ob ein Körper ein Leiter ist oder ein Isolator. Hat man die Goldblättchen durch Elektrisieren zur Divergenz

Fig. 2.



gebracht, so bleiben sie so lange divergent, als ihre Elektrizität nicht zur Erde abgeleitet wird. Berührt man den Knopf des Elektroskops mit einer (unelektrischen) Glasstange, so bleiben die Goldblättchen divergent, denn Glas ist ein Isolator. Berührt man ihn dagegen mit einem unisolierten Metallstab, den man in der Hand hält, so fallen die Goldblättchen sofort zusammen, denn die Elektrizität hat sich sofort über die ganze Erde verbreitet. Auf diese Weise erkennt man sofort, daß die Luft ein Isolator ist. Denn der Knopf des Apparates ist ja für gewöhnlich stets mit Luft in Berührung und die Blättchen bleiben doch divergent. Man kann so alle Körper daraufhin untersuchen, ob sie Leiter oder Isolatoren sind. Aber dabei zeigt es sich, daß dieser Unterschied nicht ein ganz scharfer ist, daß vielmehr ein stetiger Übergang zwischen Leitern und Isolatoren stattfindet. Legt man nämlich ein unisoliertes Metall an den Knopf des (geladenen) Elektroskops, so fallen die Goldblättchen im Moment zusammen. Eben-dasselbe geschieht, wenn man den Knopf mit der Hand, oder mit Kohle oder mit feuchten Stoffen berührt. Berührt man den Knopf dagegen z. B. mit Papier, so findet im ersten Moment kein Zusammenfallen der Goldblättchen statt, aber ganz allmählich divergieren sie immer weniger und nach mehr oder minder langer Zeit hängen sie unelektrisch nebeneinander. Berührt man den Knopf mit trockenem Glas, oder mit Schellack u. s. w., so dauert es sehr lange Zeit, bis die Goldstreifchen zusammenfallen, aber am Ende hört die Divergenz doch auf. Man ersieht daraus, daß man die Körper nicht einfach streng in Leiter und Isolatoren scheiden darf, sondern daß man vielmehr sagen muß, alle Körper leiten die Elektrizität, aber in außerordentlich verschiedenem Maße. Die Metalle leiten außerordentlich gut, andere Substanzen wie Papier viel schlechter, die sogenannten Isolatoren ganz überaus schlecht, oder für gewöhnliche praktische Zwecke gar nicht. Für praktische Zwecke kann man also die Einteilung in Leiter und Isolatoren immer beibehalten. Zu den Leitern gehören alle Metalle, ferner Kohle, Graphit, Säuren, Salzlösungen, menschliche und tierische Körper, Leinen, Baumwolle; zu den Isolatoren gehören Öle, Kautschuk, Porzellan, Leder, Wolle, Seide, Glimmer, Glas, Wachs, Schwefel, trockene Salze, Bernstein, Schellack. Alle die letzterwähnten Substanzen, wenn sie trocken sind, kann man also zum Isolieren von Leitern benutzen.

Bietet uns die Konstruktion des Elektroskops eine praktische Anwendung der Elektrisierung von isolierten Leitern, so können wir aber andererseits auch durch genauere Betrachtung des Verhaltens solcher Leiter weiterführende wissenschaftliche Einsichten gewinnen.

Wenn wir einen isolierten Leiter durch Berühren mit einem elektrischen Körper, z. B. mit geriebenem Glas, elektrisch machen, so bekommt der Leiter dadurch Elektrizität von derselben Art, wie diejenige, welche der berührende Körper enthielt. Die Elektrizität bleibt auf dem Leiter nicht an der Berührungsstelle allein, sondern der ganze Leiter wird sofort elektrisch. Man sagt, die Elektrizität verteilt sich auf dem Leiter. Berühren wir den Leiter nun zum zweitenmal mit einem elektrischen Glasstab, so wird ihm wieder neue Elek-

trizität mitgeteilt, die sich auch wieder über die ganze Oberfläche des Leiters verteilt. Und so können wir dem Leiter ein drittes, ein viertes Mal Elektrizität zuführen u. s. w. Es wird dadurch der isolierte Leiter immer stärker elektrisch. Man sagt von ihm, er wird immer stärker geladen. Je stärker der Körper geladen ist, desto kräftiger stößt er ein aufgehängtes Markkugelnchen unter sonst gleichen Umständen ab. Man kann auch in übertragener Weise dies so ausdrücken, daß man sagt, ein elektrischer Körper, der, unter sonst gleichen Umständen, eine größere Kraft auf ein elektrisiertes Markkugelnchen ausübt, enthält eine größere Elektrizitätsmenge oder Ladung. Man braucht aber bei diesem Wort Elektrizitätsmenge nicht an eine gewisse Menge Substanz denken, sondern muß dieses Wort nur als kurze Bezeichnung für die Tatsache ansehen, daß ein und derselbe Körper, wenn er elektrisiert ist, größere oder geringere Kräfte ausüben kann. Man spricht auch von Lichtmenge, von Wärmemenge, ohne anzunehmen, daß Licht oder Wärme ein Stoff ist. Selbstverständlich unterscheidet man positive und negative Elektrizitätsmengen. Wir schließen also aus der Kraft, die ein elektrischer Körper zeigt, auf die Elektrizitätsmenge, die er enthält. Üben zwei geladene Körper die gleiche Kraft auf dasselbe Markkugelnchen in derselben Entfernung aus, so sagen wir, sie enthalten gleiche Elektrizitätsmengen. Übt der eine eine doppelt so große Kraft aus, so sagen wir, er enthält eine doppelt so große Elektrizitätsmenge. Wir messen dann also die gesamte Elektrizitätsmenge, die ein Körper enthält, aus der Kraft, die er auf ein in bestimmter Entfernung befindliches kleines elektrisches Markkugelnchen ausübt.

Die Kraft nun, die ein elektrisierter Körper auf einen anderen ausübt, ist an Größe verschieden, je nach der Entfernung, in welcher die beiden Körper sich voneinander befinden. Es entstand natürlich die Frage: in welcher Weise hängt die Kraft, mit der ein elektrisierter Körper auf einen anderen wirkt, von der Entfernung dieser beiden Körper voneinander ab? Um dies zu entscheiden, muß man das Experiment befragen und muß sehr kleine elektrisierte Körper daraufhin untersuchen, weil bei diesen ihre Gestalt nicht mehr von Einfluß ist. Das Grundgesetz nun, das Coulomb durch eine mühsame Untersuchung gefunden hat, lautet:

Die Kraft, welche zwei kleine elektrisierte Körper aufeinander ausüben, ist gleich dem Produkt ihrer Elektrizitätsmengen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung, und diese Kraft ist eine abstoßende, wenn die beiden Körperchen gleichnamig, eine anziehende, wenn sie ungleichnamig elektrisiert sind.

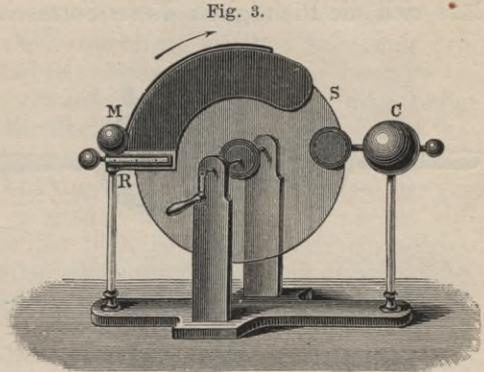
Dieses Gesetz, das im Jahre 1785 gefunden wurde, nennt man nach seinem Entdecker das Coulombsche Gesetz.

Wir können das Coulombsche Gesetz zunächst mit Leichtigkeit dazu benutzen, um Elektrizitätsmengen in genau bestimmtem Maße zu messen, d. h. um uns eine Einheit zu schaffen, in der wir alle Elektrizitätsmengen ausdrücken. Wir sahen, daß wir auf die Größe einer Elektrizitätsmenge schließen aus der Kraft, welche sie ausübt. Nun

werden aber Kräfte in der Physik ein für allemal in einer bestimmten Einheit, die man 1 Dyne nennt, ausgedrückt. Es ist z. B. die Anziehungskraft, welche die Erde auf ein Kilogramm ausübt (das Gewicht eines Kilogramms), in dieser Einheit gleich 981 000 Dynen. Eine Dyne ist daher ungefähr gleich der Kraft, mit welcher die Erde ein Milligramm anzieht, also gleich dem Gewicht eines Milligramms; genauer ist das Gewicht eines Milligramms bloß gleich 0,981 Dynen. Wir können daher nach dem Coulombschen Gesetz sagen, wir wollen diejenige Elektrizitätsmenge als Einheit wählen, welche auf eine gleich große in der Entfernung von 1 cm befindliche eine Kraft ausübt, deren Größe gerade 1 Dyne ist. Dies ist die sogenannte elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge, weil sie aus dem Grundgesetz der Elektrostatik, dem Coulombschen Gesetz, folgt. Statt dieser Einheit braucht man aber in Wirklichkeit stets eine andere, welche auf anderer Grundlage beruht, und welche dreitausendmillionenmal so groß wie die von uns bestimmte ist. Man nennt diese praktisch gebrauchte Einheit 1 Coulomb. So spricht man von 10 Coulomb, 0,5 Coulomb u. s. w., die ein elektrischer Körper enthält. Der Grund, der zur Einführung dieser Einheit geführt hat, wird später (Kap. 13) klar werden, vorläufig genügt es festzusetzen, daß wir alle Elektrizitätsmengen in Coulombs messen. Man sieht aber, daß ein Körper, der die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb enthalten würde, ganz außerordentlich große Kräfte auf einen zweiten, ebenfalls mit 1 Coulomb geladenen Körper ausüben würde, da 1 Coulomb gleich dreitausend Millionen ($3 \cdot 10^9$) elektrostatistischen Einheiten ist. Schon Ladungen von 1 millionstel Coulomb bringen große Kräfte hervor. Man bezeichnet 1 millionstel Coulomb als 1 Mikrocoulomb. Wir können leicht ausrechnen, daß zwei kleine Körper, von denen jeder mit 1 Mikrocoulomb geladen wäre, wenn sie 1 cm Abstand voneinander haben, eine Kraft aufeinander ausüben würden, die gleich 9 Millionen Dynen, also etwa gleich dem Gewicht von 10 Kilogrammen wäre.

Da wir Elektrizität durch Reiben stets erzeugen können, und da wir einem isolierten Leiter durch wiederholte Berührung mit einem elektrisierten Körper beliebige Mengen von Elektrizität mitteilen können, so liegt der Gedanke nahe, eine Maschine zu konstruieren, welche gestattet, auf bequeme Weise durch Reiben Elektrizität fortwährend zu erzeugen und zugleich einen isolierten Leiter mit ihr zu laden. Diese Aufgabe wird durch die Elektrisiermaschine gelöst. Statt eine Glasröhre in der Hand mit Leder zu reiben, setzt man eine runde Glasscheibe S (Fig. 3) fest auf eine Achse auf, durch welche man sie mittels einer Kurbel drehen kann, und läßt nun die Glasscheibe bei der Drehung sich fortwährend an zwei mit Zinnamalgam bestrichenen Lederscheiben R, dem sogenannten Reibzeug, reiben. Das Reibzeug ist durch eine Schraube ziemlich fest gegen die Glasscheibe angedrückt. Dadurch wird also auf der Scheibe fortwährend positive Elektrizität erzeugt, auf dem Reibzeug negative. Um nun die positive Elektrizität der Glasscheibe auf einen isolierten Leiter C zu übertragen, benutzt man folgende Anordnung, deren Begründung sofort gegeben werden wird. Man verbindet mit dem Leiter C (den man den einen Konduktor

der Elektrisiermaschine nennt, M ist der andere) zwei Holzringe, welche die Scheibe zwischen sich hindurch rotieren lassen, und welche mit feinen Spitzen, Nähnadeln, der Scheibe gegenüber besetzt sind. Diese Spitzen saugen, wie wir sofort erklären werden, die positive Elektrizität aus der Glasscheibe fortwährend in sich, und da sie in leitender Verbindung mit dem Konduktor C stehen, so verbreitet sich die Elektrizität von ihnen aus auf den Konduktor. Der isolierte Leiter C wird also positiv geladen und zwar umso stärker, je länger man die Glasscheibe dreht. Zugleich steht das Reibzeug R in Verbindung mit einem anderen isolierten oder zur Erde abgeleiteten Leiter M, und auf diesem verbreitet sich die negative Elektrizität. An dem Reibzeug ist noch ein nach oben gebogener Ebonitstab befestigt, an welchem zwei Stücke Seidenzeug hängen, die von dem Reibzeug an bis beinahe zu den Saugspitzen sich an die Glasscheibe anhängen. Dadurch wird ein Ausgleich der beiden Elektrizitäten vermieden und die Maschine wird daher wirksamer.



So haben wir also ein einfaches Mittel, um dem Leiter C positive und dem Leiter M negative Elektrizität in großem Betrag zuzuführen.

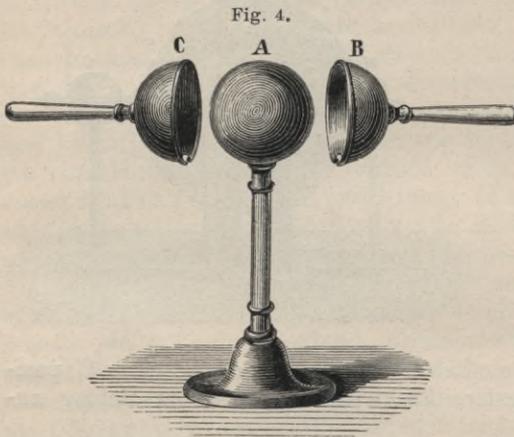
Wie aber verteilen sich diese zugeführten Ladungen auf dem Leiter? Wir haben gesehen, daß ein Leiter die Eigenschaft hat, daß in ihm der elektrische Zustand nicht an einem einzigen Punkte oder an einigen wenigen Stellen bleiben kann, sondern daß er sich sofort über den ganzen Leiter verbreitet, wenn er an einem Punkte erregt ist.

Teilt man daher einem Leiter an einer Stelle eine gewisse Menge Elektrizität mit, so muß diese zunächst wegen ihrer absolut leichten Beweglichkeit auf dem Leiter sich verschieben. Denn die einzelnen elektrischen Teilchen der Ladung, sei diese nun positiv oder negativ, suchen sich gegenseitig so weit als möglich abzustößen. Wenn also weiter keine äußeren Ursachen vorhanden sind, die etwa auf die Ladung wirken, so folgt daraus, daß die Elektrizität nicht im Innern des Leiters bleiben kann, sondern daß erst dann ein Ruhezustand, ein Gleichgewichtszustand erreicht ist, wenn die Ladung nur an der Oberfläche des Leiters ist, wo sie durch den angrenzenden Isolator verhindert ist, weiter den gegenseitigen Abstoßungskräften zu folgen. Daraus ergibt sich also der Satz:

Wenn die Elektrizität in einem Leiter im Gleichgewicht ist, so kann sie sich nur an der Oberfläche des Leiters befinden. Das Innere muß unelektrisch sein.

Faraday hat diese Folgerung durch einen großen Versuch bestätigt. Er ließ einen großen Würfel aus Kupferdraht machen, einen

Würfel von mehr als 3 m Seitenlänge, in welchen also ein Mann bequem hineingehen konnte. Die Wände dieses Würfels ließ er mit Stanniolpapier, einem leitenden Körper, überziehen. Dann begab er sich selbst mit sehr empfindlichen Elektroskopen in diesen Würfel hinein, der isoliert aufgestellt war, und ließ den Würfel von außen durch eine Elektriermaschine sehr stark elektrisieren. Trotzdem nun auf der Oberfläche des Würfels außerordentlich große Elektrizitätsmengen vorhanden waren, konnte er inwendig, auch an der Innenfläche des Stanniols, nicht eine Spur von Elektrizität nachweisen. Die obige Folgerung, die aus dem Wesen der Leiter folgte, ist also unbedingt bestätigt. Es läßt sich die Richtigkeit dieses Satzes auch durch einen einfachen Versuch zeigen.



Eine isolierte Metallkugel A (Fig. 4) wird stark elektrisiert und dann mit den beiden Halbkugeln B und C, die an isolierten Griffen befestigt sind, vollständig bedeckt. Dadurch bildet die Kugel mit den beiden Halbkugeln einen einzigen Leiter, und die Elektrizität kann nach unserem Satze nicht auf A bleiben, sondern muß auf die Oberfläche von B und C gehen. In der Tat, wenn man die Halbkugeln nun wieder abnimmt, zeigt sich

A vollkommen unelektrisch, während B und C elektrisch sind.

Es ist also in der Tat durch den Versuch bewiesen, daß ein Leiter, wenn er im elektrischen Gleichgewicht ist, nur an seiner Oberfläche elektrisch ist. Wie das möglich ist, darüber kann man sich noch zweierlei verschiedene Ansichten bilden. Entweder kann man annehmen, daß wirklich die metallische Oberfläche in bestimmter Weise modifiziert ist, so daß wir sie elektrisch nennen, oder aber man kann annehmen, daß es in Wirklichkeit gar nicht das Metall ist, welches elektrisch geworden ist, sondern daß es nur der angrenzende Isolator ist, welcher modifiziert wurde und welcher den Schein erweckt, als ob der Leiter elektrisch geworden ist. Diese letztere Ansicht wurde von Faraday stets vertreten und es wird sich zeigen, daß diese Vorstellung, obwohl sie komplizierter aussieht, die richtige ist. Das Metall des Leiters ist nun zwar nach dieser Ansicht an sich unelektrisch, nicht modifiziert. Aber es spielt doch bei dem ganzen Vorgang eine wichtige Rolle. Der Leiter bewirkt nämlich, daß der ganze angrenzende Isolator sofort in den elektrischen Zustand kommt, wenn auch nur an einer Stelle der Zustand erregt wurde. Das Metall leitet tatsächlich den elektrischen Zustand längs seiner ganzen Oberfläche fort. Worin der Vorgang des Elektrisierens besteht, darüber ist damit noch nichts ausgesagt.

Aus der Tatsache der gegenseitigen Abstößung der elektrischen Teile haben wir geschlossen, daß sich die Ladung nur an der Oberfläche eines Leiters, nicht im Innern befinden kann. Längs der ganzen Oberfläche eines geladenen Leiters haben wir also eine elektrisierte Schicht, deren einzelne Teile sich gegenseitig abzustößen suchen. Diese Schicht würde sich noch weiter von dem Leiter entfernen, wenn nicht eben der angrenzende Isolator diese Beweglichkeit verhindern würde. Eine solche Schicht verhält sich in gewisser Weise ähnlich wie eine Kautschukkugel, oder wie eine Seifenblase, die man aufbläst. Wie bei diesen der Druck der eingeblasenen Luft bewirkt, daß der Kautschuk oder das Seifenwasser sich so weit ausdehnen, bis ihre Spannung dem Druck der eingeblasenen Luft das Gleichgewicht hält, so bewirkt bei der Elektrizität die gegenseitige Abstößung, daß sich eine dem Leiter zugeführte Ladung bis an die Oberfläche desselben ausdehnt und gewissermaßen ein elektrisches Häutchen um den Leiter bildet. So wie bei einer aufgeblasenen Kautschukkugel der Kautschuk eine gewisse Spannung besitzt, nämlich eine so große, daß sie dem Druck der eingeschlossenen Luft das Gleichgewicht hält, so besitzt auch ein solches elektrisches Häutchen eine gewisse Spannung, nämlich eine solche, daß sie dem Druck der gegenseitigen Abstößungskräfte das Gleichgewicht hält.

In der Tat müssen wir jedem elektrisierten Leiter eine gewisse Spannung oder, wie man dasselbe gelehrter ausdrückt, ein gewisses Potential zuschreiben, eine Spannung, die man sich eben am besten unter dem Bilde eines gespannten Häutchens klar macht. Man kann auch leicht folgendes in Bezug auf die Größe dieser Spannung einsehen. Führt man eine und dieselbe Elektrizitätsmenge, z. B. 1 Mikrocoulomb, einmal einer kleinen, dann einer großen Metallkugel zu, so muß die Spannung der elektrischen Schicht beidemale verschieden sein. Und zwar muß sie bei der großen Kugel kleiner sein als bei der kleinen. Denn da die Spannung dem Druck der Abstößungskräfte das Gleichgewicht halten muß, da aber diese Abstößungskräfte bei der großen Kugel wegen der größeren Entfernung der Teilchen voneinander kleiner ist als bei der kleinen Kugel, so ist auch die Spannung der elektrisierten Schicht bei der großen Kugel kleiner als bei der kleinen.

Allgemein werden wir also sagen müssen, daß jeder Leiter, dem man eine gewisse Elektrizitätsmenge zugeführt hat, eine gewisse Spannung besitzt, und daß diese Spannung abhängt außer von der zugeführten Elektrizitätsmenge von der Form und Größe des Leiters. Für einen und denselben Leiter, z. B. eine Kugel, wird die Spannung natürlich größer sein, wenn die zugeführte Elektrizitätsmenge größer ist. Denn führe ich einer leitenden Kugel einmal 1 Mikrocoulomb, das andere Mal 10 Mikrocoulomb zu, so sind die Drucke infolge der Abstößungskräfte das zweite Mal größer, weil eben größere Elektrizitätsmengen sich abstoßen, und daher ist auch die Spannung der Kugel bei größerer Ladung größer als bei kleinerer.

Wir können uns dies wieder durch eine Analogie leicht klar machen. Wenn man in ein allseitig geschlossenes Gefäß, z. B. in eine Metallkugel, ein Gas hineinbringt, so wird das Gas einen Druck auf

die Wände des Gefäßes ausüben und selbst auch unter diesem Drucke stehen. Je mehr Gas wir in das Gefäß bringen, um so größer ist der Druck des Gases. Was nun bei dem gasgefüllten Körper der Druck ist, ist bei dem mit Elektrizität geladenen Leiter die Spannung. Bei einem gaserfüllten Gefäß wächst der Druck, wenn die Menge des Gases zunimmt, und wird der Druck geringer, wenn die Menge abnimmt. Ebenso wird bei einem elektrischen Leiter die Spannung größer, wenn man ihn mit mehr Elektrizität ladet, und geringer, wenn man ihm weniger Elektrizität zuführt. Wenn man ferner eine und dieselbe Menge Gas, z. B. 1 g, in Gefäße von verschiedener Form und Größe bringt, so wird der Druck jedesmal ein anderer sein. Nämlich in dem Gefäß mit größerem Inhalt, mit größerer Kapazität, wird dieselbe Menge Gas einen kleineren Druck ausüben, in einem Gefäße mit kleinerem Inhalt einen größeren. Das Verhältnis zwischen der Menge des eingeführten Gases und dem dadurch erzeugten Druck hängt also ganz allein ab von dem Inhalt, von der Kapazität des Gefäßes. Ganz ebenso ist es bei einem elektrischen Leiter. Das Verhältnis der Elektrizitätsmenge, die auf dem Leiter liegt, zu der Spannung, die dadurch hervorgebracht ist, hängt nur ab von der Gestalt und Größe des Leiters, welcher mit dieser Elektrizität geladen ist. Man nennt dieses Verhältnis auch hier, wie in unserem Beispiel, die Kapazität des Leiters. Die Kapazität eines Leiters gibt also an, in welchem Verhältnis stets die Elektrizitätsmenge des Leiters zu seiner Spannung steht. Es ist die

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Spannung}}.$$

Die Kapazität eines Leiters bei der Ladung mit Elektrizität entspricht also dem Volumen eines Gefäßes bei der Füllung mit Gas.

Man kann bei vielen Körpern die Kapazität aus ihren Dimensionen berechnen, bei allen sie leicht durch Versuche bestimmen, wie wir später sehen werden. Kennt man nun die Kapazität eines Leiters und weiß man, wie viel Elektrizität er enthält, so weiß man auch, welches seine Spannung ist, denn es ist seine

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Kapazität}}.$$

Und umgekehrt, kennt man die Kapazität und die Spannung, so weiß man auch, wie groß die Elektrizitätsmenge auf dem Körper ist, denn es ist seine

$$\text{Elektrizitätsmenge} = \text{Kapazität} \times \text{Spannung}.$$

Es ist nun aber notwendig, daß wir die so neu eingeführten Größen, Spannung und Kapazität, nicht bloß im allgemeinen verstehen, sondern daß wir sie auch in bestimmtem Maß ausdrücken und wir müssen untersuchen, wie wir das tun können.

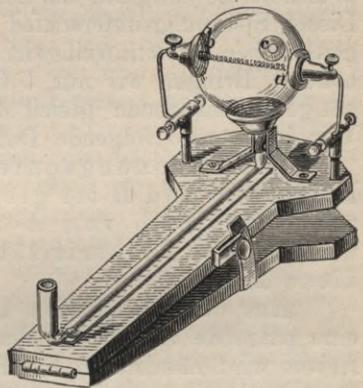
Zwei verschiedene geladene Leiter haben im allgemeinen verschiedene Spannung. Verbinden wir die beiden Leiter nun durch einen Draht, so bilden sie jetzt nur einen einzigen zusammenhängenden Leiter. Es muß sich also der Spannungsunterschied zwischen ihnen ausgleichen

und in der Tat findet eine andere Anordnung der Ladung an der Oberfläche statt, so daß jetzt wieder der ganze zusammenhängende Leiter überall dieselbe Spannung hat, es bewegt sich, wie man sagt, die Elektrizität längs des Drahtes von dem einen Leiter zum anderen, bis überall dieselbe Spannung herrscht. Diese Betrachtung können wir auch umkehren:

Stets, wenn wir beobachten, daß die Elektrizität sich von einem Leiter A zu einem Leiter B bewegt, drücken wir das so aus, daß wir sagen, die beiden Leiter A und B haben einen Spannungsunterschied (oder eine Potentialdifferenz), die Spannung ist nicht auf dem Leiter A dieselbe wie auf B, sondern sie ist auf A größer als auf B.

Bei dieser Bewegung der Elektrizität zwischen zwei Leitern von verschiedener Spannung leisten aber die elektrischen Kräfte stets eine gewisse Arbeit. Es entsteht nämlich, wie sich leicht beweisen läßt, in dem Draht, durch welchen die Elektrizität sich bewegt, um den Ausgleich der Spannungen zu erzielen, immer eine gewisse Wärmemenge, wodurch der Draht erwärmt wird, und da die Wärme nach den allgemeinen Begriffen der Physik nur eine bestimmte Form der Arbeit ist, so können wir allgemein sagen, daß bei der Bewegung der Elektrizität von einem Leiter A mit höherer Spannung zu einem Leiter B mit niedriger Spannung die elektrischen Kräfte immer eine gewisse Arbeit leisten. Um nachzuweisen, daß bei der Bewegung der Elektrizität durch einen Draht wirklich der Draht erwärmt wird, kann man sich am besten eines Apparates bedienen, der von Rieß angegeben ist. Man bringt nämlich einen spiralförmig gewundenen Platindraht a (Fig. 5)

Fig. 5.



in eine hohle Glaskugel, die in ein enges Rohr ausläuft, in welchem etwas Wasser sich befindet. Die Enden des Spiraldrahtes, die durch die Glaskugel eingeschmolzen hindurchgehen, verbindet man nun durch Drähte mit den beiden Leitern von verschiedener Spannung, die sich ausgleichen sollen, z. B. mit den beiden Konduktoren unserer Elektrisiermaschine, von denen der eine positive, der andere negative Spannung besitzt. Dann bildet also der Platindraht die Verbindung zwischen den Konduktoren, und durch ihn bewegt sich beim Ausgleich der Spannungen die Elektrizität. Der Draht wird nun in der Tat dabei wärmer, wie man daraus erkennt, daß die Luft in der Kugel sich ausdehnt und das Wasser in der engen Röhre vor sich hinschiebt.

Durch diesen Versuch ist also vorläufig bewiesen, daß bei dem Übergang der Elektrizität von einem Leiter höherer Spannung zu einem solchen von geringerer Spannung Arbeit geleistet wird, und das können wir dazu benutzen, um zunächst für den Unterschied der Spannungen der beiden Leiter ein Maß zu finden und festzusetzen. Wir können

uns dabei an ein bekanntes Beispiel aus der Bewegung von Wasser halten. Wenn eine bestimmte Wassermenge (z. B. 10 kg) aus einer Höhe A (z. B. 30 m) unter dem Einfluß der Erdanziehung heruntermfällt bis zu einer Höhe B (z. B. 12 m) über dem Erdboden, so ist die Arbeit, welche die Erdschwere dabei leistet, gleich dem Produkt aus der Wassermenge und dem Höhenunterschied, also hier gleich 180 Kilogramm-meter.

Ganz ebenso wollen wir jetzt feststellen: Wenn eine gewisse Elektrizitätsmenge (z. B. 10 Coulomb) von einem geladenen Leiter A nach einem Leiter B sich bewegt, also unter dem Einfluß der Anziehung- unter Abstößungskräfte, so ist die Arbeit, welche bei dieser Bewegung von den Kräften geleistet wird, gleich dem Produkt aus der Elektrizitätsmenge und dem Spannungsunterschied der Leiter A und B. Was also in dem Fall des Wassers der Höhenunterschied ist, das ist hier der Spannungsunterschied. Offenbar haben wir damit den Spannungsunterschied zweier Leiter A und B ganz sicher bestimmt, sobald wir nur die Arbeit messen können (etwa durch Messen der erzeugten Wärme), die nötig ist, um unsere 10 Coulomb von A nach B zu bringen. Dieser Spannungsunterschied ist nämlich gleich dem zehnten Teil der gemessenen Arbeit, weil wir eben 10 Coulomb von A nach B gebracht haben. Bringen wir nur 1 Coulomb von A nach B, so ist die dazu nötige Arbeit genau gleich dem Spannungsunterschied von A und B. Wir haben also folgende Definition:

Der Spannungsunterschied zwischen zwei geladenen Leitern A und B ist gleich der Arbeit, welche nötig ist, um 1 Coulomb von A nach B zu bringen. (Die Kräfte, welche die Elektrizitäten aufeinander ausüben, leisten diese Arbeit.)

Aus dieser Definition können wir aber auch sofort unmittelbar eine passende Einheit für den Spannungsunterschied entnehmen. Eine Arbeit wird nämlich in der Physik und Technik in Kilogramm-metern (kgm) gemessen, wobei man unter 1 kgm diejenige Arbeit versteht, welche die Erdschwere leistet, wenn 1 kg unter ihrer Wirkung um 1 m herabfällt. Wir werden also zunächst auch sagen können: an zwei Leitern wird dann die Einheit des Spannungsunterschiedes vorhanden sein, wenn eine Arbeitseinheit (1 kgm) dazu gehört, um 1 Coulomb von einem Leiter zum anderen überzuführen. Diese Einheit hat man aber nicht mit einem besonderen Namen bezeichnet, sondern eine andere, bei der man nicht 1 kgm, sondern nur $\frac{1}{9,81}$ kgm Arbeit aufwenden muß, um 1 Coulomb von dem einen Leiter zum anderen überzuführen. Diese Einheit des Spannungsunterschiedes nennt man 1 Volt. Es ist also

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = \frac{1}{9,81} \text{ kgm.}$$

Das ist die Definition für 1 Volt. Die Zahl 9,81 kommt daher, daß die Erdschwere einem Körper nicht die Beschleunigung 1, sondern die Beschleunigung 9,81 erteilt.

Wir haben bisher den Spannungsunterschied von irgend zwei Leitern oder allgemein von irgend zwei Stellen A und B zu messen und auszudrücken gelernt.

Nun ist die Erde auch ein Leiter der Elektrizität und für alle Versuche, die wir machen können, ist die Erde als ein unendlich großer Körper anzusehen. Daher wird jede Elektrizitätsmenge, die wir der Erde zuführen, ein Häutchen von kolossal großer Oberfläche bilden. Die Spannung (das Potential) der Erde wird also Null sein, weil der Druck, den die Elektrizitäten aufeinander ausüben, dabei wegen der großen Entfernung Null ist. Die Spannung (das Potential) der Erde setzen wir also gleich Null. Und nun haben wir auch nicht bloß für den Spannungsunterschied zweier Leiter, sondern für die Spannung jedes Leiters selbst sofort ein bestimmtes Maß.

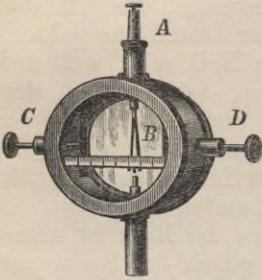
Der Spannungsunterschied eines Leiters gegen die Erde ist nämlich, da die Spannung der Erde Null ist, direkt gleich der Spannung dieses Leiters selbst.

Auch die Spannung selbst, wie der Spannungsunterschied, hat als Einheit 1 Volt. Wenn wir also sagen, an einem Leiter herrscht die Spannung 8 Volt, so heißt das nichts anderes, als daß die elektrischen Kräfte der Ladung dieses Leiters eine Arbeit von $8 \times \frac{1}{9,81}$ kgm ausüben müssen, um 1 Coulomb von diesem Leiter A bis zur Erde zu bringen.

Auf diese Weise haben wir also nun ein bestimmtes Maß für Spannungen, nämlich das Volt, so wie wir früher für die Elektrizitätsmengen ein Maß in den Coulombs festgelegt haben. Nun steht aber die Ladung eines bestimmten Leiters, seine Anzahl Coulombs, zu der Spannung, die der Leiter besitzt, den Volts, immer in einem bestimmten Verhältnis, welches wir als die Kapazität des Leiters bezeichnet haben. Wenn wir als Leiter z. B. die Kugel mit den Goldblättchen unseres Elektroskops von S. 7 nehmen, so hat dieser Leiter eine bestimmte Kapazität. Bringen wir diese Kugel nun in Berührung mit einem großen geladenen Körper, der etwa die Spannung 1000 Volt hat, so wird sie dieselbe Spannung annehmen, wie dieser Körper, also auch 1000 Volt, und es wird infolgedessen die Ladung unserer Kugel eine bestimmte Anzahl Coulombs sein, nämlich gleich der Kapazität der Kugel mal 1000 Volt. Bringen wir die Kugel in Berührung mit einem Körper, der 2000 Volt Spannung hat, so wird die Ladung der Kugel, also auch die der Goldblättchen, die doppelte von vorher sein. Es werden daher die Goldblättchen jetzt auch stärker ausschlagen. Man sieht daraus, daß, wenn wir unser Elektroskop in Verbindung mit einem geladenen Körper bringen, die Ausschläge der Goldblättchen ein Maß geben für die Spannung, die der Körper besitzt. Wir können daher ein solches Elektroskop direkt als Spannungsmesser benutzen, wenn wir nur die Ausschläge desselben meßbar machen. Und wenn wir nur ein für allemal bestimmt haben, wie groß der Ausschlag unseres Elektroskops für 100, 200, 300 u. s. w. Volt ist, so dient uns ein solches Instrument nun immer dazu, um die Spannung eines geladenen Körpers direkt in Volts zu messen.

Ein solches Instrument, ein kalibriertes Elektroskop, welches von Exner konstruiert ist, und das vielfache Anwendung findet, zeigt Fig. 6. In einem mit Glaswänden versehenen Gehäuse steckt isoliert

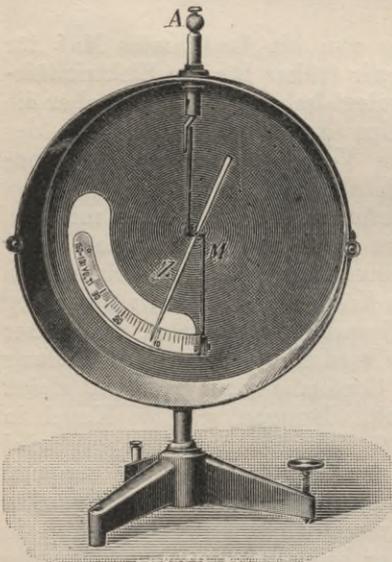
Fig. 6.



ein Metallstab, der oben an der Klemme A befestigt ist, und der im Gehäuse die beiden Goldblättchen B trägt. Wird A mit einem geladenen Körper in Verbindung gesetzt, so schlagen die Goldblättchen aus und ihre Divergenz wird an dem geteilten Maßstab abgelesen. Je größer der Ausschlag, umso größer ist die Spannung des geprüften geladenen Körpers. Die beiden verschiebbaren Platten bei C und D dienen dazu, beim Transport des Apparates, der namentlich bei Messungen der Lufterlektrizität gebraucht wird, die Goldstreifen vor Verletzungen zu schützen.

Sehr bequem sind die in Volts geachteten, sogenannten absoluten Elektrometer von Braun, von denen Fig. 7 eine Ansicht gibt. Dieselben bestehen aus einem Metallgehäuse, welches vorn entweder ganz, oder bloß so weit, daß man die Skala sehen kann, durch Glas abgeschlossen ist. In das Metallgehäuse

Fig. 7.



führt isoliert hinein ein festes Metallblech M, welches oben einen Knopf A besitzt und welches innen gabelförmig aufgeschnitten ist und einen drehbaren Aluminiumzeiger Z trägt. Ist das Instrument ohne Ladung, so berühren sich Metallblech und Aluminiumzeiger. Wird der Knopf A aber mit einem elektrisierten Körper verbunden, so werden beide Teile, das feste Blech und der bewegliche Zeiger, gleichmäßig geladen und stoßen sich ab. Die Größe des Ausschlags ist ein Maß für die Spannung des untersuchten Körpers. An der Skala kann man direkt die Spannung in Volts ablesen. Bei dem abgebildeten Instrument entspricht jeder Teilstrich 100 Volt. Je nach der Schwere des beweglichen Zeigers kann man die Instrumente empfindlicher und weniger empfindlich machen.

Verbindet man einen geladenen Körper, der z. B. 1000 Volt Spannung besitzt, mit einem solchen Elektrometer, so ist klar, daß die Spannung des Körpers dadurch etwas sinken muß, weil eben jetzt ein Teil seiner Elektrizität auf das Elektrometer übergegangen ist. Das Elektrometer gibt die Spannung an, nicht wie sie der freie Körper, sondern wie sie der mit dem Elektrometer verbundene Körper besitzt.

Hat aber das Elektrometer eine sehr kleine Kapazität, wie es die beiden eben angeführten wirklich haben, so ist die auf sie übergehende Elektrizitätsmenge sehr klein, also wird dadurch auch die Spannung des untersuchten Körpers nur sehr wenig geändert.

Da die Kapazität eines Leiters gleich dem Verhältnis einer auf ihm liegenden Elektrizitätsmenge zu ihrer Spannung ist, so können wir nun auch leicht eine Einheit für die Kapazitäten festsetzen. Wir sagen nämlich, daß derjenige Leiter die Einheit der Kapazität hat, welcher durch die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb gerade die Spannung 1 Volt bekommt. Diese Einheit der Kapazität nennt man 1 Farad. Hat man also z. B. gemessen, daß ein Leiter die Spannung 1500 Volt hat und hat man andererseits gemessen, daß die Elektrizitätsmenge, die sich auf ihm befindet, $\frac{1}{200}$ Coulomb ist, so hat der Leiter die Kapazität von $\frac{1}{300000}$ Farad. Für gewöhnliche Zwecke ist das Farad oft un bequem groß; die Leiter, mit denen wir wirklich operieren, haben sehr viel kleinere Kapazitäten als 1 Farad. Deswegen benutzt man gewöhnlich den millionsten Teil desselben als Einheit und nennt diesen 1 Mikrofara d. Unser Leiter hätte also die Kapazität 3,33 Mikrofara d.

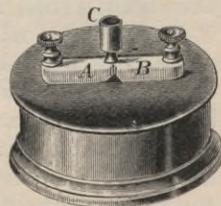
Man stellt praktisch Leiter her, welche eine Kapazität von einer gewissen Zahl Mikrofara d haben und mit den man dann die Kapazitäten anderer Leiter vergleichen kann. So zeigt die Fig. 8 ein Instrument, welches $\frac{1}{3}$ Mikrofara d Kapazität besitzt. Es besteht aus einem zusammengelegten, sehr großen Stück paraffinierten Papiers, welches auf beiden Seiten mit Stanniol beklebt ist. Die Büchse, die das Papier enthält, ist mit einem Deckel aus Ebonit verschlossen, auf welchem zwei Metallstücke A und B aufsitzen, die voneinander isoliert sind. Das eine dieser Metallstücke ist mit der einen Stanniolfäche, das andere mit der anderen verbunden. Bringt man das eine Metallstück, z. B. A, mit der Erde in Verbindung und das andere, B, mit einem Leiter, auf dem man dauernd gerade die Spannung 1 Volt aufrecht erhält (was man, wie wir sehen werden, bewirken kann), so geht auf das Stanniol eine Elektrizitätsmenge über, welche gleich

$$1 \text{ Volt} \times \frac{1}{3} \text{ Mikrofara d} = \frac{1}{3} \text{ Mikroculomb ist.}$$

Will man dann die geladene Metallfläche bei B wieder un elektrisch machen, so braucht man bloß den Metallstöpsel C (wie in der Figur) zwischen A und B einzustecken; dann ist B und A metallisch verbunden, und da B mit der Erde verbunden ist, so ist das ganze Stanniol zur Erde abgeleitet, also un elektrisch.

Um einen Leiter elektrisch zu laden, muß man eine gewisse Arbeit aufwenden; umsonst erhält man die Elektrizität nicht. Denn da die elektrischen Kräfte Arbeit leisten können, so ist ein elektrisierter Körper ein Sitz, eine Quelle von Energie, und Energie ist nirgends in der Natur umsonst zu haben, vielmehr muß man eine gewisse Arbeit aufwenden, um dem Körper eben diese Energie zu erteilen. Diese Arbeit läßt sich aber leicht ermitteln.

Fig. 8.



Wir wissen ja (S. 16), daß die Arbeit, die die elektrischen Kräfte leisten müssen, um eine Anzahl von Coulombs von einer Stelle, deren Spannung eine beliebige Anzahl von Volts ist, bis zur Erde (Spannung Null) abzustößen, daß diese Arbeit gleich dem

Produkt aus Anzahl der Coulombs und Anzahl der Volts

ist und dann in Kilogrammmetern (dividiert durch 9,81) ausgedrückt wird. Gerade so groß, wie die Arbeit ist, die die elektrischen Kräfte in diesem Fall leisten, gerade so groß ist umgekehrt die Arbeit, welche wir gegen diese Kräfte aufwenden müssen, um diese Anzahl von Coulombs auf diese Spannung zu bringen. Um also eine bestimmte Elektrizitätsmenge auf einen Leiter zu bringen, so daß er eine gewisse, bekannte Spannung erhält, müssen wir eine Arbeit aufwenden, welche gleich ist dem Produkt aus dieser Spannung und der zugeführten Elektrizitätsmenge. Haben wir nun diese Elektrizitätsmenge auf diesen Leiter gebracht, haben wir also die bestimmte Arbeit aufgewendet, so steckt diese Arbeit jetzt gewissermaßen aufgespeichert in dem Leiter. Der Leiter besitzt, wie man sagt, elektrische Energie, welche ihn dann eben befähigt, Kräfte auf andere Elektrizitätsmengen auszuüben und Arbeit zu leisten.

Es wird also die Energie, die ein elektrischer Leiter enthält; die Arbeit, welche er leisten kann, gemessen durch das Produkt aus seiner Spannung und seiner Elektrizitätsmenge.

Drücken wir, wie bisher, die Elektrizitätsmengen in Coulombs und die Spannung in Volts aus, so ist also die Energie, die ein Leiter enthält, die Arbeit, die er leisten kann, ausgedrückt in Volts \times Coulombs, wenn wir, wie es gewöhnlich geschieht, auch die Benennungen multiplizieren. Zum Beispiel ein Leiter, der die Spannung 10 000 Volt besitzt und die Elektrizitätsmenge 20 Mikrocoulomb enthält, besitzt eine Energie von 0,2 Volt-Coulomb, kann also eine ebenso große Arbeit leisten. Verbindet man z. B. diesen Leiter durch einen Draht mit der Erde, so kommt er auf die Spannung Null, er wird entladen, seine ganze Energie geht durch den Draht und erzeugt, wie wir gesehen haben, in diesem Wärme. Die erzeugte Wärmemenge entspricht also dabei gerade der Arbeit von 0,2 Volt-Coulomb.

Nun haben wir oben (S. 16) festgesetzt, daß

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = \frac{1}{9,81} \text{ Kilogrammmer}$$

ist. In unserem Beispiel enthält also der Leiter $\frac{0,2}{9,81} =$ etwa 0,0204 Kilogrammmer Energie, d. h. es war eine Arbeit von 0,0204 Kilogrammmetern nötig, um ihn zu laden, und dieselbe Arbeit kann der geladene Leiter auch wieder leisten.

Diese Beziehung zwischen den elektrischen Größen Volt und Coulomb und der mechanischen Arbeitseinheit Kilogrammmer ist deswegen wichtig, weil sie sofort erlaubt, die Energie eines Leiters in

gewöhnlichem Maß auszudrücken, wenn man nur seine Spannung in Volts und seine Elektrizitätsmenge in Coulombs gemessen hat.

Die gesamte einem Leiter zugeführte Elektrizitätsmenge befindet sich, wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, nach dem früher Gesagten auf der Oberfläche und zwar so verteilt, daß die Spannung überall auf dem Leiter dieselbe ist. Wenn das der Fall sein soll, so kann durchaus nicht auf jeder gleichgroßen Stelle der Oberfläche, z. B. auf jedem Quadratmillimeter, die gleiche Elektrizitätsmenge vorhanden sein. Vielmehr wird an den verschiedenen gleichgroßen Stellen der Oberfläche die Elektrizitätsmenge verschieden sein, je nach der Gestalt der Oberfläche. Man nennt die Menge der Elektrizität, welche auf der Einheit der Oberfläche, also etwa auf einem Quadratmillimeter vorhanden ist, die Dichtigkeit der Elektrizität an dieser Stelle. Man kann also sagen, auf einem beliebig geformten elektrisierten Leiter ist die Spannung zwar überall dieselbe, aber die Dichtigkeit der Elektrizität ist im allgemeinen von Punkt zu Punkt verschieden. Je kleiner die Fläche ist, auf der eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. 5 Mikrocoulomb, vorhanden ist, desto größer ist also die Dichtigkeit der Elektrizität an dieser Stelle.

Es läßt sich nun leicht einsehen, und auch durch das Experiment leicht beweisen, daß, wenn ein Leiter in eine Spitze ausläuft, daß dann an dieser Spitze die Dichtigkeit der Elektrizität eine außerordentlich große ist, eine ganz bedeutend größere als an jedem anderen Punkte des Leiters. Es kann die gesamte Elektrizitätsmenge auf dem Leiter eine sehr kleine sein, trotzdem ist die Dichtigkeit der Elektrizität auf einer leitenden Spitze eine sehr große, weil eben die Flächengröße einer Spitze außerordentlich klein ist. Diese Eigenschaft der Spitzen zieht nun eine Reihe von wichtigen Folgen nach sich. Je dichter nämlich die elektrischen Teilchen an der Oberfläche des Leiters beieinander liegen, desto stärker ist naturgemäß die Abstößung zwischen ihnen. Nach der oben von uns vorläufig acceptierten Vorstellung sind es die Teilchen des an den Leiter angrenzenden Isolators, welche elektrisiert sind und welche den Schein erwecken, als ob der Leiter selbst elektrisiert sei. Wenn nun die Abstößung zwischen diesen Teilchen groß genug wird, wie eben gerade an einer Spitze, so kann dieselbe den Widerstand des Isolators überwinden, und die Folge davon ist, daß die elektrischen Teilchen sich von der Spitze weg nach außen bewegen müssen, namentlich wenn der angrenzende Isolator die Luft ist.

An einer Spitze eines geladenen Leiters werden die elektrischen Teilchen des angrenzenden Isolators nach außen, von dem Leiter weg, getrieben.

Daraus folgt zunächst, daß an einer solchen Spitze eine wirkliche Luftströmung vorhanden sein muß. Und in der Tat fühlt man stets einen Luftstrom, der von einer geladenen Spitze ausgeht und den man als elektrischen Wind bezeichnet. Ferner aber folgt, daß die Ladung eines Leiters sich verringern muß, wenn man an ihn eine Spitze ansetzt. Auch dies ist der Fall, wie man leicht durch den Versuch beweisen kann. Man nehme einen isolierten Leiter, etwa den Zylinder mit abgerundeten Ecken B (Fig. 9) (an dem man sich die

Spitze noch fortdenken muß) und lade ihn durch eine Elektrisiermaschine. Befestigt man an eine oder mehrere Stellen des Zylinders Streifchen von Blattgold, so divergieren diese bei der Ladung und die Größe ihrer Divergenz läßt die Spannung des geladenen Zylinders erkennen. Sowie man nun an den geladenen isolierten Leiter eine Spitze ansetzt, so nimmt die Divergenz der Goldblättchen sofort ab und dies beweist,

Fig. 9.

B



daß seine Spannung geringer geworden ist, also auch seine Ladung, daß also von der Spitze die elektrischen Teilchen fortgeflogen sind.

Allgemein folgt ferner daraus, daß man einen mit einer Spitze versehenen Leiter nicht so stark laden kann, wie wenn die Spitze nicht vorhanden wäre. Aber man erkennt noch mehr daraus. Ein jeder Leiter kann nicht beliebig stark geladen werden. Denn wenn man die Ladung immer mehr vergrößert, so werden die Dichtigkeiten, also auch die Kräfte, die die Elektrizität nach außen treiben, immer größer, und endlich wird an der Stelle des Leiters, an der die Dichtigkeit den größten Wert hat, diese Kraft so groß, daß sie den Widerstand der Luft oder eines anderen Isolators überwindet. Dann strömt alle neu zugeführte Elektrizität von dem Leiter fort. Der Leiter läßt sich also nur bis zu einer gewissen Grenze laden, und diese Grenze hängt ab von der Gestalt des Leiters und von der Natur des umgebenden Isolators. Je geringer die Isolationsfähigkeit des umgebenden Mediums ist, umso geringer ist die Elektrizitätsmenge, die man dem Leiter zuführen kann.

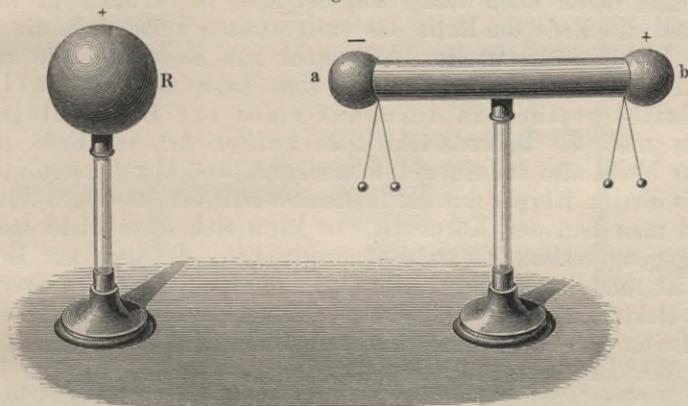
Unsere bisherigen Betrachtungen sind aber nun durch eine neue Tatsache von weitreichendster Bedeutung zu vervollständigen, durch eine Eigenschaft der Elektrizität, die man aus dem Bisherigen nicht vermuten konnte.

Wenn man ein Goldblattelektroskop aufstellt und eine geriebene Glasstange in die Nähe des Knopfes desselben bringt, so fangen die Goldblättchen schon an zu divergieren, ehe noch der Glasstab den Knopf berührt hat. Hält man den Glasstab in einiger Entfernung von dem Knopf des Elektroskops, so gehen die Goldblättchen auseinander und bleiben so lange divergent, als der Stab in der Nähe gehalten wird. Sowie man den Glasstab fortnimmt, fallen die Goldblättchen wieder zusammen. Die Elektrizität auf dem Glasstab hat also, wie man daraus sieht, die Eigenschaft, durch ihre bloße Nähe auf leitenden Körpern den elektrischen Zustand hervorzurufen, oder mit anderen Worten, man kann einen leitenden Körper elektrisch machen, wenn man nur einen elektrischen Körper in seine Nähe bringt. Man bezeichnet diese Wirkung mit dem Namen Influenz. Man sagt, der elektrisierte Körper influenziere auf dem in der Nähe befindlichen Leiter Elektrizität, er erzeuge Influenzelektrizität.

Zwei Unterschiede kann man aber sofort zwischen dem Verhalten eines influenzierten Leiters und eines durch Reibung oder Berührung elektrisierten erkennen. Erstens: Die Influenzelektrizität bleibt auf einem isolierten Leiter nur so lange, als der influenzierende Körper in der Nähe ist. Wird dieser fortgenommen oder wird ihm seine Elektrizität

auf irgend eine Weise entzogen, so verschwindet auch sofort die Influenz-
elektrizität auf den influenzierten Leiter. Der zweite Unterschied ist
folgender: Untersucht man einen influenzierten Leiter daraufhin, von
welcher Art die Elektrizität ist, die auf ihm durch Influenz entwickelt ist,
so findet man, daß er nicht eine Art Elektrizität enthält, sondern daß
auf seiner Oberfläche beide Arten Elektrizität getrennt vorhanden sind,
die positive und die negative. Ein Teil der Oberfläche ist positiv,
der andere negativ elektrisch, und zwar haben diejenigen Teile der
Oberfläche, welche am nächsten an dem influenzierenden Körper sich
befinden, immer die entgegengesetzte Art der Elektrizität wie dieser,
während die entfernteren Teile dieselbe Art der Elektrizität enthalten.
Es sei z. B. (in Fig. 10) R eine positiv elektrische Glaskugel. Bringt
man in ihre Nähe den isolierten Leiter a b, so entsteht auf diesem
Influenzelektrizität, und zwar wird der links liegende Teil a negativ,
während der rechts liegende Teil b positiv elektrisch wird. Wenn

Fig. 10.



die Kugel R negativ elektrisch wäre, so würde auch die Verteilung
der Elektrizität auf a b die umgekehrte sein. Man bezeichnet die
Elektrizität auf a, also auf den dem Körper R am nächsten liegenden
Teilen, als Influenzelektrizität erster Art, die auf b als
Influenzelektrizität zweiter Art. Je mehr man von a aus
nach der Mitte geht, desto mehr nimmt die Dichtigkeit der negativen
Elektrizität ab, je mehr man von b nach der Mitte geht, desto mehr
nimmt die Dichtigkeit der positiven Elektrizität ab. Die Mitte selbst
ist unelektrisch. Es sieht so aus, als ob durch die Annäherung des
Körpers R in dem Leiter a b beide Elektrizitäten sich entwickelt hätten
und die ungleichnamige Elektrizität von R nach a hin angezogen, die
gleichnamige nach b hin abgestoßen worden wäre. Diese Vorstellung
ist zwar sehr bequem, doch entspricht sie nicht dem wirklichen Vor-
gang, schon deswegen nicht, weil der Leiter vermutlich selbst gar nicht
elektrisiert ist, sondern es nur zu sein scheint.

Wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, so muß auch hier, wie
stets, die Spannung auf dem ganzen Leiter a b überall dieselbe sein.

Die Spannung rührt aber her teils von den Kräften, die von R ausgehen, teils von den Kräften der elektrischen Teilchen auf a b selbst.

Die beiden Arten von Influenzelektrizität auf einem isolierten Leiter verhalten sich nun durchaus verschieden. Es läßt sich nämlich die Influenzelektrizität zweiter Art (die gleichnamige) zur Erde ableiten, dagegen diejenige erster Art durchaus nicht.

Legt man an das Ende b des Zylinders a b einen leitenden Draht an, der mit der Erde in Verbindung ist, so hat jetzt der ganze Zylinder die Spannung Null. Durch die Influenz des positiven Körpers R wird nun wieder die ungleichnamige negative Elektrizität scheinbar nach a hingezogen, die positive nach b und dem Draht abgestoßen. Die positive Elektrizität fließt also zur Erde ab. Hebt man nun die Verbindung mit der Erde auf, isoliert man also den Leiter wieder, so bleibt auf a b nur negative Elektrizität übrig. Man kann also die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde ableiten.

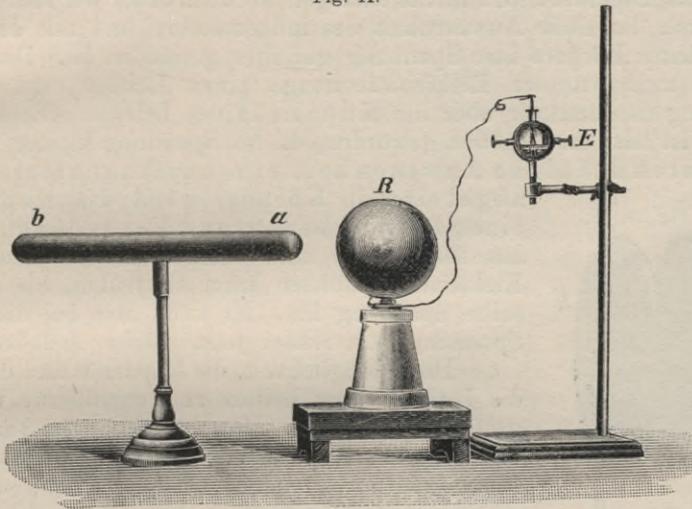
Legt man den Draht dagegen an das Ende a des Zylinders an, so ist unser Leiter auch wieder mit der Erde in Verbindung, und auch hier spielt die Erde die Rolle des entferntesten Teils, d. h. die gleichnamige Elektrizität (zweiter Art) geht zur Erde und die negative Elektrizität bleibt auf dem Leiter. Man kann also die Influenzelektrizität erster Art durchaus nicht zur Erde ableiten.

Da man die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde ableiten kann, so bleibt also auf einem influenzierten, erst abgeleiteten und dann wieder isolierten Körper nur die Influenzelektrizität der ersten Art übrig. Entfernt man nun den Körper R, so kann sich diese nicht mehr mit der entgegengesetzten Elektrizität ausgleichen, da diese zur Erde abgeleitet ist, und der Körper bleibt also nun elektrisch (in unserem Falle negativ elektrisch). Wir haben also auf diese Weise ein Mittel erlangt, einem Leiter durch Influenz bleibend Elektrizität einer Art mitzuteilen. Wir berühren ihn mit dem Finger, während wir ihn influenzieren. Dadurch wird die Elektrizität zweiter Art (die gleichnamige) zur Erde abgeleitet. Nehmen wir dann den Finger weg, so bleibt die ungleichnamige Elektrizität auf dem Leiter und sie bleibt auch auf ihm nach der Entfernung des influenzierenden Körpers.

Wir müssen aber die Verhältnisse noch etwas eingehender untersuchen, die sich bei der Influenzwirkung ergeben. Wir hatten bisher angenommen, daß der influenzierende Körper R ein elektrischer Isolator ist, eine Glaskugel z. B., auf welcher die Elektrizität sich nicht verschieben kann. Nimmt man aber als influenzierenden Körper einen geladenen Leiter, der natürlich isoliert sein muß, also z. B. eine elektrisierte Metallkugel, so ist der Vorgang, der nun stattfinden wird, ein etwas verwickelterer, aber auch noch leicht zu übersehen. Die geladene Metallkugel R influenziert auf dem Zylinder a b (Fig. 10) Elektrizität, sie zieht scheinbar die ungleichnamige nach a, stößt die gleichnamige nach b. Aber auch auf der Metallkugel R muß die Elektrizität verschoben werden, muß sie sich anders verteilen. Die von a b ausgehenden Kräfte wirken ja auf die Elektrizität an der Oberfläche von R ein und verschieben sie, und es muß schließlich sowohl auf R als auf a b eine solche Anordnung der Elektrizität eintreten,

daß an jedem Punkt sich alle Kräfte das Gleichgewicht halten. Erst dann ist das Gleichgewicht der Elektrizität eingetreten. Es wird dadurch auch an den einzelnen Teilen der Oberfläche von R die Dichtigkeit nicht mehr dieselbe sein wie früher, sondern eine andere. Durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers wird also die Dichtigkeit der Elektrizität an jedem Punkte des influenzierenden Leiters geändert. Wir können aber auch sofort noch einen viel wichtigeren Schluß ziehen. Wir können nämlich schließen, daß durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers, und namentlich wenn dieser zur Erde abgeleitet ist, die Spannung von R weit kleiner werden muß, als sie ursprünglich war. Denn die Spannung von R (in Volts) ist ja gleich der Arbeit, welche nötig ist, um ein Coulomb (eine positive Elektrizitätseinheit) auf die Kugel R (diese

Fig. 11.



sei positiv elektrisch) zu bringen, von einer Stelle aus, wo die Spannung Null ist, und zwar entgegen den abstoßenden Kräften, die von R ausgehen. Hier in unserem Fall ist aber in der Nähe von R der influenzierte Körper, der zur Erde abgeleitet ist und daher negative Elektrizität enthält. Die Kräfte, die diese negative Elektrizität auf unser Coulomb ausübt, sind aber anziehende, sie ziehen das Coulomb von selbst heran und die Arbeit, die wir aufwenden müssen, um die Kräfte von R zu überwinden, ist also geringer, ein Teil der ganzen Arbeit wird von dem influenzierten Körper übernommen. Es ist also eine viel geringere Arbeit nötig, um 1 Coulomb auf den Körper R zu bringen, d. h. die Spannung der Kugel R ist unter sonst gleichen Umständen kleiner, wenn der influenzierte und abgeleitete Körper in der Nähe ist.

Also: wenn einem geladenen Leiter ein anderer Leiter in die Nähe gebracht wird, der zur Erde abgeleitet ist, so verringert sich die Spannung des ersten bedeutend.

Wir können uns davon leicht durch das Experiment überzeugen. Wir verbinden unsere Kugel R (Fig. 11), die der guten Isolation halber auf einen Paraffinklotz gelegt ist, mit einem Exnerschen Elektroskop E und laden die Kugel etwa durch eine Elektrisiermaschine. Das Elektroskop zeigt uns die vorhandene Spannung, sagen wir 1500 Volt, an. Ohne etwas zu ändern, stellen wir nun bloß den Leiter a b, zunächst isoliert, in die Nähe der Kugel. Unser Elektroskop zeigt sofort, daß jetzt bloß noch eine Spannung von 1300 Volt auf der Kugel R herrscht. Und nun verbinden wir unseren Leiter a b dadurch, daß wir den Finger anlegen, mit der Erde. Sofort gehen die Goldblättchen des Elektroskops zurück und bleiben auf etwa 600 Volt stehen, ein Beweis, wie erheblich die Spannung unserer Kugel durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers gesunken ist.

Unsere Kugel R hat dieselbe Elektrizitätsmenge behalten, es ist ihr nichts zugeführt und nichts entzogen worden. Aber wir sehen jetzt, daß durch die bloße Anwesenheit des influenzierten und mit der Erde verbundenen Körpers ihre Spannung geringer geworden ist. Das Verhältnis zwischen der Elektrizitätsmenge eines Leiters und seiner Spannung nannten wir aber die Kapazität des Leiters. Dieses Verhältnis ist also nun größer geworden, da die Spannung kleiner wurde, d. h. durch die bloße Anwesenheit eines influenzierten und

abgeleiteten Körpers wird die Kapazität eines Leiters bedeutend vergrößert. Daraus folgt, daß man unserem Leiter jetzt mehr Elektrizität zuführen kann als früher, bis er dieselbe Spannung hat. Er kann also bei derselben Spannung wie früher jetzt stärker geladen sein.

Diese Möglichkeit, die Kapazität und dadurch die Ladung eines Leiters zu vergrößern, ist von großer Wichtigkeit. Man hat schon im 18. Jahrhundert einen Apparat konstruiert, den Ansammlungsapparat oder Kondensator, welcher in einer einfachen Form in Fig. 12 abgebildet ist. Er besteht aus zwei isolierten Metallplatten A und B, die einander gerade gegenübergestellt werden können. Die Platte B kann durch ein drehbares Gelenk nach unten

zurückgeschlagen werden. Steht die Platte B nicht der Platte A gegenüber und verbindet man die Platte A mit dem Konduktor einer

Elektrisiermaschine, so wird A so lange geladen, bis seine Spannung gleich der des Konduktors der Maschine ist. Weiter läßt sich die Ladung nicht treiben. Stellt man aber der Platte A jetzt die zur Erde abgeleitete Platte B gegenüber, so haben wir gesehen, daß dadurch die Spannung von A erheblich kleiner wird, als sie war. Infolgedessen geht jetzt von der Elektrisiermaschine wieder neue Elektrizität auf A über, bis die Spannung von A wieder gleich der der Elektrizitätsquelle

Fig. 12.



geworden ist. Es hat also A viel mehr Elektrizität aufgenommen, als es ohne die Anwesenheit von B hätte aufnehmen können.

Man nennt die Platte A die Kollektorplatte, die Platte B die Kondensatorplatte. Die Kollektorplatte hat also eine viel größere Kapazität, sie kann eine größere Elektrizitätsmenge aufnehmen, wenn die zur Erde abgeleitete Kondensatorplatte ihr gegenübersteht, als wenn sie allein steht. Man bezeichnet die Kapazität der Kollektorplatte, wenn die Kondensatorplatte ihr gegenübersteht und zur Erde abgeleitet ist, kurz als die Kapazität des Kondensators. Die Kapazität eines Kondensators ist also das Verhältnis zwischen der Elektrizitätsmenge, die auf der Kollektorplatte liegt, zu der Spannung derselben, falls die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ist.

Die Kapazität eines Kondensators hängt von verschiedenen Umständen ab. Sie hängt ab von der Form und Größe der leitenden Körper, also in unserem Falle der Platten; sie hängt wesentlich davon ab, in welcher Entfernung die beiden Platten einander gegenüberstehen. Die Kapazität ist umso größer, je geringer diese Entfernung ist. Endlich hängt, wie Faraday gezeigt hat, die Kapazität auch wesentlich davon ab, welches das isolierende Medium zwischen den beiden Platten ist. Wir haben stillschweigend angenommen, daß zwischen den beiden Platten sich Luft befindet. Ist aber das isolierende Medium nicht Luft, sondern ein anderer Isolator, Glas, Kautschuk, Schwefel u. s. f., so ist die Kapazität eine andere und zwar immer eine größere. Die Isolatoren spielen, und das ist von besonderer Wichtigkeit, eine wesentliche Rolle bei der elektrischen Influenz. Man bezeichnet deshalb einen Isolator auch als Dielektrikum. Diese beiden Bezeichnungen bedeuten dasselbe. Das eine Mal hebt man nur die Fähigkeit zu isolieren hervor, das andere Mal die Fähigkeit, auf die elektrische Verteilung einen Einfluß zu üben. Die festen Isolatoren, Glas, Kautschuk, Schellack u. s. w., machen, als Zwischenschicht in einem Kondensator gebraucht, unter sonst gleichen Umständen die Kapazität desselben größer, als wenn Luft dazwischen ist. Außerdem haben sie noch einen weiteren Vorteil. An den beiden einander gegenüberstehenden Seiten eines Ansammlungsapparates befinden sich ja Elektrizitäten von entgegengesetzter Art und zwar in großer Dichte. Je dichter nun die Elektrizität an einer Stelle ist, desto größer ist, wie wir wissen, die Kraft, welche sie nach außen treibt. Die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten auf den beiden Platten können daher den Widerstand der Luft überwinden und sich in Form eines elektrischen Funkens ausgleichen. Die Anhäufung der Elektrizität wird dadurch illusorisch gemacht. Ist aber das Dielektrikum ein fester Körper, wie Glas, so ist der Widerstand, der dem Ausgleich der Elektrizitäten entgegengesetzt wird, ein viel größerer; diese können sich im allgemeinen nicht gewaltsam ausgleichen, sondern bleiben auf den beiden Leiterflächen. Will man deshalb einen Ansammlungsapparat stark laden, so muß man als isolierende Zwischenschicht, als Dielektrikum, einen festen Körper, Paraffin, Papier, Glimmer oder Glas, nehmen.

Wenn man einen und denselben Kondensator nimmt (d. h. dieselben Metallflächen in demselben Abstand läßt) und den Zwischenraum

einmal mit Luft, das zweite Mal mit einem anderen Dielektrikum, z. B. Glimmer oder Glas oder Schwefel, ausfüllt, so ist die Kapazität des Kondensators das zweite Mal größer als das erste Mal. Ist sie dann z. B. 8- oder 6- oder 3,9mal so groß wie das erste Mal, so sagt man, das betreffende Dielektrikum besitzt die Dielektrizitätskonstante 8 oder 6 oder 3,9. Man versteht also unter der Dielektrizitätskonstante eines Dielektrikums das Verhältnis der Kapazität eines Kondensators, wenn er das betreffende Dielektrikum als Zwischenschicht enthält, zu der Kapazität desselben Kondensators, wenn er Luft als Zwischenschicht enthält. So hat man experimentell folgende Dielektrizitätskonstanten gefunden:

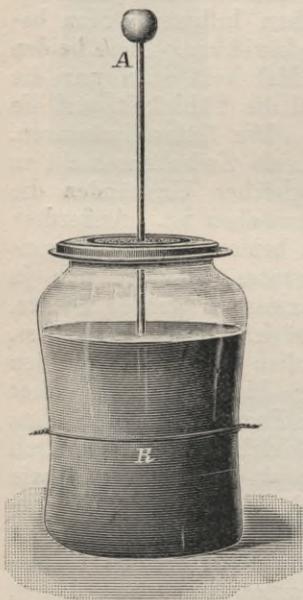
Dielektrizitätskonstanten.

Paraffin	2,3	Glimmer	8,0
Kautschuk	2,9	Glas (je nach der Sorte).	6—10
Ebonit	2,6	Öle (" " " ")	2—5
Schwefel	3,9	Gase	1

Auf die hervorragende theoretische Wichtigkeit dieser dielektrischen Eigenschaften der Isolatoren kommen wir bald zurück.

Die zweckmäßigste und am meisten benutzte Form für einen Ansammlungsapparat ist die der Leydener Flasche, deren Prinzip

Fig. 13.



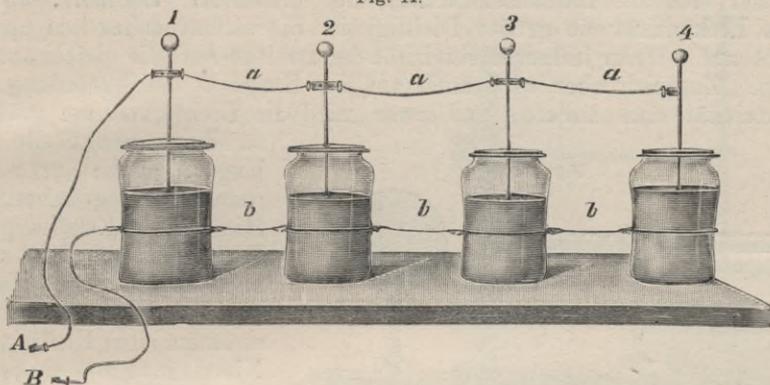
nach dem Gesagten sofort zu übersehen ist. Sie besteht (Fig. 13) aus einer Flasche aus Glas in Form der gewöhnlichen Einlegegläser. Dieses Glas ist außen und innen bis zu etwa $\frac{2}{3}$ seiner Höhe mit Stanniolpapier, einem leitenden Körper, beklebt. Diese beiden Stanniolpapierplatten, die man die Belegungen der Flasche nennt, vertreten die Stellen unserer Platten A und B in Fig. 12. Das Glas ist das Dielektrikum. Man braucht nun bloß die eine Belegung als Kollektorplatte mit einer Elektrisiermaschine, die andere mit der Erde in leitende Verbindung zu setzen, um auf der Kollektorplatte sehr viel Elektrizität anzuhäufen, sie sehr stark zu laden, viel stärker, als es möglich wäre, wenn diese Platte allein stände.

Um diese Verbindung herzustellen, trägt die Glasflasche einen Holzdeckel, durch welchen ein Metallstab mit einem Knopf gesteckt ist. Der Metallstab berührt die innere Belegung. An der äußeren Belegung dient ein herumgelegter Draht mit Öse zur Verbindung. Nun braucht man bloß den Knopf dieses Stabes mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in leitende Verbindung zu setzen, etwa, indem man eine Drahtschnur mit angelöteten

Metallklammern an beiden befestigt, und braucht ebenso bloß die äußere Belegung mit der Erde in Verbindung zu bringen, dann kann man die Flasche durch Drehen der Elektrisiermaschine sehr stark laden. Hat man den Knopf der Flasche mit dem positiven Konduktor der Elektrisiermaschine in Verbindung gesetzt, so wird die innere Belegung positiv elektrisch, die äußere negativ elektrisch, da die Influenzelektrizität der zweiten Art zur Erde abgeleitet wird. Ist der Knopf mit dem negativen Konduktor in Verbindung, so sind die Ladungen der beiden Belegungen die entgegengesetzten.

Die Elektrizitätsmenge, die eine Flasche aufnehmen kann, ist umso größer, je größer ihre Kapazität ist, und die Kapazität einer Flasche

Fig. 14.



ist eine umso größere, je größer ihre Belegungen und je geringer die Entfernung der Stanniolplatten ist, also je dünner das Glas der Flasche ist.

Um also sehr viel Elektrizität anzusammeln, muß man das Glas sehr dünn — wobei man aber praktisch bald zu einer Grenze kommt — und die Belegungen sehr groß machen. Das letztere kann man aber einfacher erreichen, wenn man nicht eine, sondern mehrere Flaschen nimmt. Wenn man eine Reihe von Leydener Flaschen nimmt und alle inneren Belegungen miteinander verbindet, während man alle äußeren zur Erde ableitet, so entspricht dieses System einer einzigen Flasche mit sehr großen Belegungen. Alle inneren Stanniolplatten bilden zusammen eine große Stanniolplatte, ebenso alle äußeren. Man kann also, was eigentlich selbstverständlich ist, in einer Batterie von 4 Leydener Flaschen, deren innere Belegungen alle leitend verbunden sind, 4mal so viel Elektrizität anhäufen als in einer einzigen. Eine solche Batterie von 4 Flaschen zeigt Fig. 14. Die äußeren Belegungen sind durch Metallschnüre *b b*, die inneren durch Metallschnüre *a a* je miteinander verbunden. Die Drahtschnur *A* wird zur Elektrisiermaschine geführt, die Drahtschnur *B* zur Erde, indem man sie etwa mit einem Gasrohr oder Wasserleitungsrohr des Hauses verbindet.

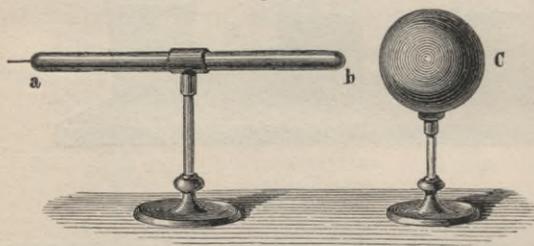
Die oben (S. 19) beschriebene Büchse, welche $\frac{1}{3}$ Mikrofarad enthielt, ist auch nichts anderes als ein Kondensator. Die beiden Stanniol-

flächen sind die Belegungen, das mit Paraffin getränkte Papier ist die dielektrische (isolierende) Zwischenschicht.

Zum Verständnis einiger Vorrichtungen, die im folgenden besprochen werden sollen, müssen wir nun die Wirkung einer Spitze an einem influenzierten Leiter untersuchen. Enthält ein influenzierter Leiter a b (Fig. 15) eine Spitze an der Stelle a, welche von dem influenzierenden Körper C abgewendet ist, so wird auf der Spitze die Influenz Elektrizität zweiter Art erregt und da die Dichtigkeit auf einer Spitze, wie oben (S. 21) ausgeführt, außerordentlich groß ist, strömen die elektrischen Teilchen dort von der Spitze fort. Der Leiter a b behält also die Influenz Elektrizität der ersten Art.

Ebenso hat, wenn die Spitze an der Stelle b angebracht ist, an welcher sich die Influenz Elektrizität der ersten Art sammelt, an ihr diese Elektrizität die größte Dichtigkeit. Sie strömt daher aus und es bleibt auf a b nur Influenz Elektrizität der zweiten Art (die gleichnamige) übrig. Zugleich aber wird auch auf der Kugel C die Verteilung der Elektrizität eine andere, und zwar wird die Dichtigkeit am größten

Fig. 15.



an derjenigen Stelle der Kugel, welche der Spitze gerade gegenüberliegt. Diese starke Erhöhung der Dichtigkeit bewirkt aber auch an der Kugel, ebenso wie an der Spitze, ein Ausströmen der Elektrizität. Nimmt man nun die Spitze aus der Nähe von C fort, so enthält C weniger Elektrizität als früher, während

a b gleichnamig geladen ist. Es sieht also so aus, als ob die Spitze aus dem Leiter C Elektrizität herausgesaugt hätte. Man bezeichnet diese Wirkung der Spitzen auch als Saugwirkung, wobei aber natürlich an ein Saugen gar nicht zu denken ist. Diese Wirkung der Spitzen wurde bei der Reibungselektrismaschine, die wir oben (S. 11) beschrieben haben, benutzt. Dort war der Konduktor der Maschine mit einem Ring verbunden, an welchem Spitzen der rotierenden Glasscheibe gegenüberstanden. Durch diese Spitzen wird der Konduktor mit der Influenz Elektrizität zweiter Art geladen, also mit Elektrizität derselben Art, welche auf der Glasscheibe durch Reiben entwickelt wird, mit positiver.

Die angeführten Tatsachen über die Influenz lassen sich am leichtesten durch die Vorstellung zusammenfassen, daß jedes kleinste Teilchen eines Dielektrikums, jedes Molekül desselben, stets eine gewisse positive und negative Ladung, aber getrennt, besitze. Man kann sich etwa vorstellen, daß jedes Molekül, welches ja mindestens aus zwei Bestandteilen, Atomen oder Atomkomplexen, zusammengesetzt ist, an dem einen dieser beiden Atome eine gewisse Äthermenge in verdichtetem, an dem anderen in verdünntem Zustande besitzt. Jedes Molekül wäre danach ein polarer Körper, indem es zwei, sich entgegengesetzt verhaltende

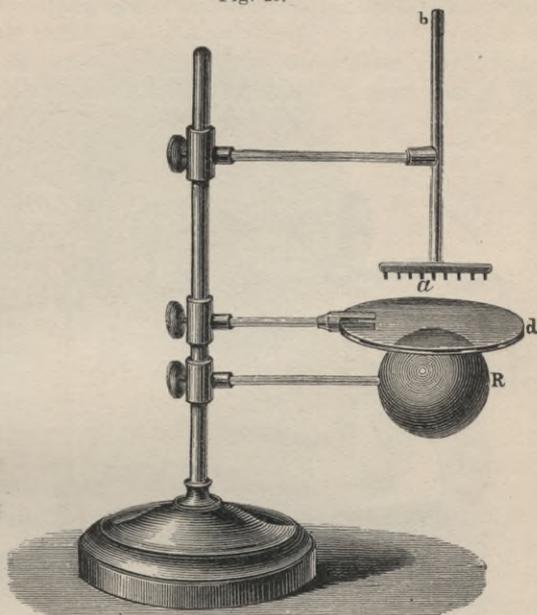
Ladungen, Pole, besitzt. Diese Ladungen sind infolge der Kräfte der körperlichen Materie in einem gewissen Abstand, der sich durch geeignete Einwirkungen auch vergrößern oder verringern läßt. Die Verbindungslinie der beiden Pole können wir als die dielektrische Achse des Moleküls bezeichnen. Die Ladung eines Leiters mit positiver Elektrizität würde dann dadurch hervorgebracht sein, daß die positiven Atome der Moleküle des umgebenden Dielektrikums mehr zu dem Leiter hingedreht werden als im normalen Zustand, wo sie alle wirtt durcheinander liegen. Zugleich würden dann die negativen Atome sich alle mehr nach der anderen Seite richten, und wenn dem geladenen Leiter ein anderer Leiter gegenübersteht, so wird dieser in der Nähe die ungleichnamigen, entfernt die gleichnamigen Atome an seiner Oberfläche haben müssen, was ja die Grunderscheinung der Influenz ist, auf der alle anderen beruhen.

Ebenso wie man eine Maschine konstruieren konnte, welche durch Reibung große Mengen Elektrizität entwickeln konnte, ebenso lag der Gedanke nahe, eine Maschine zu konstruieren, die durch Influenz Elektrizität in großen Mengen erzeugt oder, wie wir besser sagen, positive und negative Ladungen in großen Mengen trennt. Denn die Ladungen sind nach der ausgesprochenen Ansicht schon vorhanden,

der Vorgang der Elektrisierung besteht nur in einer Drehung, in einer Richtung der dielektrischen Achsen. Solche Maschinen, Influenzmaschinen, wurden von Holtz und von Töpler in äußerst sinnreicher, aber verschiedener Weise konstruiert. Die Wirkungsweise dieser Maschinen ist zum Teil recht kompliziert, sie beruht darauf, daß die durch Influenz geschiedenen Elektrizitätsmengen die ursprünglich mitgeteilten noch verstärken. Ursache und Wirkung verstärken sich bei diesen Maschinen fortwährend und so kommen sie zu einer sehr großen Wirksamkeit.

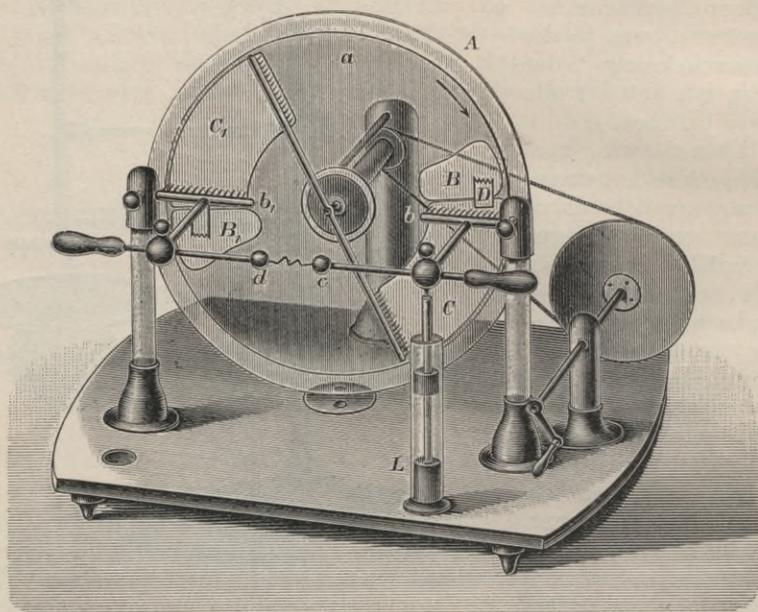
Um das Spiel der Maschinen zu verstehen, müssen wir untersuchen, welche Vorgänge stattfinden, wenn ein geladener Körper R (Fig. 16) zugleich auf einen Isolator, eine Glasscheibe, d, und auf einen hinter dieser stehenden Leiter a b, der mit Spitzen versehen ist, wirkt. Es wird sich zeigen, daß der Isolator dadurch auf beiden Seiten mit der-

Fig. 16.



selben Elektrizität, und zwar mit ungleichnamiger, geladen wird. Es enthalte der Leiter R positive Elektrizität. Dann wird auf der Scheibe d die untere Seite negative Elektrizität durch Influenz bekommen, die obere Seite wird zuerst positive Elektrizität enthalten. Zugleich wird auch durch den Isolator hindurch der Leiter a b influenziert und auf den Spitzen a erscheinen negativ elektrische Teilchen in sehr großer Dichte. Diese strömen nun von den Spitzen weg auf die obere Seite der Scheibe d und gleichen sich mit der positiven Elektrizität in d aus. Da aber innerhalb des Isolators die elektrischen Moleküle sich schwerer verschieben, drehen können, wie die an dem Leiter anliegenden, so überwiegt die negative Elektrizität aus den Spitzen und es wird

Fig. 17.



dadurch auch die obere Seite der Glasscheibe mit negativer Elektrizität geladen.

In der Tat enthalten also beide Seiten der Scheibe dieselbe Art der Elektrizität und zwar die entgegengesetzte wie der influenzierende Körper.

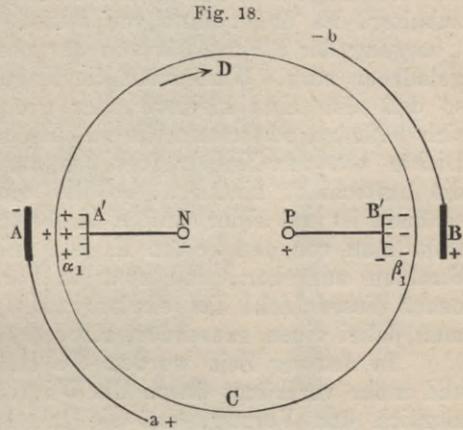
Dies wird bei der Influenzmaschine von Holtz benutzt, welche in Fig. 17 abgebildet ist. Die Maschine enthält zwei gefirnifste Glasscheiben, eine feste, A, und eine drehbare, a, welche nahe beieinander aufgestellt sind. Aus der festen Scheibe (in der Figur ist es die hintere, größere) sind an zwei einander gegenüberliegenden Stellen, B und B₁, Ausschnitte gemacht. An diese Ausschnitte anschließend, sind auf der Hinterseite der festen Scheibe Papiere geklebt, C und C₁, in Form von Sektoren mit etwa 60° Centriwinkel. Diese nennt man

die Belegungen. Auf die Vorderseite der festen Scheibe sind auch Papierstreifen, D, geklebt, die mit den Belegungen der Hinterseite in Verbindung sind. Zugleich laufen diese Belegungen der Vorderseite in mehrere mit Stanniol überzogene stumpfe Spitzen aus, welche etwas nach vorn, der drehbaren Scheibe zu, gebogen sind. Diese Spitzen befinden sich ungefähr in der Mitte der Ausschnitte und stehen der Hinterseite der beweglichen Scheibe gegenüber. Die bewegliche Scheibe a hat keine Ausschnitte und keine Belegungen. Der Vorderseite der beweglichen Scheibe stehen zwei mit Spitzen versehene Leiterkämme, b und b_1 , gegenüber, welche, voneinander und vom Boden isoliert, je in eine Kugel auslaufen. Durch diese Kugeln hindurch ist je eine bewegliche Metallstange gesteckt, die ebenfalls in kleine Kugeln, c und d, auslaufen. Die verschiebbaren Stangen werden zuerst zusammengeschoben, so daß ihre Endkugeln sich berühren.

Um die Maschine in Gang zu setzen, wird nun dem einen hintersten Papierbeleg etwas Elektrizität mitgeteilt, indem man ihn z. B.

mit einem geriebenen Ebonitstab berührt. Dann entwickeln sich die Elektrizitäten so, wie es am besten aus der Fig. 18 erkannt werden kann. In dieser denken wir uns die bewegliche Scheibe als Zylinder, dessen Durchschnitt der Kreis CD sei. Außerhalb dieses Zylinders seien die Papierbelege A und B mit ihren Stanniolspitzen a und b. Innen stehen diesem Zylinder die Metallkämme A' und B' mit ihren Kugeln N und P gegenüber, die wir erst zusammengeschoben annehmen wollen. Macht man den Papierbeleg A durch Berührung mit einem geriebenen Ebonitstab negativ,

so wird die bewegliche Scheibe, wie wir wissen, auf beiden Seiten positiv elektrisch. Zugleich geht die negative Elektrizität von A' über N und P nach B'. Von B' strömt sie auf die eine Seite der beweglichen Glasscheibe; zugleich wird aber auch die gegenüberliegende Papierspitze influenziert, und zwar so, daß auch von dieser negative Elektrizität auf die Glasscheibe strömt. Es ist also an dem ersten Papierbeleg A die bewegliche Scheibe auf beiden Seiten positiv, an dem anderen B negativ elektrisch. Nun wird die Scheibe gedreht. Dann wiederholt sich bei der ersten halben Umdrehung derselbe Vorgang an allen Stellen der Glasscheibe, so daß auf ihr eine positiv elektrische und eine negativ elektrische Hälfte entsteht. Sowie aber die positiv elektrische Hälfte an die andere Spitze b kommt, findet folgendes statt. Die Papierspitze sowohl wie die Metallspitzen saugen die positive Elektrizität aus der Glasscheibe ein. Es fließt dann also die positive Elektrizität von B' durch P und N zu A' und



zugleich die negative von A' durch N, P zu B'. Diese entgegengesetzt fließenden entgegengesetzten Elektrizitäten verstärken sich also bei jeder Umdrehung. Bleiben die Kugeln N und P in Berührung, so gleichen sich diese entgegengesetzten Elektrizitäten ohne weiteres aus. Werden sie aber voneinander getrennt, so sammelt sich auf der einen positive, auf der anderen negative Elektrizität an und es gehen, wie wir sehen werden, Funken zwischen ihnen über. In der Figur 17 ist zugleich eine Leydener Flasche L gezeichnet, deren innere Belegung mit der einen Kugel in Verbindung ist. Man kann diese Flaschen anbringen, um die Menge der Elektrizität auf den Kugeln bei gleicher Spannung zu vergrößern.

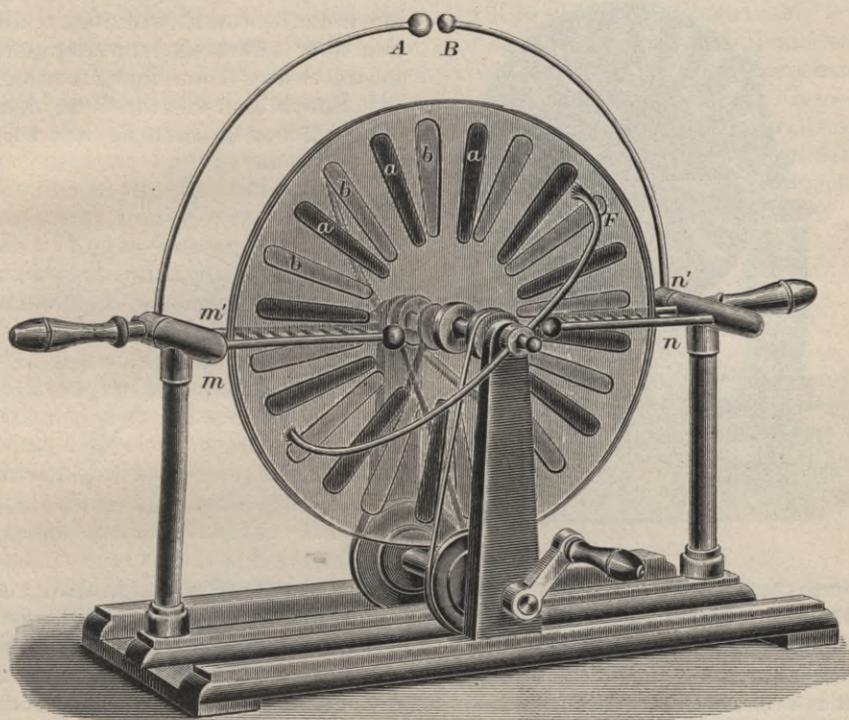
Die beiden Kugeln der Influenzmaschine mußten zuerst, wenn die Maschine in Tätigkeit versetzt wurde, aneinander geschoben werden, damit die Elektrizität überhaupt zwischen ihnen übergehen kann. Ist die Maschine aber einmal in Tätigkeit gebracht, dann wird bald die Elektrizitätsmenge und infolgedessen die Dichtigkeit der Elektrizität auf den Kugeln so groß, daß es nicht mehr nötig ist, sie zusammenzuhalten. Es findet dann von selbst, durch die Luft, ein fortwährender Übergang der Elektrizität von der positiv geladenen Kugel zur negativ geladenen statt. Wenn man die Kugeln nämlich voneinander entfernt, so daß also eine kleinere oder größere Luftschicht zwischen ihnen sich befindet, so strömen die elektrischen Teilchen vermöge ihrer großen Dichte von den Kugeln fort und transportieren ihre Ladungen durch die Luftschicht hindurch, so daß sie sich ausgleichen. Dieses Ausströmen ist mit einer sanften Lichterscheinung verbunden. Im Dunkeln sieht man von den beiden Kugeln mildeleuchtende blaue oder violette Strahlen ausgehen, und zwar in Form eines Strahlenbüschels. Man nennt dieses Licht das elektrische Büschellicht. Zugleich hört man dabei einen sausenden, zischenden Ton.

In neuerer Zeit werden die Holtzschen Influenzmaschinen mehr und mehr verdrängt durch die Wimshurstmaschinen. Diese haben nämlich den Vorzug, daß sie keine Erregung von außen brauchen, sondern von selbst angehen, sobald man sie dreht. Es sind selbst-erregende Maschinen. Außerdem sind sie auch viel einfacher und von der Feuchtigkeit der Luft nicht so abhängig wie die Holtzschen Maschinen, die, wenn sie feucht sind, oft gar nicht erregt werden können. Die Ansicht einer Wimshurstmaschine ist in Fig. 19 gegeben.

Die Maschine enthält zwei Scheiben aus Glas oder Ebonit, welche 5 mm Abstand voneinander haben. Beide Scheiben werden zugleich gedreht und zwar im entgegengesetzten Sinne, die vordere z. B. wie der Uhrzeiger, die hintere entgegengesetzt. Dies wird einfach dadurch bewirkt, daß die Schnur von der Kurbelachse auf die Achse der vorderen Scheibe direkt, auf die Achse der hinteren gekreuzt gelegt ist. Auf jede Scheibe sind eine Anzahl Metallsektoren von der Form wie in der Figur aufgeklebt. Mit a, a sind die Metallsektoren vorn auf der vorderen Scheibe, mit b, b die hinten auf der hinteren Scheibe bezeichnet. Die beiden Scheiben laufen rechts und links innerhalb je einer Metallgabel mm' und nn', welche den Scheiben gegenüber mit Spitzen versehen sind. Von diesen Gabeln gehen noch Messingstangen

aus, welche in den Polkugeln A und B endigen. (Die Polkugeln A und B sind in der Figur nur der Deutlichkeit halber nach oben gelegt, in Wirklichkeit befinden sie sich vorn an der Maschine.) Endlich hat die Maschine als wesentlichen Teil noch auf jeder Seite einen Ausgleich F (den hinteren, der senkrecht zu F steht, sieht man nicht). Dieser besteht aus einem Metallarm, dessen Enden durch weiche Pinsel aus Metalldraht gebildet sind, die auf den Sektoren *aa* . . resp. *bb* . . schleifen. Wird die Maschine gedreht, so entwickelt sich sofort Elektrizität, die zwischen A und B in Funken oder Büscheln über-

Fig. 19.



geht. Die Ausgleicher sind etwa um 50° gegen die Spitzenkämme geneigt. Fig. 20 zeigt die Wimshurstmaschine in der gewöhnlich gebrauchten Form.

Der Vorgang in der Maschine wird am besten aus der schematischen Fig. 21 erkannt werden. In dieser ist die eine Scheibe mit ihren Sektoren als der innere Kreis *BB'*, die andere Scheibe mit ihren Sektoren als der äußere Kreis *DD'* dargestellt. Der Ausgleicher am inneren Kreis mit den Pinseln ist mit *ab*, der am äußeren Kreis mit *cd* bezeichnet. Die Spitzenkämme sind vorläufig nicht gezeichnet. Die Wirkung der Maschine läßt sich vollständig erklären, wenn wir nur die Vorgänge an den Metallsektoren ins Auge fassen, diejenigen

in dem Ebonit zunächst nicht berücksichtigen. Die gleichzeitige entgegengesetzte Drehung der beiden Scheiben fassen wir hier als successive Drehung bald der einen, bald der anderen Scheibe auf.

Es möge nun der Sektor 1 (bei a) des inneren Kreises aus irgend einem Grunde Elektrizität, etwa negative, besitzen. Gewöhnlich hat er diese noch von dem letzten Gebrauch der Maschine her, da er isoliert ist, behalten. Der innere Kreis werde rechts herumgedreht, während der äußere zunächst stillsteht. Der Sektor 1 passiert nun eine Reihe

Sektoren des äußeren Kreises, die isoliert sind, und beeinflusst beim Vorübergehen jedesmal zwar in ihnen die beiden Elektrizitäten, die sich aber sofort wieder vereinigen, sobald Sektor 1 an ihnen vorüber ist. Sowie aber Sektor 1 an dem Sektor 2 des äußeren Kreises vor-

Fig. 20.

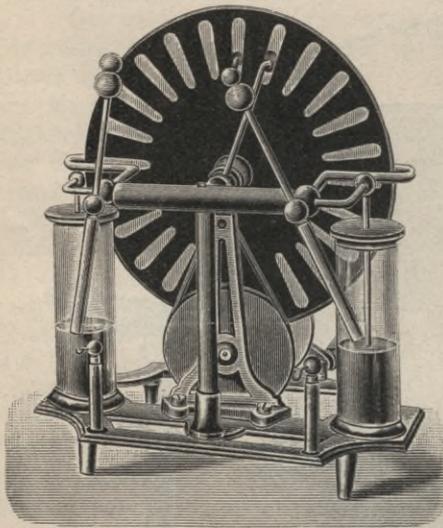
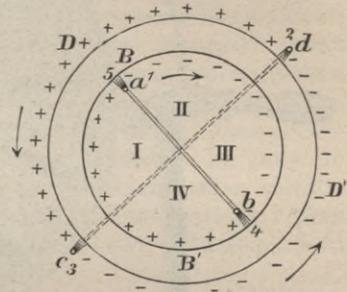


Fig. 21.



beipassiert, der gerade von dem Ausgleicher *dc* berührt wird, wird auf 2 die positive Elektrizität entwickelt und auf dem damit durch den metallischen Ausgleicher verbundenen Sektor 3 negative. Nun dreht sich aber auch der äußere Kreis. Im nächsten Moment sind also 2 und 3 nicht mehr verbunden, sondern 2 behält seine positive, 3 seine negative Elektrizität. Nun dreht sich der äußere Kreis links herum weiter. Sobald 3 gegenüber 4 kommt, beeinflusst es dort positive und stößt die negative Elektrizität nach 5 ab, welches jetzt an derjenigen Stelle ist, wo zuerst 1 war. Zugleich beeinflusst 2 bei 5 (an der Stelle von 1) die negative und stößt die positive Elektrizität nach 4 ab. Das Resultat ist also, daß der Sektor 4 positiv geladen ist und 5 (resp. 1) negativ. Nun drehen sich wieder 4 und 5, und so geht das fort. Das Resultat ist eine Ladung der Sektoren auf der inneren und äußeren Scheibe, wie sie durch die Zeichen ++ und -- angegeben ist. Man sieht, daß mitten zwischen den Ausgleichern rechts beide Scheiben negative, links positive Sektoren haben. Bringt man also da je einen Spitzenkamm an, wie es Fig. 22 zeigt, so wird der linken Kugel fortwährend positive, der rechten fortwährend negative

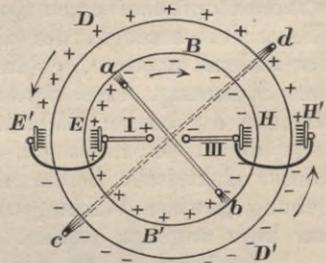
Elektrizität zugeführt, die sich beim Auseinanderschieben der Kugeln in Form des Büschellichts ausgleichen.

Man kann übrigens sowohl bei der Holtzschen Influenzmaschine, als bei der Wimshurstmaschine den Ausgleich der Elektrizitäten auch in anderer Form als der des Büschellichts vor sich gehen lassen. Wenn man nämlich die beiden Kugeln zu Knöpfen zweier Leydener Flaschen macht, wie das in Fig. 17 an einer Kugel und in Fig. 20 an beiden Kugeln gezeichnet ist, dann werden durch das Drehen der Influenzmaschine die beiden Flaschen und mit ihnen die Kugeln sehr stark geladen, ohne daß ein kontinuierlicher Ausgleich der Elektrizität zwischen den Kugeln stattfindet. Wenn aber diese Dichtigkeit sehr groß geworden ist, wenn auf der einen Kugel positive Elektrizität, auf der anderen negative, beide von sehr großer Dichte sich befinden, dann wird die Luft von den Elektrizitäten gewaltsam durchbrochen. Die positive Elektrizität auf dem Knopf der einen Leydener Flasche und die negative auf dem Knopf der anderen ziehen sich gewaltsam an, und es springt zwischen den beiden Knöpfen unter knatterndem Geräusch ein elektrischer Funke über. Dreht man die Influenzmaschine immer weiter, so wird wieder die eine Kugel positiv, die andere negativ elektrisch mit sehr großer Dichtigkeit, und allmählich überwindet wieder die Kraft zwischen den Kugeln den Widerstand der Luft, und so springen von Zeit zu Zeit Funken zwischen den beiden Kugeln über. Nach jedem Überspringen eines Funkens sind die beiden Kugeln zum Teil entladen, indem ihre entgegengesetzten Elektrizitäten sich zum Teil ausgeglichen haben. Man nennt diesen Vorgang eine plötzliche oder disruptive Entladung.

Ganz derselbe Vorgang findet übrigens statt, wenn man nicht zwei von vornherein entgegengesetzt elektrische Leiter hat, die einander gegenüberstehen, sondern wenn man einem geladenen elektrischen Leiter einen anderen unelektrischen immer näher bringt. Auf dem unelektrischen Leiter wird Influenzelektrizität erzeugt, und wenn er nahe genug an den ersten geladenen Leiter herangekommen ist, so haben die beiden einander gegenüberliegenden Elektrizitäten, die ja von entgegengesetzter Art sind, solche große Dichtigkeiten erlangt, daß sie den Widerstand der Luft gewaltsam überwinden. Es springt also auch hier ein elektrischer Funke über. Schon wenn man einem geladenen Leiter ein Fingergelenk nähert, springt ein Funke über, und man spürt einen geringen Stich im Finger.

Wir sind hier schon zu einem neuen Erscheinungsgebiet der Elektrizität vorgedrungen. Unsere ersten Betrachtungen bezogen sich alle auf diejenigen Vorgänge, bei denen die Elektrizität im Gleichgewicht, in Ruhe ist. Jetzt behandeln wir bereits den Übergang der Elektrizität von einem geladenen Leiter zu einem anderen, also die Bewegung der Elektrizität. Diese Erscheinungen, die später aus-

Fig. 22.



fürhlich behandelt werden, sollen hier nur kurz angegeben werden, um einen Überblick über sie zu gewinnen.

Zwischen den beiden entgegengesetzt geladenen Kugeln unserer Influenzmaschine geht also die Elektrizität gewöhnlich in Form eines Büschellichts über. Sind die Kugeln mit je einem Kondensator (einer Leydener Flasche) verbunden, so daß sehr viel Elektrizität auf ihnen sich ansammelt, so findet der Übergang disruptiv als Funkenentladung statt.

Wenn man aber die beiden Kugeln oder überhaupt zwei entgegengesetzt geladene Leiter durch einen metallischen, leitenden Draht miteinander verbindet, so geht der Ausgleich der Elektrizitäten nicht mehr durch die Luft vor sich, sondern durch den Draht, da ja die Elektrizität auf Metallen sich mit der allergrößten Leichtigkeit verschiebt. Es geht also von dem positiven Leiter, wo die Elektrizität höhere Spannung besitzt, die positive Elektrizität längs des Drahtes auf den negativen Leiter, wo die Spannung geringer ist, über, bis sich beide Elektrizitäten ausgeglichen haben. Es findet durch den Draht hindurch oder längs des Drahtes eine Ausgleichung der Elektrizitäten statt, was wir kurz damit bezeichnen, daß wir sagen, die Elektrizität fließt durch den Draht. Durch die Drehung der Maschine wird fortwährend auf dem einen Konduktor positive, auf dem anderen negative Elektrizität erzeugt, der eine Konduktor hat also positive Spannung, der andere negative, es herrscht also zwischen ihnen ein Unterschied der Spannung, eine Spannungsdifferenz, und gerade deshalb strömen die beiden Elektrizitäten fortwährend durch den Draht. Man sagt dann, es fließt ein elektrischer Strom durch den Draht. Dieser elektrische Strom nun bringt in dem Draht und in seiner Umgebung gewisse Wirkungen hervor, von denen wir einige hier zuerst nur kurz angeben wollen.

Zunächst haben wir uns schon früher (S. 15) davon überzeugt, daß der Draht dabei wärmer wird. Aus dieser Tatsache ersehen wir, daß der Draht selbst, der Leiter, bei einem solchen Strom mitbeteiligt ist. Bei dem Gleichgewicht der Elektrizität erkannten wir, daß nur die Oberfläche der Leiter elektrisch ist und nahmen an, daß die ganze Ladung in dem angrenzenden Isolator ihren Sitz hat. Wenn nun aber diese Ladungen längs eines Drahtes sich ausgleichen, so spielt doch das Innere des Drahtes selbst dabei eine Rolle, wie wir eben daraus erkennen, daß es sich erwärmt, und wie wir noch genauer aus den Gesetzen dieser Erwärmung erkennen werden.

Eine zweite wichtige Wirkung des elektrischen Stromes kann man auf folgende Weise erkennen. Den Draht, durch den der Strom fließen soll, umhüllt man sorgfältig mit Kautschuk und windet ihn vielmal um einen rechteckigen Holzrahmen (Fig. 23). Durch ein freigelassenes Loch in diesem Holzrahmen steckt man ein Elfenbeinstäbchen, welches an einem Faden hängt und welches zwei Magnetnadeln s n und n s trägt, so daß die eine Nadel innerhalb der Windungen, die andere oberhalb sich befindet. Die beiden Nadeln haben ihre Pole in entgegengesetzter Lage, so daß dem Nordpol der einen der Südpol der anderen gerade gegenüberliegt. Ein solches System nennt man ein

astatisches Nadelpaar. Sowie man nun durch diesen gewundenen Draht, den man Multiplikator nennt, den elektrischen Strom hindurchfließen läßt, werden die Nadeln aus ihrer Lage abgelenkt und bleiben so lange abgelenkt, als der Strom fließt. Hört der elektrische Strom auf, so kommen die Nadeln auch wieder in ihre Ruhelage. Diese magnetische Wirkung des elektrischen Stromes, deren genauere Bestimmung uns noch beschäftigen wird, wird uns oft dazu dienen, anzuzeigen, ob überhaupt ein elektrischer Strom durch einen Draht fließt. Der elektrische Strom hat noch eine Reihe von anderen Wirkungen, die aber mit den Strömen, mit denen wir es hier zu tun haben, nur schwer nachzuweisen sind.

Nachdem wir so einige Methoden kennen gelernt haben, wie man Elektrizität erzeugt, nachdem wir ferner die hauptsächlichsten Wirkungen und Eigenschaften der ruhenden Elektrizität erkannt und auch einige Eigenschaften des elektrischen Stromes schon gefunden haben, müssen wir uns noch mit einem Apparat bekannt machen, der uns erlaubt, auch sehr geringe Elektrizitätsmengen sicher zu erkennen und zu messen, und ferner zu bestimmen, ob sie positiv oder negativ sind. Apparate, welche dieses gestatten, nennt man Elektrometer. Schon ein gewöhnliches Goldblattelektroskop gibt uns ein Mittel, um das Vorhandensein von Elektrizität anzuzeigen und in der oben beschriebenen Exnerschen Form auch Messungen anzustellen.

Ebenso erlaubt das Braunsche Elektroskop die Spannung von geladenen Körpern messend zu verfolgen. Diese Elektroskope sind aber zu wenig empfindlich. Viel empfindlichere Elektrometer hat Lord Kelvin (Sir W. Thomson) auf verschiedenfache Weise konstruiert. Das wichtigste von diesen ist das Quadrantenelektrometer, welches schon außerordentlich geringe Elektrizitätsmengen anzeigt und zu messen gestattet.

Die wesentlichen Teile des Instruments sind in Fig. 24 abgebildet. Eine Nadel *u* aus dünnem Aluminiumblech hängt an einem dünnen Faden *x* in einer Messingbüchse, welche aus vier voneinander getrennten Quadranten *a*, *b*, *c*, *d* besteht. (Der Quadrant *b* ist in der Figur weggelassen, damit man die Nadel *u* sehen kann.) Diese Quadranten stehen isoliert auf Glasfüßen. Die beiden Quadranten *a* und *d* sind permanent miteinander durch einen Draht *w* verbunden, und ebenso die beiden Quadranten *c* und *b*. An dem Quadranten *a* ist ein Metallstäbchen *l*, an *c* ein Metallstäbchen *m* befestigt, welche zur Zuführung der zu untersuchenden Elektrizität dienen oder auch nach Bedürfnis die Ableitung zur Erde vermitteln. Man nennt diese Stäbchen die

Fig. 23.

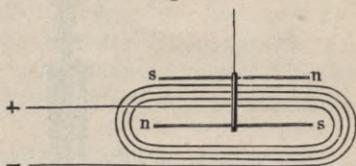
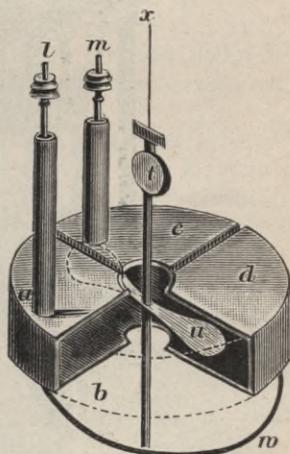


Fig. 24.



Elektroden. Die Nadel *u* trägt auf ihrer Achse einen Spiegel *t*, in welchem das Bild einer entfernt aufgestellten Skala erscheint, welches durch ein Fernrohr beobachtet werden kann.

Um den Apparat zu benutzen, wird die Nadel *u* ein für allemal stark positiv geladen (auf eine hohe positive Spannung gebracht), etwa durch Verbindung mit der einen Belegung einer geladenen Leydener Flasche, und so gestellt, daß sie zwischen *a* und *b* liegt, und es wird dafür gesorgt, daß diese Ladung konstant erhalten bleibt. Nun wird eins der beiden Metallstäbchen, z. B. *m*, mit der Erde verbunden, also auf die Spannung Null gebracht, und dadurch auch die mit ihm verbundenen Quadranten *b* und *c*. Durch das andere Metallstäbchen wird den Quadranten *a* und *d* die zu untersuchende Elektrizität mitgeteilt.

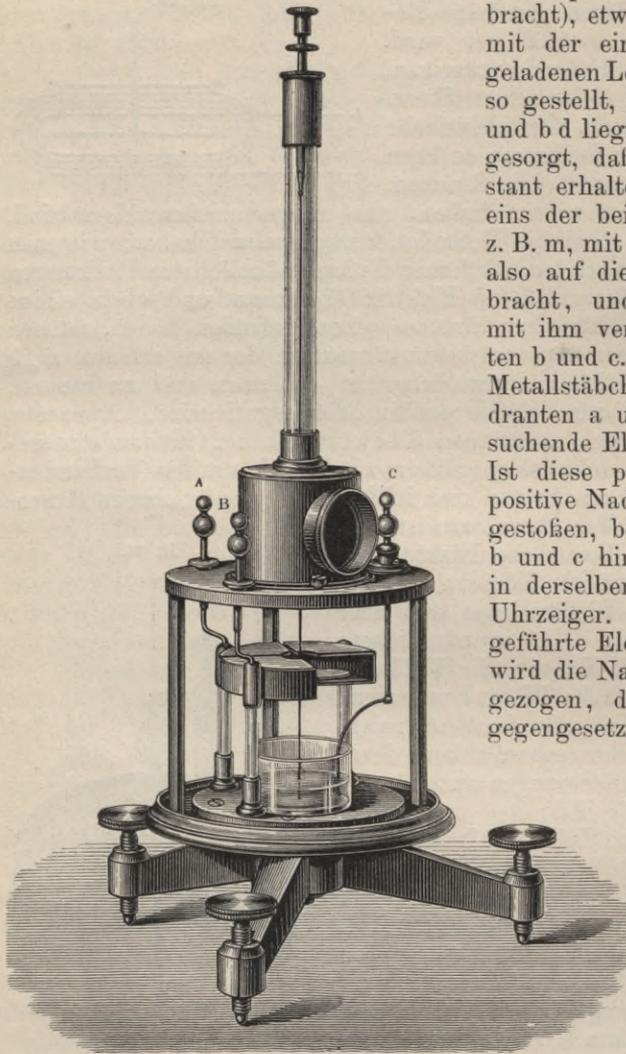
Ist diese positiv, so wird die positive Nadel von *a* und *d* abgestoßen, bewegt sich also nach *b* und *c* hin, dreht sich mithin in derselben Richtung wie ein Uhrzeiger. Ist dagegen die zugeführte Elektrizität negativ, so wird die Nadel von *a* und *d* angezogen, dreht sich also entgegengesetzt wie ein Uhrzeiger.

Der Sinn der Drehung gibt also an, ob die zugeführte Elektrizität positiv oder negativ ist, und die Größe der Drehung, die man durch die Verschiebung des Skalenbildes im Spiegel messen kann, gibt ein Maß

für die Größe der untersuchten Elektrizitätsmenge. Der Apparat ist so außerordentlich empfindlich, daß er die kleinsten Elektrizitätsmengen zu messen gestattet.

In etwas von der originalen Thomsonschen veränderter, aber leichter zu übersehender Form ist das Quadrantelektrometer in Fig. 25

Fig. 25.



abgebildet. Die Nadel schwebt zwischen den Quadranten, von denen wieder einer in der Figur weggelassen ist. Ihre Achse ist durch einen Faden an dem oberen Kopf des Apparates drehbar befestigt, unten taucht sie in ein Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure, durch welche der Nadel die Elektrizität vermittels des Leiters mit dem Knopf C zugeführt wird, und welche zugleich zur Dämpfung der Schwingungen der Nadel dient. Zwei gegenüberliegende Quadranten sind mit der Elektrode A verbunden, die beiden anderen mit der Elektrode B. An C legt man etwa die eine Belegung einer geladenen Leydener Flasche an, und bringt dadurch mit Hilfe der Schwefelsäure die Nadel auf die Spannung dieser Flasche.

Betrachten wir die Wirkung des Quadrantelektrometers genauer, so werden wir erkennen, daß es, wie auch das Exnersche und Braunsche (oben S. 18) Elektroskop, zuerst gar nicht Elektrizitätsmengen sind, welche man damit messen kann, sondern nur Spannungen, und daß man erst indirekt daraus auch die Größe von Elektrizitätsmengen miteinander vergleichen kann. Denn bei der Messung wird die Nadel ein für allemal auf einer sehr hohen Spannung gehalten, indem man ihre Elektrode C mit einer Elektrizitätsquelle verbindet, die eine hohe Spannung hat. Der zu untersuchende Körper wird durch einen feinen Draht mit dem einen Quadrantenpaare, etwa mit A, verbunden. Von dem zu untersuchenden Körper strömt nun durch den Draht Elektrizität so lange auf das Quadrantenpaar A, bis dessen Spannung gleich der des zu untersuchenden Körpers ist. Dieses Quadrantenpaar enthält also umso mehr Elektrizität, je höher die Spannung des zu untersuchenden Körpers ist. Der Drehungswinkel der Nadel gibt also direkt ein Maß für die Spannung des untersuchten Körpers, nicht für die auf ihm befindliche Elektrizitätsmenge und wir haben dadurch die Möglichkeit, die Spannungen von geladenen Körpern miteinander zu vergleichen.

Wir können aber durch zweckmäßige Einrichtung von solchen Elektrometermessungen auch die Kapazität eines Leiters oder Kondensators in Mikrofarads messen, wenn wir nur einen Vergleichskondensator von bekannter Kapazität, z. B. unser $\frac{1}{3}$ -Mikrofarad von S. 19 besitzen. Zu dem Zweck laden wir den zu untersuchenden Kondensator z. B. mit einer Elektrisiermaschine. Dann bekommt die Kollektorplatte desselben eine gewisse Spannung und enthält eine bestimmte Elektrizitätsmenge, und wir wissen aus S. 14, daß dann die Elektrizitätsmenge auf der Kollektorplatte gleich der Kapazität des Kondensators mal seiner Spannung ist. Diese Spannung können wir aber messen, indem wir die Kollektorplatte des Kondensators mit dem Elektrometer verbinden und den Ausschlag der Nadel bestimmen. Wenn das geschehen ist, trennen wir diesen Kondensator wieder von dem Elektrometer und setzen jetzt seine Kollektorplatte mit dem Mikrofarad in Verbindung (dessen Kondensatorplatte, wie immer, zur Erde abgeleitet ist). Dann verteilt sich die Elektrizitätsmenge, die auf dem Kondensator war, jetzt auf die beiden Kollektorplatten. Die Spannung des Kondensators nimmt ab, die des Mikrofarads, die vorher Null war, nimmt zu, bis die beiden Kollektorplatten ein und dieselbe Spannung haben, die natür-

lich kleiner ist, als die vorher auf dem Kondensator vorhandene, während die Elektrizitätsmenge, die auf beiden Platten zusammen vorhanden ist, dieselbe ist wie früher. Die neue Spannung können wir auch wieder mit dem Elektrometer messen, und man sieht nun ein, daß die neue Spannung um so viel kleiner ist, als die erste, als die Summe der beiden Kapazitäten größer ist, als die Kapazität des ersten Kondensators allein. Dadurch ist das Verhältnis der Kapazität des Kondensators zu der des Mikrofarads bestimmt, also die Kapazität des Kondensators in Mikrofarads ausgedrückt.

Unsere bisherigen Betrachtungen gaben im wesentlichen eine große Reihe von Erfahrungstatsachen; aber diese Erfahrungstatsachen wurden häufig in einer Weise ausgedrückt, welche noch hypothetische Elemente, unbewiesene Auffassungen enthielt. So z. B. sprachen wir davon, daß man einen Leiter elektrisch laden kann, wir sprachen davon, daß die Elektrizität sich auf der Oberfläche der Leiter verteilt, und sprachen von der Dichtigkeit der Elektrizität an jedem Punkte des Leiters. In diesen Aussagen sind aber Erfahrungstatsachen mit hypothetischen Auffassungen gemischt. Denn in der Tat beobachten wir nichts weiter, als daß ein „geladener“ Leiter anziehende und abstoßende Kräfte ausübt, und zwar, daß dies alle Stellen des Leiters tun. Aber von der „Elektrizität“, die auf dem Leiter liegen soll, beobachten wir nichts, diese nehmen wir bloß hypothetisch an. In Wirklichkeit versuchen wir aber immer, wenn wir solche Tatsachen beobachten, uns ein Bild davon zu machen, in welcher Weise diese Tatsachen zusammenhängen; wir suchen die beobachtbaren Tatsachen zurückzuführen auf unsichtbare, nur dem geistigen Auge deutliche Vorgänge, welche einfacher sind als diese Tatsachen. So erklärte man sich die elektrischen Erscheinungen, die wir besprochen haben, früher durch die Annahme, daß es zwei verschiedene, sehr feine Substanzen, Fluida genannt, gäbe, nämlich die positive und negative Elektrizität, welche aufeinander in die Ferne anziehend oder abstoßend wirken. Diese Annahme mußte noch ergänzt werden dadurch, daß in jedem Leiter die beiden Fluida in praktisch unerschöpflichem Betrage vorhanden seien und durch Influenz getrennt werden können. Abgesehen von der Annahme zweier verschiedener Substanzen, liegt aber dieser Erklärung der Begriff der Fernkraft zu Grunde, d. h. einer Kraft, welche von einem Körper A ausgeht und an einen Körper B angreift, ohne daß in dem Zwischenraum zwischen den beiden Körpern etwas von ihr zu merken ist. Der Begriff der Fernkraft enthält aber etwas Unverständliches und Mystisches. Wenn wir beobachten, daß ein Mann an einem Tische sitzt und daß ein Glas auf diesem Tische sich bewegt, so werden wir naturgemäß zunächst untersuchen, ob nicht eine Verbindung zwischen diesem Mann und diesem Glas vorhanden ist, etwa durch Fäden oder durch einen Mechanismus in der Tischplatte, oder ob nicht die Bewegung des Glases nur eine scheinbare ist, durch optische Täuschung hervorgerufen. Wenn wir nun auch nichts derartiges finden können, so werden wir, falls wir nicht etwa zum Spiritismus neigen, unsere Überzeugung doch nicht aufgeben, daß diese Bewegung durch irgend eine reale Vermittelung erzeugt ist und nicht durch Fernkräfte, die etwa von dem Willen des

Mannes ausgehen. Nicht anders ist es bei den Kräften, die wir in der Natur sehen, z. B. bei den elektrischen Anziehungskräften. Sie erscheinen uns zunächst als Fernkräfte, aber die Annahme derselben kann uns nicht befriedigen, vielmehr werden wir diese Kräfte erst dann verstehen, wenn es gelingt, den Mechanismus klarzulegen, durch welchen ein Körper A auf einen Körper B wirkt. Die Einsicht, daß dies zum vollen Verständnis notwendig ist, hatte zuerst der große englische Physiker Faraday, und seine Bemühungen gingen sein ganzes Leben hindurch darauf hin, durch experimentelle Tatsachen zu zeigen, daß eine solche Vermittelung existiert und worin sie besteht. Die Auffindung der dielektrischen Eigenschaften der Körper war ein erster Erfolg in dieser Richtung. Sie zeigten ganz direkt, daß das Zwischenmedium zwischen zwei geladenen Kondensatorplatten einen wesentlichen Einfluß auf den ganzen Vorgang der Influenz besitzt. Die Anschauungen von Faraday wurden später von Maxwell weiter ausgebildet und präziser dargestellt, und man versteht heute unter der Maxwellschen Theorie der Elektrizität diejenige Theorie, welche die elektrischen Erscheinungen nicht auf Fernkräfte, sondern auf vermittelte Kräfte zurückführt. Nach dieser Theorie nimmt man an, daß der Sitz aller elektrischen Erscheinungen nicht, wie es scheint, in den Leitern, sondern gerade in den Isolatoren ist. Nur die Isolatoren sind es, welche elektrisch erregt werden können und welche andererseits den elektrischen Wirkungen auch den Durchgang gestatten. In den Leitern selbst ist, falls das Gleichgewicht eingetreten ist, nie Elektrizität vorhanden. An der Oberfläche des Leiters ist nur darum scheinbare Ladung vorhanden, weil eben an die Leiteroberfläche ein Isolator grenzt, und dieser ist der Sitz der Elektrizität. Da die elektrischen Wirkungen zwar einerseits von der Natur der Isolatoren abhängen, andererseits aber, wie wir später sehen werden, sich durch die Isolatoren mit einer außerordentlich großen Geschwindigkeit fortpflanzen, welche ebenso groß ist wie die Geschwindigkeit des Lichts, so muß man weiter annehmen, daß zwar vielleicht die körperliche Substanz der Isolatoren, die Moleküle derselben, die Träger der elektrischen Erscheinungen seien, daß aber die Vermittelung, die Übertragung der elektrischen Wirkungen von einem Molekül zu einem benachbarten durch eine außerordentlich feine elastische Substanz geschieht, dieselbe, welche man auch zur Erklärung der optischen Erscheinungen anzunehmen gezwungen ist, und welche man bekanntlich den Lichtäther nennt. Dieser Körper ist im Weltraum verbreitet und heißt dort der freie Äther, er ist aber auch in den Körpern selbst vorhanden und man nimmt in der Optik weiter an, daß er in den verschiedenen Körpern verschiedene Dichtigkeit hat. Bekanntlich haben die verschiedenen Körper die Eigenschaft, das Licht in verschiedenem Maße zu brechen, und der sogenannte Brechungsindex der Körper ist umso größer, je größer die Quadratwurzel aus der Dichtigkeit des Lichtäthers in dem betreffenden Körper ist. Dieser Äther nun ist nach Maxwell auch der Vermittler, der Übertrager der elektrischen Erscheinungen, und zwar kann man sich die Vorstellung bilden, daß in jedem Isolator die Dichtigkeit des Lichtäthers gleich der Dielektrizitätskonstante des betreffenden Körpers ist.

Daraus ist nun zunächst sofort ein wichtiger und interessanter Schluß zu ziehen. Da einerseits der optische Brechungsindex einer Substanz — nach der Theorie des Lichts — und andererseits die Dielektrizitätskonstante — nach der Maxwell'schen Theorie — von der Dichtigkeit des Lichtäthers in dem betreffenden Körper abhängen, so müssen diese beiden Größen selbst in einer Beziehung stehen. Und zwar, da die Dichtigkeit des Lichtäthers einerseits gleich dem Quadrat des Brechungsindex, andererseits gleich der Dielektrizitätskonstante selbst sein soll, so folgt:

Die Dielektrizitätskonstante eines Körpers ist gleich dem Quadrat des (optischen) Brechungsindex.

Diese merkwürdige Beziehung, die von Maxwell zuerst ausgesprochen wurde, heißt auch das Maxwell'sche Gesetz. Es hat sich dasselbe an der Erfahrung bisher ausgezeichnet bestätigt gezeigt, wenn man nur für den Brechungsindex die richtigen Zahlen nimmt. Folgendes sind z. B. bei einigen Körpern die beobachteten Zahlen für die Dielektrizitätskonstante und für das Quadrat des Brechungsindex:

Name der Substanz	Dielektrizitätskonstante	Quadrat des Brechungsindex
Schwefel	3,97	3,89
Paraffin	2,00	2,01
Schweres Flintglas	3,16	3,05
Petroleum	2,07	2,07
Terpentinöl	2,23	2,13

Dadurch ist also jedenfalls die Grundlage der Maxwell'schen Anschauung als wahrscheinlich bewiesen.

Die Kräfte, mit der zwei elektrische Körper aufeinander nach dem Coulombschen Gesetze wirken, sind also nach dieser Theorie keine Fernkräfte, sondern hervorgebracht durch den Druck oder Zug, den die elektrischen Körper auf den benachbarten Äther ausüben, und der sich durch den Äther fortpflanzt und so Bewegungsantriebe erzeugt. Es lassen sich also die elektrischen Erscheinungen ganz anders auffassen, als der erste Anschein es erfordert und als man es früher getan hat. Während aber diese neue Anschauung hier nur als eine der alten ebenbürtige sich hinstellen läßt, werden wir später zeigen, daß ihre Folgerungen zu ganz neuen Erscheinungen führen, die auch durch die Experimente von Hertz tatsächlich bestätigt worden sind.

2. Kapitel.

Kontaktelektrizität. Der elektrische Strom.

Lange Zeit galt es für unmöglich, Elektrizität auf andere Weise zu erzeugen, als durch Reibung. Zwar konnte man mit einem einmal elektrisierten Körper auch wieder von neuem durch Influenz Elektrizität entwickeln, aber immer mußte man zuerst einen elektrisierten Körper dazu haben, und dieser ließ sich nicht anders herstellen, als durch Reibung. Da war es gegen Ende des 18. Jahrhunderts, daß, durch eine zufällige Entdeckung von Galvani veranlaßt, Volta, Professor der Physik in Pavia, eine Reihe von Experimenten anstellte, welche nicht nur neue Methoden zur Hervorbringung von Elektrizität lehrten, sondern welche die gesamte Kenntnis von den Wirkungen der Elektrizität außerordentlich erweiterten. Volta zeigte zum ersten Male, daß man Körper auch ganz ohne Reibung in den elektrischen Zustand versetzen könnte, er machte zum ersten Male Experimente, in denen Elektrizitätsentwicklung durch chemische Einwirkung zweier leitender Körper aufeinander eintrat.

Der Zufall, durch den diese neue Klasse von Erscheinungen bekannt wurde, war folgender:

Galvani, Professor der Medizin in Bologna, machte im Jahre 1789 (wie eine Erzählung behauptet, war es eigentlich seine Frau) eine Beobachtung, die zunächst ganz rätselhaft erschien. Galvani hatte nämlich einen Froschschenkel an dessen Nervenenden an einem kupfernen Haken aufgehängt und diesen an einem eisernen Balkongitter befestigt. Als zufällig durch den Wind das untere Ende des Froschschenkels mit dem eisernen Geländer selbst in Berührung kam, zuckte der Froschschenkel zusammen und tat dies auch jedesmal, als Galvani nun absichtlich die Berührung mit dem Balkongitter hervorbrachte.

Dieses Experiment machte damals die Runde durch alle wissenschaftlichen Kreise Europas. Aber wie war dieser Versuch Galvanis aufzufassen? Galvani selbst ließ sich durch Voreingenommenheit täuschen, er glaubte, daß dieses Experiment die lange vermutete Lebenskraft beweise, und es gelang ihm nicht, diesen immerhin sehr verwickelten Komplex von Erscheinungen in seine einfacheren Elemente aufzulösen. Erst Volta zeigte durch eine Reihe von Versuchen, daß folgende Dinge bei diesem Versuche wesentlich zum Gelingen sind:

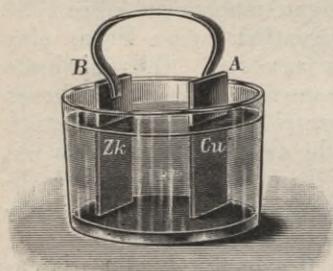
Erstens: Es müssen außer dem Froschschenkel zwei verschiedene Metalle vorhanden sein. Bei Galvani waren es Kupfer

und Eisen, es können aber auch Zink und Kupfer, oder Zink und Platin, oder überhaupt irgend zwei verschiedene Metalle sein. Mit zwei gleichen Metallen gelingt der Versuch nicht.

Zweitens: Die drei vorhandenen Körper, der Froschschenkel und die beiden Metalle müssen einen geschlossenen Kreis bilden, es muß das Kupfer einerseits mit dem Eisen, andererseits mit dem Froschschenkel und ebenso das Eisen einerseits mit dem Kupfer, andererseits mit dem Froschschenkel in Berührung sein, sonst gelingt der Versuch nicht.

Drittens aber, welche Rolle spielt der Froschschenkel bei diesem Experiment? Sicher ist, daß in diesem geschlossenen Kreis, gebildet aus zwei Metallen und dem Froschschenkel, etwas Ungewöhnliches vor sich geht, was sich eben durch das Zucken des Froschschenkels manifestiert. Aber hierbei liegen noch zwei Möglichkeiten vor: Entweder nämlich ist der Froschschenkel überhaupt zu dem ungewöhnlichen Vorgang notwendig — und das war die Ansicht von Galvani, welcher ja die Lebenskraft aus diesem Versuche zu ersehen glaubte — oder zweitens, der ungewöhnliche Vorgang an sich ist nicht an die organische Materie des Froschschenkels geknüpft, sondern der Froschschenkel zeigt durch seine Zuckungen nur an, daß eben etwas Merkwürdiges vor sich geht, er ist nur ein Reagenzmittel für den Vorgang, ganz wie das Blauwerden von Stärke ein Reagens auf das Vorhandensein von Jod ist. Diese zweite Ansicht erwies sich als die richtige. Nicht darauf kommt es an, daß gerade ein Froschschenkel mit den beiden Metallen in Berührung ist, sondern darauf, daß eine Flüssigkeit, wie das salzhaltige Wasser, welches in dem Froschschenkel vorhanden ist, mit den beiden verschiedenen Metallen in Berührung ist, und daß diese beiden Metalle sich selbst berühren, daß also ein geschlossener Kreis vorhanden ist, gebildet aus einer Flüssigkeit und zwei verschiedenen Metallen.

Fig. 26.



Wenn man also, so schloß Volta weiter, wie in Fig. 26, zwei Metalle, Zink (Zk) und Kupfer (Cu), in eine Flüssigkeit, z. B. verdünnte Schwefelsäure oder auch bloß in gewöhnliches Brunnenwasser stellt und wenn man das Kupfer, wie in der Figur, durch einen geraden oder gebogenen Draht AB mit dem Zink außerhalb der Flüssigkeit verbindet, so geht in diesem geschlossenen Kreis dasselbe Ungewöhnliche vor, wie bei dem Galvanischen Experiment.

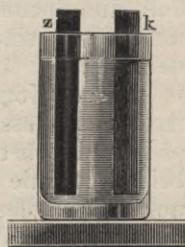
In der Tat ist dies dieselbe Anordnung, wie bei Galvani, nur daß statt Kupfer und Eisen hier Kupfer und Zink und daß statt des Froschschenkels direkt eine Flüssigkeit in einem Gefäß angewendet sind.

Was geht nun in einem solchen Kreis vor, was ist es, was die Zuckungen des Froschschenkels veranlaßt? Daß die Elektrizität hierbei in das Spiel kommt, hatte schon Galvani bei seinen ersten Versuchen erkannt, denn er konnte den Froschschenkel auch zum Zucken bringen,

wenn er in seiner Nähe nur elektrische Funken durch eine Elektrisiermaschine erzeugte. Volta aber erkannte, daß in diesem geschlossenen Kreis ein Vorgang stattfindet, den wir als elektrischen Strom schon oben (S. 38) bezeichnet haben, daß nämlich durch den Draht AB dauernd sich Elektrizität bewege. Den Beweis dafür können wir dadurch erbringen, daß wir zeigen, daß wir dieselben Wirkungen, die wir oben beim Durchgang der Elektrizität durch einen Draht vom positiven zum negativen Konduktor einer Elektrisiermaschine beobachtet haben, hier wieder finden. Die erste Wirkung bestand darin, daß der Draht dort erwärmt wurde, was wir durch das Rießsche Luftthermometer nachwiesen. Dieselbe Wirkung finden wir auch hier und zwar in viel stärkerem Maße. Wenn wir den Draht AB nur mit der Hand anfassen, so merken wir sofort, daß er wärmer ist als die Umgebung, und mit einem Thermometer, das wir anlegen, können wir das noch viel genauer kontrollieren. Zweitens wurde damals ein astatisches Nadelpaar, um welches der Draht herumgeführt war, abgelenkt, sobald die Elektrizität sich durch den Draht bewegte. Benutzen wir denselben Multiplikator draht (S. 39) jetzt dazu, um durch ihn A und B zu verbinden, statt durch den in der Fig. 26 gezeichneten dicken Draht, so finden wir eine noch viel kräftigere Ablenkung des astatischen Nadelpaares, ja es würde hier, wie wir bald sehen werden, eine gewöhnliche einfache Magnetnadel zu diesem Versuch vollständig genügen.

Wir können also nicht zweifeln, daß in diesem Apparat, den man ein Volta'sches Element nennt, ein elektrischer Strom fließt. Aber, so müssen wir fragen und so hat auch Volta gefragt, woher entsteht denn hierbei die Elektrizität und woher kommt es, daß sie nicht in Ruhe bleibt, wie auf einem geladenen Leiter, sondern daß sie sich bewegt? Vor allen Dingen wissen wir bereits, daß, wenn die Elektrizität sich von einem geladenen Leiter A zu einem anderen geladenen Leiter B bewegt, daß das nur dann geschehen kann, wenn die beiden Leiter verschiedene Spannung, einen Spannungsunterschied besitzen. Wir werden daher von selbst auf die Frage geführt, ob die beiden Metallplatten, die in die Flüssigkeit tauchen, einen solchen Spannungsunterschied wirklich zeigen, wenn sie nicht durch einen Draht verbunden sind. Der Versuch ist ja leicht gemacht. Wir brauchen bloß unser Quadrantelektrometer anzuwenden. Nehmen wir also (Fig. 27) ein Glas, welches wir mit verdünnter Schwefelsäure füllen und tauchen wir in dasselbe eine Zinkplatte z und eine Kupferplatte k; verbinden wir nun das herausstehende Ende der Zinkplatte durch einen Draht mit dem einen Quadrantenpaar unseres Quadrantelektrometers (dessen Nadel, wie stets, durch eine geladene Leydener Flasche auf hoher Spannung erhalten ist), so finden wir in der Tat, daß die Nadel einen Ausschlag von, sagen wir, 50 Teilstrichen macht, und zwar können wir uns leicht überzeugen, daß die Drehung der Nadel dabei anzeigt, daß die Zinkplatte negative Spannung hat. Machen wir denselben Versuch, indem wir nun die Kupferplatte mit demselben Quadrantenpaar verbinden, so

Fig. 27.



bekommen wir einen Ausschlag der Nadel von derselben Größe, 50 Skalenteile, aber in entgegengesetzter Richtung, wodurch wir erfahren, daß das Kupfer positive Spannung besitzt.

Durch diesen Versuch ist also nachgewiesen, daß unsere beiden verschiedenen Metalle, die in die Flüssigkeit tauchen, tatsächlich einen Spannungsunterschied besitzen, einen Spannungsunterschied, der durch die Zahl 100 (50 positive weniger 50 negative Teilstriche) in unserem willkürlichen Maß angegeben ist. Wenn wir von vornherein festgestellt haben, welcher Anzahl von Volt die Ablenkung der Nadel um einen Teilstrich entspricht, so können wir diesen Unterschied der Spannungen auch sofort in unseren Einheiten, in Volt, ausdrücken. Bei der hier angenommenen Größe des Ausschlages würde ein Teilstrich etwa einem hundertstel Volt entsprechen, so daß unsere Messung uns sagt: zwischen dem Kupfer und dem Zink in der Flüssigkeit herrscht ein Unterschied der Spannungen von etwa 1 Volt.

Dieser Unterschied der Spannungen der beiden Metalle, so lehrt nun die Erfahrung weiter, bleibt immer bestehen und ist immer von demselben Betrage, welche Operationen wir auch mit dem Element vornehmen.

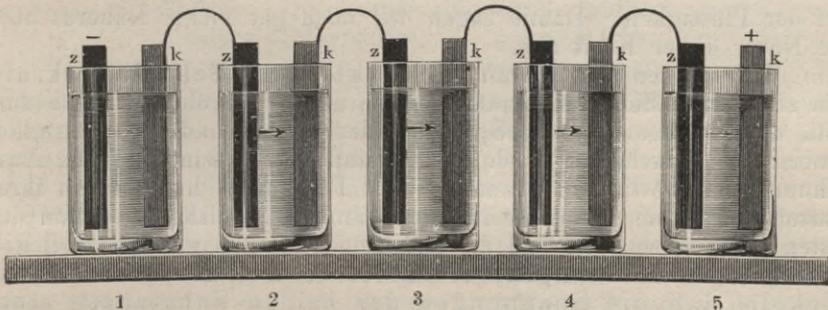
Wenn unser Gefäß isoliert ist, d. h. wenn beide Metalle und die Flüssigkeit ohne leitende Verbindung mit der Erde oder mit anderen Elektrizitätsquellen sind, so beträgt die Spannung auf dem Kupfer $\frac{1}{2}$ Volt, die auf dem Zink $-\frac{1}{2}$ Volt, so daß ihre Differenz gleich 1 Volt ist. Ist dagegen z. B. das Zink zur Erde abgeleitet, also auf der Spannung Null, so ist die Spannung des Kupfers = 1 Volt. Ist das Kupfer zur Erde abgeleitet, also auf der Spannung Null, so zeigt das Zink die Spannung -1 Volt. Wird andererseits das Zink z. B. mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in Verbindung gesetzt, der auf der Spannung 1000 Volt ist, so wird es ebenfalls die Spannung 1000 Volt bekommen, aber die Spannung auf dem Kupfer ist dann 1001 Volt, so daß die Differenz wieder 1 Volt ist. Also ergibt sich, daß die Spannung auf dem Kupfer hierbei unter allen Umständen immer um einen bestimmten Betrag, 1 Volt, größer ist als die auf dem Zink.

Eine Kombination wie die angewendete aus einer oder auch aus mehreren Flüssigkeiten und zwei Metallen nennt man ein galvanisches Element. In jedem galvanischen Element haben also die beiden Metalle einen bestimmten Spannungsunterschied. Dieser hängt nur ab von der Natur der beiden Metalle und der Flüssigkeit, aber nicht von der Größe und Form der Metalle oder der Menge der Flüssigkeit. Man kann große Zink- und Kupferplatten in Schwefelsäure tauchen lassen, oder kleine, man erhält immer am Elektrometer denselben Spannungsunterschied. Man bezeichnet diesen bestimmten Spannungsunterschied als die elektromotorische Kraft des Elements. Ein jedes galvanische Element hat also eine bestimmte elektromotorische Kraft, die in Volts ausgedrückt wird. Bei dem bisher betrachteten Element, das man ein Voltasche nennt, beträgt die elektromotorische Kraft, wie gesagt, gerade etwa 1 Volt.

Die Spannungen der beiden Metalle in einem Element sind also

um diese bestimmte Größe verschieden, wie groß oder wie klein auch die wirklichen Werte der Spannungen gemacht werden mögen. Daraus folgt zunächst als praktisches Resultat, daß wir durch eine Kombination von mehreren Elementen den Unterschied der Spannungen an den Endgliedern beliebig erhöhen können. Stellen wir nämlich einen Zinkstab und einen Kupferstab in ein Glas mit verdünnter Schwefelsäure und verbinden wir den Zinkstab mit der Erde, so hat der Kupferstab die Spannung 1 Volt, und ebenso bekommen alle leitenden Körper, die wir mit dem Kupferstab verbinden und sonst isoliert lassen, die Spannung 1 Volt. Verbinden wir also z. B. wie in Fig. 28 den Kupferstab unseres Glases mit dem Zinkstab eines zweiten Glases, in welchem auch ein Zinkstab und ein Kupferstab in dieselbe Flüssigkeit tauchen, so wird der Zinkstab des zweiten Systems die Spannung 1 Volt von dem ersten Kupferstab bekommen. Außerdem aber muß das Kupfer des zweiten Systems wiederum eine um 1 Volt höhere Spannung haben, als das Zink dieses Systems, folglich wird auf dem Kupferstab des zweiten Systems die Spannung

Fig. 28.



2 Volt herrschen. Setzen wir ebenso mit diesem zweiten Kupferstab das Zink eines dritten Systems in Verbindung, so wird dessen Kupfer die Spannung 3 Volt haben u. s. f. Verbindet man also in der angegebenen Weise eine beliebige Anzahl, etwa 5 gleiche galvanische Elemente, so wird der Spannungsunterschied der Endglieder fünfmal so groß sein, als in jedem einzelnen System. Fünf von unseren Elementen in der angegebenen Weise verbunden, haben also den Spannungsunterschied 5 Volt an ihren Endgliedern. Sind alle Elemente isoliert, so wird also das erste Zink die Spannung $-2,5$ Volt haben, das letzte Kupfer die Spannung $+2,5$ Volt. Die elektromotorische Kraft dieses Systems ist 5 Volt.

Eine Reihe von galvanischen Elementen, die so verbunden sind, daß immer das positive Metall des einen Elements mit dem negativen des nächsten durch einen Draht in leitendem Kontakt ist, nennt man eine Kette oder Batterie, oder auch besser eine hintereinander verbundene Kette. In einer solchen Kette sind nur die beiden letzten Metalle frei, alle übrigen sind, je ein positives und ein negatives, miteinander verbunden. Man nennt die beiden freien Metalle die Pole der Kette, ebenso wie man auch bei einem einzelnen Element die

Enden der beiden Metalle die Pole des Elements nennt. Die in Fig. 28 gezeichnete Kette hat nach dem Gesagten eine fünfmal so große elektromotorische Kraft, als jedes einzelne Element derselben.

Woher kommt es nun aber, daß in einer solchen Kombination von zwei Metallen und einer Flüssigkeit dauernd ein bestimmter Spannungsunterschied vorhanden ist? Woher kommt die Elektrizität, die diesen Spannungsunterschied hervorbringt? Diese Frage ist zunächst nicht leicht zu beantworten. Volta nahm an, daß die bloße Berührung der Metalle und der Flüssigkeiten die Ursache dieser Elektrizitätserzeugung sei und bezeichnete sie daher als Kontaktelektrizität. Dieser Name ist geblieben, obwohl wir heute wissen, daß es nicht die bloße einflußlose Berührung, sondern daß es die chemischen Vorgänge, die Auflösung der Metalle in der Flüssigkeit sind, welche die Elektrizität hierbei auftreten lassen. Indes unabhängig von jeder besonderen Erklärung können wir die neue Tatsache kurz so ausdrücken, daß wir sagen, bei der Berührung eines Metalls und einer leitenden Flüssigkeit entsteht an der Berührungsfläche eine Kraft, welche auf beiden Elektrizität entwickelt und zwar auf dem Metall die entgegengesetzte wie auf der Flüssigkeit. Damit sagen wir noch gar nichts Näheres über die Natur dieser Kraft aus.

Wir nennen diese Kraft die elektrische Scheidungskraft. Die elektrische Scheidungskraft, welche an der Berührungsfläche auftritt, bewirkt also, daß die Spannung des Metalls und der Flüssigkeit voneinander verschieden wird. Das Metall hat in seiner ganzen Ausdehnung eine bestimmte Spannung, die Flüssigkeit hat auch in ihrer ganzen Ausdehnung eine bestimmte Spannung, welche aber von der ersten verschieden ist. Und die Erfahrung hat nun gezeigt, daß die elektrische Scheidungskraft immer so viel Elektrizität entwickelt, daß die Spannungen der beiden Substanzen stets denselben Unterschied zeigen, welche Größe und Gestalt sie auch haben mögen, und unabhängig davon, ob etwa sonst noch auf ihnen Elektrizität vorhanden ist. Die elektrische Scheidungskraft bewirkt also, daß das Metall und die Flüssigkeit immer einen bestimmten Spannungsunterschied (eine bestimmte Potentialdifferenz) besitzen.

Über die Größe dieses Spannungsunterschiedes zwischen einem Metall und einer Flüssigkeit hat man lange wegen der experimentellen Schwierigkeiten keine genügenden Zahlenwerte aus der Erfahrung gewinnen können. Erst zirka 100 Jahre nach Voltas Entdeckung ist man dazu gekommen, auf sichere Weise sich Kenntnisse von der Größe des erzeugten Spannungsunterschiedes zu verschaffen, der zugleich ein Maß für die Größe der entsprechenden Scheidungskraft ist.

Man bezeichnet die Scheidungskraft zwischen zwei Körpern gewöhnlich dadurch, daß man sie nebeneinander schreibt und zwischen ihnen einen vertikalen Strich macht. Es bedeutet also:

Zink | Schwefelsäure

die Scheidungskraft zwischen Zink und Schwefelsäure.

Ist die betreffende Scheidungskraft positiv, so heißt das, der vor-

angehende Körper bekommt höhere Spannung als der nachfolgende; ist sie negativ, so hat der vorausgehende die geringere Spannung.

Die Scheidungskraft

Schwefelsäure | Zink

hat demnach den entgegengesetzten Wert, weil die Ordnung der Körper dabei vertauscht ist.

So wurden folgende Werte für die Spannungsunterschiede, also auch für die Scheidungskräfte zwischen den folgenden Metallen und den angegebenen Flüssigkeiten gefunden. Diese Spannungsunterschiede sind schon in Volts ausgedrückt und sie sind als direkte Messungsergebnisse anzusehen.

Magnesium	Magnesiumsulfat	= -	1,239	Volt
Aluminium	Aluminiumsulfat	= -	1,040	"
Zink	Zinksulfat	= -	0,524	"
Kadmium	Kadmiumsulfat	= -	0,162	"
Eisen	Eisensulfat	= +	0,093	"
Kupfer	Kupfersulfat	= +	0,515	"
Quecksilber	Quecksilbersulfat	= +	0,980	"
Silber	Silbersulfat	= +	0,974	"

Diese Zahlen besagen also, daß an der Grenzfläche von Zink und Zinksulfat immer ein Spannungsunterschied von 0,524 Volt entsteht und zwar, daß das Zink dabei die niedrigere, die Flüssigkeit die höhere Spannung besitzt. Umgekehrt hat das Kupfer in Berührung mit Kupfersulfat die höhere Spannung und zwar eine um 0,515 Volt höhere als die Flüssigkeit. Taucht eines dieser Metalle nicht in die entsprechende Sulfatlösung, sondern in Schwefelsäure, so bildet sich rein chemisch gleich in der Nähe das entsprechende Sulfat und die obigen Zahlen gelten also auch für den Fall, daß die betreffenden Metalle in Schwefelsäure gestellt werden.

Auch wenn zwei Metalle sich berühren, scheint ein solcher Spannungsunterschied zwischen ihnen zu entstehen. Doch ist dieser außerordentlich viel geringer, als bei der Berührung eines Metalls und einer leitenden Flüssigkeit. Ebenso entsteht auch ein kleiner Spannungsunterschied, wenn zwei verschiedene leitende Flüssigkeiten sich berühren. Doch sind in diesen Fällen, wie man allmählich eingesehen hat, die auftretenden Scheidungskräfte so gering, daß wir uns mit ihnen im folgenden nicht beschäftigen wollen, sondern nur die bedeutenden Spannungsunterschiede zwischen den Metallen und den sie berührenden Flüssigkeiten weiter untersuchen wollen. Metalle und Flüssigkeiten, die beide die Elektrizität leiten, unterscheiden sich also dadurch voneinander, daß bei ihrer Berührung ein starker Spannungsunterschied entsteht, während ein solcher bei der Berührung von Metallen unter sich oder Flüssigkeiten unter sich kaum auftritt.

Man teilt deshalb die leitenden Körper in zwei Klassen ein: in Leiter erster Klasse und Leiter zweiter Klasse.

Die Leiter erster Klasse sind alle Metalle, ferner einige Metallsuperoxyde, z. B. Braunstein, Bleisuperoxyd, ferner einige Schwefelverbindungen, wie Bleiglanz, Schwefelkies u. s. w.

Die Leiter zweiter Klasse sind diejenigen, welche mit den Leitern erster Klasse zusammen große Spannungsunterschiede ergeben. Zu ihnen gehören die Säuren, die Lösungen von Salzen und geschmolzene Salze.

Der Spannungsunterschied, der zwischen Leitern erster und zweiter Klasse stets auftritt, hat nun sehr wesentliche Folgen.

Bringen wir nämlich nun eine Zinkplatte und eine Kupferplatte frei, d. h. nicht durch einen Draht verbunden, in verdünnte Schwefelsäure, so tritt folgendes ein. Die Zinkplatte wird durch die elektrische Scheidungskraft negativ elektrisch, bekommt also eine negative, die verdünnte Schwefelsäure wird positiv elektrisch, bekommt also eine positive Spannung und die Scheidungskraft sucht diese Verteilung immer beständig zu erhalten. In Zahlen ausgedrückt beträgt der Überschuß der Spannung der verdünnten Schwefelsäure über die des Zinks 0,524 Volt. In der verdünnten Schwefelsäure steht nun aber noch die Kupferplatte. Diese bekommt durch die Berührung mit der verdünnten Schwefelsäure ebenfalls Elektrizität, also ebenfalls einen Spannungsunterschied gegen diese und zwar wird ihre Spannung höher als die des Kupfersulfats um 0,515 Volt. Daraus folgt, daß das Kupfer so viel positive Elektrizität enthält, daß seine Spannung um 0,515 Volt höher ist als die der Säure und daß diese wieder eine um 0,524 Volt höhere Spannung hat als das Zink, so daß der Überschuß der Spannung des Kupfers über die des Zinks die Summe ist, nämlich $0,515 + 0,524 = 1,039$ Volt. Dieser Unterschied ist also dasjenige, was wir die Spannungsdifferenz oder die elektromotorische Kraft des Voltaschen Elementes genannt haben. Wir sehen in der That, daß diese, wie oben angeführt, ungefähr gleich 1 Volt ist. Wir haben hierbei zwei Metalle kombiniert, welche sich gegen die Flüssigkeit verschieden verhalten. Dasselbe gilt nun auch, wenn wir etwa Zink und Kadmium in Schwefelsäure stellen würden. Die Schwefelsäure hat dabei eine um 0,524 Volt höhere Spannung als das Zink und eine um 0,162 Volt höhere Spannung als das Kadmium, also hat das Kadmium dabei eine um 0,524 weniger 0,162, d. i. um 0,362 Volt höhere Spannung als das Zink. Kadmium wird also dabei positiv elektrisch, Zink negativ, wenn das ganze Element isoliert ist. Wir können diese Resultate verallgemeinernd so aussprechen: Bringt man zwei Metalle in eine Flüssigkeit, so wird das eine Metall negativ elektrisch, das andere positiv elektrisch, und zwar bleibt immer dasjenige Metall, das durch seine eigene Scheidungskraft stärker negativ elektrisch wurde, auch in diesem Falle negativ.

Bringt man also Zink mit irgend einem anderen in der Tabelle S. 51 auf dasselbe folgenden Metall zugleich in verdünnte Schwefelsäure, so wird immer das Zink negativ elektrisch. Nur mit Magnesium und Aluminium würde Zink positiv werden.

Da jedes Metall in Berührung mit einer Flüssigkeit elektrisch wird, so kann man auch Kombinationen derart bilden, daß nicht die beiden Metalle in einer einzigen Flüssigkeit stehen, wie wir es bis jetzt angenommen haben, sondern dass jedes Metall in eine besondere

Flüssigkeit taucht, aber die Flüssigkeiten doch in leitender Verbindung sind. Auch hierbei wird das eine Metall positiv elektrisch, das andere negativ, und auch ein solches galvanisches Element hat eine ganz bestimmte elektromotorische Kraft, welche nur abhängt von der Natur seiner Metalle und seiner Flüssigkeiten. Solche Elemente, mit zwei Metallen und zwei Flüssigkeiten, werden aus später sich ergebenden Gründen besonders häufig benutzt, und wir werden deshalb einige von ihnen beschreiben. Damit die beiden Flüssigkeiten sich nicht mischen und doch in leitender Verbindung sind, wird hierbei die eine gewöhnlich in einen porösen Tonzylinder gefüllt, durch dessen Poren die Berührung zwischen den Flüssigkeiten stattfindet.

Beim Daniellschen Element (Fig. 29) sind die beiden Metalle Zink Z und Kupfer K. Das Kupfer taucht in konzentrierte Kupfervitriollösung, das Zink in verdünnte Schwefelsäure. In ein Glas wird Kupfervitriollösung gegossen und der hohle Kupferzylinder K hineingestellt. In diesen wird dann der Tonzylinder T gesetzt und dieser wird mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, in welche dann das massive Zinkstück Z eingesetzt wird.

Das Zink trägt an seinem oberen Ende eine Klemmschraube m, der Kupferzylinder eine Klemmschraube s, in welche man Drähte festklemmen kann, um leitende Verbindungen herzustellen. Diese Enden

Fig. 29.

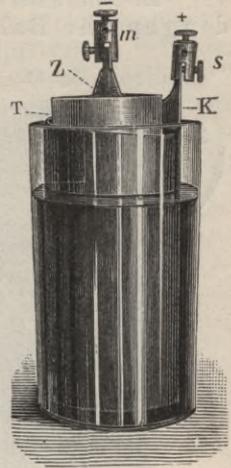
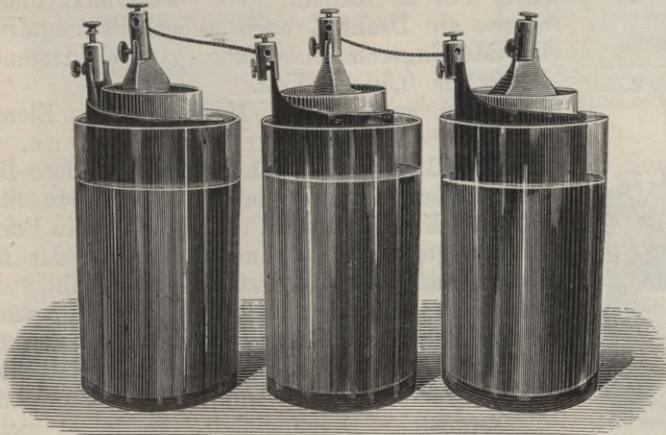


Fig. 30.

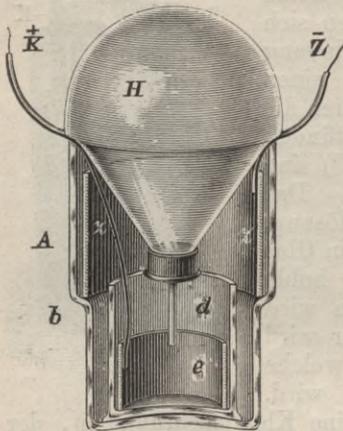


des Zinks und Kupfers nennt man speziell die Pole des Elements. Auf dem Zinkpol wird negative Spannung herrschen, auf dem Kupferpol positive. Die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes ist ungefähr gleich 1 Volt (genauer 1,08 bis 1,12 Volt). Will man

mehrere Elemente in der vorhin beschriebenen Weise zu einer Kette verbinden, so kann man das leicht, indem man die Klemmschraube s des einen Elementes mit der Schraube m des anderen Elementes durch einen Draht verbindet. Die Fig. 30 zeigt eine solche Kette aus drei Elementen.

In ähnlicher Weise gebildet wie das Daniellsche ist das Meidinger'sche Ballonelement, das in der Telegraphie viel benutzt

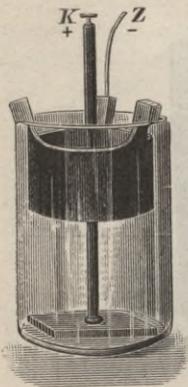
Fig. 31.



wird, und von dem Fig. 31 einen Durchschnitt gibt. Auch in diesem werden Kupfer und Zink als Metalle benutzt, als Flüssigkeiten aber Kupfervitriollösung und Bittersalzlösung, und durch die Form des Elementes ist die Anwendung einer Tonzelle vermieden. In dem bei b etwas eingebogenen Glase A steht ein Zinkzylinder. Im Innern von A ist ein kleines Glas d angekittet, in welchem der Kupferzylinder e sich befindet. Auf dem Rand des Glases A sitzt ein mit Kupfervitriolkristallen gefüllter Glasballon H auf, dessen unterer Teil in d hineinreicht und dort in eine kleine Glasröhre ausläuft, die durch einen Kork gesteckt ist. Das Glas A ist nun mit verdünnter Bittersalzlösung gefüllt. Die

konzentrierte Kupfervitriollösung sammelt sich unten am Kupferblech und dringt nur langsam höher hinauf. Von dem Kupferblech geht ein mit einer Glasröhre oder mit Guttapercha umgebener Draht K nach oben, um als positiver Pol zu dienen. Von dem Zinkzylinder geht ebenso ein Draht Z nach außen als negativer Pol. Die Meidinger'schelemente haben eine elektromotorische Kraft von 0,96—1 Volt.

Fig. 32.



Ein vereinfachtes Meidinger'sches Element ist das deutsche Telegraphenelement, welches in Fig. 32 abgebildet ist. In einem Glase liegt auf dem Boden eine Bleiplatte, an der ein Stiel mit Klemme K befestigt ist. Das Zink ist in Form eines starken gegossenen Zylinders benutzt, der mit drei Nasen auf dem Rand des Glases ruht. In eine der Nasen ist der Poldraht Z eingegossen. Der innere Rand des Glases ist oben mit Paraffin angestrichen. Als Flüssigkeiten dienen eine Bittersalzlösung für das Zink und eine Kupfervitriollösung für das Blei. Die Bleiplatte umkleidet sich nämlich beim Gebrauch der Elemente mit Kupfer und wirkt dann wie eine Kupferplatte. Die Lösung

von Kupfervitriol sammelt sich unten im Glase an, die Bittersalzlösung darüber, da die erstere Lösung schwerer ist als die letztere. Wenn das Element ruhig steht, bleibt eine ziemlich scharfe Trennung

der blauen Kupferlösung von der hellen Bittersalzlösung lange bestehen.

Ein anderes viel benutztes Element, das eine größere elektromotorische Kraft hat, ist das Bunsensche Element. Es ist in seiner einfachsten Form in Fig 33 abgebildet. Das eine Metall ist auch hier wieder Zink, das andere Metall ist durch Kohle ersetzt, welche sich ebenso wie ein Metall verhält. Das Zink taucht wieder in verdünnte Schwefelsäure, die Kohle aber in konzentrierte Salpetersäure. In das Glas wird zuerst Schwefelsäure gegossen, dann der hohle Zinkzylinder Z eingesetzt, in diesen der Tonzylinder T, mit Salpetersäure gefüllt, und darein die Kohle K gestellt. Wieder wird der Zinkpol negativ elektrisch, der Kohlenpol positiv elektrisch. An dem Zinkzylinder befindet

Fig. 33.

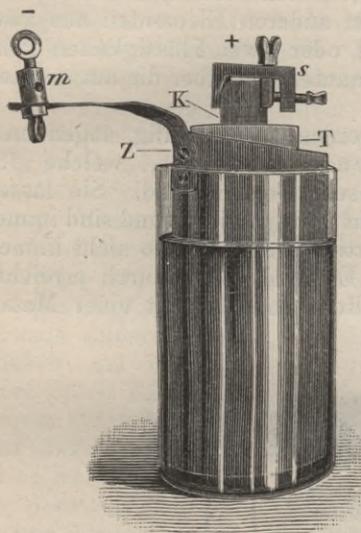
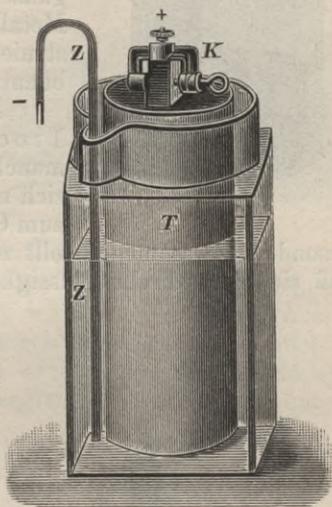


Fig. 34.

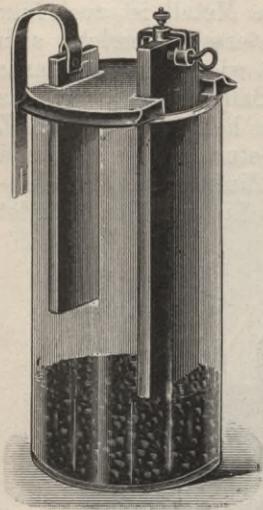


sich eine Klemmschraube *m*, an die Kohle wird eine Messingklammer s angeschraubt. Die elektromotorische Kraft eines Bunsenelements ist 1,9 Volt.

Als weiteres galvanisches Element führen wir, weil es in der Telephonie und bei elektrischen Klingeleinrichtungen sehr viel angewendet wird, das Leclanché-Element an, von dem Fig. 34 eine Ansicht gibt. Auch in diesem sind, wie bei dem Bunsenschen Element, die beiden Metalle Kohle und Zink. Aber die Kohle *K*, welche positiv elektrisch wird, steht in einer Tonzelle *T*, die mit einem Gemisch von Braunstein und Kohle gefüllt ist. Die Zinkstange *Z* steht in Salmiaklösung. Es ist also bei diesem Element nur eine Flüssigkeit vorhanden. Die elektromotorische Kraft des Leclanché-Elements ist ungefähr 1,49 Volt. Eine Abänderung dieses Elementes ist das Braunstein-Element, Fig. 35, bei welchem die Kohle in einem handhohen Gemisch von Kohle und Braunstein steht, während die Zinkplatte daneben nicht bis

zum Boden des Gefäßes reicht. Die Flüssigkeit ist auch Salmiaklösung. Zu demselben Typus gehören die S. & H.-Beutelelemente

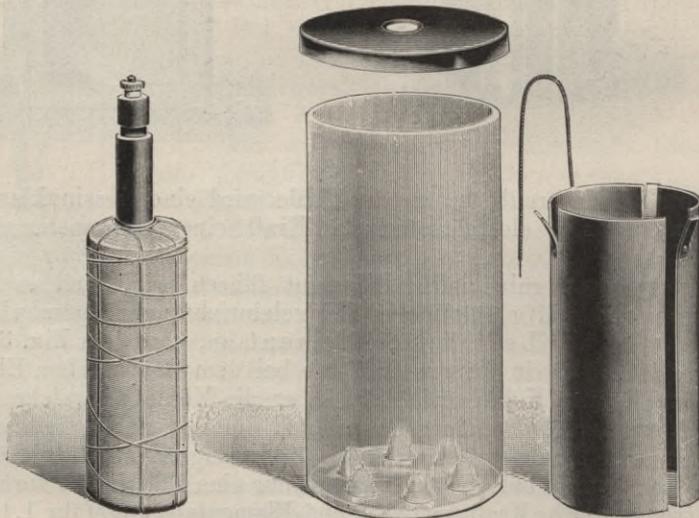
Fig. 35.



von Siemens & Halske, die insbesondere für starke Stromentnahme für kürzere Zeit brauchbar sind, und deren einzelne Teile in Fig. 36 gezeichnet sind. In das Standglas, dessen Boden passende Erhöhungen besitzt, wird der rechts sichtbare Zinkzylinder unverrückbar eingesetzt. In die Mitte kommt die mit einem Beutel und Masse (Kohle und Braunstein) umwickelte Kohle, die auch am Boden und Deckel unverrückbar befestigt ist. Das Gefäß wird mit Salmiaklösung gefüllt. Die elektromotorische Kraft des Elementes ist 1,5 Volt. Man hat noch eine ganze Anzahl von anderen Elementen aus zwei Metallen und ein oder zwei Flüssigkeiten konstruiert. Die genannten sind aber die am meisten benutzten.

Dagegen werden jetzt häufig sogenannte Trockenelemente verwendet, welche für manche Zwecke sehr bequem sind. Sie lassen sich nämlich leicht transportieren und sind immer zum Gebrauch fertig, brauchen also nicht immer besonders zusammengestellt zu werden. Es wird das dadurch erreicht, daß sie nicht direkt Flüssigkeiten enthalten, sondern mit einer Masse

Fig. 36.



gefüllt sind, welche mit der Flüssigkeit imprägniert ist und immer feucht bleibt. Als Metalle sind bei ihnen auch gewöhnlich Zink und

Kohle verwendet. Die Füllmasse dagegen ist Geheimnis. Ein sehr brauchbares Element dieser Art ist das von Hellesen (Fig. 37), welches die Form eines Kästchens hat und von Siemens & Halske konstruiert wird. Die Kohle, deren Pol in der Mitte aus dem Kästchen herausragt, ist mit Braunstein umgeben, der durch eine Pergamentpapierhülle gehalten wird. Das Zink, dessen Pol außen durch den gewundenen Enddraht bezeichnet wird, umgibt in Form eines durchlöcherten Zylinders die Pergamenthülle und befindet sich selbst in der mit Salmiak imprägnierten Masse. Die elektromotorische Kraft eines solchen Elementes ist 1,5 Volt.

Fig. 37.



TYPE NO 3.

Betrachten wir nun die Vorgänge in einem beliebigen galvanischen Element, z. B. in einem Daniellschen. Auf dem Kupferpol ist positive Elektrizität und positive Spannung, auf dem Zinkpol negative Elektrizität und negative Spannung vorhanden. Diese beiden Pole verhalten sich also ganz so wie die beiden Konduktoren der Elektrisiermaschine, die wir früher betrachtet haben.

Verbinden wir die beiden Pole durch einen Draht, schließen wir, wie man sagt, das Element, so fließt die Elektrizität von dem einen Pol zum anderen über. Die Elektrizitäten würden sich sofort ausgleichen und das Element würde unelektrisch werden, wenn nicht sofort durch die elektrische Scheidungskraft wieder neue Elektrizitätsmengen erzeugt würden, die sich wieder ausgleichen u. s. f. Es entsteht daher ein dauernder elektrischer Strom (galvanischer Strom). Die positive Elektrizität fließt von der höheren Spannung längs des Verbindungsdrahts der beiden Pole zur niederen Spannung. Bei dem Daniellschen Element also, bei dem auf dem Kupferpol positive Spannung herrscht, strömt die positive Elektrizität vom Kupferpol längs des Verbindungsdrahts zum Zinkpol. Zugleich hat die Flüssigkeit in der Nähe des Zinks höhere Spannung als die in der Nähe des Kupfers und es bewegt sich daher die positive Elektrizität von der Schwefelsäure in der Nähe des Zinks durch die mit Flüssigkeit erfüllten Poren der Tonzelle hindurch zum Kupfervitriol. Das mit diesem in Berührung stehende Kupfer hat nun wieder höhere Spannung als die Flüssigkeit und so bewegt sich die Elektrizität wieder vom Kupfer weiter. Dauernd aufrecht erhalten wird der Strom durch die elektrische Scheidungskraft, welche für jede ausgeglichene Elektrizitätsmenge gleich wieder neue erzeugt. Wir könnten ebensogut auch

Fig. 38.

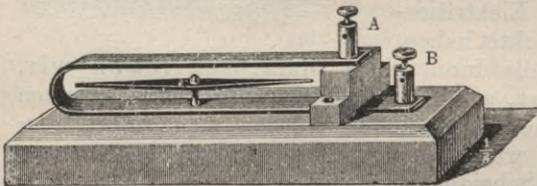


sagen, die negative Elektrizität fließt von dem Zink durch den Verbindungsdraht zum Kupfer, dann aus dem Kupfer durch die Flüssigkeiten zurück zum Zinkpol. Das ist rein Sache der Festsetzung. Man bezeichnet allgemein die Richtung, in der die positive Elektrizität fortgeführt wird, kurzweg als die Richtung des Stromes. Die Richtung des Stromes in einem Element ist in Fig. 38 dargestellt. Durch den Verbindungsdraht fließt der positive Strom vom Kupfer zum Zink und durch die Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer zurück.

Auf diese Weise ist also das Vorhandensein eines elektrischen Stromes in einem geschlossenen Element erklärt. Daß ein solcher Strom tatsächlich fließt, davon haben wir uns schon oben auf zweifache Weise überzeugt. Zunächst hatten wir gefunden, daß der Draht, durch welchen der Strom fließt, erwärmt wird. Diese Erwärmung kann hierbei aus später einleuchtenden Gründen eine sehr starke werden. Wenn man z. B. die in Fig. 28 gezeichnete Kette durch einen dünnen Draht verbindet, so kommt dieser Draht ins Glühen und schmilzt sogar weg.

Die zweite Wirkung, durch die wir erkannten, daß ein Strom in dem Draht fließt, war die Ablenkung einer Magnetnadel, um die der Strom herumgeführt wurde. Die Ströme, die wir jetzt haben, zeigen diese Wirkung in viel höherem Grade als der Strom, den wir etwa zwischen den beiden Leitern einer Elektrisiermaschine erhielten. Wir bedienen uns, um vorläufig nur qualitativ

Fig. 39.



diese Ablenkung zu zeigen, zunächst des Apparates Fig. 39, den man ein Galvanoskop nennt.

Eine Magnetnadel befindet sich drehbar auf einer Spitze in dem Innern eines umgebogenen kupfernen Streifens, der auf Holz montiert ist. An die beiden freien Enden dieses Streifens sind Klemmschrauben A und B aufgeschraubt. Sobald man nun den positiven Pol eines Elementes durch einen Draht mit A und den negativen Pol durch einen Draht mit B verbindet, so ist das Element durch diese Drähte und den Kupferstreifen geschlossen, und man sieht nun sofort die Magnetnadel sich aus der Schleife herausdrehen und nach einigen Schwingungen, die sie ausführt, in der herausgedrehten Lage zur Ruhe kommen. Damit die Magnetnadel vor der Schließung des Elementes in der Kupferschleife steht, wie es die Figur zeigt, ist natürlich notwendig, daß man die Schleife selbst, also den Apparat Fig. 39, in die Süd-Nordrichtung stellt.

Bei dieser Verbindung der Pole des Elementes mit A und B wird der Nordpol der Magnetnadel nach vorn aus der Kupferschleife herausgedreht.

Hätten wir den Kupferpol mit B, den Zinkpol mit A verbunden, so wäre der positive Strom in entgegengesetzter Richtung durch die

Kupferschleife geflossen, und die Nadel wäre dann auch nach entgegengesetzter Richtung abgelenkt worden.

Während wir beim Gleichgewicht der Elektrizität gesehen haben, daß die Leiter, die Metalle, ganz frei von Elektrizität sind, daß in ihnen überhaupt keine elektrischen Kräfte wirken, und daß daher die ganze Ladung eines Leiters darin besteht, daß an seiner Oberfläche, d. h. im angrenzenden Isolator, sich der elektrische Zustand ausbildet, ist jetzt bei den galvanischen Strömen die Sachlage nicht mehr so einfach. Zunächst könnte man zwar glauben, daß wenn am Kupferpol die Spannung höher ist, als am Zinkpol, daß dann die Elektrizität, der elektrische Zustand, sich längs des Verbindungsdrahtes, aber außerhalb, nämlich im angrenzenden Isolator, verschiebt, so daß die Drähte bloß die Schienen bilden, auf denen diese Verschiebung vor sich geht. Der Leiter selbst, das Innere, wäre dann gar nicht beeinflusst. Tatsächlich aber ist das nicht der Fall, vielmehr zeigen eine ganze Reihe von Tatsachen, z. B. schon die Erwärmung der Drähte durch den Strom, daß bei der Strömung der Elektrizität das Innere des Leiters selbst beteiligt ist. Aber wenn man früher glaubte, daß bloß das Innere des Leiters bei einem Strom in Frage käme, so ist das auch nicht richtig. Vielmehr wird sich zeigen, daß bei einem galvanischen Strom sowohl in den Leitern, wie in den angrenzenden Isolatoren Vorgänge auftreten, die zusammengehören und die zusammen den elektrischen Strom ausmachen.

Diese Fragen wollen wir aber erst näher untersuchen, wenn wir die quantitativen Verhältnisse der elektrischen Ströme näher kennen gelernt haben.

3. Kapitel.

Die Gesetze des elektrischen Stromes.

Ein jedes galvanische Element ist im stande, dauernd einen elektrischen Strom zu erzeugen. In der Tat ist ja die Elektrizität auf einem Leiter nur dann im Gleichgewicht, wenn auf ihm überall dieselbe Spannung vorhanden ist. Wenn aber aus irgend einem Grunde an verschiedenen Stellen des Leiters die Spannung verschieden ist, dann muß eben die positive Elektrizität stets von Stellen höherer zu Stellen niederer Spannung auf dem Leiter fließen. In jedem offenen galvanischen Element, dessen Pole also nicht verbunden sind, hat nun jede der beiden Metallplatten mit ihrem Pol eine bestimmte Spannung, aber die des einen Pols ist um eine bestimmte Größe höher als die des anderen. Sobald man daher die beiden Metalle durch einen Draht verbindet, so muß in diesem und längs diesem die positive Elektrizität von dem einen Metall (dem Kupfer im Daniellschen Element) zum anderen (dem Zink) fließen. Aber auch in den Flüssigkeiten des Elements selbst muß die Elektrizität fließen. Denn an jedem der beiden Metalle herrscht ja die elektrische Scheidungskraft und sie bewirkt, daß die Flüssigkeit in der Nähe des einen Metalls (des Zinks) eine höhere Spannung hat wie in der Nähe des anderen (des Kupfers). Sowie also die beiden Metalle durch einen Draht verbunden werden, fließt die Elektrizität durch den Draht und durch das Element selbst hindurch, und die elektrische Scheidungskraft bewirkt, daß dieser Strom ein dauernder ist. Wir können uns dieses Verhalten durch einen Vergleich mit dem Strömen von Wasser leicht klar machen. In einem Teich stehen zwei Röhren, in welche durch eine Pumpmaschine Wasser hineingepumpt ist, und zwar so, daß das Niveau des Wassers in der einen Röhre höher ist, als in der anderen. Sowie man die beiden Röhren durch eine zwischen ihnen angelegte Röhre verbindet, fließt das Wasser aus der Röhre mit höherem Niveau in die andere. Und wenn man durch die Pumpmaschine dafür sorgt, daß das Niveau der beiden Röhren stets in gleicher Höhe gehalten wird, so fließt das Wasser fortwährend von der ersten Röhre durch das Verbindungsrohr zur zweiten und wird durch die Pumpe wieder auf das erste Niveau gehoben. Ganz entsprechend ist es bei der Elektrizität. Dem Niveau beim Wasser entspricht die Spannung der Elektrizität, die Funktionen der Pumpmaschine übernimmt die elektrische Scheidungskraft. Von der höheren Spannung auf dem Kupfer fließt die positive Elektrizität

durch den Verbindungsdraht zum Zink und durch die Flüssigkeit zum Kupfer zurück. Die elektrische Scheidungskraft bringt sie wieder auf die ursprüngliche Spannung, die des Kupfers. Ein elektrischer Strom fließt also dauernd nur in einem geschlossenen Kreise, d. h. in einem Kreise, der gebildet ist aus einem Element, dessen Pole durch Leiter miteinander verbunden sind.

Man nennt eine solche geschlossene Leitung, die aus einem Element (oder einer Kette) und einem Verbindungsdraht besteht, einen Stromkreis oder besser einen einfachen Stromkreis (im Gegensatz zu verzweigten Stromkreisen, von denen später die Rede sein wird). Wenn der Strom fließt, so geht durch jeden Teil des gesamten geschlossenen Kreises in jedem Augenblick eine gewisse Menge von Elektrizität, eine gewisse Anzahl von Coulombs, hindurch. Es kann der Stromkreis an verschiedenen Stellen verschieden große Querschnitte haben, stets muß doch bei einem konstanten Strome durch jeden Querschnitt in einer Sekunde gleichviel Elektrizität hindurchfließen. Denn wenn an einen Querschnitt mehr Elektrizität hinströmen als von ihm fortströmen würde, so würde ja an dieser Stelle eine Anhäufung der Elektrizität stattfinden. Man nennt die Elektrizitätsmenge, also die Anzahl Coulombs, die in einer Sekunde durch irgend einen Querschnitt des Stromkreises hindurchfließt, die Stromstärke oder Stromintensität. Wieviel Elektrizität durch einen Querschnitt in einer Sekunde hindurchfließt, das hängt natürlich von verschiedenen Umständen ab. Das hängt einmal davon ab, wie groß die treibende Kraft ist, welche den galvanischen Strom hervorruft, wie groß also die elektromotorische Kraft des Elementes ist. Zweitens hängt es aber auch davon ab, durch welche Stoffe der Strom fließt und wie gestaltet diese sind. Aber mögen sie auch Formen haben, welche sie wollen, in einem bestimmten Stromkreis fließt durch jeden Querschnitt, wie groß oder wie klein er sein mag, immer ein und dieselbe Menge Elektrizität in der Sekunde. Mit anderen Worten heißt dies, die Stromstärke ist in einem Stromkreis überall dieselbe. In jedem einfachen Stromkreis hat also der elektrische Strom eine gewisse Stärke und zwar an allen Stellen des Stromkreises dieselbe. Man kann sich dies wieder an dem Vergleich mit unseren Röhren, in welchen ein Strom von Wasser fließt, klar machen. Wenn die eine Röhre an verschiedenen Stellen etwa verschiedene Weite besitzt, und durch die Pumpmaschine in diese Röhre in jeder Sekunde z. B. 300 ccm Wasser hineingepumpt werden und ebensoviel am anderen Ende abfließen, so daß die Röhre immer ganz mit Wasser gefüllt ist, so fließen durch jeden Querschnitt, mag er groß oder klein sein, in jeder Sekunde gerade 300 ccm Wasser. An engeren Stellen der Röhre fließt dann eben das Wasser rascher, an weiteren langsamer. Ganz so ist es beim elektrischen Strome. Die Stromintensität, die Stärke des Stromes ist überall dieselbe, durch jeden Querschnitt des Stromkreises fließt in einer bestimmten Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge hindurch.

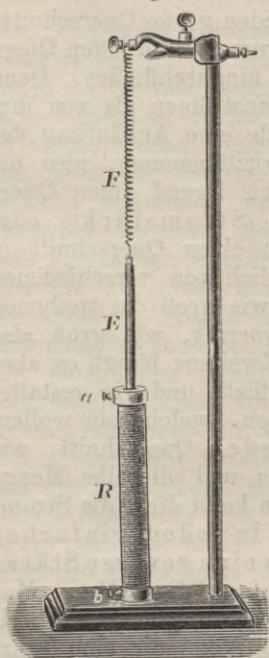
Um nun die Stromstärke in irgend einem Stromkreis messen zu können, müssen wir wieder zunächst eine Einheit für sie festsetzen. Wir wollen sagen, derjenige Strom hat die Einheit der Stromstärke,

bei welchem in jeder Sekunde gerade ein Coulomb durch jeden Querschnitt fließt. Diese Einheit nennen wir 1 Ampère und drücken also alle Stromstärken in Ampères aus. Durch welche Mittel wir dann die Stromstärke in irgend einem Stromkreis messen, d. h. in Ampères ausdrücken können, wird sich sofort ergeben. Den tausendsten Teil eines Ampère nennt man ein Milliampère.

Je stärker ein elektrischer Strom ist, je größer seine Stromintensität ist, desto stärker sind die Wirkungen, die er erzeugt. Wir werden also die Stärke des Stromes erkennen können aus der Größe seiner Wirkungen. Das einfachste Mittel dazu bieten die magnetischen Wirkungen des Stromes, für welche wir oben S. 58 bei dem einfachen

Galvanoskop ein Beispiel gesehen haben. Bei diesem wird durch den Strom eine Magnetnadel aus ihrer natürlichen Lage abgelenkt und zwar um so mehr, je stärker der Strom ist. Zugleich aber will die Nadel immer ihre natürliche Richtung einnehmen, weil eine Magnetnadel durch den Einfluß des Erdmagnetismus ja bekanntlich immer nach Norden zeigen will. Unter dem Einfluß dieser beiden Kräfte kommt also die Nadel in eine bestimmte Lage. Sie wird umso mehr aus der Nord-Südrichtung herausgedreht, je größer die Stärke des galvanischen Stromes ist, der um sie herumfließt und der sie beeinflusst. Eine andere magnetische Wirkung eines elektrischen Stromes ist an dem Apparat in Fig. 40 zu beobachten. Sie besteht darin, daß eine von einem Strom durchflossene Drahtrolle R einen Eisenstab E, der an einer Spiralfeder F aufgehängt ist, in sich hineinzieht, und zwar um so tiefer, je stärker der Strom ist, der durch die Drahtwindungen der Rolle fließt. Man verbindet zu dem Zweck die beiden Schrauben a und b, in welche die Drahtwindungen der Rolle endigen, mit dem galvanischen Element. Hat man nun z. B. einmal an

Fig. 40.



diesem Instrument festgestellt, wie tief der Eisenstab in die Rolle hineingezogen wird, wenn durch die Rolle ein Strom von 1, 2, 3 u. s. w. Ampère hindurchgeht, so kann man offenbar nun immer umgekehrt aus der Stellung des Eisenstabes die Zahl der Ampères bestimmen, welche durch die Rolle hindurchgehen. Auf genau diesem Prinzip beruhen gewisse Meßinstrumente für die Stromstärke, von denen eines in Fig. 41 abgebildet ist und welche man Federgalvanometer nennt. Man sieht auf einem Fuß die Drahtrolle, welche unten die beiden Klemmen zum Einschrauben der Leitung hat. In dem Gehäuse oberhalb der Drahtrolle hängt ein hohler Eisenzylinder an einer Spiralfeder. Er trägt einen kleinen Vorsprung, welcher durch die Spalte der Skala hervortritt und bei dem Hineinziehen des Zylinders sich längs

der Skala bewegt. Ist die Rolle ohne Strom, so steht dieser Zeiger bei 0. Durch Ströme von 5, 10, 15 u. s. w. Ampère bekommt er die an der Skala verzeichneten Lagen. Man kann diese Instrumente, die nach F. Kohlrauschs Angaben von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. konstruiert werden, auch so einrichten, daß sie viel kleinere oder viel größere Stromstärken noch messen lassen. Für uns genügt es hier vorläufig, daß wir dadurch ein Instrument haben, welches uns die Stromstärken in Ampères zu messen gestattet.

Wovon hängt nun die Stärke eines Stromes ab? Jedenfalls von der Größe der elektromotorischen Kraft des Elements. Je größer die elektromotorische Kraft ist, welche die Elektrizität bewegt, desto größer kann auch die Menge der Elektrizität sein, die durch jeden Querschnitt pro Sekunde hindurchgeht, d. h. desto größer muß die Stärke des Stromes in dem Stromkreise sein. Und das ist in der Tat der Fall, wie wir uns durch unser Federgalvanometer überzeugen können. Nehmen wir z. B. ein Daniellsches Element, und verbinden wir es durch ein Paar dünne Drähte (warum sie dünn sein müssen, wird sich bald zeigen) mit dem Meßinstrument, so erhalten wir eine gewisse Stromstärke, sagen wir von 0,2 Ampère.

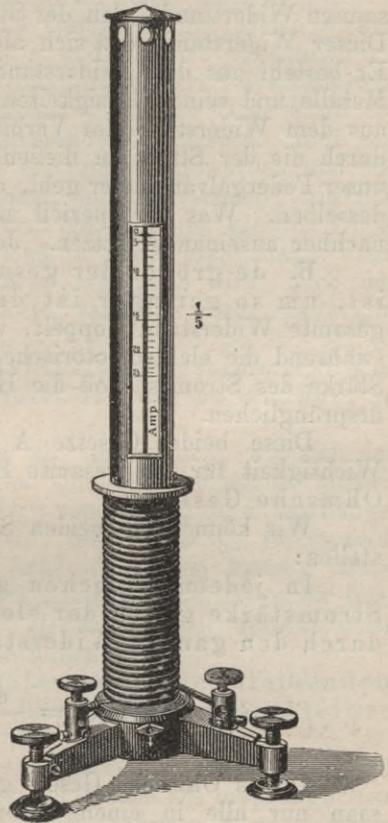
Verbinden wir jetzt vier solcher Elemente hintereinander und setzen die Endpole dieser Elemente durch dieselben dünnen Drähte mit den Klemmen des Meßinstrumentes in Verbindung, so zeigt dies jetzt die vierfache Stromstärke, 0,8 Ampère, an.

Ebendasselbe Resultat könnten wir mit mehr oder weniger Elementen erhalten. Wir haben danach das Gesetz:

A. Je größer die elektromotorische Kraft ist, die in einem bestimmten Stromkreis wirkt, desto größer ist unter sonst gleichen Umständen auch die Stärke des Stromes. Wird die elektromotorische Kraft zwei-, drei-, viermal so groß als zuerst, so wird auch die Stromstärke zwei-, drei-, viermal so groß. Der eine Faktor, von dem die Stromstärke abhängt, ist dadurch ermittelt und sein Einfluß erkannt.

Außer von der elektromotorischen Kraft hängt aber die Stromstärke noch ab von der Art und Gestalt und Größe der Körper, durch welche die Elektrizität fließt.

Fig. 41.



Wir haben uns früher schon überzeugt, daß alle Körper dem Durchgang der Elektrizität einen gewissen Widerstand entgegenzusetzen, die Isolatoren einen außerordentlich großen, die Halbleiter einen kleineren, die Leiter einen verhältnismäßig sehr kleinen. Je größer nun der Widerstand ist, den ein Strom in seinem gesamten Stromkreis zu überwinden hat, desto weniger Elektrizität kann unter sonst gleichen Umständen in einer bestimmten Zeit, z. B. in einer Sekunde, durch einen Querschnitt gehen, desto geringer ist also die Stärke des Stromes. Es hängt also die Stromstärke noch ab von dem gesamten Widerstande, den der Strom in seiner Bahn zu überwinden hat. Dieser Widerstand setzt sich aber aus verschiedenen Teilen zusammen. Er besteht aus dem Widerstand, den das Element selbst, also seine Metalle und seine Flüssigkeiten dem Strom darbieten, und er besteht aus dem Widerstand des Verbindungsdrahtes, resp. aller der Drähte, durch die der Strom zu fließen hat, also z. B. wenn der Strom durch unser Federgalvanometer geht, auch aus dem Widerstand der Drahtrolle desselben. Was wir speziell unter Widerstand verstehen, werden wir nachher auseinander setzen. Jedenfalls haben wir den Satz:

B. Je größer der gesamte Widerstand des Stromkreises ist, um so geringer ist die Stärke des Stromes. Wird der gesamte Widerstand doppelt, dreifach, vierfach so groß als er war (während die elektromotorische Kraft ungeändert bleibt), so wird die Stärke des Stromes bloß die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel von der ursprünglichen.

Diese beiden Gesetze A und B zusammen, die von höchster Wichtigkeit für die gesamte Elektrizitätslehre sind, nennt man das Ohmsche Gesetz.

Wir können die beiden Sätze zusammen in folgender Form darstellen:

In jedem einfachen geschlossenen Stromkreis ist die Stromstärke gleich der elektromotorischen Kraft dividiert durch den ganzen Widerstand:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}.$$

Dieses Ohmsche Gesetz gilt für jeden galvanischen Strom, wenn man nur alle in einem Stromkreis vorhandenen elektromotorischen Kräfte und alle Widerstände berücksichtigt.

Wir müssen nun zunächst näher bestimmen, wie der Widerstand von Leitern abhängt von der Größe und Gestalt, dem Stoffe und der Anordnung derselben.

In den meisten Anwendungen des galvanischen Stromes ist der Weg, durch den die Elektrizität fließt, ein Draht, oder hat wenigstens die Form eines Drahtes. Man nimmt Kupferdrähte oder Platindrähte oder Eisendrähte, um den Strom durchzuleiten. Aber auch, wenn der elektrische Strom durch eine Flüssigkeit fließt, kann man deren Form als die eines Drahtes ansehen. Man kann von der Länge der durchlaufenden Flüssigkeit sprechen und von ihrem Querschnitt. Untersuchen

wir also, wie sich der Widerstand eines Drahtes mit seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material ändert.

Wir nehmen ein bestimmtes galvanisches Element, z. B. einen Daniell, und verbinden seine Pole mit unserem Federgalvanometer durch zwei Kupferdrähte von ganz bestimmtem Querschnitt und zusammen ganz bestimmter Länge, z. B. der Länge von 100 m. Dann zeigt unser Meßinstrument eine bestimmte Stromstärke an. Ersetzen wir dann die Drähte von 100 m Länge durch genau ebenso dicke Kupferdrähte von 200 m Länge, so bekommen wir eine andere, kleinere Stromstärke, und machen wir dieselbe Operation mit gleich dicken Kupferdrähten von 300, 400, 500 m u. s. w. Länge, so bekommen wir immer kleinere Stromstärken. Die elektromotorische Kraft des Elements, der Widerstand der Flüssigkeiten im Element und der Widerstand des Drahtes im Federgalvanometer sind unverändert geblieben. Bloß der Widerstand der Verbindungsdrähte ist ein anderer geworden und dadurch auch die Stromstärke. Wir können daher berechnen, wie sich der Widerstand von Drähten von gleichem Material und gleicher Dicke verändert, wenn die Länge variiert. Und so findet man, daß, wenn die Länge eines Drahtes die zwei-, drei-, vierfache wird, auch der Widerstand des Drahtes der zwei-, drei-, vierfache wird. Es ergibt sich also daraus das Gesetz:

a) Der Widerstand eines Drahtes von bestimmtem Material und bestimmtem Querschnitt ist um so größer, je größer seine Länge ist.

Auf ganz dieselbe Weise können wir untersuchen, wie sich der Widerstand eines Drahtes ändert, wenn sich der Querschnitt ändert. Wir nehmen eine Reihe von Kupferdrähten von ein und derselben Länge, deren Querschnitte aber verschieden sind, und lassen der Reihe nach den Strom aus einem Element durch jeden von ihnen fließen. Dann können wir aus den verschiedenen Stromstärken, die uns unser Galvanometer angibt, die Größe des Widerstandes der verschiedenen Drähte berechnen und auf diese Weise finden wir:

b) Der Widerstand von Drähten bei gleichbleibendem Material und gleichbleibender Länge ist um so kleiner, je größer ihr Querschnitt ist.

Wird der Querschnitt zwei-, drei-, viermal so groß, so ist der Widerstand bloß die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel des ursprünglichen.

Die Form des Querschnitts, ob er kreisförmig oder viereckig oder unregelmäßig ist, ist gleichgültig. Nur auf seine Größe kommt es an.

Wir haben damit die Gesetze gefunden, wie der Widerstand eines Drahtes abhängt von seiner Größe und Gestalt. Der Widerstand hängt aber auch wesentlich ab von der Art des Stoffes, aus welchem der Leiter besteht. Ein Kupferdraht von z. B. 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt hat einen anderen Widerstand als ein Aluminiumdraht von derselben Länge und demselben Querschnitt. Legt man daher z. B. den Widerstand eines Kupferdrahtes von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt als Einheit zu Grunde, so kann man für jedes andere leitende Material eine Zahl bestimmen, welche angibt, wievielfach dessen

Widerstand bei derselben Länge und demselben Querschnitt größer oder kleiner ist. Diese Zahl nennt man den spezifischen Widerstand des Leiters, bezogen auf Kupfer als Einheit. Wir werden weiter unten Tabellen über die spezifischen Widerstände vieler Metalle und anderer Leiter geben. Hier sei nur als Beispiel angeführt, daß der spezifische Widerstand von Eisen 6,10 ist, bezogen auf Kupfer als Einheit, der von Neusilber 18,8. Das heißt also, ein Eisendraht hat immer einen 6,10mal so großen Widerstand als ein Kupferdraht von derselben Länge und demselben Querschnitt, ein Neusilberdraht gar einen 18,8mal so großen Widerstand.

Nachdem wir so gesehen haben, wie der Widerstand eines Leiters von seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material abhängt, können wir das Gesetz aussprechen:

c) Der Widerstand eines Leiters ist gleich seinem spezifischen Widerstand, multipliziert mit seiner Länge, dividiert durch seinen Querschnitt:

$$\text{Widerstand eines Leiters} = \text{spezifisch. Widerstand} \times \frac{\text{Länge}}{\text{Querschn.}}$$

Dies gilt für Leiter jeder Art, sowohl für feste Leiter — wie Metalle, Kohle — als für flüssige Leiter, also auch für die Flüssigkeiten in galvanischen Elementen.

Wir wollen nun zunächst auch für den Widerstand eine Einheit festsetzen, um alle Widerstände gleichartig bezeichnen zu können. Dazu brauchen wir das bereits gefundene Ohmsche Gesetz. Es ist ja nach diesem die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Gesamtwiderstand}}$$

Wenn wir nun eine elektromotorische Kraft haben, die gerade gleich unserer Einheit, nämlich 1 Volt ist, so können wir den Widerstand des gesamten Schließungskreises so wählen, daß die Stromstärke dann auch gerade die Einheit, nämlich 1 Ampère, ist. Diesen so festgestellten Widerstand wollen wir nun als Einheit für den Widerstand festsetzen und ihn ein Ohm nennen. Wir werden also alle Widerstände in Ohm ausdrücken. Bei dieser Festsetzung gilt also die Beziehung

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$$

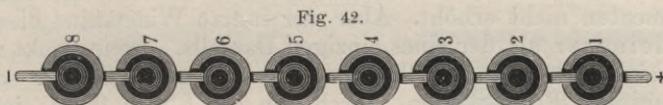
Man hat nun experimentell gefunden, daß ein Quecksilberfaden von 1 qmm Querschnitt und von 106,3 cm Länge gerade den so festgestellten Widerstand 1 Ohm hat.

Mit den bisherigen Kenntnissen können wir zunächst den Widerstand von galvanischen Elementen genauer untersuchen.

Nehmen wir ein galvanisches Element, z. B. einen Daniell, und verbinden wir seine Pole durch einen Draht von einem bestimmten Widerstand, so fließt durch diesen geschlossenen Stromkreis ein Strom, dessen Stärke gleich der elektromotorischen Kraft des Daniells dividiert durch den gesamten Widerstand ist. Der gesamte Widerstand

setzt sich zusammen aus dem des Drahtes und dem des Elementes selbst, welchen man den inneren Widerstand des Elementes nennt.

Schaltet man nun eine Reihe von Daniells hintereinander, wie in Fig. 42, so fließt der Strom von dem positiven Pol (+) durch den äußeren Verbindungsdraht zum negativen Pol (—), und dann durch die



Kette zurück zum + Pol, d. h. vom achten Element zum siebenten, von diesem zum sechsten u. s. w.

Es ist bei dieser Anordnung immer das Zink des einen Elementes mit dem Kupfer des anderen verbunden. Die elektromotorische Kraft, die in dieser Kette wirkt, ist also die achtfache eines einzigen Daniells (S. 49). Aber auch der innere Widerstand der ganzen Kette ist der achtfache eines Daniells, weil der Strom jetzt die achtfache Länge der Flüssigkeit bei gleichem Querschnitt zu durchlaufen hat. Die gesamte Stärke des Stromes ist also

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{achtfache elektromotorische Kraft eines Daniells}}{\text{Drahtwiderstand} + \text{achtfacher innerer Widerstand eines Daniells}}$$

Ist nun z. B. der Drahtwiderstand sehr klein gegenüber dem inneren Widerstand eines Daniells, so daß man ihn vernachlässigen kann, so ist nahezu

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniells}}{\text{innerer Widerstand eines Daniells}}$$

Man gewinnt also dann gar nichts an Stromintensität, wenn man die 8 Elemente hintereinander schaltet. Der Gesamtstrom ist ungefähr ebenso stark, als wenn man nur einen Daniell genommen hätte.

Ist dagegen der Drahtwiderstand sehr groß, viel größer als der gesamte innere Widerstand der Kette, so hat man nahezu

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{achtfache elektromotorische Kraft eines Daniells}}{\text{Drahtwiderstand}}$$

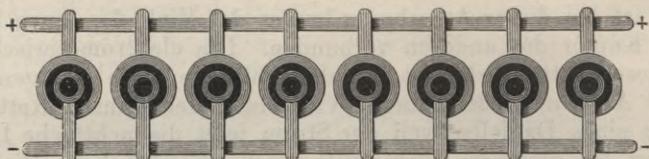
Jetzt ist also die Stromstärke nahezu 8mal so groß, als wenn man nur einen Daniell anwendet.

Es ergibt sich also die Regel: Ist der Widerstand des Verbindungsdrahtes einer Kette oder, wie man auch sagt, des äußeren Stromkreises sehr groß gegen den inneren Widerstand der Kette, so ist es vorteilhaft, die Elemente hintereinander zu einer Kette zu schalten, um möglichst starke Stromintensität zu erhalten.

Man kann aber eine Reihe von Elementen auch anders verbinden, nämlich so, daß man alle Kupferplatten miteinander verbindet und ebenso alle Zinkplatten. Eine solche Anordnung ist in Fig. 43 dargestellt. Man sagt dann, die Elemente seien nebeneinander geschaltet oder parallel geschaltet. Hier sind die Verhältnisse ganz anders. Alle

die Kupferzylinder bilden zusammen eine große Kupfermasse und alle die Zinkzylinder eine große Zinkmasse, die der Kupfermasse gegenübersteht. Die elektromotorische Kraft hängt aber, wie wir wissen, gar nicht von der Größe der Kupfer- und Zinkmassen ab, sie ist also in dieser Kettenanordnung einfach gleich der eines einzigen Daniells. Die elektromotorische Kraft wird also durch eine derartige Anordnung von Elementen nicht erhöht. Aber der innere Widerstand dieser Kette ist ein kleinerer als der eines einzigen Daniells. Denn denkt man sich alle Flüssigkeiten und Metalle zusammen in einem Gefäß, so ist der Querschnitt der Flüssigkeiten, durch den der Strom fließt, jetzt 8mal so groß wie bei einem Daniell. Folglich ist der innere Widerstand

Fig. 43.



dieser Kette bloß der achte Teil von dem inneren Widerstand eines Daniells. Verbindet man jetzt die Pole dieser Kette (die in der Figur rechts oder links mit + oder — bezeichnet sind) durch den äußeren Verbindungsdraht, so hat man

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniells}}{\text{Drahtwiderstand} + \frac{1}{8} \text{ innerer Widerstand eines Daniells}}$$

Jetzt sind die Verhältnisse gerade die entgegengesetzten wie früher, bei Hintereinanderschaltung der Elemente.

Ist nämlich der Drahtwiderstand klein gegen den inneren Widerstand der Kette, so ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniells}}{\frac{1}{8} \text{ innerer Widerstand eines Daniells}}$$

also die Stromstärke nahezu 8mal so groß wie bei einem Daniell. Ist dagegen der Drahtwiderstand sehr groß, so ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniells}}{\text{Drahtwiderstand}}$$

Dann ist also die Stromstärke nahezu dieselbe wie bei einem einzigen Daniell. Man gewinnt also dann gar nichts an Stromstärke.

Wir haben danach die beiden Regeln:

Ist der Widerstand des äußeren Stromkreises sehr groß, so ist es vorteilhaft, die Elemente hintereinander zu schalten; ist er sehr klein, so ist es vorteilhaft, sie nebeneinander zu schalten, um möglichst große Stromstärken zu erhalten.

Ist der Widerstand des Drahtes nicht sehr groß und auch nicht sehr klein gegen den inneren Widerstand eines Elements, so kann man

die Elemente teils hintereinander, teils nebeneinander schalten, wie in Fig. 44 und 45 an zwei Beispielen dargestellt ist.

In Fig. 44 sind immer je 2 Daniell hintereinander und 4 nebeneinander geschaltet. Es ist also der innere Widerstand dieser

Kette $= \frac{2}{4} =$ dem halben Widerstand eines einzelnen Elements, denn

die Flüssigkeit hat die doppelte Länge und den vierfachen Querschnitt von der in einem einzigen Element. Die elektromotorische Kraft ist dabei gleich 2 Daniell, weil nur je 2 Elemente hintereinander geschaltet sind. Dagegen in Fig. 45 sind 4 Elemente hintereinander und je 2 parallel geschaltet. Der innere Widerstand dieser Kette ist

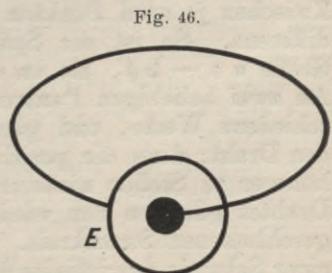
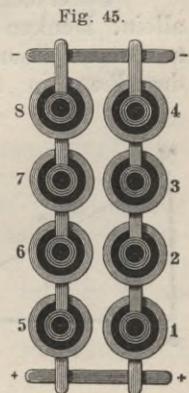
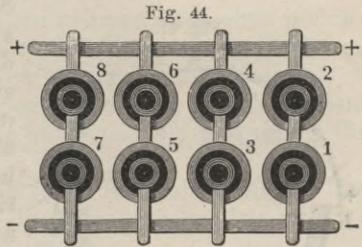
also $\frac{4}{2}$, d. h. doppelt so groß, wie der eines einzelnen Elements, und

die elektromotorische Kraft ist gleich der von 4 Daniell.

Wenn man ein Element oder eine Kette durch einen sehr kleinen äußeren Widerstand, z. B. durch einen kurzen dicken Draht, schließt, so sagt man, das Element oder die Kette ist kurzgeschlossen. Die Stromstärke wird dann in jedem Fall die größte, die das betreffende Element überhaupt liefern kann, sie ist nämlich gleich der elektromotorischen Kraft des Elementes selbst, dividiert durch seinen Widerstand. Man sieht, daß, um bei der Kurzschließung aus einem Element eine recht hohe Stromstärke erhalten zu können, es vorteilhaft ist, daß das Element einen sehr kleinen inneren Widerstand besitzt.

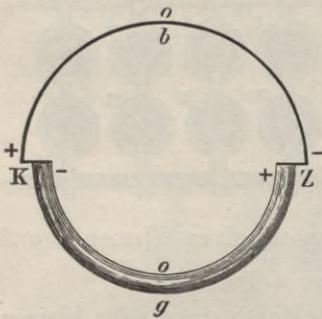
Wir hatten das Ohmsche Gesetz abgeleitet und bestätigt gefunden für den Fall, daß ein galvanisches Element oder eine Kette von Elementen durch einen äußeren Draht geschlossen war. Wir hatten dabei vorausgesetzt, daß der Draht ein einfacher sei, daß er keine Verzweigungen enthalte. Das einfache Schema eines solchen geschlossenen Stromkreises ist also in Fig. 46 dargestellt. Darin ist E das Element, und der Verbindungsdraht geht von dem einen Pol des Elements zum anderen. Er kann dabei durch viele Apparate gehen, aber es ist immer ein einziger unverzweigter Draht.

Wir können, um die Verhältnisse in einem solchen einfachen Stromkreis näher zu untersuchen, das Schema in Fig. 47 benutzen. Dasselbe stellt in seinem unteren Teil Z g K eine mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Glasröhre dar, der obere



Teil ZbK stellt einen Draht dar. Bei Z befindet sich eine Zinkplatte, bei K eine Kupferplatte. Die Kupferplatte hat positive Spannung, die Zinkplatte eine ebenso große negative Spannung. Auf dem Draht KbZ herrscht an allen Stellen eine andere Spannung, und zwar nimmt dieselbe von dem positiven Wert bei K allmählich durch Null hindurch ab bis zu dem negativen Werte bei Z.

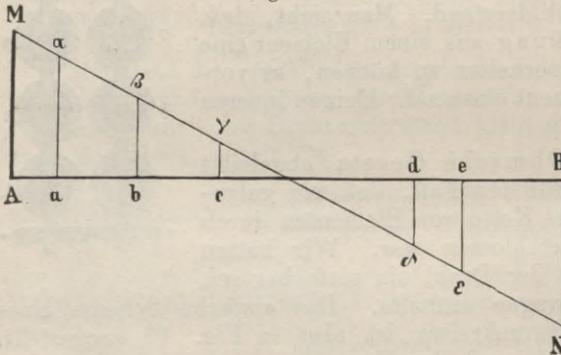
Fig. 47.



An einer Stelle ist also die Spannung Null und zwar, wenn der Draht aus einem überall gleich dicken Metalldraht besteht, bei b, gerade in der Mitte zwischen K und Z. Entsprechendes findet in der unteren Hälfte der Figur statt. Die an K anliegende Schicht der Schwefelsäure hat negative, die an Z anliegende positive Spannung, und in der unteren Hälfte nimmt also die Spannung von Z bis K ab. Auch hier ist an einem Punkt in der Mitte, etwa bei g, die Spannung Null. An den Metallen selbst findet ein Sprung der Spannung statt, hervorgebracht durch die elektrische Scheidungskraft.

Untersuchen wir nun die Verteilung der Spannung auf dem Draht allein. Denken wir uns denselben, wie in Fig. 48, gerade gestreckt und aus einem homogenen Metall bestehend, AB, so herrscht am Anfang desselben in A die positive Spannung, die wir uns durch die

Fig. 48.



Strecke AM repräsentiert denken können, am Ende B die ebenso große negative Spannung, die durch die Linie BN repräsentiert sei. An den zwischenliegenden Stellen a b c d e hat die Spannung dann die Werte, deren Größe durch die Linien a α , b β , c γ , d δ , e ϵ dargestellt ist. In der Mitte des Leiters ist die Spannung Null.

Zwischen je zwei Punkten des Drahtes herrscht also eine Spannungsdifferenz. So ist die Spannung in a größer als die in b um die Größe $a \alpha - b \beta$, die an a größer als die an e um $a \alpha + e \epsilon$ u. s. w. An zwei beliebigen Punkten des Drahtes hat also die Spannung verschiedene Werte, und gerade deswegen strömt die Elektrizität durch den Draht; denn die positive Elektrizität bewegt sich stets von Stellen höherer zu Stellen niedriger Spannung. In jedem Stück eines solchen Drahtes gilt also nun wieder ein ähnliches Gesetz, wie in dem ganzen geschlossenen Stromkreis. Die Stromstärke, d. h. die Menge der in einer Sekunde durchfließenden Elektrizität in einem Stück eines Drahtes,

hängt ab von dem Spannungsunterschied an den beiden Enden dieses Stückes und von dem Widerstand dieses Stückes:

$$\text{Stromstärke in einem Drahtstück} = \frac{\text{Spannungsunterschied an seinen Endpunkten}}{\text{Widerstand des Drahtstückes}}.$$

In einem einfach geschlossenen, unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke überall dieselbe, die Spannungen nehmen dann eben gleichmäßig auf dem ganzen Draht ab. Besteht der Verbindungsdraht aus mehreren aneinander gesetzten Stückchen von verschiedenem Material, so kann man sich diese durch einen einzelnen Draht von gleich großem Widerstand ersetzt denken und auf dieselbe Weise die Spannung für jeden Punkt bestimmen.

Aus dem Ohmschen Gesetz läßt sich noch folgende einfache Betrachtungsweise ableiten, die für viele Fälle sehr zweckmäßig ist. Da für jedes Stück eines Drahtes das Gesetz gilt

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannungsunterschied an seinen Endpunkten}}{\text{Widerstand des Drahtstückes}},$$

so kann man auch umgekehrt sagen: der Unterschied der Spannungen an den Endpunkten des Drahtstückes ist gleich dem Produkt aus seinem Widerstand und der Stromstärke, oder die Spannung am Ende eines Drahtstückes ist kleiner als am Anfang, und zwar um das Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand des Drahtstückes. Dies kann man zweckmäßig so ausdrücken: beim Durchströmen durch ein Drahtstück verliert der Strom an Spannung, erleidet er einen Spannungsverlust, welcher gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Drahtstückes ist. Die Überwindung eines jeden Widerstandes durch den Strom ist also mit einem bestimmten Spannungsverlust verbunden, der um so größer ist, je größer der überwundene Widerstand ist. Auf dem Wege bc in Fig. 48 erleidet also der Strom einen Spannungsverlust, welcher gleich $b\beta - c\gamma$ ist, auf dem Wege ae einen Verlust der Spannung, welcher gleich $a\alpha + e\varepsilon$ ist.

Am Zink selbst und am Kupfer selbst erfährt die Spannung durch die elektrische Scheidekraft eine sprungartige Änderung. Vom Zink zur angrenzenden Flüssigkeit findet eine Spannungszunahme und ebenso von der angrenzenden Flüssigkeit zum Kupfer eine solche infolge der Scheidungskräfte statt. Fließt nun der Strom vom Kupfer außen zum Zink und vom Zink innen durch die Flüssigkeiten zum Kupfer, so muß der Spannungsverlust, den er auf dem ganzen Wege erfährt, gleich sein dem Spannungsgewinn, den er am Zink und am Kupfer durch die Scheidungskräfte bekommt. Also muß der Spannungsverlust auf dem äußeren Verbindungsdraht + Spannungsverlust im Innern des Elements = Spannungsgewinn am Zink + Spannungsgewinn am Kupfer sein. Letztere beiden Spannungszunahmen zusammen sind aber nichts anderes, als was wir die elektromotorische Kraft des Elementes genannt haben. Und wir können daher sagen, die elektromotorische Kraft der Kette ist, wenn der Strom fließt, gleich dem Spannungsverlust im äußeren +

dem Spannungsverlust im inneren Stromkreis. Der Spannungsverlust im äußeren Stromkreis ist aber nichts anderes als der Spannungsunterschied an den Polen des geschlossenen Elementes. Man bezeichnet ihn gewöhnlich als die Klemmenspannung. Und wir können daher auch unseren Satz so ausdrücken: die elektromotorische Kraft eines Elementes ist gleich der Klemmenspannung + dem Spannungsverlust im Innern des Elementes. Daraus sieht man, daß die Klemmenspannung an einem geschlossenen Element kleiner ist als die elektromotorische Kraft des Elementes, und zwar kleiner um den Betrag des Spannungsverlustes im Inneren des Elementes, d. h. um das Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand.

Bisher betrachteten wir immer einen einfachen geschlossenen Kreis, in dem der Strom fließt.

Man braucht aber für elektrische Untersuchungen und Anwendungen oft einen allgemeineren Fall. Man läßt nämlich den Strom durch eine verzweigte Leitung gehen, wie sie in einem einfachen Falle in Fig. 49 dargestellt ist. Darin kommt der elektrische Strom in der Richtung des Pfeiles aus dem Element Q,

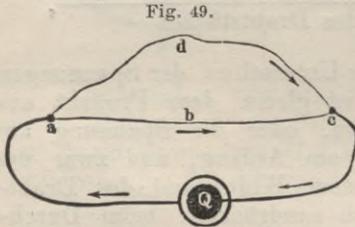


Fig. 49.

fließt zuerst wie gewöhnlich bis a, dann aber verzweigt er sich und fließt sowohl durch d als durch b in der Richtung der Pfeile, bis er nach c kommt. Dort vereinigen sich die beiden Stromzweige wieder und nun fließt er wie früher zum Element zurück. Auch für diesen Fall

der Stromverzweigung lassen sich die Gesetze aus der oben angeführten Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes ableiten.

Zunächst ergibt sich hierbei, daß die Stromstärke nun nicht mehr in der ganzen Leitung dieselbe ist, sondern daß vielmehr in den verschiedenen Zweigen des Stromkreises verschiedene Stromstärken herrschen. Am Punkt a ist eine bestimmte Spannung vorhanden, am Punkt c eine andere. Durch den Spannungsunterschied zwischen a und c wird die Elektrizität sowohl durch a b c, als durch a d c getrieben. Es ist folglich:

$$\text{die Stromstärke in a b c} = \frac{\text{Spannungsunterschied zwischen a und c}}{\text{Widerstand von a b c}}$$

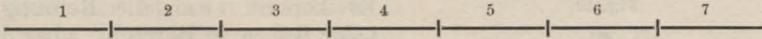
$$\text{und die Stromstärke in a d c} = \frac{\text{Spannungsunterschied zwischen a und c}}{\text{Widerstand von a d c}}$$

Daraus folgt, daß sich die Stromstärken in den beiden Zweigen umgekehrt wie ihre Widerstände verhalten. In dem unverzweigten Teil der Leitung a Q c ist die Stromstärke die Summe von den beiden Zweigstromstärken. Haben also z. B. die beiden Zweige gleichen Widerstand, so fließt durch jeden ein Strom, dessen Stärke bloß die Hälfte von der des Hauptstromes ist. Hat z. B. das Stück a d c in der Figur einen doppelt so großen Widerstand wie das

Stück a b c, so ist der Strom, der durch a d c fließt, nur halb so stark wie der, der durch a b c fließt, und die Summe der Stromstärken in den beiden Zweigen ist gleich der Stromstärke in dem ungeteilten Stück des Stromes.

Der Widerstand der beiden Zweige des Leiters zusammen gegen den Strom ist hier nicht etwa gleich der Summe der Widerstände der beiden Leiter, sondern viel kleiner, kleiner als der Widerstand jedes einzelnen Leiters allein genommen. Man kann das sofort erkennen,

Fig. 50.

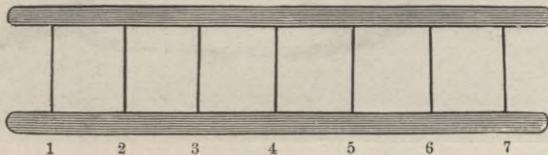


wenn man z. B. annimmt, die beiden Zweige seien gleich lang und haben gleichen Querschnitt. Dann fließt der Strom von a aus durch beide Zweige zu gleicher Zeit, und dies ist dasselbe, als ob nur ein einziger Leiter von a bis c ginge, aber mit einem doppelt so großen Querschnitt. Der Widerstand dieses Leiters ist dann, wie wir wissen, nur die Hälfte des früheren. Also diese beiden gleich langen und gleich dicken Zweige des Leiters haben zusammen nur einen Widerstand, der gleich der Hälfte des Widerstandes jedes einzelnen Leiters ist. Das ist ein sehr wichtiger Satz. Man sagt von zwei oder mehr Leitern, deren Anfangspunkte alle miteinander verbunden sind und deren Endpunkte auch miteinander verbunden sind, sie seien nebeneinander geschaltet oder auch parallel geschaltet, während man von Leitern, die so verbunden sind, daß der Anfangspunkt des einen mit dem Endpunkt des anderen verbunden ist, sagt, sie seien hintereinander geschaltet oder in Serie geschaltet. Diese Bezeichnungen sind ganz analog dem oben erwähnten bei der Verbindung von galvanischen Elementen.

Haben wir also z. B. 7 Drähte, alle von gleichem Widerstand, und verbinden wir sie wie in Fig. 50, so ist der Widerstand dieser zusammenhängenden Drähte der siebenfachen von jedem einzelnen. Die Drähte sind dabei hintereinander geschaltet.

Verbinden wir aber die Drähte wie in Fig. 51, so ist der Widerstand der 7 Drähte zusammen gegen den Strom bloß $\frac{1}{7}$ von dem jedes

Fig. 51.



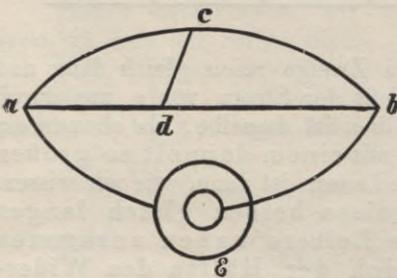
einzelnen, aber bloß $\frac{1}{49}$ von dem in Fig. 50. Die Drähte sind dabei nebeneinander geschaltet.

Man kann sich dieses Verhalten wieder leicht klar machen, wenn man an die Bewegung einer wirklichen Flüssigkeit, des Wassers, denkt.

Läßt man aus einem Reservoir Wasser durch eine Röhre von 5 m Länge und einem bestimmten Querschnitt ausfließen, so wird die in einer Minute ausfließende Wassermenge abhängen von der Reibung in der Röhre, die wir mit dem Widerstand eines Leiters identifizieren können. Hat die Röhre statt 5 m die doppelte Länge, 10 m, so ist die Reibung auch die doppelte, es fließt also weniger Wasser in der Minute aus.

Hat man dagegen statt einer Ausflüßröhre von 10 m Länge zwei nebeneinander von je 5 m Länge, so fließt durch diese die doppelte Wassermenge aus als durch eine. Es kommt zwar die Reibung bei jeder Röhre in Betracht, aber durch zwei gleich lange und dicke Röhren fließt eben die doppelte Wassermenge in der Minute aus.

Fig. 52.



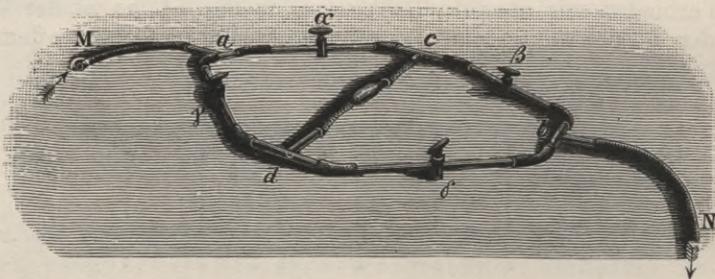
schaltet, desto kleiner wird der Widerstand, desto größer die Stromstärke.

Man kann die Stromverzweigung noch komplizierter machen. Man kann die beiden Zweige einer Leitung wieder durch einen Draht miteinander verbinden, wie in Fig. 52.

Hier sind die beiden Zweige a b und a c b, die sich an das Element E anschließen, noch durch einen Draht c d verbunden. Diesen Draht nennt man die Brücke und die ganze Verzweigung, die sehr wichtig ist, „Brückenverzweigung“.

Wenn man sich ein eben solches System aus Röhren gebildet denkt, wie in Fig. 53, durch welche Wasser strömt, so kann man eine wich-

Fig. 53.



tige Eigenschaft dieser Anordnung sofort erkennen. Durch den Schlauch bei M läßt man aus der Wasserleitung immer nach a hin Wasser strömen, welches durch die Röhren a c und c b einerseits und durch die Röhren a d und d b andererseits nach b fließt, von wo es durch den Schlauch N

abfließt. Dann sucht in dem Verbindungsstück $c d$ zu gleicher Zeit das Wasser von c nach d nach unten und von d nach c nach oben zu fließen. Man kann nun offenbar die Stärke der Strömung in den vier Röhren durch die Hähne $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ so regulieren, daß in dem Rohr $c d$ das Wasser stillsteht, sich gar nicht bewegt, daß also z. B. ein leichter Flügel, der in dem Glasrohr zwischen c und d angebracht ist, in Ruhe bleibt.

Ganz ebenso ist es nun bei elektrischen Strömen. In der Brücke nämlich treffen sich, wie die Pfeile in Fig. 54 andeuten, zwei Ströme von entgegengesetzter Richtung, die sich gegenseitig schwächen. Von a c fließt der Strom nach unten in die Brücke hinein, von $a d$ nach oben. Es ist daher die Möglichkeit vorhanden, daß durch die Brücke ein Strom von der Stärke Null, d. h. gar kein Strom fließt, während sonst das ganze System von Strömen durchflossen ist. Es wird diese Möglichkeit davon abhängen, wie sich die Widerstände in den vier Teilen $a d$, $a c$, $b d$ und $b c$ zueinander verhalten, ganz so, wie es bei der Wasserströmung auf die Stellung der Hähne ankommt. Dies läßt sich hier wieder aus unserer Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes für Drahtstücke genauer präzisieren.

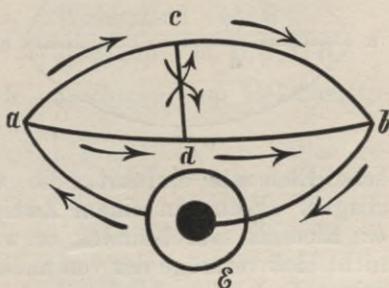
In welchem Fall wird durch die Brücke kein Strom fließen?

Wenn durch die Brücke $c d$ kein Strom fließen soll, so muß die Spannung an c gleich der Spannung an d sein, denn nur dann fließt kein Strom durch $c d$. Daher muß dann auch der Spannungsverlust auf dem Wege $c b$ gleich dem auf dem Wege $a d$, und der Spannungsverlust auf dem Wege $c b$ gleich dem auf dem Wege $d b$ sein. Da nun durch die Brücke kein Strom fließen soll, so können wir uns diesen Draht ganz entfernt denken und daher muß auch die Stromstärke in $a c$ gleich der in $c b$ sein, und ebenso die in $a d$ gleich der in $d b$. Daraus ergibt sich sofort, daß, wenn in der Brücke kein Strom fließen soll, die Beziehung bestehen muß:

$$\frac{\text{Widerstand von } a c}{\text{Widerstand von } a d} = \frac{\text{Widerstand von } c b}{\text{Widerstand von } d b}$$

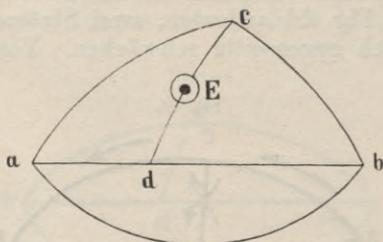
Man erkennt daraus leicht, daß es möglich ist, auf diese Weise den Widerstand eines Drahtes mit dem eines anderen zu vergleichen, eine Methode, die wir im folgenden zu beschreiben haben werden. Sie ist zuerst von Wheatstone angegeben worden, und daher heißt diese ganze Art von Stromverzweigung die Wheatstonesche Brücke. Die Wheatstonesche Drahtkombination läßt sich auch so auffassen, daß vier Punkte a, d, b, c je mit einem Leiter verbunden sind $a d$, $d b$, $b c$, $c a$. Die vier Punkte bilden dann die vier Ecken eines Vierecks, dessen Seiten eben $a d$, $d b$, $b c$ und $c a$ sind. Je zwei gegenüber-

Fig. 54.



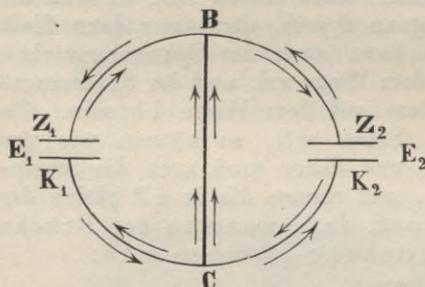
liegende Eckpunkte eines Vierecks werden nun durch die Diagonalen verbunden. Die eine Diagonale (zwischen c und d) ist also die Brücke, in der anderen Diagonale zwischen a und b befindet sich das Element. Wenn also die Widerstände der vier Seiten des Vierecks in dem oben eruierten Verhältnis stehen, so fließt in der einen Diagonale kein Strom, wenn in der anderen sich ein Element befindet. Die beiden

Fig. 55.



Diagonalen sind aber gleichwertig. Folglich können wir auch in die Brücke cd unser Element E bringen. Dann fließt unter den angegebenen Verhältnissen im Zweig a b kein Strom. Diese Anordnung der Wheatstoneschen Kombination, die oft benutzt wird, ist in Fig. 55 gezeichnet. Eine noch weitergehende Komplikation kann man in die Stromverzweigung dadurch einführen, daß man in einzelne Zweige noch galvanische Elemente einführt, die von sich aus auch wieder Ströme erzeugen. Wenn in einem Zweig eines verzweigten Stromkreises noch ein Element sich befindet, so wird die Elektrizität durch diesen Zweig nicht bloß vermöge des von außen herrührenden Spannungsunterschiedes seiner Endpunkte hindurchgetrieben, sondern auch durch die in ihm herrschende elektromotorische Kraft. Wirken der Spannungsunterschied und die elektromotorische Kraft nach derselben Richtung, so hängt die Stromstärke in diesem Zweig ab von der Summe dieser beiden

Fig. 56.



Größen. Wirken sie einander entgegen, so hängt die Stromstärke ab von ihrer Differenz und in beiden Fällen von dem Gesamtwiderstand des Zweiges. Ein Beispiel für diese Stromverzweigung ist in Fig. 56 gezeichnet. Darin sind $K_1 Z_1$ und $K_2 Z_2$ zwei Elemente, von denen wir annehmen wollen, daß das zweite eine kleinere elektromotorische Kraft, E_2 , hat als das erste, E_1 . Diese beiden Elemente seien nun so geschaltet, daß die positiven Pole K_1 und K_2 miteinander und ebenso die negativen Pole Z_1 und Z_2 miteinander verbunden sind. Außerdem sei zwischen zwei beliebigen Punkten B und C wieder eine Brücke angebracht. Die Pfeile zeigen, daß in den Zweigen BE_1C und BE_2C sich zwei Ströme entgegenfließen, und es wird daher die Möglichkeit vorhanden sein, daß in dem Zweig BE_2C mit kleinerer elektromotorischer Kraft die Stromstärke Null ist. Unter welchen Verhältnissen kann nun die Stromstärke im Zweige BE_2C gleich Null sein? Wenn das der Fall sein soll, dann muß der Spannungsunterschied an den Punkten B und C gerade gleich der

elektromotorischen Kraft E_2 sein. Daher muß die Stromstärke im Zweige BC gleich der elektromotorischen Kraft von E_2 dividiert durch den Widerstand von BC sein. Andererseits aber können wir, da im Zweige BE_2C kein Strom fließen soll, uns diesen jetzt ganz fortgelassen denken. Dann fließt im geschlossenen Kreise BE_1CB ein einziger Strom, es muß also die Stromstärke in BC nach dem Ohmschen Gesetz auch gleich der elektromotorischen Kraft von E_1 dividiert durch den ganzen Widerstand $BE_1C + BC$ sein.

So findet man, daß dann die elektromotorischen Kräfte von E_2 und E_1 sich verhalten müssen wie die Widerstände einerseits von BC , andererseits von BE_1CB . Es ergibt sich also

$$\frac{\text{elektromotorische Kraft von } E_2}{\text{elektromotorische Kraft von } E_1} = \frac{\text{Widerstand von } BC}{\text{Widerstand von } BE_1CB}$$

Daraus werden wir später eine Methode entnehmen, um elektromotorische Kräfte miteinander zu vergleichen.

Auf dieselbe Weise, wie es in diesen drei speziellen Fällen geschehen ist, kann man in jedem beliebig komplizierten Fall der Stromverzweigung sich in die Verhältnisse der Stromstärken eine Einsicht verschaffen. Man braucht nur immer für jeden Zweig eines Stromkreises den Spannungsverlust nach der oben gegebenen Definition zu bestimmen. Daß man auf diese Weise die Eigenschaften der verzweigten Ströme finden kann, hat zuerst Kirchhoff gezeigt.

Mit den bisher besprochenen Gesetzen sind die Grundgesetze des galvanischen Stromes, soweit sie seine Stärke, deren Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft der Kette und vom Widerstand des gesamten Schließungskreises betreffen, vollkommen bekannt. Auf diesen Gesetzen basieren die quantitativen Anwendungen des elektrischen Stromes. Um nun aber nicht bloß im allgemeinen qualitativ, sondern im speziellen quantitativ mit Stromstärken, elektromotorischen Kräften und Widerständen rechnen zu können, sind zuerst Meßmethoden für diese elektrischen Größen anzugeben.

4. Kapitel.

Elektrische Apparate und Messungen.

Drei Größen sind es, die bei jedem galvanischen Strom in Betracht kommen, die elektromotorische Kraft, der Widerstand und die Stromstärke. Um mit diesen so einfach und sicher operieren zu können, wie wir es etwa mit Längen, mit Gewichten, mit der Zeit tun, ist es notwendig, daß wir diese drei Größen immer in bestimmten Einheiten ausdrücken und daß wir sie ebenso leicht und sicher messen können, wie wir Längen, Gewichte, Zeiten messen. So wie wir dazu besondere Apparate brauchen, Metermaßstäbe, Wagen, Uhren, so brauchen wir natürlich auch für die elektrischen Messungen gewisse Apparate, die zunächst besprochen werden sollen.

Zuvörderst haben wir Instrumente nötig, welche das Vorhandensein eines elektrischen Stromes anzeigen, ohne daß eine genaue Messung seiner Stärke nötig ist, und insbesondere Instrumente, welche schon sehr schwache Ströme anzeigen. Solche Apparate nennt man, wie schon früher erwähnt, Galvanoskope. Sie beruhen zum Teil darauf, daß ein elektrischer Strom, der in Windungen um eine Magnetnadel herumgeführt wird und zwar parallel zu ihr, diese Magnetnadel aus ihrer gewöhnlichen Nord-Südlage herausdreht. In je mehr Windungen der Strom um die Magnetnadel herumgeführt ist und je näher der Strom bei der Nadel vorbeifließt, um so stärker ist diese Wirkung. Man braucht daher bloß um eine Magnetnadel einen Draht einmal oder mehreremal recht nahe herumzuwinden und dann einen Strom durch den Draht zu senden, so wird auch bei schwachen Strömen die Magnetnadel kräftig abgelenkt und zeigt die Anwesenheit des Stromes an.

Ein sehr brauchbares Galvanoskop, bei dem der Magnet sich um eine horizontale Achse drehen kann, zeigt Fig. 57, ein sogenanntes Vertikalgalvanoskop. Man sieht in der Figur nebenbei den Magnetstab M besonders gezeichnet, der mit der Schneide α auf eine Unterlage im Innern des Galvanoskops aufgesetzt wird und so sich um eine horizontale Achse drehen kann. An dem Magneten ist ein Zeiger A, gewöhnlich aus Aluminium, befestigt. Das eigentliche Galvanoskop besitzt einen Rahmen B, der mit einem Draht, parallel zum Magnetstab, vielfach umwunden ist. Die Enden des Drahtes gehen in die Klemmschrauben b und e. Innerhalb der Drahtwindungen ist der Magnet so aufgesetzt, daß er um eine horizontale Achse drehbar ist, und sowie

ein Strom durch die Drahtwindungen geht, dreht sich der Magnet und der Zeiger A spielt vor der Skala C.

Bei anderen Galvanoskopen dreht sich die Nadel über einem horizontalen Kreis. Die Drahtwindungen, durch die der Strom gesendet wird, sind dabei, wie es Fig. 58 zeigt, auf Rollen A und B zu beiden Seiten der Nadel aufgewickelt, die auch wieder einen Zeiger N trägt.

Solche Galvanoskope mit vielen Windungen nennt man auch Multiplikatoren. Um Luftströmungen zu vermeiden, sind die Galvanoskope gewöhnlich mit einem Glasgehäuse umgeben.

Diejenigen Galvanoskope, die nicht bloß zum Anzeigen der Ströme, sondern zu wirklichen Messungen der Stromstärke benutzt werden können, nennt man Galvanometer. Man kann diese nach demselben Prinzip konstruieren, wie die eben erwähnten Galvanoskope, nämlich, daß man durch den Strom eine Magnetenadel ablenken läßt, oder man kann, wie bei dem S. 62 angeführten Federgalvanometer, die Wirkung einer Drahtrolle auf einen Eisenstab benutzen, welche darin besteht, daß der Eisenstab in die Hohlung der Drahtrolle hineingezogen wird. Meistenteils werden jetzt aber die Galvanometer so konstruiert, daß man die Drehungen benutzt, die eine bewegliche Drahtrolle, in welcher der zu untersuchende Strom fließt, unter dem Einfluß eines starken Magneten ausführt.

Nach diesem Prinzip, das hier nur kurz angedeutet ist, in einem späteren Kapitel (Kapitel 7) aber ausführlicher dargelegt wird, ist ein Meßinstrument konstruiert, das in Fig. 59 in seiner äußeren Ansicht abgebildet ist, und das von Siemens & Halske unter dem Namen „Präzisionsmilliampèremeter“ verbreitet wird. Der äußere Anblick zeigt nur einen Schutzkasten, welcher einen Aus-

Fig. 57.

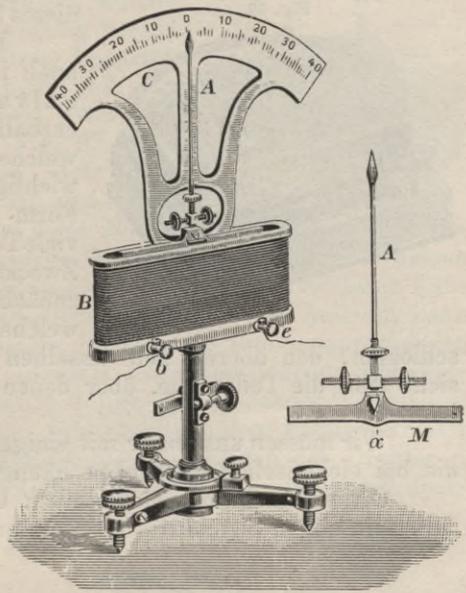
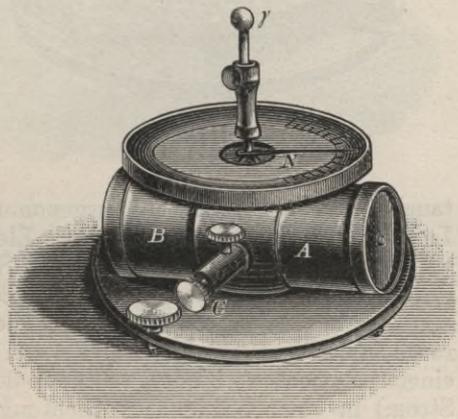
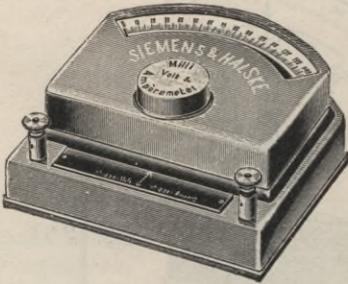


Fig. 58.



schnitt trägt, durch den eine Skala von 0 bis 150 Teilstrichen und ein bei Null stehendes Ende des Zeigers sichtbar ist. Das Instrument ist so eingerichtet, daß jeder Teilstrich einem Milliampère entspricht. In die beiden vorn am Gehäuse sichtbaren Klemmen werden die Drähte eingeschaltet, durch welche der zu messende Strom fließt, und das Instrument erlaubt sofort die Stärke dieses Stromes in Milliampères abzulesen.

Fig. 59.

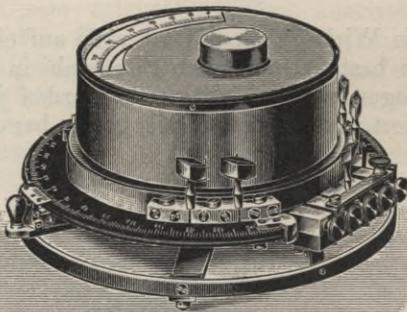


Ein solches Milliampèremeter ist auch in dem sogenannten Universalgalvanometer von Siemens & Halske enthalten, wie man in Fig. 60 sieht, welche die allgemeine Ansicht dieses wichtigen Instrumentes in seiner neuen Form zeigt. In dem Instrument sind viele Teile enthalten, welche verschiedenen Zwecken dienen. Uns interessiert hier zunächst nur das Galvanometer desselben, welches, in eine Messingbüchse eingeschlossen, den oberen Teil desselben bildet. In dem Ausschnitt oben sieht man die Teilstriche, über denen der Zeiger des Instrumentes sich bewegt.

Wir müssen uns ferner mit einigen Hilfsapparaten vertraut machen, die bei elektrischen Versuchen häufig gebraucht werden.

Oft will man bei elektrischen Untersuchungen den galvanischen Strom in einem Stromkreis rasch unterbrechen, ohne langwierige Prozeduren, vielmehr durch eine einzige Bewegung. Die einfachste Vorrichtung dazu besteht, wie Fig. 61 zeigt, aus einem kleinen Brett aus Holz oder Paraffin, in welches zwei Vertiefungen (a und b) gebohrt sind, die mit Quecksilber gefüllt werden. In die Quecksilbernäpfe tauchen Drähte ein, die mit den Klemmschrauben c und d verbunden sind. Ein mit einem Stück Kautschukschlauch umgebener Kupferbügel e kann mit seinen Enden in die Quecksilbernäpfe getaucht oder aus ihnen herausgenommen werden. Führt man also die Leitung von dem einen Pol eines Elementes nach c und von d weiter zu dem anderen Pol, so wird der Strom durch Einsetzen des Bügels geschlossen, durch Herausnehmen geöffnet.

Fig. 60.



ferner ist es oft erwünscht, die Stromrichtung in einem Apparat rasch umkehren zu können. Wenn man z. B. ein Galvanoskop mit einem Element verbindet, so fließt der Strom (d. h. immer der positive Strom) in einer bestimmten Richtung durch die Windungen des Gal-

vanometers. Führt man also die Leitung von dem einen Pol eines Elementes nach c und von d weiter zu dem anderen Pol, so wird der Strom durch Einsetzen des Bügels geschlossen, durch Herausnehmen geöffnet.

Ferner ist es oft erwünscht, die Stromrichtung in einem Apparat rasch umkehren zu können. Wenn man z. B. ein Galvanoskop mit einem Element verbindet, so fließt der Strom (d. h. immer der positive Strom) in einer bestimmten Richtung durch die Windungen des Gal-

vanoskops, je nachdem man den positiven Pol mit dem einen oder mit dem anderen Ende der Windungen verbunden hat. Will man den Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Windungen fließen lassen, so muß man die Verbindung der Pole wechseln. Dies kann man zwar durch Aus- und Einschrauben der Drähte erreichen, was aber Mühe und Zeit kostet. Man hat deshalb Apparate konstruiert, welche diese Umkehrung durch eine Bewegung vorzunehmen gestatten. Man nennt diese Apparate Kommutatoren. Der einfachste und am meisten benutzte Apparat für diesen Zweck ist der Pohlsche Kommutator, Fig. 62. Er besteht aus einer Unterlage von Holz oder Paraffin, auf welcher sechs Näpfcchen stehen, die mit Quecksilber gefüllt sind. In diese Näpfcchen taucht nun ein beweglicher Bügel ein, der aus einem Glasstab *q* besteht, an dessen beide Enden je ein metallener Dreifuß angekittet ist. Die mittleren Füße tauchen in die mittleren Quecksilbernäpfcchen, von den äußeren kann bald das eine Paar, bald das andere Paar in die ihm entsprechenden Näpfcchen eingetaucht werden. Je zwei gegenüberliegende Ecknäpfcchen *dg* und *cf* sind durch Drähte *h* und *i* miteinander verbunden.

Um den Apparat zu benutzen, führt man von dem Element Drähte nach den Näpfcchen *b* und *e*, während man die Enden des Drahtes *r*, in welchem der Strom rasch umgekehrt werden soll, in die Quecksilber-

Fig. 61.

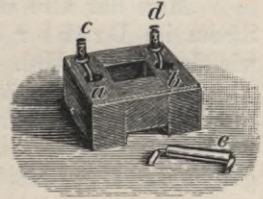
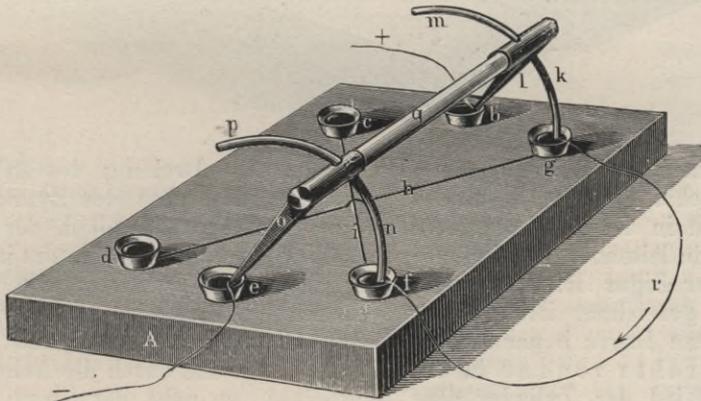


Fig. 62.



näpfcchen *f* und *g* taucht. Dann sind, je nach der Lage des Bügels, die Näpfe *b* und *e* mit den Näpfen *g* und *f* entweder direkt oder übers Kreuz verbunden. Bei der in der Figur gezeichneten Lage des Bügels ist nun der Weg des Stromes folgender:

Vom positiven Pol des Elementes nach *b*, durch *g*, dann durch den Draht *r* in Richtung des Pfeiles nach *f*, nach *e* und von dort zum negativen Pol des Elementes.

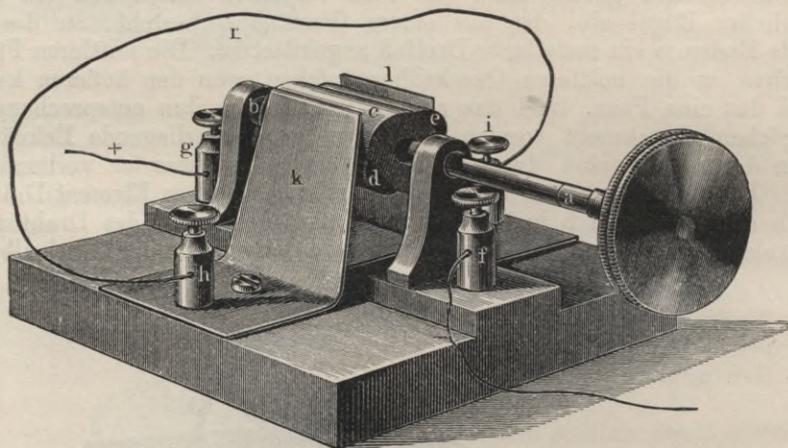
Legt man aber jetzt den Bügel um, so ist der Weg des Stromes folgender:

Vom positiven Pol des Elementes nach b, durch c und den Draht i nach f, durch den Draht r entgegen der Richtung des Pfeiles nach g, dann durch den Draht h nach d und e, und von dort zum negativen Pol des Elementes.

Man hat also durch bloßes Umlegen des Bügels bewirkt, daß der Strom im Draht r das eine Mal in entgegengesetzter Richtung floß, wie das zweite Mal.

Ein anderer häufig benutzter Kommutator ist der in Fig. 63 abgebildete Foucaultsche. Seine Wirkungsweise beruht darauf, daß zwei Metallwülste e und d, die sich auf einem Ebonitzylinder c befinden, gegen die Metallbleche l und k gedrückt werden und zwar entweder

Fig. 63.



e gegen l und d gegen k, oder, durch eine Drehung des Zylinders, umgekehrt e gegen k und d gegen l. Die Achse des Zylinders ist nämlich in der Mitte unterbrochen und ein Teil steht mit d, der andere mit e in leitender Verbindung. Die Wirkung des Kommutators ist sonst aus der Figur leicht verständlich. Liegt der Zylinder, wie in der Figur gezeichnet ist, so geht der positive Strom von g durch das metallene Lager b nach dem Wulst e, dann durch l zu i und durch den Draht r von i zu h, dann durch k zu d und durch die Achse zu f.

Wird der Zylinder aber umgedreht, so geht der Strom von g durch b zu e und von e durch k zu h, dann durch den Draht r von h zu i und dann durch l, d, a, f weiter zum Element zurück.

Im Draht r hat also der Strom das eine Mal die entgegengesetzte Richtung wie das andere Mal.

Ist der Zylinder so gestellt, daß e und d gerade sich oben und unten befinden, also nicht gegen k und l drücken, so ist der Strom ganz unterbrochen, da der Zylinder sonst ganz nichtleitend ist.

Mit diesen experimentellen Hilfsmitteln ausgestattet, gehen wir

nun zunächst zur näheren Untersuchung des elektrischen Widerstandes der Körper.

Der Widerstand eines Drahtes hängt, wie wir oben S. 65 sahen, ab von seiner Länge, seinem Querschnitt und von seinem Material. Es hat also ein jeder Stoff seine bestimmte Zahl, seinen spezifischen Widerstand, welcher angibt, wievielmals der Widerstand eines Drahtes von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt aus diesem Material größer und kleiner ist, als der Widerstand z. B. einer Quecksilbersäule von derselben Länge und demselben Querschnitt. Diese Zahl ist der spezifische Widerstand der betreffenden Substanz, bezogen auf Quecksilber. Das Umgekehrte des betreffenden Widerstandes nennt man die spezifische Leitungsfähigkeit (ebenfalls bezogen auf Quecksilber). Ist also z. B. der spezifische Widerstand von Aluminium 0,027, so ist die spezifische Leitungsfähigkeit desselben $\frac{1}{0,027} = 37$, d. h. Aluminium leitet den Strom 37mal so gut wie Quecksilber.

In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Widerstände und die spezifischen Leitungsfähigkeiten einer Reihe von festen Leitern angegeben, bezogen auf Quecksilber (Hg) als Einheit.

Namen der Leiter	Spezifischer Widerstand (Hg = 1)	Spezifische Leitungsfähigkeit (Hg = 1)
Quecksilber	1	1
Aluminium	0,027	37,0
Blei	0,2083	4,80
Eisen	0,1034	9,67
Gold	0,02183	45,8
Kupfer (rein)	0,0162	61,8
„ (käufl.)	0,01754	57,0
Nickel	0,1319	7,58
Platin	0,06944	14,4
Silber (weich)	0,01597	62,6
„ (hart)	0,01730	57,8
Wismut	1,389	0,72
Zink	0,0599	16,7
Zinn	0,1400	7,14

Je größer der spezifische Widerstand eines Metalls ist, desto schlechter leitet es den galvanischen Strom. Man sieht also aus diesen Zahlen, daß Silber den Strom am besten leitet, nachher kommt Kupfer und dann ordnen sich die anderen Stoffe in der Reihe ihrer spezifischen Leitungsfähigkeiten.

Wegen der praktischen Anwendungen ist noch der Widerstand einiger Kohlen und Metalllegierungen in der folgenden Tabelle angeführt.

Namen der Leiter	Spezifischer Widerstand (Hg = 1)	Spezifische Leitungsfähigkeit (Hg = 1)
Graphit	12,08	0,0828
Gaskohle	67,56	0,0148
Konstantan	0,53	1,90
Kruppin	0,90	1,12
Neusilber	0,3184	3,14
Nickelin	0,455—0,555	2,2—1,8
Rheotan	0,50	2,0
Patentnickel	0,364	2,75
Platinsilber	0,261	3,83
Mangankupfer 12proz.	0,460	2,194
Mangankupfer 30proz.	1,135	0,881
Nickelmangankupfer (Manganin)	0,498	2,007

Graphit und Gaskohle leiten den elektrischen Strom siebenhundert-, ja viertausendmal schlechter als Kupfer, trotzdem sind sie noch ganz gute Elektrizitätsleiter. Die gute Leitungsfähigkeit des Kupfers, die ja nur von der des Silbers etwas übertroffen wird, ist der Grund, warum man für den Durchgang von elektrischen Strömen meistens Kupferdrähte nimmt. Für lange Leitungen, für Telegraphenleitungen, ist das Kupfer allerdings zu teuer, und man bedient sich dann der Eisen- oder Bronzedrähte, deren Kosten viel geringer, deren Leitungsfähigkeit aber auch nur ungefähr der sechste Teil von der des Kupfers ist. In der jüngsten Zeit nimmt man wegen der hohen Kosten des Kupfers für starke Leitungen zuweilen Drähte aus Aluminium, welches zwar nur ungefähr halb so gut leitet wie Kupfer, dessen Preis aber, auch bei entsprechend größerem Querschnitt der Drähte, doch noch eine Ersparnis von zirka 40 Prozent gegenüber dem Kupfer gewährt.

Da ein Ohm gleich dem Widerstand einer Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und 1 qmm Querschnitt ist (oben S. 66), so können wir aus den obigen Zahlen entnehmen, wie groß der Widerstand (in Ohms) eines beliebigen Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt ist. Ein solcher Draht aus Quecksilber hat nämlich den Widerstand $\frac{1}{1,063} = 0,94073$ Ohm. Für jedes andere Material erhalten wir also den Widerstand eines Drahtes von solcher Länge und solchem Querschnitt, indem wir diese Zahl mit dem spezifischen Widerstand (bezogen auf Quecksilber) multiplizieren. Diese Zahlen sind in folgender Tabelle, abgerundet in gewöhnlichen Brüchen, enthalten, wodurch man rasch den Widerstand eines beliebigen Drahtes angenähert schätzen kann.

Widerstand (in Ohms) eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt.

Name:	Widerstand in Ohms abgerundet:
Aluminium	$\frac{1}{39}$
Blei	$\frac{1}{5}$
Eisen	$\frac{1}{12}$
Gold	$\frac{1}{19}$
Kupfer	$\frac{1}{61}$
Nickel	$\frac{1}{9}$
Platin	$\frac{1}{16}$
Silber (weich)	$\frac{1}{66}$
„ (hart)	$\frac{1}{62}$
Wismut	$1\frac{1}{5}$
Zink	$\frac{1}{18}$
Zinn	$\frac{1}{8}$
Neusilber	$\frac{1}{4}$
Nickelin	$\frac{1}{3}$
Manganin	$\frac{1}{3}$

Daraus kann man also z. B. leicht berechnen, daß ein Kupferdraht von 465 cm Länge und $\frac{1}{2}$ qmm Querschnitt den Widerstand von $\frac{4,65}{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{61} = 0,152$ Ohm hat, während ein Draht aus Manganin von derselben Länge und demselben Querschnitt den Widerstand $\frac{4,65}{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{3} = 3,1$ Ohm besitzt.

Wenn man die spezifischen Leitungsfähigkeiten der Substanzen bezogen auf Quecksilber kennt, so kann man auch, wie es jetzt gewöhnlich geschieht, den Widerstand angeben, den ein Würfel aus der betreffenden Substanz von 1 cm Seitenlänge besitzt. Man nennt einen solchen Würfel einen Zentimeterwürfel. Da dessen Länge 1 cm und dessen Querschnitt 1 qcm ist, so hat ein solcher Würfel, wenn er aus Quecksilber ist, den Widerstand $0,94073 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{100} = \frac{0,94073}{10000}$ Ohm.

Wenn man für 1 Milliontel Ohm die Bezeichnung 1 Mikrohm einführt, so hat ein solcher Zentimeterwürfel Quecksilber also den Widerstand 94,073 Mikrohm. Für jede andere Substanz erhalten wir also den Widerstand eines Zentimeterwürfels, wenn wir diese Zahl mit dem spezifischen Widerstand (bezogen auf Quecksilber) multiplizieren. Diese Zahlen bezeichnet man auch als den Widerstandskoeffizienten der betreffenden Substanz. Man braucht nämlich, um von einem Draht den Widerstand berechnen zu können, diese Zahl nur mit der Länge des Drahtes in Zentimetern zu multiplizieren und durch den Querschnitt des Drahtes in Quadratcentimetern zu dividieren. Danach enthält folgende Tabelle die Widerstandskoeffizienten für eine Reihe von Metallen und Legierungen.

Widerstand eines Zentimeterwürfels bei 0° in Mikrohms

Aluminium	2,70	Mikrohm	Graphit	1140	Mikrohm
Blei	19,58	"	Gaskohle	6200	"
Eisen	9,725	"	Konstantan		
Gold	2,06	"	(Nickelkupfer)	50	"
Kupfer (rein)	1,533	"	Kruppin	20,9	"
" (käuflich)	1,652	"	Neusilber	30	"
Nickel	12,40	"	Nickelin	43—51	"
Platin	9,03	"	Patentnickel	34,2	"
Quecksilber	94,073	"	Platinsilber	24,59	"
Silber (weich)	1,499	"	Mangankupfer (12%)	43	"
" (hart)	6,626	"	" (30%)	107	"
Wismut	31,25	"	Manganin	47	"
Zink	5,61	"			
Zinn	13,18	"			

Es sind in den obigen Tabellen nur Leiter erster Klasse — Metalle und Kohle — enthalten. Die Flüssigkeiten, die überhaupt den elektrischen Strom leiten, sind Leiter zweiter Klasse (außer dem Quecksilber) und der Widerstand, den sie dem Durchgang eines Stromes entgegenzusetzen, ist immer sehr viel größer als der der Metalle. Die meisten untersuchten Flüssigkeiten sind Lösungen von Salzen und Säuren in Wasser. Die spezifische Leitungsfähigkeit derselben hängt von ihrer Konzentration ab, sie ist eine andere bei einer Kupfervitriollösung, die 5 Proz. Kupfervitriol enthält, als bei einer, die 20 Proz. enthält. Außerdem hängt die Leitungsfähigkeit bei den Flüssigkeiten ebenso wie bei den Metallen von der Temperatur ab. Die folgenden Zahlen beziehen sich auf die Temperatur von 18° C. und geben erstens die spezifische Leitungsfähigkeit auf Quecksilber als Einheit bezogen, ferner den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohms und drittens das Reziproke der letzteren Größe, welches man schlechtweg die Leitfähigkeit der Substanz nennt.

Name der Flüssigkeit	Spezifische Leitungsfähigkeit (Hg = 1)	Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohms	Leitfähigkeit
Schwefelsäure von 30,4 Proz.	0,00006914	1,35	0,7398
Bittersalzlösung mit 17,3 Proz. Bittersalz	0,00000456	20,3	0,04922
Zinkvitriollösung mit 23,7 Proz. Zinkvitriol	0,00000452	20,9	0,0480
Kochsalzlösung mit Kochsalz gesättigt .	0,00002015	4,63	0,2160
Essigsäure von 16,6 Proz.	0,000000152	625,0	0,00160

Vollkommen reines Wasser leitet den elektrischen Strom fast gar nicht, ist also ein fast vollkommener Isolator. Aber die geringsten Beimengungen von fremden Stoffen genügen schon, um Wasser ziemlich gut leitend zu machen.

Trotzdem die Flüssigkeiten den Strom sehr viel schlechter leiten als die Metalle, sind sie doch noch sehr gute Leiter gegenüber den eigentlichen Isolatoren, von denen wir ja wissen, daß sie ebenfalls, wenn auch in minimalster Weise, leitend sind. Genaue Zahlen über die spezifische Leitungsfähigkeit der Isolatoren anzugeben, ist nicht möglich, weil die Stromleitung bei ihnen nicht in der einfachen Weise vor sich geht, wie sie durch das Ohmsche Gesetz charakterisiert ist. Es sind daher in der folgenden Tabelle für einige Isolatoren nur ungefähre Zahlenangaben gemacht und zwar geben diese den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Millionen Ohm, wofür man die Bezeichnung Megohm eingeführt hat.

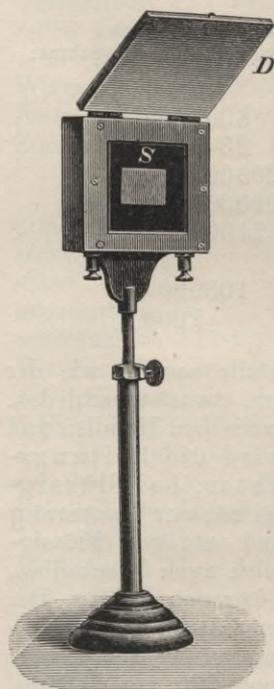
Name des Isolators:	Widerstand eines Zentimeterwürfels in Megohms:
Zelluloid	75 000
Glas (trocken)	8 000 000
Glimmer	2 300 000
Hartgummi	4 200 000 000
Paraffin	3 000 000 000
Stabilit	24 000 000
Vulkanfiber	53
Olivenöl	1 000 000
Benzol	1 300

Die Leitungsfähigkeit aller Leiter, der Metalle sowohl wie der Flüssigkeiten, ist bei verschiedenen Temperaturen etwas verschieden. Hierbei findet aber ein wesentlicher Unterschied zwischen Metallen und Flüssigkeiten statt. Bei Metallen nämlich wird die Leitungsfähigkeit bei höherer Temperatur schlechter, bei Flüssigkeiten wird sie besser. Metalle setzen also bei höherer Temperatur dem galvanischen Strom einen größeren Widerstand entgegen, Flüssigkeiten einen kleineren. Wie die Metalle verhält sich auch Quecksilber, welches ja ein Metall ist, wie die Flüssigkeiten dagegen Kohle. Der Widerstand der Kohle nimmt ab bei höherer Temperatur. Der Widerstand wächst bei den meisten reinen Metallen mit steigender Temperatur um nahezu gleich viel, nämlich für jeden Grad ungefähr um $\frac{1}{3}$ Proz. Die Metalllegierungen aber verhalten sich anders. Patentnickel und Nickelin ändern ihren Widerstand viel weniger, wenn die Temperatur wächst, und die oben erwähnten Legierungen Mangankupfer und Manganin und Konstantan fast gar nicht. Für nicht zu große Temperaturänderungen haben diese immer denselben Widerstand. Gerade deswegen werden sie, wie wir bald sehen werden, für Normalwiderstände benutzt.

Bei den Leitern zweiter Klasse nimmt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur bedeutend zu. Zum Beispiel hat die oben erwähnte Schwefelsäure bei 0° die Leitfähigkeit 0,5184, bei 30° aber schon 0,8860. Auch bei festen Salzen findet eine sehr bedeutende Zunahme der Leitfähigkeit statt, wenn die Temperatur steigt. Bei niedrigen Temperaturen sind sie fast Nichtleiter, aber bei Temperaturen in der Nähe ihres Schmelzpunktes werden sie sehr gute Leiter.

Eine besondere Eigentümlichkeit zeigt die Leitungsfähigkeit des Selens. Dieselbe wird nämlich ziemlich beträchtlich größer, wenn das Selen von Lichtstrahlen getroffen wird, als wenn es im Dunklen ist. Selen ist ein kristallinischer Körper und es scheint durch den Einfluß des Lichtes eine Modifikation der Kristalle derart einzutreten, daß eben die Leitfähigkeit erhöht wird. Man konstruiert für diese Zwecke Selenzellen, wie sie Fig. 64 darstellt. Das Selen wird in die Zwischenräume eines Messingdrahtgitters durch Schmelzen eingefüllt und die so hergerichtete Platte S in einem Kasten befestigt, der

Fig. 64.



durch einen Deckel verschlossen oder geöffnet werden kann. Im Dunklen hat eine solche Zelle z. B. einen Widerstand von 100 000 Ohm, bei Belichtung mit Sonnenlicht nur einen von etwa 70 000 Ohm.

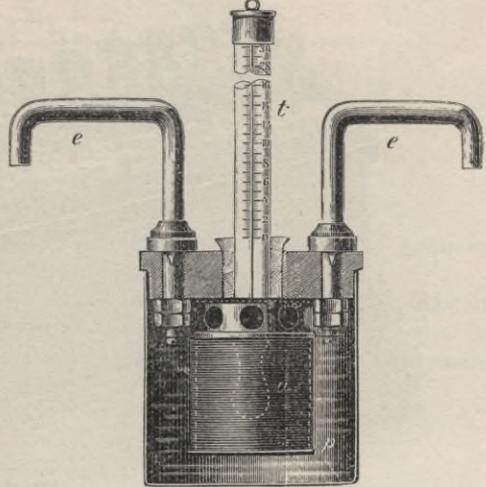
Wenn zwei Leiter aneinander grenzen und die Elektrizität zwischen ihnen übergehen soll, so muß die Verbindung beider Leiter eine sehr gute sein, weil sonst der Strom einen sehr großen Widerstand an der Trennungsstelle findet. Am besten lötet man daher die Metalle aneinander. Gewöhnlich aber klemmt man die Enden zweier Drähte durch Schrauben fest, damit sie vollkommen Kontakt haben. Bei der Kohle insbesondere ist es sehr auffällig, wie sehr eine schlechte Berührung zweier Kohlen den Widerstand derselben erhöht. Ein ganz geringer Druck auf die Berührungsstelle zweier Kohlen verringert den Widerstand beim Übergang der Elektrizität aus der einen zur anderen schon sehr bedeutend. In dem Mikrophon, das im zweiten Teil dieses Werkes besprochen ist, ist davon eine sehr wichtige Anwendung gemacht.

Um nun Widerstände von Drähten in Ohms ausdrücken zu können, muß man zunächst einen abgemessenen Widerstand haben, der gerade 1 Ohm (abgekürzt 1Ω) beträgt, so wie man einen Metermaßstab haben muß, um Längen in Metern messen zu können. Das Ohm, wie es jetzt in Deutschland gesetzlich eingeführt ist, ist bestimmt als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei der Temperatur 0° . Man nennt dieses auch wohl das internationale Ohm (int. Ω).

Normalwiderstände, welche genau 1 Ohm Widerstand haben, werden nach dem Modell der physikalischen Reichsanstalt in Berlin verfertigt. Es ist ein solches Normalohm in Fig. 65 abgebildet. Die Normalwiderstände werden der Bequemlichkeit halber nicht direkt aus Quecksilbersäulen gemacht, sondern aus Drähten, deren Länge und Querschnitt so abgemessen ist, daß der ganze Draht genau denselben Widerstand hat wie eine Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und

1 qmm Querschnitt. Und zwar werden die Drähte jetzt aus Manganin gewählt, weil diese bei allen Temperaturen zwischen 0° und 100° fast genau denselben Widerstand haben. Diese Normaleinheiten bestehen aus einer zylindrischen Büchse, welche mit Petroleum p gefüllt ist und einen Ebonitdeckel trägt. Im Innern der Büchse, im Petroleum, befindet sich ein hohler Zylinder a, auf welchen der abgemessene Draht aufgewickelt ist. Das Petroleum kann durch die Löcher auch im Innern der Büchse zirkulieren. Ein eingestecktes feines Thermometer t gibt die Temperatur im Innern an. Die Enden des Drahtes sind durch Schrauben und Lötung an den beiden gebogenen Kupferstäben ee von 7 mm Stärke befestigt, welche aus dem Deckel heraustreten und deren freie Enden in Quecksilbernapfe getaucht werden, durch welche ein Strom in sie geführt werden kann. Die äußere Ansicht eines solchen Normalohms (ohne Thermometer) zeigt Fig. 66.

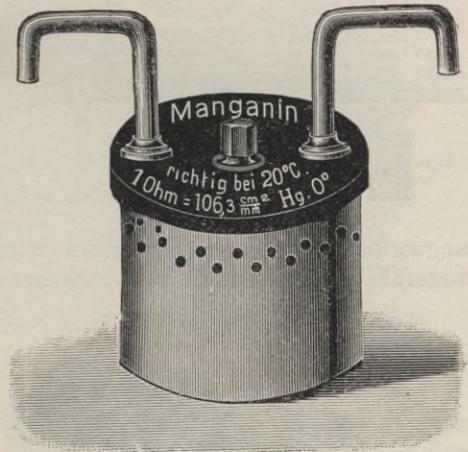
Fig. 65.



Es ist oft für elektrische Untersuchungen notwendig, eine Reihe von verschieden großen Widerständen zu haben, um sie in den Kreis eines Stromes einzuschalten, teils um dadurch den Strom auf eine gewünschte Stärke zu bringen, teils um unbekannte Widerstände mit bekannten vergleichen zu können. Es genügt dazu natürlich, wenn man eine Reihe von Drähten hat, deren Widerstände man genau kennt.

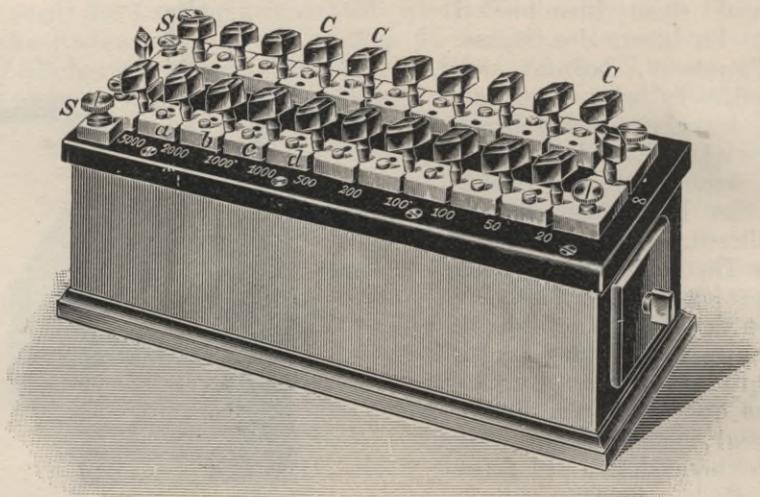
Zu diesem Zwecke hat zuerst Siemens eine Reihe von abgemessenen Widerständen in einem Kasten so angeordnet, daß sie einzeln oder zusammen leicht zu benutzen sind. Man nennt solche Apparate Widerstandskasten oder Stöpselrheostaten. Ein solcher ist in Fig. 67 in der äußeren Ansicht abgebildet. Auf dem Deckel des Kastens befindet sich eine Reihe von dicken Messingplatten a, b, c, d..., deren Ränder wenig voneinander

Fig. 66.



entfernt sind und die bogenförmige Ausschnitte haben, so daß die Stöpsel CC zwischen sie fest eingeklemmt werden können. Jede Messingplatte ist nun mit der folgenden durch eine, im Innern des Kastens

Fig. 67.



liegende Drahtrolle verbunden, wie man in der Durchschnittszeichnung Fig. 68 sieht, und zwar haben die Drahtrollen alle bestimmte, gemessene Widerstände. CC . . .

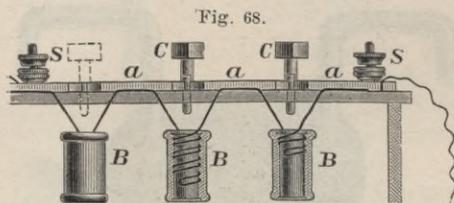


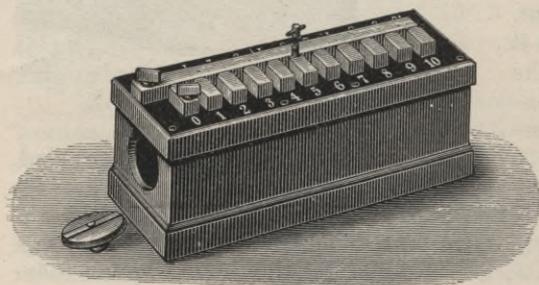
Fig. 68.

sind die Stöpsel, BB die Drahtrollen. Zwischen den aufeinander folgenden Messingplatten aa . . . sind gewöhnlich Widerstände von 0,1, 0,2, 0,2, 0,5, 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50 u. s. w. Ohm vorhanden. Doch können natürlich auch andere nach Belieben

angeordnet werden. Der Strom wird durch die Klemmschrauben S zugeführt. Sind alle Stöpsel zwischen den Messingplatten eingeklemmt,

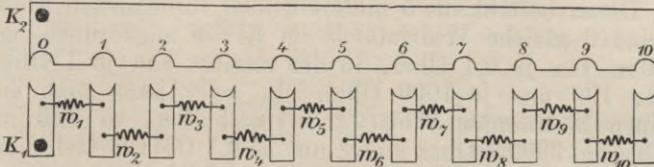
so geht der Strom nur durch die Messingplatten hindurch, weil der Widerstand der gesamten Drähte im Kasten ein enorm großer ist gegen den der dicken Messingplatten. Ist dagegen ein Stöpsel, etwa der punktiert gezeichnete, herausgenommen, so fließt der Strom durch die Rolle B an dieser Stelle und kommt

Fig. 69.



dann erst zur anderen Klemmschraube S. Durch die Herausnahme des Stöpsels ist also der bestimmte Widerstand eingeschaltet. So kann man durch Herausnehmen eines oder mehrerer oder aller Stöpsel Widerstände von 0,1 Ohm an bis zu dem größten einschalten.

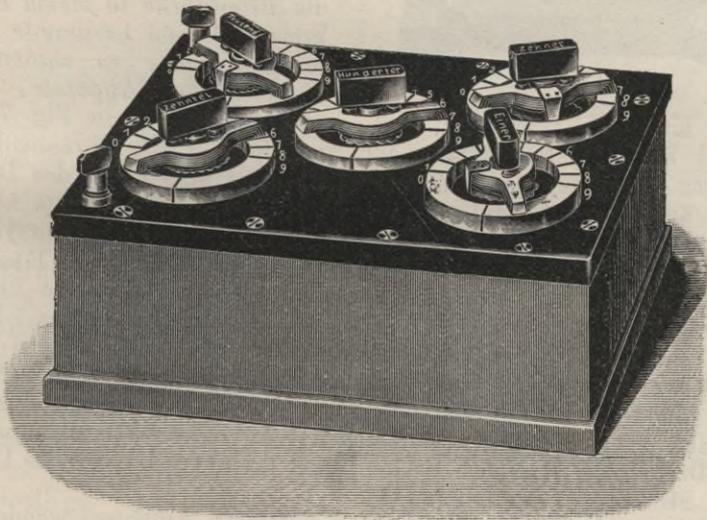
Fig. 70.



Diese Widerstandskasten sind für den Gebrauch sehr bequem. Sie werden bis zu 10 000 Ohm Widerstand konstruiert.

Für manche Zwecke werden diese Kästen so eingerichtet, daß in einem Kasten 10 gleiche Widerstände sich befinden (z. B. von je 1 Ohm oder von je 10 Ohm etc. bis zu je 100 000 Ohm). Diese nennt

Fig. 71.

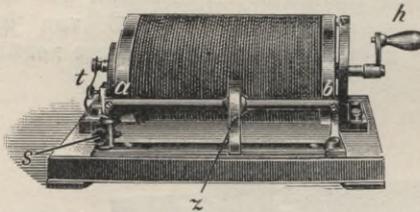


man deswegen Dekadenwiderstände. Sie besitzen, wie Fig. 69 zeigt, ebenfalls auf dem Deckel Messingklötze, deren je zwei benachbarte die beiden Enden eines der betreffenden Widerstände angelötet enthalten. Mit einem einzigen Stöpsel kann man dann die Widerstände vom 1- bis 10fachen der Einheit einschalten. Das Schema Fig. 70 zeigt die Verbindung an. Bei K_1 und K_2 werden die Drähte vom Element eingeklemmt, $w_1, w_2 \dots$ sind die gleichen Widerstände. Steckt nun z. B. der Stöpsel im Loch 4 und ist die Einheit 10 000 Ohm, so sind dabei 40 000 Ohm in den Stromkreis eingeschaltet. Solche

Dekadenrheostaten ordnet man auch häufig jetzt kreisförmig an und verbindet mehrere derselben in einen Kasten. Bei der kreisförmigen Anordnung kann man, statt durch Stöpsel Kontakt zu machen, vielmehr durch eine bewegliche Metallfeder, die durch eine Kurbel gedreht wird, die Einschaltung der Widerstände besorgen. So zeigt Fig. 71 einen Dekadenrheostatkasten mit Kurbelschaltung von Keiser & Schmidt in Berlin. Dieser besteht aus 5 hintereinander verbundenen Abteilungen. In jeder sind 9 gleiche Widerstände im Kreise angeordnet, und zwar in der ersten von je 0,1 Ohm, in der zweiten von je 1 Ohm, dann von je 10, 100 und je 1000 Ohm. In jeder kann man durch die Kurbel einen bestimmten Widerstand einschalten, so daß man von 0,1 Ohm bis zu 9999,9 Ohm stetig um je 0,1 Ohm fortschreiten kann.

Die Widerstandskasten gestatten genau bestimmte und gemessene Widerstände in einen Stromkreis einzuschalten. Will man jedoch nur

Fig. 72.



Widerstände rasch in einen Stromkreis einführen, ohne daß man ihre Größe genau zu kennen braucht, sogenannte Ballastwiderstände (was häufig vorkommt, namentlich wenn man die Stromstärke in einem Stromkreis auf eine bestimmte Größe bringen will), so eignen sich dafür andere Apparate, sogenannte

Kurbelrheostaten, gut, von denen einer in Fig. 72 abgebildet ist. Ein Neusilber- oder Nickelindraht ist schraubenförmig auf einen Marmorzylinder aufgewunden. Das eine Ende des Drahtes ist mit der Klemmschraube *s* leitend verbunden, das andere aber ist an dem Marmor befestigt. Durch Drehen des Marmorzylinders mittels der Kurbel *h* kann nun ein Messingröllchen *z* längs der Metallstange *ab* auf dem Draht gleiten. Die Metallstange und mit ihr das Röllchen ist mit der Klemmschraube *t* verbunden. In der Figur kann also ein elektrischer Strom aus einem Element bei *s* eingeführt werden, durch den Draht bis zum Röllchen *z* fließen, von diesem dann durch die Messingstange *ab* bis zur Klemmschraube *t* und dann zum Element zurückfließen. Auf diese Weise kann man durch Drehen der Kurbel *h* größere oder geringere Längen des Drahtes in den Stromkreis einschalten.

Für starke Ströme (Ströme von mehreren Ampères) wendet man jetzt gewöhnlich Ballastwiderstände von der Form an, wie sie in Fig. 73 schematisch gezeichnet sind. Eine Reihe von Spiralen aus Konstantandraht sind in einem Rahmen befestigt. Ihre oberen und unteren Enden gehen in die Metallknöpfe *0* bis *10* aus, auf welchen eine starke Messingfeder durch den Griff *K* verschoben werden kann. Der eine Pol der Leitung ist mit dem Knopf *0*, der andere mit der drehbaren Messingfeder verbunden. Bei jeder Stellung der Feder ist nun, wie man aus der Verbindung in der Figur erkennt, ein anderer Widerstand in den Stromkreis eingeführt. Steht z. B. die Feder, wie in der Figur, auf Knopf *5*, so sind die ersten 5 Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet.

Nachdem wir uns so mit einigen Apparaten vertraut gemacht haben, können wir nun leicht experimentell den Widerstand eines jeden beliebigen Leiters messen und in Ohms ausdrücken. Man hat dazu verschiedene Methoden. Unter allen aber ist die bequemste, und daher auch am meisten angewendete, diejenige, welche man die Methode der Wheatstoneschen Brücke nennt. Sie beruht auf der Anwendung derjenigen Stromverzweigung, die wir früher betrachtet haben.

Wir haben oben S. 74 gesehen, daß, wenn wir von einem Element aus den Strom durch eine Leitung mit zwei Zweigen schicken, die wiederum miteinander durch einen Draht, durch eine Brücke, verbunden sind, daß dann unter gewissen Umständen der Strom in der Brücke gleich Null wird. Diese Umstände treten, wie wir sahen, dann ein, wenn in Fig. 74

$$\frac{\text{Widerstand von } ac}{\text{Widerstand von } cb} = \frac{\text{Widerstand von } ad}{\text{Widerstand von } db}$$

ist. Dann ist der Strom in dem Brückendraht immer gleich Null, wie groß auch der Widerstand des Brückendrahtes cd sein mag. Man kann deshalb in die Brücke auch ein Galvanoskop einschalten und durch dieses zugleich erkennen, wenn der Strom in der Brücke verschwindet.

Will man nun den Widerstand eines Drahtes bestimmen, so bringt man ihn z. B. an die Stelle des Zweiges ac . Als Zweige ad und bd nimmt man einen gleichmäßig dicken Draht, auf dem ein beweglicher Kontakt d verschoben werden kann. Dieser Kontakt wird am besten aus einem Stahlklotz gebildet, der an einem Schlitten befestigt ist und mit seiner scharfen Kante auf dem Draht aufliegt. Der Draht selbst liegt auf einer Skala, so daß man die Länge von ad und bd ablesen kann. Endlich als Zweig cb nimmt man einen bekannten Widerstand, z. B. 1 Ohm. Und nun verschiebt man den Kontaktschlitten auf dem Draht adb so lange, bis das Galvanoskop in cd nicht mehr abgelenkt ist. Dann geht kein Strom durch cd , und nun wissen wir, daß

Fig. 73.

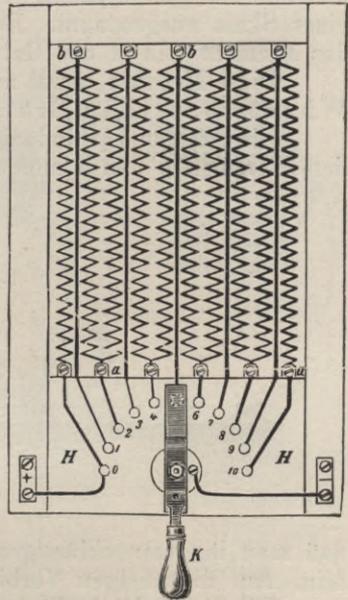
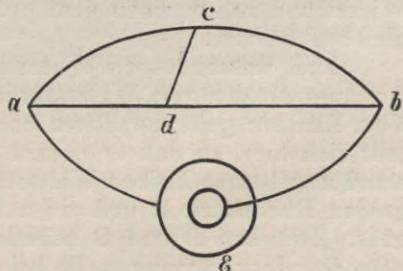


Fig. 74.



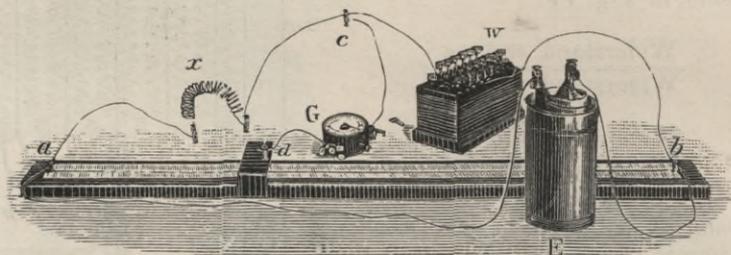
$$\frac{\text{Widerstand des zu untersuchenden Drahtes}}{1 \text{ Ohm}} = \frac{\text{Länge ad}}{\text{Länge db}},$$

also der Widerstand des zu untersuchenden Drahtes = 1 Ohm \times dem Verhältnis der Längen von ad und db ist. Folglich haben wir den Widerstand des zu untersuchenden Drahtes in Ohms bestimmt. Die Verbindungen bei dieser Widerstandsmessung gehen deutlich aus Fig. 75 hervor. Darin ist x der zu untersuchende Widerstand, w ein Widerstandskasten, aus dem ein bekannter Widerstand entnommen ist (in unserem Beispiel 1 Ohm). Zwischen a und b ist ein Platindraht über einer Skala ausgespannt. Bei d ist der verschiebbare Kontakt. E ist das Element und G das Galvanoskop.

Diese Methode nennt man, wie schon erwähnt, die Methode der Wheatstoneschen Brücke.

Die nötigen Verbindungsdrähte von x und w miteinander und mit den Klemmen a und b müssen entweder so geringen Widerstand haben,

Fig. 75.



daß man ihn vernachlässigen kann, oder ihr Widerstand muß bekannt sein. Auf die übrigen Verbindungsdrähte kommt es nicht an.

Bei dieser Methode ist es zunächst gleichgültig, wie groß der bekannte Widerstand w ist, mit dem der unbekannte x verglichen wird. Das Verhältnis der Drahtlängen ad und db ist immer gleich dem Verhältnis der Widerstände x und w, wenn das Galvanoskop keinen Ausschlag zeigt. Tatsächlich aber liefert die Methode um so genauere Werte, je weniger verschieden die beiden Widerstände x und w sind. Hat man also einen Stöpselrheostaten zur Verfügung, so wird man erst eine provisorische Messung machen, um einen ungefähren Wert von x zu erhalten, und dann eine genaue Messung, indem man als bekannten Widerstand von w einen dem provisorisch bestimmten von x möglichst gleichen benutzt.

Man verwendet die Wheatstonesche Kombination noch auf andere Art zum Messen von Widerständen, wie das Schema in Fig. 76 zeigt. Vom Element geht der Strom nach den beiden Klemmen C und A und teilt sich hier, so daß er einmal durch den zu untersuchenden Widerstand x und einen kleinen Widerstandskasten r, andererseits durch einen großen Rheostaten R und einen anderen kleinen Widerstandskasten ρ geht. Zwischen B und D befindet sich die Brücke mit dem Galvanoskop G. Man schaltet z. B. bei r und ρ je 1 Ohm aus, so daß das

Verhältnis der Widerstände AD und AB gleich 1 ist, und zieht aus R dann so lange Stöpsel heraus, bis in G kein Strom sich zeigt. Dann muß der aus R gezogene Widerstand gleich dem gesuchten sein. Macht man das Verhältnis der Widerstände AD und AB nicht gleich 1, sondern z. B. gleich 0,1, 0,01 oder gleich 10, 100, so ist auch der zu bestimmende Widerstand gleich 0,1-, 0,01- oder gleich 10-, 100mal dem ausgeschalteten Rheostatenwiderstand.

Direkt für die Kombination der Wheatstoneschen Brücke ist das Siemenssche Universalgalvanometer eingerichtet, von dem in Fig. 77 noch einmal die äußere Ansicht abgebildet ist und in das wir jetzt genauere Einsicht nehmen wollen.

Das Galvanoskop sitzt nämlich auf einer Schieferplatte auf, die in Fig. 78 besonders gezeichnet ist, in welcher das ganze Instrument von oben gesehen abgebildet ist. Unterhalb der Schieferplatte befinden sich vier Widerstandsrollen von 1, 9, 90, 900 Ohm, die in bekannter Weise durch Stöpsel ein- und ausgeschaltet werden können, so daß man, indem man sie der Reihe nach herausnimmt, 1, 10, 100, 1000 Ohm eingeschaltet hat. In dem Rand der Schieferplatte befindet sich eine Nut und in diese ist ein Neusilberdraht von gleichförmigem Widerstand eingelegt, der als Meßdraht bei der Wheatstoneschen Brücke dient. Auf der Schieferplatte befindet sich eine Teilung, und zwar geht sie von der Mitte der hinteren Seite der Schieferplatte an nach beiden Seiten von 0 bis 150, oder bei anderer Ausführung gleich so, daß man das Verhältnis der Längen der beiden Abschnitte des Meßdrahtes direkt ablesen kann.

Unterhalb der Schieferplatte befinden sich fünf Klemmschrauben I, II, III, IV, V, von denen III und IV durch einen Stöpsel miteinander

Fig. 76.

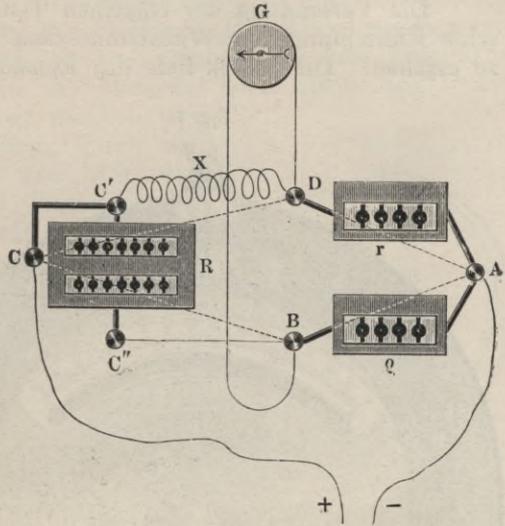
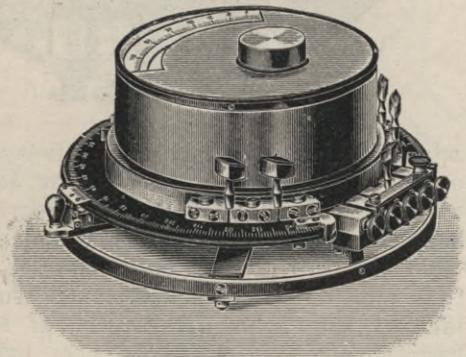


Fig. 77.

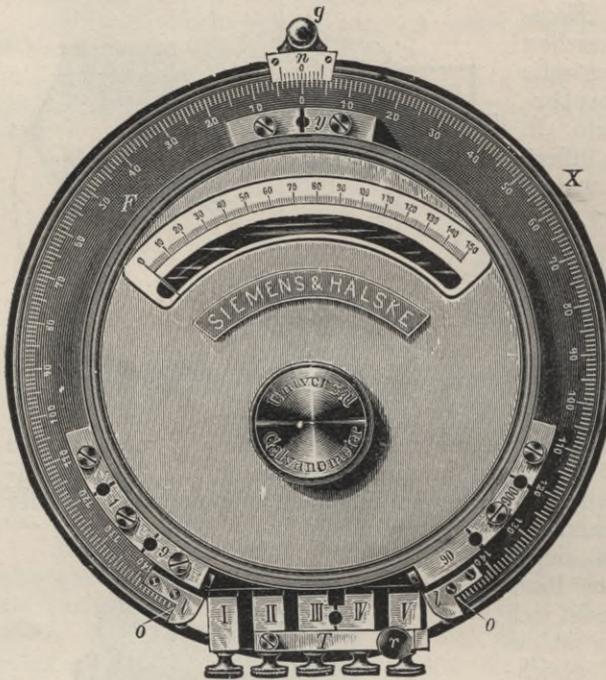


verbunden werden können, während V mit II durch einen Druck auf den Knopf r einer Feder T momentan in Verbindung gesetzt werden kann.

Endlich sitzt auf der Achse des Apparates drehbar der Arm g (den man deutlich in Fig. 77 sieht). Dieser trägt einen metallischen Kontakt, der den Meßdraht berührt und auf ihm verschoben werden kann.

Die Verbindung der einzelnen Teile des Apparates und zugleich seine Einrichtung zur Wheatstoneschen Brücke ist nun aus Fig. 79 zu ersehen. Die beiden Pole des Elementes werden zwischen I und V

Fig. 78.



eingeschaltet, der zu untersuchende Widerstand x zwischen II und III (mit welchem IV durch einen Stöpsel verbunden ist). Der Meßdraht steht einerseits in ständiger Verbindung mit den Widerständen 1, 9, 90, 900, und durch diese mit der Klemme II, andererseits mit der Klemme III, das Galvanometer ebenfalls mit den Widerständen und der Klemme IV. Der bewegliche Zeiger ist mit der Klemme I fest verbunden. In das Schema der Wheatstoneschen Brücke gebracht, reihen sich die ein-

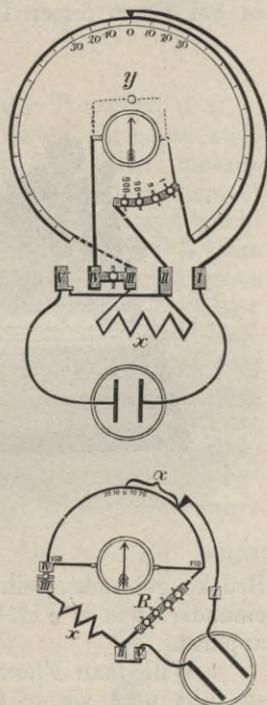
zelnen Zahlen und Buchstaben dieser Figur nun so ein, wie es die untere Figur angibt. Dies ist aber die Anordnung der Brücke, welche wir auf S. 76 beschrieben und begründet haben. Man schaltet nun beim Gebrauch des Instrumentes denjenigen von den Widerständen 1 bis 1000 ein, der dem zu bestimmenden Widerstand x am nächsten liegt (was man durch einen Vorversuch ermittelt), und verschiebt den Kontakt so lange, bis der Zeiger auf Null bleibt. Dann steht der zu bestimmende Widerstand zu dem bekannten (durch die Stöpsel ausgeschalteten) in demselben Verhältnis wie die Längen der beiden Teile des Meßdrahtes, die man entweder direkt oder in Graden ausgedrückt auf der Skala der Schieferplatte abliest.

Man hat daher den zu bestimmenden Widerstand sofort in Ohms ausgedrückt.

In Bezug auf die Schnelligkeit und Bequemlichkeit der Widerstandsbestimmung läßt das Universalgalvanoskop nichts zu wünschen übrig.

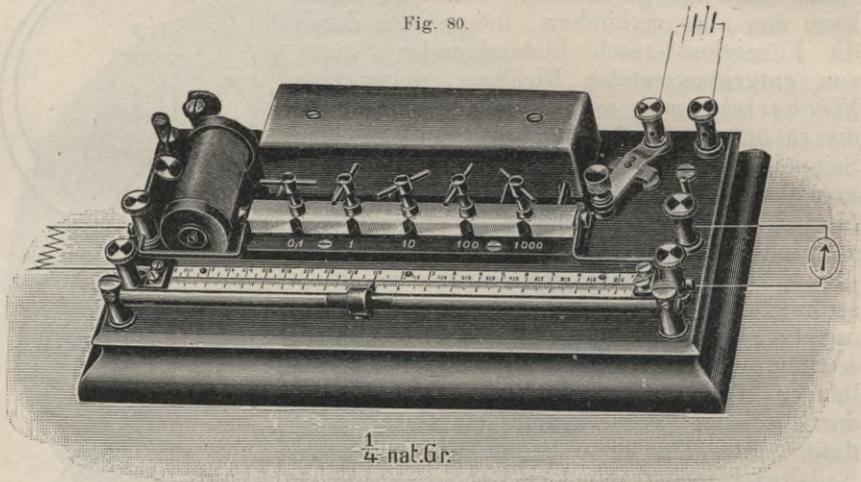
Auf diese Weise läßt sich der Widerstand jedes Leiters messen. Ohne weiteres anwendbar ist die Methode der Wheatstoneschen Brücke in der angegebenen Art bei metallischen Leitern und bei anderen Leitern erster Klasse. Bei der Bestimmung des Widerstandes von zusammengesetzten Flüssigkeiten kommt aber noch eine Komplikation hinzu, so daß bei ihnen die Methode noch etwas abgeändert werden muß. Eine Flüssigkeit nämlich wird, wie wir in Kap. 6 sehen werden, durch einen galvanischen Strom zersetzt und wirkt dann selbst wie ein galvanisches Element. Man kann das aber verhindern, indem man durch die Flüssigkeit rasch hintereinander Ströme von entgegengesetzter Richtung, sogenannte Wechselströme, sendet. Macht man dann die zu untersuchende Flüssigkeit zu der einen Seite eines Wheatstoneschen Vierecks, so kann man durch Abgleichen der Widerstände auch hierbei die Wechselströme in der Brücke verschwinden machen und dadurch den Widerstand der Flüssigkeit messen. Derartige Wechselströme liefert z. B. ein sogenannter Induktionsapparat, wie wir ihn in Kap. 9 beschreiben werden. Nur ist noch die Schwierigkeit vorhanden, daß ein Galvanoskop in der Brücke durch solche Wechselströme gar nicht beeinflusst wird. Der erste Strom will z. B. die Nadel nach rechts ablenken, der zweite, gleich starke, aber entgegengesetzte Strom, sucht sie nach links abzulenken. Die Nadel bleibt daher, wie Buridans Esel, in Ruhe. Es gibt aber Apparate, die auch durch Wechselströme in gleicher Weise beeinflusst werden wie die Galvanoskope durch gleichgerichtete Ströme, nämlich die Elektrodynamometer, die wir in Kap. 8, und die Telephone, die wir in Kap. 9 beschreiben werden. Bringt man also z. B. ein Telephon in die Brücke und sendet man Wechselströme durch die ganze Kombination von Leitern, so wird man dieses so lange tönen hören, bis die Widerstände so abgeglichen sind, daß durch die Brücke keine Ströme gehen. Dann bleibt das Telephon ruhig, und dann bestimmt sich der Flüssigkeitswiderstand wie ein Drahtwiderstand. Diese Meßmethode ist von F. Kohlrausch ausgearbeitet worden. Man bedient sich vorteilhaft, um die Widerstände von Flüssigkeiten zu messen, einer Anordnung, wie sie von F. Kohlrausch angegeben und von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. unter dem Namen „Universalmeßbrücke“ ausgeführt wird. Dieselbe ist in Fig. 80 gezeichnet. Man sieht eine kleine Drahtrolle links in der

Fig. 79.



Figur; diese ist der Induktionsapparat, der die Wechselströme erzeugt. Er erhält einen Strom von einem Element, das rechts schematisch gezeichnet ist. In dem Kästchen befinden sich fünf Widerstände von 0,1, 1, 10, 100, 1000 Ohm, welche durch Herausnehmen der vor dem Kästchen befindlichen Stöpsel eingeschaltet werden können. Auf der geteilten Skala liegt ein Platindraht, auf welchem ein Metallzeiger verschoben werden kann, der sich auf einem Messingstab bewegt. Der zu messende Widerstand wird an die Klemmen links, das Telephon rechts angelegt. Man verschiebt den Zeiger auf dem Meßdraht so lange, bis der Ton im Telephon verschwindet, und bestimmt dadurch auf bekannte Weise den Widerstand der Flüssigkeit ganz so, wie man es bei einem festen Leiter tut. In das Schema der Wheatstoneschen

Fig. 80.



Brücke gebracht, reihen sich die einzelnen Teile des Apparates so aneinander, wie es Fig. 81 zeigt. T ist das Telephon, R der Induktionsapparat.

Will man Flüssigkeiten auf ihre Leitungsfähigkeit untersuchen, so füllt man sie in Gefäße, etwa von der Form der in Fig. 82 gezeichneten. Durch die Ebonitdeckel dieser Gefäße gehen Messingstäbchen hindurch, welche unten Platinscheibchen tragen, durch welche der Strom in die Flüssigkeit geleitet wird. Diese Scheiben mit ihren Stielen nennt man die Elektroden. Oben befinden sich die Klemmschrauben zur Verbindung. Bequemer sind noch die Gefäße von der Form 83, einfache Fläschchen, in denen zwei halbzyllindrische Elektroden aus Platin stehen, die mit Platindrähten versehen sind. Letztere gehen eingeschmolzen durch das Glas hindurch. Man füllt das Gefäß zunächst mit einer der Lösungen, deren Leitfähigkeit auf S. 86 angegeben ist, und bestimmt den Widerstand derselben, dann füllt man es mit der zu untersuchenden Lösung und bestimmt wieder den Widerstand. Die Leitfähigkeit der zu untersuchenden Lösung verhält sich dann zu der der bekannten Lösung umgekehrt wie die Widerstände derselben.

Ein spezieller Fall von flüssigen Widerständen ist der innere Widerstand der galvanischen Elemente selbst. Es ist eine wichtige und häufig notwendige Aufgabe, diesen inneren Widerstand zu bestimmen, und man hat daher verschiedene Methoden dafür erdnen. Am einfachsten und raschesten kann man ihn, ebenso wie den jeder Flüssigkeit, durch die Wheatstonesche Brücke mit Wechselströmen und Telephon bestimmen. Man braucht eben nur in Fig. 80 links das zu untersuchende Element einzuschalten.

Natürlich hängt der innere Widerstand eines galvanischen Elements von der Größe des Elements, von der Beschaffenheit der Tonzellen u. s. w. ab. Man kann deshalb für die gewöhnlich benutzten Elemente auch nur ungefähre Angaben über den inneren Widerstand machen.

Ein Bunsensches Element von der Größe, wie sie gewöhnlich gebraucht wird (32 cm Höhe), hat nur etwa 0.2 Ohm Widerstand, ein gewöhnlicher Daniell etwa 0,6 Ohm, ein Meidinger-Element, je nach der Größe 4 bis 10 Ohm, ein Element der deutschen Telegraphenverwaltung 7,5 Ohm, ein Leclanché-Element ungefähr 0,3 Ohm, das S. & H.-Beutelement nur 0,06 Ohm, und ein Trockenelement von Hellesen etwa 0,1 Ohm Widerstand. Die Stromstärke bei Kurzschließung des Elements (S. 69) wäre daher

für ein Bunsen-Element etwa $\frac{1,9 \text{ Volt}}{0,2 \text{ Ohm}} = 9,5 \text{ Ampère}$, für einen

Daniell 2 Ampère, ein Meidinger-Element 0,5 Ampère, Leclanché-Element 5 Ampère, S. & H.-Beutelement über 20 Ampère, Hellesen-Trockenelement 15 Ampère. Doch werden alle Elemente durch so starke Ströme rasch ruiniert, so daß diese Zahlen nicht wirklich zu entnehmende, sondern nur maximale Stromstärken bedeuten.

Eine besondere Modifikation erfordert die Methode der Wheatstoneschen Brücke, wenn es sich darum handelt, sehr kleine Widerstände (z. B. von 0,01 Ohm oder gar 0,00001 Ohm) zu messen. Da kann man die gewöhnliche Schaltung nicht anwenden, erstens weil genaue Vergleichswiderstände von diesem geringen Betrage schwer herzustellen und sehr kostspielig sind, hauptsächlich aber, weil die Verbindungen von Drähten untereinander durch Klemmschrauben selbst schon Widerstandsschwankungen von diesem Betrag hervorbringen können. Und solche Messungen werden jetzt immer

Fig. 81.

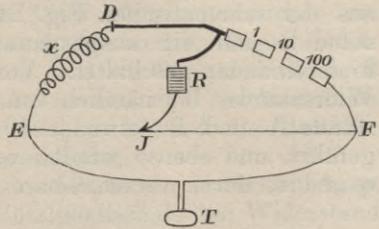


Fig. 82.

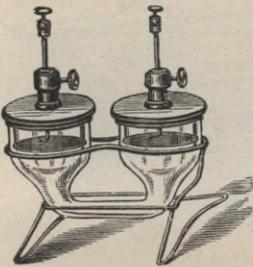
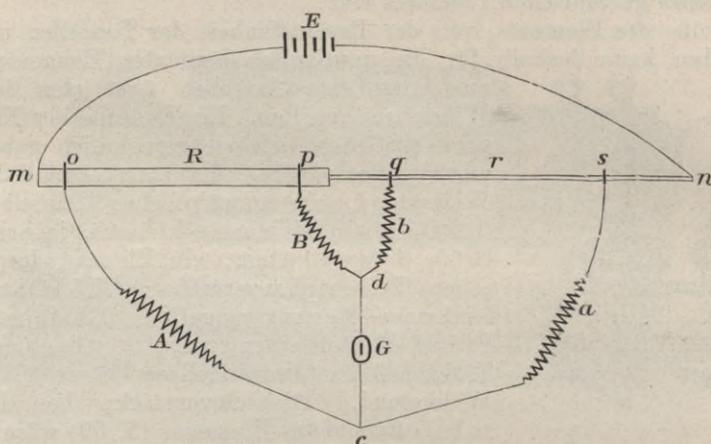


Fig. 83.



wichtiger, da man in elektrischen Anlagen es oft mit sehr kleinen Widerständen zu tun hat, in denen sehr große Stromstärken enthalten sind. Deswegen hat Sir W. Thomson (Lord Kelvin) eine eigene Methode dafür angegeben, welche nach ihm die Methode der Thomsonbrücke oder Doppelbrücke heißt. Das Prinzip derselben ist aus der schematischen Fig. 84 ersichtlich. Der zu messende Widerstand R und ein ausgespannter Draht r , ein Meßdraht, werden hintereinander geschaltet. Von zwei festen Stellen des zu messenden Widerstandes R , nämlich von o und p , werden zwei gleiche Widerstände A und B (etwa je 10 Ohm) zu zwei Punkten c und d hingeführt, und ebenso werden von zwei Stellen des Meßdrahtes, nämlich q und s , durch verschiebbare Kontakte zwei einander gleiche Wider-

Fig. 84.



stände a und b , etwa je 1000 Ohm, zu denselben Punkten hingeführt. Zwischen c und d wird ein Galvanoskop G eingeschaltet, zwischen m und n eine (starke) Batterie E , etwa von 8 Volt Spannung. Das Galvanoskop zeigt natürlich einen Ausschlag. Man verschiebt nun den einen der Kontakte q oder s , während man den anderen fest liegen läßt, so lange, bis der Ausschlag des Galvanoskops verschwindet. Ist das erreicht, dann läßt sich zeigen, daß

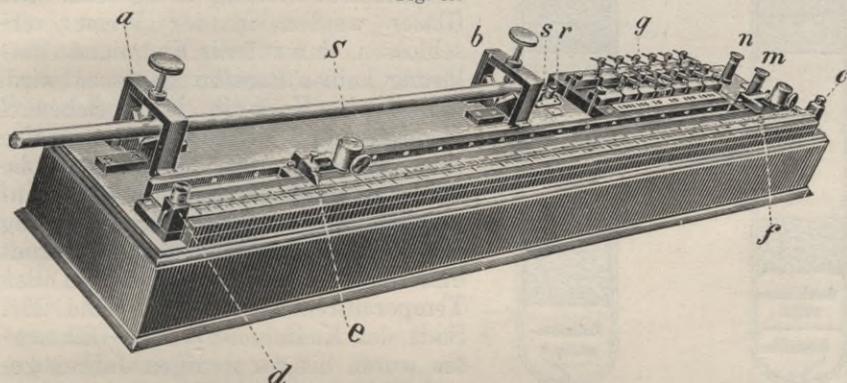
$$\frac{\text{Widerstand von } R}{\text{Widerstand von } r} = \frac{\text{Widerstand von } A}{\text{Widerstand von } a}$$

ist. Der Widerstand von R ist dann also in unserem Beispiel nur ein Hundertstel des Widerstandes von r . Ist nun r ein ausgespannter dicker Draht, der in 1000 mm geteilt ist, und hat der ganze Draht, wie man es in der Praxis macht, den Widerstand von 0,01 Ohm, so hat also jeder Millimeter des Drahtes den Widerstand von $\frac{1}{100000}$ Ohm, und der gesuchte Widerstand von R ist dann gleich der Zahl der Millimeter zwischen q und s , dividiert durch 10 Millionen. Damit kann man also sehr kleine Widerstände messen.

Bei der praktischen Anordnung dieser Messungen kann man sich der in Fig. 85 abgebildeten Thomsonbrücke von Edelmann bedienen. Man sieht bei dieser den ausgespannten Draht cd von 0,01 Ohm Widerstand mit den beiden verschiebbaren Kontakten f und e , ferner sieht man als zu untersuchenden Widerstand eine dicke Kupferstange S , die bei a und b mit festen Schrauben eingeklemmt ist. Bei g sind 4 Widerstandssätze von je 10, 100 und 1000 Ohm angebracht, aus denen man die Widerstände A , B und a , b der vorigen Figur bildet. Nimmt man für a , b die Widerstände von je 1000 Ohm und für A , B entweder je 10 oder 100 oder 1000 Ohm, so hat man ein Verhältnis von 0,01 oder 0,1 oder 1. Zwischen m und n wird die Batterie, zwischen s und r das Galvanometer eingeschaltet.

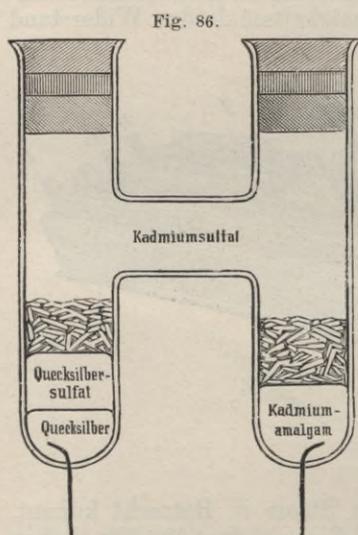
Nach einer der auf den letzten Seiten erörterten Methoden kann man also von jedem Draht, von jeder Flüssigkeitssäule den Widerstand in Ohm messen.

Fig. 85.



Die zweite Größe, welche bei jedem Strom in Betracht kommt, ist die elektromotorische Kraft. Als Einheit für dieselbe haben wir 1 Volt genommen (s. o. S. 52). Praktisch vergleicht man häufig die elektromotorische Kraft eines beliebigen Elementes mit der eines Daniells und bezieht also auf einen Daniell die Kräfte aller anderen Elemente. Da 1 Volt nur etwa 10 Proz. kleiner ist als 1 Daniell, so ist damit auch die elektromotorische Kraft gleich in Volts bestimmt. So ist z. B. die elektromotorische Kraft eines Bunsenschen Elementes gleich 1,7 Daniell ungefähr, die eines Leclanché-Elementes gleich 1,4 Daniell, also sind sie etwa gleich 1,9 bzw. 1,5 Volt. Eine Kette von zehn hintereinander verbundenen Bunsenschen Elementen hat also eine elektromotorische Kraft von 19 Volt. Daß man ein Daniell zum Vergleich nimmt, ist nur willkürlich und beruht darauf, daß ein Danielles Element leicht zusammensetzen ist und eine ziemlich konstante elektromotorische Kraft hat. Will man ganz genaue Bestimmungen der elektromotorischen Kraft eines Elementes haben, so darf man allerdings nicht ein Daniell als Vergleichungselement nehmen, weil dieses doch nicht ganz unveränderlich ist. Vielmehr benutzt man zu genauen Bestimmungen sogenannte Normalelemente, welche stets

denselben Wert der elektromotorischen Kraft haben. Am meisten gebraucht wird als solches das Kadmiumelement. Dieses kann man sich leicht selbst in folgender Weise herstellen. In ein H-förmiges Reagenzglas (Fig. 86) (von Alb. Geißler Ww. in Berlin zu beziehen) bringt man auf den Boden des einen Schenkels eine Schicht reinen Quecksilbers, über diese einen Teig, der durch Zusammenreiben von schwefelsaurem Quecksilberoxydul mit schwefelsauren Kadmiumkristallen und Quecksilber gebildet ist. In den anderen Schenkel wird Kadmiumamalgam gefüllt, welches aus 90 Teilen Quecksilber und 10 Teilen Zink besteht. Da das Amalgam bei gewöhnlicher Temperatur fest ist, wird es heiß eingefüllt und erstarren gelassen. Ueber die Paste in dem einen Schenkel und über das Amalgam in dem anderen Schenkel



werden Kristalle von schwefelsaurem Kadmium geschüttet und das Ganze in beiden Schenkeln mit konzentrierter Kadmiumsulfatlösung übergossen. Die Gläser werden in der Weise verschlossen, daß auf die Kadmiumsulfatlösung heißes Paraffin gegossen wird, darauf ein Kork in jeden Schenkel eingesetzt und die Mündung mit Marineleim ausgegossen wird. In die Gläser ist unten je ein Platindraht eingeschmolzen, welche zur Zuleitung dienen. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes ist 1,019 Volt bei allen Temperaturen zwischen 10 und 20°. Statt des Kadmium-(Weston-)Elementes wurde bis vor wenigen Jahren gewöhnlich das Clark-Element als Normalelement benutzt, welches sich von dem Kadmiumelement nur dadurch unterscheidet, daß statt Kadmium und Kad-

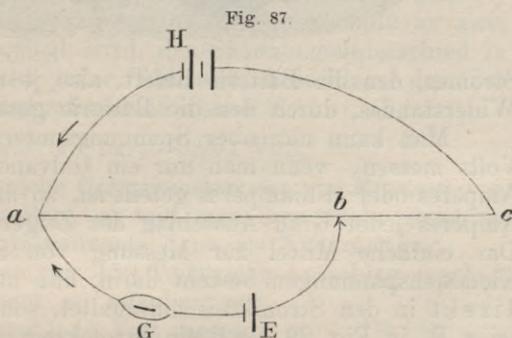
miumsulfat vielmehr Zink und Zinksulfat angewendet ist. Seine elektromotorische Kraft ist aber ziemlich erheblich von der Temperatur abhängig, sie beträgt bei 15° 1,438 Volt, bei 20° 1,433 Volt. Gerade deswegen wird jetzt das Kadmiumelement dem Clark-Element vorgezogen, aus demselben Grunde, wie für Normalwiderstände Manganindrähte viel geeigneter sind als Kupferdrähte.

Um nun die elektromotorische Kraft irgend eines Elementes mit der eines Daniell- oder eines Kadmium- oder Clark-Elementes oder eines anderen Elementes zu vergleichen, hat man verschiedene Methoden. Da die elektromotorische Kraft eines Elementes gleich der Spannungsdifferenz seiner Pole im ungeschlossenen Zustand (also ohne Strom) ist, so kann man sie dadurch bestimmen, daß man diese Spannungsdifferenz z. B. an dem Quadrantelektrometer mißt. Bestimmt man erst, welchen Ausschlag ein Kadmiumelement am Quadrantelektrometer gibt, und dann den Ausschlag des zu bestimmenden Elementes, so ist das Verhältnis dieser Ausschläge gleich dem Verhältnis der elektromotori-

sehen Kräfte. Man kann so die gesuchte elektromotorische Kraft sofort in Volts ausdrücken, da man die elektromotorische Kraft eines Kadmiumelements in Volts kennt.

Gewöhnlich aber bestimmt man elektromotorische Kräfte von Elementen im geschlossenen Zustand, und von den dazu benutzten Methoden ist die wichtigste und immer anwendbare die sogenannte Kompensationsmethode. Diese Methode beruht auf der Stromverzweigung, die auf S. 76 beschrieben ist. In dieser läßt sich nämlich bewirken, daß in dem einen Zweige, in dem gerade das zu untersuchende Element sich befindet, kein Strom fließt, und wenn das stattfindet, so verhalten sich die elektromotorischen Kräfte wie bekannte Widerstände. Man verbindet hierbei (Fig. 87) zunächst eine konstante starke Hilfssäule H (z. B. zwei Bunsen-Elemente) mit den Endpunkten a und c eines ausgespannten, ziemlich dünnen Drahtes, und eines der zu vergleichenden Elemente E, z. B. einen Daniells, einerseits mit a, andererseits mit einem auf dem

Drahtverschiebbaren Kontakt b, und zwar so, daß die gleichnamigen Pole von H und E nach a hinzeigen (in beiden z. B. der Zinkpol). In den Zweig von E schaltet man noch ein Galvanoskop G ein und verschiebt den Gleitkontakt b so lange, bis durch das Galvanoskop kein Strom mehr geht. Da der Zweig abE



dann stromlos ist, so muß die Spannungsdifferenz in a und b gerade gleich der elektromotorischen Kraft von E sein. Schaltet man nun statt E das zweite zu untersuchende Element E' (z. B. ein Leclanché) ein und macht das Galvanoskop wieder stromlos, so kommt der Gleitkontakt auf eine andere Stelle b'. Es muß dann die Spannungsdifferenz zwischen a und b' der jetzigen elektromotorischen Kraft gleich sein. Diese Spannungsdifferenzen verhalten sich aber wie die Längen der Drahtstücke ab und ab', und in demselben Verhältnis stehen daher auch die gesuchten elektromotorischen Kräfte, z. B. eines Daniell und eines Leclanché. So kann man die elektromotorische Kraft eines Leclanché in Daniells und dadurch auch in Volts ausdrücken.

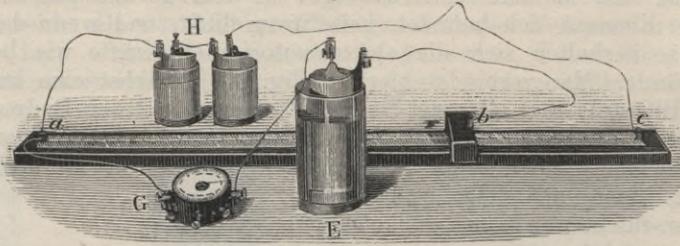
Zur Ausführung dieser Messungen verbindet man die Apparate wie in Fig. 88 und schaltet an Stelle von E erst das eine, dann das andere der zu vergleichenden Elemente ein.

Die Kompensationsmethode hat den Vorzug, daß bei ihr das zu untersuchende Element während der Messung stromlos ist. Sie läßt sich also insbesondere auch bei den sogenannten inkonstanten Elementen anwenden, d. h. bei denjenigen, deren elektromotorische Kraft sich ändert, wenn ein Strom durch sie hindurchfließt.

Praktisch von weit größerer Bedeutung als die Messung der elektro-

motorischen Kraft von Elementen ist die Messung des Spannungsunterschiedes an zwei Punkten eines geschlossenen Stromkreises und speziell die Messung der Klemmenspannung, d. h. des Spannungsunterschiedes an den Polen einer Batterie, während der Stromkreis geschlossen ist. Wir wissen schon (S. 72), daß die Klemmenspannung einer Batterie nicht, wie die elektromotorische Kraft, immer dieselbe Größe hat, sondern, daß sie verschieden ist, je nach der Stärke des

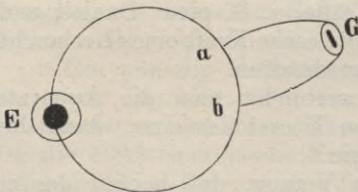
Fig. 88.



Stromes, den die Batterie liefert, also je nach der Größe des äußeren Widerstandes, durch den die Batterie geschlossen ist.

Man kann nun aber Spannungsunterschiede leicht und direkt in Volts messen, wenn man nur ein Galvanometer hat, dessen Skala in Ampères oder Milliampères geteilt ist, so daß man also weiß, wie vielen Ampères jeder Grad Ausschlag des Zeigers im Instrument entspricht. Das einfache Mittel zur Messung von Spannungsunterschieden und Klemmenspannungen besteht darin, daß man das Galvanometer nicht direkt in den Stromkreis einschaltet, sondern parallel zu ihm. Es sei z. B. in Fig. 89 E ab ein Stromkreis, in dem ein Strom vom Element E aus fließt, und man wolle den Spannungsunterschied an irgend zwei Punkten a und b des Stromkreises bestimmen. Man verbindet dann, parallel zu dem Drahtstück ab, das Galvanometer G mit den beiden Punkten a und b. Man sagt dann, das Galvanometer liegt im Nebenschluß zu ab. Wir wissen nun (S. 71), daß der Strom im Galvanometer G gleich dem Spannungsunterschied von a und b dividiert durch den Widerstand der Zweigleitung ist. Der Widerstand

Fig. 89.



der Zweigleitung ist aber, bis auf die notwendigen Verbindungsdrähte, einfach der des Galvanometers. Legt man also das Galvanometer an andere und andere Punkte an a und b an, so geben, da ja der Widerstand des Galvanometers derselbe bleibt, die Ausschläge direkt ein Maß für die Spannungsdifferenz an den Punkten a und b.

Kennt man nun die Ausschläge, welche das Galvanometer für 1, 2, 3 etc. Ampère gibt, und kennt man den Widerstand des Galvanometers in Ohms, so kann man bei jedem Ausschlag angeben, wie groß der Spannungsunterschied in Volts ist, durch die er hervorgerufen ist. Denn dieser Spannungsunterschied ist sofort

in Volts bekannt, wenn man den Widerstand des Galvanometers, in Ohms, mit der Stromstärke in Ampères multipliziert, da ja die Beziehung besteht:

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm.}$$

Natürlich wird im allgemeinen durch die Anlegung eines solchen Ampèremeters im Nebenschluß zu a b die Stromstärke und die Spannungsverteilung etwas geändert. Je größer der Widerstand des Galvanometers ist, desto geringer ist aber der abgezweigte Strom, der durch dasselbe hindurchfließt, desto geringer ist also die Störung. Man nimmt deswegen für solche Galvanometer, die im Nebenschluß gebraucht werden, um Spannungsunterschiede zu messen, häufig solche von großem Widerstand, etwa 100 Ohm; oft aber genügt auch ein Widerstand von 10 oder von 1 Ohm. So hat z. B. das Milliampèremeter, das oben S. 80 abgebildet ist, einen Widerstand von 1 Ohm. Da jeder Grad der Teilung desselben einer Stromstärke von 0,001 Ampère (1 Milliampère) entspricht, so gibt das Instrument, wenn es im Nebenschluß an zwei Punkten des Stromkreises angelegt wird, den Spannungsunterschied in Volts an, und zwar entspricht jeder Teilstrich Ausschlag, den der Zeiger macht, einem Spannungsunterschied von

$$0,001 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm} = 0,001 \text{ Volt,}$$

also einem Millivolt. Wenn solche Galvanometer nur zur Messung von Spannungen benutzt werden sollen, so teilt man ihre Skala gleich in Volts ein und bezeichnet die Instrumente dann als Voltmeter.

Da der Zeiger im ganzen nur 150 Teilstriche Ausschlag machen kann, so kann das Instrument so offenbar nur Spannungen zwischen 0,001 und 0,15 Volt messen, größere nicht. Um nun aber auch größere Spannungen messen zu können, hat man ein einfaches Mittel.

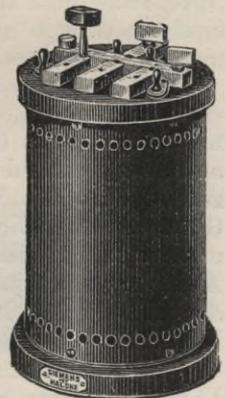
Man braucht nämlich bloß in die Zweigleitung noch außer dem Galvanometer bekannte Widerstände einzuschalten. Je größer der gesamte Widerstand der Zweigleitung ist, desto geringer ist der Zeigerausschlag für 1 Volt, desto größere Spannungen kann man also noch messen. Deswegen werden solchen Milliampèremetern, wenn man sie zur Messung der Spannungen, also als Voltmeter benutzen will, Widerstandskästen (Fig. 90) beigegeben, mit abgemessenen Widerständen von 9, 99, 999 und 9999 Ohm. Da der erste dieser Widerstände 9 Ohm hat, so ist der ganze Widerstand der Zweigleitung dann 10 Ohm und es entspricht daher ein Grad Ablenkung des Zeigers einem Spannungsunterschied von

$$10 \text{ Ohm} \times 0,001 \text{ Ampère} = 0,01 \text{ Volt.}$$

Dadurch kann man also schon Spannungen von 0,01 bis 1,5 Volt messen.

Schaltet man den zweiten Widerstand, der 99 Ohm groß ist, zum Galvanometer ein, so enthält die Zweigleitung 100 Ohm Widerstand,

Fig. 90.

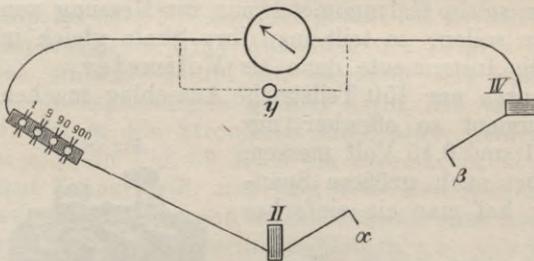


es entspricht also jeder Grad $100 \text{ Ohm} \times 0,001 \text{ Ampère} = 0,1 \text{ Volt}$, so daß man Spannungen von 0,1 bis 15 Volt damit messen kann. Ebenso entspricht bei dem dritten Widerstand (von 999 Ohm) jeder Grad 1 Volt und bei dem vierten Widerstand (von 9999 Ohm) jeder Grad 10 Volt. Dadurch kann man dann also Spannungsdifferenzen von 0,001 bis 1500 Volt messen.

Hat ein solches Instrument, das Milliampère zeigt, nicht 1 Ohm, sondern 100 Ohm Widerstand, so muß der beigegebene Widerstandskasten, um die Messung größerer Spannungen zu ermöglichen, Widerstände von 900, 9900, 99900 Ohm enthalten, so daß die Zweigleitung in den einzelnen Fällen 100, 1000, 10000, 100000 Ohm enthält.

Das Universalgalvanometer von Siemens & Halske, das oben (S. 96) schon zu Widerstandsmessungen sich als sehr praktisch erwies, läßt sich auch für solche Spannungsmessungen bequem verwenden. Zu dem Zweck ist dem Instrument ein Metallbügel beigegeben, welcher an die Klemmen II und IV angeschraubt wird. Die übrigen Klemmen, sowie der kreisförmig ausgespannte Draht kommen bei diesen Messungen nicht in Betracht, wohl aber die Widerstände 900, 90 und 9 Ohm, welche zur Erzielung der passenden Empfindlichkeit dienen. Diejenigen beiden Punkte eines Stromkreises, zwischen denen die

Fig. 91.



Spannung gemessen werden soll, werden an die Klemmen II und IV geschaltet. Das auf dem Grundriß (Fig. 78) sichtbare Loch y wird gestöpselt, wodurch die Angaben des Instruments erst wirklich Milliampères werden (für die

Widerstandsmessung oben kam es ja darauf

nicht an, da das Galvanometer keinen Ausschlag angeben sollte). Es ordnen sich nun die einzelnen Teile des Instrumentes so, wie es Fig. 91 zeigt. Sind alle Widerstände 900, 90 und 9 eingeschaltet, so ist im Galvanometerzweig der Widerstand 1000 Ohm enthalten, da das Galvanometer selbst 1 Ohm Widerstand besitzt. Folglich entspricht jeder Grad Ausschlag der Spannung 1 Volt. Sind bloß 90 und 9 eingeschaltet, so entspricht jeder Grad 0,1 Volt, bei 9 allein 0,01 Volt, und wenn alle Widerstände gestöpselt sind, so entspricht jeder Grad 0,001 Volt.

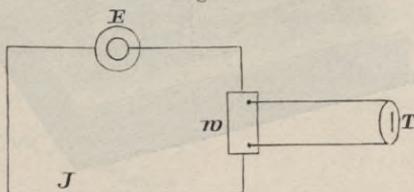
Wenn man so die Klemmenspannung eines jeden Elements in Volts ausdrücken kann und wenn man den Widerstand des Schließungsdrahtes nach früheren Methoden in Ohms bestimmt hat, so kennt man sofort die Stromstärke in Ampères, welche in diesem Draht herrscht. Denn es ist die

$$\text{Anzahl der Ampères} = \frac{\text{Anzahl der Volts}}{\text{Anzahl der Ohms}}$$

Indes bestimmt man gewöhnlich die Stromstärke ganz direkt in

Ampères, indem man in den Stromkreis selbst ein Galvanometer, speziell ein Ampèremeter einschaltet. Die Milliampèremeter, die wir bisher angeführt haben, gestatten allerdings direkt nur geringe Stromstärken zu messen, nämlich solche zwischen 0 und 150 Milliampères. Für noch geringere Stromstärken werden die ganz feinen Galvanometer benutzt, die wir erst im Kap. 7 besprechen werden. Man kann aber mit den Millampèremetern und überhaupt mit jedem für ganz schwache Ströme eingerichteten Instrument auch leicht Ströme von sehr großer Stärke messen, indem man sich eines einfachen und zweckmäßigen Kunstgriffes bedient. Es werden nämlich diesen Ampèremetern (also dem oben beschriebenen Milliampèremeter und dem Universalgalvanometer) genau abgemessene, sehr kleine Widerstände beigegeben, welche in den zu messenden Stromkreis mit eingeschaltet werden (und, da sie eben sehr klein sind, die Stromstärke desselben

Fig. 92.



nur unwesentlich ändern). An die Enden dieser Widerstände, die gewöhnlich $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ u. s. w. Ohm betragen, wird nun, und das ist der Kunstgriff, das Milliampèremeter in den Nebenschluß gelegt. Die Schaltung zur Messung der Stromstärke ist also die durch Fig. 92 dargestellte. Von der Batterie E fließt der Strom J, dessen Stärke gemessen werden soll. In diesen ist der kleine Widerstand w (etwa von $\frac{1}{999}$ Ohm) eingefügt und parallel zu diesem ist das Milliampèremeter T geschaltet. Wird nun in diesem Instrument die Nadel um 1 Grad abgelenkt, so wird dasselbe, wie wir wissen, und wie sein Name sagt, von einem Strom von 0,001 Ampère durchflossen. In dem Widerstand von $\frac{1}{999}$ Ohm fließt dann, nach dem Gesetz der Stromverzweigung von S. 72, ein 999mal so starker Strom, also ein Strom von 0,999 Ampère, da das Galvanometer den Widerstand 1 Ohm hat. Und in dem Hauptstrom, dessen Stärke gemessen werden soll, fließt danach ein Strom von

$$0,999 + 0,001 = 1 \text{ Ampère.}$$

Jeder Grad im Milliampèremeter entspricht danach einer Stromstärke von 1 Ampère im Hauptstrom. Hat der eingeschaltete Widerstand nicht $\frac{1}{999}$, sondern $\frac{1}{9}$ oder $\frac{1}{99}$ oder $\frac{1}{9999}$ Ohm

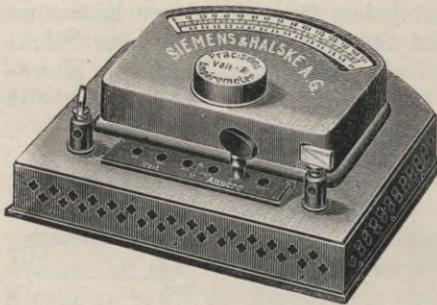
Widerstand, so gibt jeder Grad im Milliampèremeter eine Stromstärke von 0,01 oder von 0,1, oder von 10 Ampère im Hauptstrom an. So kann man also Stromstärken von 0,001 bis 1500 Ampère mit dem Instrument messen. Die sehr kleinen Widerstände von $\frac{1}{9}$ bis $\frac{1}{9999}$ Ohm werden aus dicken Manganinstreifen gebildet, deren Widerstand sich ja auch bei der Erwärmung nicht ändert (S. 87). Die Widerstände sind in Kästchen mit durchbrochenen Wänden enthalten, wie aus Fig. 93 zu ersehen ist.

Fig. 93.



Bei dem Universalgalvanometer ist dabei die Schaltung genau dieselbe, wie bei der Spannungsmessung. An die Klemmen II und IV wird der beigegebene Bügel angelegt, an diesen der kleine Widerstand von Fig. 93 angeschaltet und es wird der zu messende Strom mit durch diesen Widerstand geschickt, während alle Widerstände des Instruments sonst durch die Stöpsel ausgeschaltet sind.

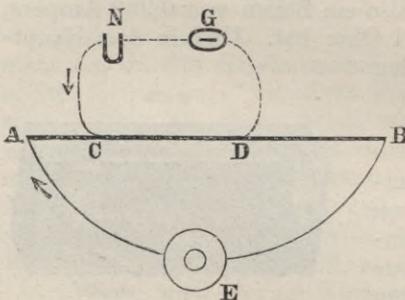
Fig. 94.



Sehr zweckmäßig werden neuere Präzisionsmeßinstrumente von Siemens & Halske, wie Fig. 94 zeigt, gleich derart eingerichtet, daß man in ihnen sowohl für die Voltmessung, wie für die Ampèremessung verschiedene Meßbereiche hat, indem die dazu notwendigen Vorschalt- und Nebenschlußwiderstände gleich in dem Boden des Apparates angebracht sind und durch Herausnehmen des Stöpsels eingeschaltet werden können. So hat das gezeichnete Instrument je nach der Stellung des Stöpsels links für die Spannungsmessung die drei Meßbereiche von 0 bis 3 oder bis 15 oder bis 150 Volt, und beim Einschalten des Stöpsels rechts für die Stromstärken die Meßbereiche von 0 bis 0,15 oder bis 1,5 oder bis 15 Ampère.

Da die Normalelemente, insbesondere das Kadmiumelement, eine sehr genau bestimmte und konstante elektromotorische Kraft haben, und da sie leicht und bequem herzustellen und aufzuheben sind, so braucht man sie seit einigen Jahren direkt, um mit ihrer Hilfe Spannungsdifferenzen und Stromstärken zu bestimmen. Man bedient sich zu diesem Zweck der Kompensationsschaltung, die schon auf S. 103 eingeführt wurde, die wir aber hier genauer besprechen wollen. Wenn wir einen Stromkreis (Fig. 95) bilden aus einer beliebigen Batterie E, beliebigen Drähten EA und EB und einem ausgespannten Draht AB, dessen Widerstand für jeden Zentimeter in Ohms wir kennen, so können wir mit Hilfe eines Normalelementes N und eines Galvanoskops sofort die Stromstärke in dem Kreise EAB in Ampères ermitteln, wenn wir die in der Figur angegebene Schaltung anwenden. Wir legen nämlich das Normalelement einerseits an einen Punkt C an, so daß die Stromrichtung die in der Figur gezeichnete ist, und verbinden andererseits N durch ein Galvanoskop hindurch mit einem Schleifkontakt D auf dem Draht. Verschieben wir den Schleifkontakt so lange, bis das Galvanoskop stromlos ist, so

Fig. 95.

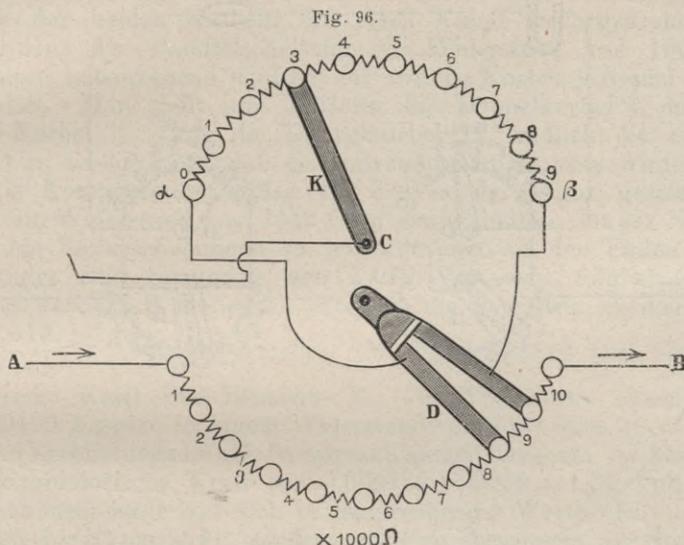


Wir legen nämlich das Normalelement einerseits an einen Punkt C an, so daß die Stromrichtung die in der Figur gezeichnete ist, und verbinden andererseits N durch ein Galvanoskop hindurch mit einem Schleifkontakt D auf dem Draht. Verschieben wir den Schleifkontakt so lange, bis das Galvanoskop stromlos ist, so

ist die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten C und D auf dem Draht gerade gleich der elektromotorischen Kraft des Normalelementes (also z. B. bei dem Kadmiumelement gleich 1,019 Volt). Da aber andererseits die Spannungsdifferenz zwischen C und D (der Spannungsverlust) gleich der Stromstärke im Drahte CD und dem Widerstand von CD ist, und da der letztere in Ohms bekannt sein soll, so sieht man, daß die

$$\text{gesuchte Stromstärke} = \frac{1,019}{\text{Widerstand von CD}} \text{ Ampère}$$

ist. Man kann so ohne ein geeichtes Galvanometer die Stromstärke in Ampères, und zwar sehr genau finden. Dieselbe Stromstärke, welche

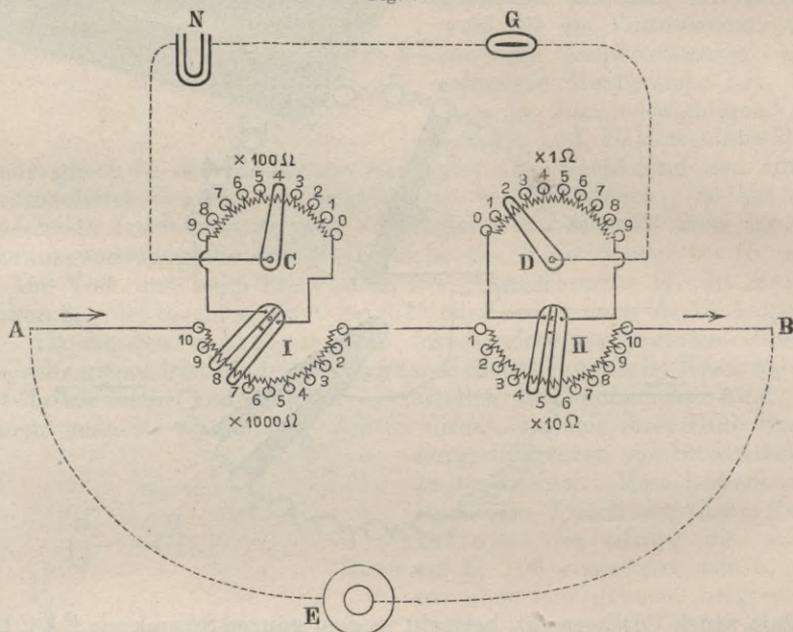


in dem Stück CD herrscht, herrscht in dem ganzen Stromkreis EACDB, weil ja der Nebenschluß CNGD stromlos gemacht würde. Den Stromkreis CNGD bezeichnet man als die Kompensationsleitung.

Die Anwendung eines solchen ausgespannten Drahtes, dessen Widerstand für jedes Stück bekannt sein soll, ist nicht bequem, insbesondere dann nicht, wenn man sehr große oder sehr kleine Widerstände CD in die Kompensationsleitung einführen muß. Man nimmt dann viel bequemer an Stelle des ausgespannten Drahtes einen Widerstandskasten, bei dem man bequem alle Widerstände von 0,1 Ohm bis zu 10 000 Ohm durch Stöpseln erhalten kann. Aber offenbar muß hier ein solcher Widerstandskasten eine besondere Einrichtung haben. Durch den Gleitkontakt D in Fig. 95 wird ja, wo er sich auch auf dem Draht AB befindet, der gesamte Widerstand dieses Drahtes und damit des ganzen Stromkreises EAB nicht geändert. Tritt D näher an C, so ist der Widerstand CD kleiner, dafür aber der Widerstand AC + DB größer, so daß AB immer denselben Widerstand behält. Würde man

aber zwischen C und D einen Widerstandskasten einschalten, und von diesem die zur Kompensation von N passenden Widerstände herausnehmen, so würde der gesamte Widerstand von A B sich ändern. Man muß deshalb vielmehr die Widerstandskästen, die man zwischen A und B einschaltet, so einrichten, daß derselbe Widerstand, den man aus ihnen zwischen C und D einschaltet, zugleich selbsttätig zwischen D und B oder A und C ausgeschaltet wird und umgekehrt, so daß der gesamte Widerstand zwischen A und B trotz der variablen Stöpselung immer derselbe bleibt. Solche Anordnungen sind in verschiedener Weise ausführbar. Apparate mit solcher Anordnung der Widerstände und zu

Fig. 97.



diesem Zweck bezeichnet man als Kompensationsapparate. Es soll hier nur die Anordnung bei dem Apparat von Siemens & Halske beschrieben werden. Dabei sind die Widerstandskästen als Kurbelrheostaten (S. 91) ausgebildet und, um nicht zu viel einzelne Rheostaten anbringen zu müssen, ist eine Anordnung der Widerstände getroffen, die zuerst aus Fig. 96 zu ersehen ist. In dieser sind zwischen A und B unten 10mal je 1000 Ohm zwischen den Kontaktknöpfen eingeschaltet. Aber ein aus zwei isolierten Teilen bestehender Hebel D ruht immer auf zwei von diesen Knöpfen und seine beiden Hälften sind mit den Enden α und β des oberen Rheostaten verbunden, der 9 Widerstände von je 1000 Ohm enthält. Dadurch sind zwischen A und B, wo auch die Kurbel D steht, immer 9900 Ohm enthalten. Denn die Kurbel schaltet stets einen der unteren Widerstände von 1000 Ohm mit dem oberen 9000 Ohm parallel. Zwei solche parallel geschaltete Wider-

stände entsprechen aber 900 Ohm. Diese und die übrigen 9000 Ohm des unteren Rheostaten sind also dauernd zwischen A und B eingeschaltet.

Diese Anordnung ist nun in dem Kompensationskasten getroffen, von dem Fig. 97 das Schema gibt. Ein (zu messender) Strom fließt von der Batterie E durch die beiden Doppelkurbelrheostaten I und II, von denen der erstere zwischen zwei Knöpfen je 1000 Ohm, der zweite je 10 Ohm enthält. Der Gesamtwiderstand des ersteren beträgt also 9900 Ohm, der des zweiten 99 Ohm, der ganze Widerstand zwischen A und B, der also bei allen Lagen der Kurbeln konstant bleibt, ist danach 9999 Ohm. Das Normalelement N ist nun einerseits mit der einfachen Kurbel am Punkte C, andererseits durch das Galvanometer G mit der einfachen Kurbel am Punkte D verbunden. Jedesmal, wenn die erste der beiden Kurbeln um einen Knopf weitergedreht wird, wird vermöge der Parallelschaltung ein Widerstand von 100 Ohm zugeschaltet, entsprechend wird bei der zweiten Kurbel jedesmal 1 Ohm zugeschaltet. Man stellt nun zunächst die Doppelkurbel I, dann die einfache Kurbel C, dann die Doppelkurbel II, endlich die einfache Kurbel D in solche Lage, daß das Galvanometer stromlos wird. Dann ist in die Kompensationsleitung bei der in der Figur gezeichneten Stellung ein Widerstand von 7442 Ohm eingeschaltet. Ist das Normalelement ein Kadmiumelement, so herrscht also an den Enden dieses Widerstandes eine Spannung von 1,019 Volt und folglich ist die Größe des durch AB fließenden Stromes, die gemessen werden sollte, gleich $\frac{1,019}{7442} = 0,000\ 139$ Ampère. Man findet sofort auch die elektromotorische Kraft des Elements E. Denn da dieses einen Strom von 0,000139 Ampère in einem Widerstand von 9999 Ohm (der Widerstand der Verbindungsdrähte ist vernachlässigt) erzeugt, so besitzt es eine elektromotorische Kraft von $0,000139 \times 9999 = 1,39$ Volt. Der Kompensationsapparat läßt sich in entsprechender Weise nicht bloß zu Messungen der Stromstärke, sondern auch zu Messungen der Spannung und des Widerstands benutzen und er erlaubt auch insbesondere einen Strom auf genau bemessene Stärke zu bringen. Da er dies alles nur durch Kombination von Widerständen zu erreichen gestattet, so ist er einer der brauchbarsten und vielseitigsten Apparate der gesamten elektrischen Meßtechnik.

Nachdem wir nunmehr das Hauptgesetz des elektrischen Stromes, das Ohmsche Gesetz, kennen, das bei jedem elektrischen Strom, mag er herkommen, wo er wolle, gilt, und die auf ihm beruhenden Messungen der Widerstände, elektromotorischen Kräfte, Spannungen und Stromstärken behandelt haben, wollen wir nun die Wirkungen des elektrischen Stromes der Reihe nach besprechen. Ein elektrischer Strom übt sowohl innerhalb seiner Bahn Wirkungen aus, als auch in der Umgebung seiner Bahn. Fast eine jede Wirkung, die der elektrische Strom erzeugt, ist, wie wir sehen werden, im stande, auch selbst wieder einen elektrischen Strom zu erzeugen, wenn man die Einrichtungen dazu zweckmäßig trifft.

5. Kapitel.

Die Wärme und Lichtwirkungen des elektrischen Stromes. Thermoelektrizität.

Ein elektrischer Strom fließt dauernd nur durch eine ganz geschlossene Kette von Leitern. Auf seinem ganzen Wege müssen sich leitende Körper, Metalle, Kohle, Flüssigkeiten aneinander schließen, um dem Strom den Durchgang zu gestatten. Sowie an einer Stelle die Leitung unterbrochen ist, hört der Strom zu fließen auf. Es befindet sich dann zwar an den beiden getrennten Enden der Leitung freie Elektrizität, aber diese kann durch die trennende Schicht, bestehe sie nun aus Luft oder Gas oder Ebonit oder aus einem anderen Isolator, im allgemeinen nicht hindurchfließen.

In den elektrischen Leitern selbst aber bringt der Strom während seines Durchflusses Wirkungen hervor, die ganz verschiedener Art sind, je nach der Natur der Leiter, die vom Strome durchflossen werden.

Wir wollen zuerst den Strom vom galvanischen Element aus nur durch Leiter erster Klasse, also durch Metalle oder durch Kohle senden, also nicht durch Flüssigkeiten, außer durch das metallische Quecksilber.

Die hauptsächlichste Wirkung des elektrischen Stromes besteht nur darin, daß er einen jeden solchen Leiter, ein jedes Metall, ein jedes Stück Kohle, durch welches er fließt, erwärmt. Man kann sich davon leicht durch einen Versuch überzeugen, indem man, wie in Fig. 98, einen dünnen Draht, am besten aus Platin, spiralförmig aufwindet und in ein Gefäß J mit Weingeist taucht, in welchem sich ein Thermometer T befindet. Sowie man die Enden des Platindrahtes mit den Polen einer galvanischen Säule G verbindet, fließt der Strom durch den Platindraht (durch den Alkohol nicht, weil Alkohol ein Isolator ist) und der Draht wird dadurch erwärmt. Diese Wärme teilt sich dem Alkohol mit, dessen Temperatur steigt, und die Erhöhung der Temperatur zeigt sich an dem Thermometer an.

Wir müssen nun die Gesetze dieser Wärmeezeugung ermitteln. Zunächst sieht man, daß die Temperatur am Thermometer um so höher wird, je länger der Strom durch den Draht fließt. Also finden wir das erste Gesetz, daß die durch den Strom entwickelte Wärmemenge um so größer wird, je längere Zeit der Strom fließt. In 2, 3, 4 Sekunden entwickelt der Strom 2-, 3-, 4mal so viel Wärme als in einer Sekunde.

Diese Wärme wird in jedem einzelnen Teile des Drahtes durch den Strom erzeugt, und daher ist die zweite Frage die: Wie hängt die Erwärmung eines Drahtstückes mit dem Widerstand desselben zusammen? Der Versuch hat nun gelehrt, daß von einem und demselben Strome in einem Drahtstück um so mehr Wärme erzeugt wird, je größer der Widerstand dieses Drahtstückes ist. Schließen wir z. B.

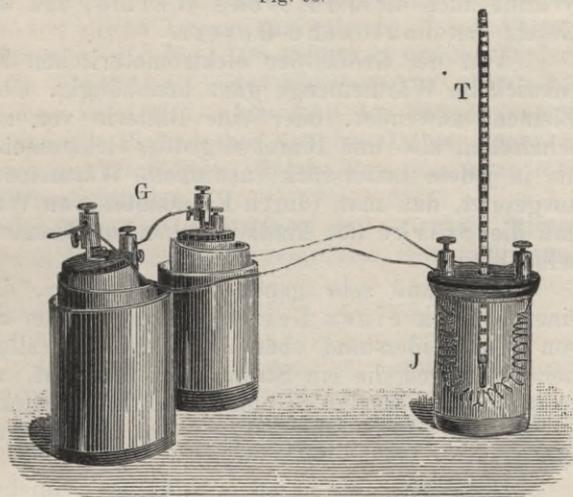
eine galvanische Säule durch einen Schließungskreis, in welchem sich zwei solche Drahtspiralen je in einem Gefäß mit Alkohol und Thermometer befinden, nehmen wir aber die beiden Spiralen so, daß sie ungleichen Widerstand haben, daß die erste z. B. einen 3mal so großen Widerstand hat als die zweite, so zeigen uns die Angaben der Thermometer, daß in der ersten Spirale auch

3mal so viel Wärme entwickelt wurde wie in der zweiten. Die Stärke des Stromes ist im ganzen Stromkreis, also auch in den beiden Spiralen dieselbe; die Erwärmung der einzelnen Leiterstücke hängt also ab von ihrem Widerstand und ist um so größer, je größer der Widerstand ist.

Die dritte Frage ist die: Wie hängt die Erwärmung, die in einem bestimmten Drahtstück erzeugt wird, ab von der Stärke des Stromes? Wir können diese Frage leicht mit unserem Apparat (Fig. 98) beantworten. Schicken wir durch die Spirale einmal einen Strom von 1 Ampère, dann einen Strom von 2 Ampère (indem wir etwa Widerstände, die vorher durch einen Kurbelreostaten in den Stromkreis eingeschaltet waren, ausschalten und so die Stromstärke vergrößern), dann einen Strom von 3 Ampère, so zeigt sich, daß die Erwärmung der Spirale auch immer größer wird, je größer die Stromstärke ist, und zwar sehr beträchtlich. Wenn statt 1 Ampère 2 Ampère herrschen, so ist die Erwärmung 4mal, wenn 3 Ampère herrschen, ist sie 9mal so groß. Das heißt also: wird die Intensität des Stromes doppelt, dreifach, vierfach so groß, als sie war, so wird die Erwärmung jedes einzelnen Leiterstückes bei sonst gleichen Umständen schon 4-, 9-, 16mal so groß. Die Erwärmung hängt also ab von dem Quadrat der Stromstärke.

Diese drei Größen, die Zeit, der Widerstand des Leiterstückes und die Stärke des durchfließenden Stromes, sind aber auch die einzigen,

Fig. 98.



von welchen die Erwärmung abhängt. In jedem Leiterstück ist die in jeder bestimmten Zeit, also z. B. in einer Sekunde, entwickelte Wärmemenge gleich dem Widerstand des Leiterstückes, multipliziert mit dem Quadrat der Stromstärke.

Dieses Gesetz der Wärmeentwicklung durch den galvanischen Strom wurde von Joule zuerst aufgestellt. Man nennt deshalb diese Wärme auch die Joulesche Wärme, und das eben ausgesprochene Gesetz das Joulesche Gesetz.

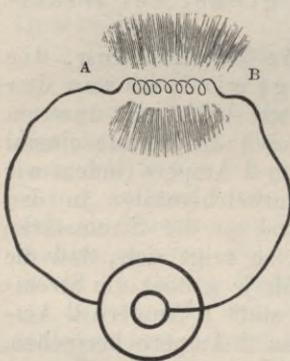
Von der Größe der elektromotorischen Kraft der Säule ist die entwickelte Wärmemenge ganz unabhängig. Ob man ein Daniellsches Element anwendet, oder eine Batterie von zehn hintereinander geschalteten, also mit 10mal so großer elektromotorischer Kraft, es bleibt die in jedem Leiterstück entwickelte Wärmemenge doch dieselbe, vorausgesetzt, daß man (durch Einschalten von Widerständen) dafür sorgt, daß die Stärke des hindurchgehenden Stromes in beiden Fällen dieselbe bleibt.

Man muß sehr genau darauf achten, daß die Erwärmung in einem Stück eines Leiters außer von der Stromstärke nur abhängt von dem Widerstand eben dieses Stückes allein. In einer einfachen Leitung, durch die ein Strom geht, herrscht, wie wir gesehen haben, zwar überall dieselbe Stromstärke. Die entwickelte Wärmemenge aber ist in allen gleich langen Teilen der Leitung verschieden, sobald diese verschiedene Widerstände haben.

Die Wärme, die in jedem Stück des Schließungskreises fortwährend entwickelt wird, erhöht nun fortwährend die Temperatur dieses Stückes. Ist der Strom stark genug und der Widerstand des Stückes groß genug, so kann diese Temperaturerhöhung eine so bedeutende sein, daß das Stück anfängt zu glühen, rot, gelb, weiß glüht und schließlich sogar schmilzt. Je geringere Masse ein Stück hat, desto leichter wird seine Temperatur durch die Wärmemenge erhöht, da ja diese Wärmemenge sich nicht auf eine zu große Masse zu verteilen braucht. Je dünner also ein Draht ist, desto leichter kann er zum Glühen kommen, besonders da ein sehr dünner Draht bei sonst gleichen Umständen dem Strom auch einen sehr großen Widerstand entgegengesetzt.

Man kann also durch den elektrischen Strom das Glühen eines Drahtes sehr leicht hervorbringen. Man verbindet z. B. drei Bunsensche Elemente hintereinander und schließt ihre Pole durch einen beliebigen Draht, in welchem sich aber an einer Stelle ein nicht zu langes Stück eines sehr dünnen Drahtes, z. B. eines Platindrahtes, befindet (Fig. 99), der am besten spiralförmig gewunden ist. In den dicken Drähten ist die entwickelte Wärme nicht groß und nicht ausreichend, um diese zum Glühen zu bringen. In dem dünnen Platindraht AB dagegen ist der Widerstand und folglich auch

Fig. 99.



die entwickelte Wärme sehr groß, und da der Draht dünn ist, so reicht die Wärme aus, um den Draht zum hellen Weißglühen zu bringen.

Hat man sehr starke Ströme, so kann man ganze Kupferbarren kiloweise zum Schmelzen bringen, wie es in New York unbeabsichtigterweise bei der ersten Einrichtung von elektrischen Zentralstationen geschah.

Wie wir oben auf S. 83 gesehen haben, ist der spezifische Widerstand des Platins größer als der des Silbers. Leitet man also einen Strom durch eine Reihe von gleich langen und gleich dicken Platinstücken p und Silberstücken s, wie Fig. 100 zeigt, so ist der Widerstand und daher auch die Erwärmung jedes Platinstückes größer als die jedes Silberstückes. Man kann also, wenn man den Strom passend stark wählt, bewirken, daß die Platindrähte alle ins Glühen kommen, die Silberdrähte aber noch dunkel bleiben. Solche Versuche kann man in verschiedenen Variationen anstellen.

Diese Eigenschaft des galvanischen Stromes, daß er seinen Stromkreis erwärmt und einzelne Teile desselben sogar zum Glühen bringen

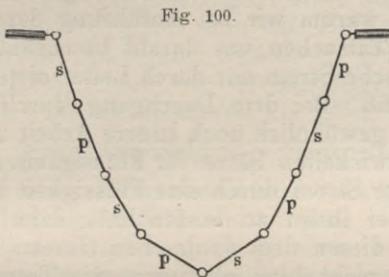


Fig. 101.



kann, wird vielfach benutzt. Man bedient sich dieser Eigenschaft in der Medizin, wo man darauf das galvanokaustische Verfahren gegründet hat; man bedient sich dieser Wirkung zur Entzündung von Sprengmaterialien. Man benutzt jetzt auch schon vielfach diese Wirkung zu Zwecken des Heizens und Kochens, wie im zweiten Abschnitt ausführlich gezeigt werden wird. Endlich hat diese Eigenschaft des Stromes ihre wichtigste Anwendung dadurch gefunden, daß man durch Edison gelernt hat, sie zum Beleuchten von Wohnungen zu benutzen.

Die Glühlampen, wie man die auf diesem Prinzip beruhenden Lampen nennt, bestehen im wesentlichen nur aus einem dünnen Kohlenstreifen, wie in Fig. 101, welches gewöhnlich hufeisenförmig gebogen und in ein Glasgefäß eingeschlossen ist. Durch den Kohlendraht wird ein Strom hindurchgesendet, und da das Kohlenstreifen sehr großen Widerstand hat, so kommt es durch den Strom in helles Glühen. In dem zweiten Teil dieses Werkes, Kapitel 6, ist diese Anwendung ausführlich dargestellt.

Die Tatsache, daß ein Strom seinen eigenen Stromkreis erwärmt, ist nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie, den allgemeinsten Satz, den die Physik aufzuweisen hat, direkt einzusehen, ja es läßt sich aus diesem Prinzip sogar das Joulesche Gesetz direkt ableiten.

Das Gesetz der Erhaltung der Energie sagt nämlich aus, daß bei allen physikalischen Erscheinungen Energie weder gewonnen noch verlorengehen kann. Die Hervorbringung einer jeden physikalischen Erscheinung erfordert einen gewissen Aufwand von Arbeit, die Vernichtung derselben muß daher eine ebenso große Menge Arbeit frei machen. In einem elektrischen Strom gleichen sich nun fortwährend die entgegengesetzten Elektrizitäten aus, welche vom Zinkpol zum Kupferpol und vom Kupferpol zum Zinkpol fließen, sie vernichten sich fortwährend gegenseitig. Da man nun zur Erzeugung, oder besser gesagt, zur Trennung der Elektrizitäten Arbeit aufwenden muß, so muß die Vereinigung derselben fortwährend Arbeit frei machen. Leistet nun der Strom nicht wirklich mechanische Arbeit (und wir werden sehen, daß wir ihn dazu benutzen können, wenn wir wollen), so verwandelt sich die gesamte frei gewordene Arbeitsmenge in Wärme. Dies ist der tiefere physikalische Grund dieser Jouleschen Wärmeentwicklung. Wenn daher der galvanische Strom irgend eine andere Arbeit leistet, wenn er nicht bloß in seinem Kreise ohne Arbeit zu leisten fließt, so muß auch die in dem Stromkreis entwickelte Wärmemenge eine kleinere werden. Dies ist der Grund, warum wir bei Anführung der über die Joulesche Wärme ermittelten Tatsachen uns darauf beschränkt haben, anzunehmen, daß der galvanische Strom nur durch Leiter erster Klasse, durch Metalle oder Kohle fließt. Bei dem Durchgang durch Flüssigkeiten hat nämlich der Strom gewöhnlich noch andere Arbeit zu leisten. Deswegen gelten dann die entwickelten Sätze für Flüssigkeiten im allgemeinen nicht. Wenn aber der Strom durch eine Flüssigkeit hindurchfließt, ohne daß er Arbeit bei ihnen zu leisten hat, dann folgt die Wärmeentwicklung auch bei diesen dem Jouleschen Gesetz.

Wir können aber auch nicht bloß allgemein die Tatsache der Erwärmung, sondern direkt das Joulesche Gesetz durch Überlegungen ableiten, die von dem Prinzip der Erhaltung der Energie ausgehen. Wenn eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. 5 Coulomb, sich auf einem Körper befindet, auf dem die Spannung eine bestimmte Größe hat, z. B. 3 Volt, so wissen wir aus S. 20, daß die in diesem elektrischen Körper steckende Energie gleich ist $15 \text{ Volt} \times \text{Coulomb}$,

oder daß er eine Arbeit von $\frac{15}{9,81}$ Kilogramm-meter leisten kann. Diese

Arbeit mußte aufgewendet werden, um die 5 Coulomb auf die Spannung 3 Volt zu bringen, diese Arbeit wird auch wieder frei, wenn der Körper leitend mit der Erde verbunden wird, also wenn die 5 Coulomb auf die Spannung Null kommen. Wird aber die Elektrizität nicht auf die Spannung Null gebracht, sondern auf eine andere Spannung, die geringer ist als 3 Volt, also z. B. auf 1 Volt, so ist die Arbeit, die dabei frei

wird, $5 \times (3 - 1) = 10 \text{ Volt-Coulomb} = \frac{10}{9,81}$ Kilogramm-meter. (Man

multipliziert also nicht bloß die Zahlen miteinander, sondern auch die Benennungen. 1 Volt-Coulomb ist eine gewisse Arbeit, nämlich gleich $\frac{1}{9,81}$ Kilogramm-meter.) Allgemein: Wenn eine bestimmte An-

zahl Coulombs von einer höheren Spannung zu einer niederen fällt und die Spannungen in Volts gemessen werden, so ist die dabei frei werdende Arbeit gleich

Anzahl der Coulombs \times Differenz der Volts (Benennung: Volt-Coulombs).

In jedem Stück eines Drahtes nun, durch den ein elektrischer Strom geht, fließt fortwährend die positive Elektrizität von der höheren Spannung nach der niederen Spannung, und die Differenz der Spannungen ist ja gerade das, was wir den Spannungsverlust in diesem Stück genannt haben. Es wird also dabei stets Arbeit frei. In jeder Sekunde fließt so eine gewisse Menge Elektrizität ab und die Anzahl der Coulombs, die in einer Sekunde abfließen, haben wir ja als die Stärke des Stromes bezeichnet und in Ampères ausgedrückt. Daher ist die in jeder Sekunde in einem stromdurchflossenen Drahtstück frei werdende Arbeit gleich

Spannungsverlust in Volts \times Stromstärke in Ampères.

Die Größe der von irgend einer Maschinerie in jeder Sekunde geleisteten Arbeit nennt man den Effekt dieser Maschinerie. Es besitzt also ein elektrischer Strom in jedem Stück seiner Bahn einen gewissen Effekt, und wir können sagen, indem wir wieder die Benennungen auch multiplizieren, der Effekt in einem Stromstücke ist gleich

Spannungsverlust \times Stromstärke (Volt-Ampère).

Die Größe eines Effekts mißt man nun gewöhnlich in Watts, wobei 1 Watt derjenige Effekt ist, bei dem in jeder Sekunde der 9,81. Teil eines Kilogrammmeters geleistet wird. 1 Watt ist daher gerade gleich 1 Volt-Ampère und in unserem Stromstück herrscht der Effekt

Spannungsverlust \times Stromstärke (Benennung: Watt).

Statt dieses Ausdrucks für den Effekt in einem Drahtstück kann man auch folgenden bilden. Da der Spannungsverlust in einem Drahtstück gleich dem Produkt aus seiner Stromstärke in Ampères und seinem Widerstand in Ohms ist, so ist der Effekt auch gleich

Quadrat der Stromstärke \times Widerstand (Benennung: Watt).

Für große Effekte nimmt man als Einheit jetzt 1 Kilowatt, welches gleich 1000 Watt ist, so daß unser Stromstück auch den Effekt hat

$$\frac{\text{Spannungsverlust} \times \text{Stromstärke}}{1000} \text{ Kilowatt.}$$

Der Effekt von Maschinen wird in der Technik gewöhnlich in Pferdekraften ausgedrückt. Unter einer Pferdekraft (PS) versteht man denjenigen Effekt, bei welchem in jeder Sekunde 75 Kilogrammmeter Arbeit geleistet werden. Da 1 Kilowatt der Effekt ist, bei dem in der Sekunde $\frac{1000}{9,81} = 102$ Kilogrammmeter Arbeit geleistet werden, so ist

1 Kilowatt gleich 1,36 Pferdekraften und daher ist auch der Effekt eines Stromstückes leicht in Pferdekraften auszudrücken. Fließt also ein Strom mit der Stromstärke 20 Ampère durch einen Draht, an

dessen Enden der Spannungsunterschied 150 Volt ist, so ist der elektrische Effekt dieses Stromstückes

$$20 \times 150 = 3000 \text{ Watt} = 3 \text{ Kilowatt} = 4,08 \text{ PS.}$$

Wenn nun dieser Effekt nicht wirklich dazu benutzt wird, um z. B. Maschinen in Gang zu setzen und dadurch Arbeit zu leisten, so verwandelt er sich ganz in Wärme, in jeder Sekunde wird durch diesen Effekt eine gewisse Wärmemenge entwickelt, und die Größe dieser per Sekunde erzeugten Wärmemenge in einem Drahtstück ist also gleich dem Spannungsverlust in diesem Drahtstück, multipliziert mit der Stromstärke, oder, was dasselbe ist, auch gleich

Quadrat der Stromstärke \times Widerstand des Drahtstückes,

und dies ist das Joulesche Gesetz, das also aus dem Satz von der Erhaltung der Energie folgt.

In jeder Sekunde kann also der Strom in jedem Drahtstück diese bestimmte Arbeit leisten und in dem ganzen Stromkreis daher die Summe aller der einzelnen Arbeiten. Selbstverständlich muß irgendwo im Stromkreise ein Grund dafür, eine Quelle für diese Arbeit vorhanden sein, und wir werden sehen, daß die Quelle dieser Arbeit in den galvanischen Elementen durch die chemischen Kräfte geliefert wird.

Die Joulesche Wärme ist selbstverständlich immer dieselbe, mag nun der Strom in der einen Richtung durch die Leitung gehen oder in der anderen. Es ist deshalb auch, wenn man Drähte zum Glühen bringen will, ganz gleichgültig, in welcher Richtung man den Strom durch die Drähte sendet.

Im Jahre 1821 beobachtete der englische Physiker Davy eine höchst merkwürdige und glänzende Erscheinung, welche von dieser Jouleschen Wärmeentwicklung mit abhängt. Als er nämlich die Pole einer sehr starken galvanischen Batterie mit zwei Stäben aus Kohle verband und diese Kohlen aneinander brachte, daß sie sich berührten, so ging der starke elektrische Strom durch sie hindurch. Als er aber die Enden der beiden Kohlen danach voneinander etwas entfernte, so daß eigentlich der Strom unterbrochen sein mußte, so entstand zwischen den Kohlen ein außerordentlich helles Licht. Es kamen die Enden der Kohle in helle Weißglut und ebenso glühte die Luft bläulich zwischen ihnen und der Strom war nicht unterbrochen, sondern dauerte an.

Diese Erscheinung nennt man den elektrischen oder Davy'schen Lichtbogen oder Flammenbogen und das Licht selbst daher Bogenlicht. Es erklärt sich die Erscheinung daraus, daß die Kohlen, solange sie sich noch berühren, durch den Strom erwärmt werden und wenn sie dann voneinander getrennt werden, zum Teil verdampfen, d. h. daß Kohlenpartikelchen von ihnen durch die trennende Luftschicht hindurchfliegen, welche nun auch den Übergang des elektrischen Stromes vermitteln. Aber in dieser Kohlendampfschicht findet der Strom einen großen Widerstand und es gehört daher einerseits eine große Spannung des Stromes dazu, um diesen Widerstand zu überwinden und andererseits geht diese Überwindung des großen Wider-

standes nur mit Entwicklung von Wärme vor sich, die hierbei so stark wird, daß die Enden der Leiter, zwischen denen die Luft sich befindet, und die Luft selbst ins Glühen kommen.

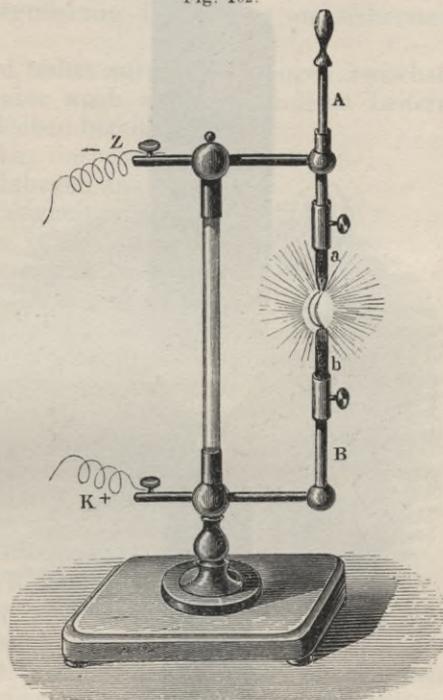
Wenn man also eine galvanische Säule von großer elektromotorischer Kraft, z. B. 25 bis 30 Bunsensche Elemente hintereinander anwendet und, nachdem der Strom durchgegangen ist, an einer Stelle den leitenden Kreis unterbricht (es braucht das nicht gerade zwischen zwei Kohlenstäben zu sein), so daß sich eine kleine Luftstrecke zwischen den Unterbrechungsstellen befindet, so fließt also der elektrische Strom noch weiter durch die trennende Luftschicht hindurch unter Entwicklung des Lichtbogens. Man bezeichnet die Leiter, zwischen denen die glühende Luftschicht sich befindet, als die Elektroden. Je leichter zerteilungsfähig die Substanz der Elektroden ist, um so leichter bildet sich der Lichtbogen.

Sehr gut zeigen diese Erscheinungen Elektroden von Zink, von Eisen oder von Quecksilber. Am schönsten und glänzendsten wird aber dieses Phänomen, wenn man den Strom zwischen Kohlen durch Luft übergehen läßt. Immer aber müssen die Elektroden, die Kohlen, einander zuerst berühren und dann erst getrennt werden, damit der Lichtbogen entsteht. Eine Abbildung einer zur Erzeugung des Lichtbogens brauchbaren Einrichtung gibt Fig. 102. Bei K und Z kommen die Leitungsdrähte von der galvanischen Batterie und gehen durch die Metallhalter A und B und zu den runden Kohlenstäben a und b, die zuerst in

Berührung miteinander sind, damit der Strom überhaupt fließen kann und die dann getrennt und in geringer Entfernung voneinander gehalten werden und zwischen sich eine kleine Luftschicht haben. Ist nun die elektromotorische Kraft der Batterie groß genug, so geht zwischen den Kohlenenden der Strom über und bildet dabei den Flammenbogen, wie er in der Figur angedeutet ist.

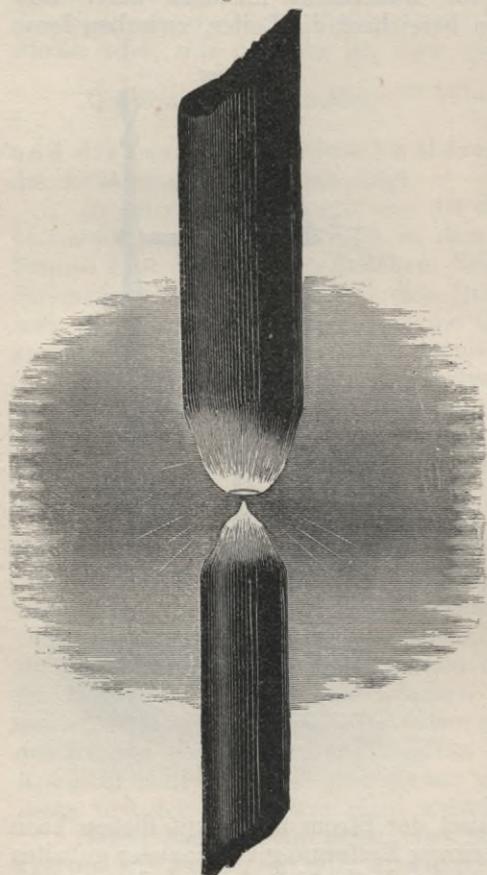
Von den Enden der Kohlen, insbesondere von demjenigen, welches mit dem positiven Pol der Batterie verbunden ist, fliegen die glühenden Teilchen zu dem anderen über. Hat man die Kohlenenden zuerst beide zugespitzt, so ist nach kurzer Zeit die Spitze an der positiven Kohle verschwunden und es hat sich an ihrer Stelle ein Krater

Fig. 102.



gebildet, von welchem aus die Teilchen zur negativen Kohle überfliegen. Die negative Kohle bleibt spitz. Nachdem der Flammenbogen eine Zeit lang bestanden hat, sehen die Enden der Kohlen so aus, wie es Fig. 103 zeigt. Die Temperatur der weißglühenden Kohlenenden ist eine sehr bedeutende. Die positive Kohle, welche den Krater bildet, hat eine Temperatur von etwa 3500, die negative, zugespitzte Kohle eine solche von etwa 2500° C. Die beiden Kohlen brennen natürlich durch die Hitze ab, die Kohle verbindet sich in der Hitze mit dem Sauerstoff der Luft zu Kohlenoxyd und Kohlensäure und da von der positiven Kohle noch außerdem eine Menge von Teilchen gegen die negative hingeschleudert werden, so wird die positive Kohle rascher kleiner als die negative. Erfahrungsgemäß brennt sie etwa doppelt so rasch ab als die negative. Warum die eine Kohle rascher abbrennt als die andere, ist noch nicht aufgeklärt. Vermutlich steckt darin noch ein wichtiges Geheimnis. Durch das Abbrennen der Kohlen wird der Abstand, die Luftschicht, zwischen ihnen immer größer, und es muß daher bald ein Zustand eintreten, bei dem der Widerstand der Luftschicht so groß wird, daß der Strom ihn nicht mehr überwinden kann. Dann hört der Strom zu fließen auf, der Flammenbogen erlischt. Wenn man also den Flammenbogen lange erhalten will, so muß man die Kohlen einander in dem Maße nähern, wie sie abbrennen. Das kann man natürlich einige Zeit me-

Fig. 103.



nisch mit der Hand machen. Um ihn aber dauernd zu erhalten, muß man dafür sorgen, daß die Kohlen von selbst einander sich nähern, während sie abbrennen. Vorrichtungen zu diesem Zweck sind in großer Anzahl ersonnen und im zweiten Teil dieses Werkes, Kapitel 5, werden wir die hauptsächlichsten dieser Konstruktionen, die elektrischen Bogenlampen, besprechen.

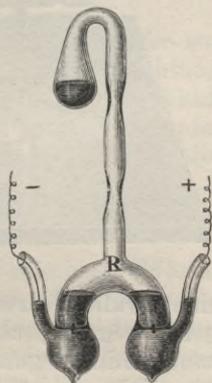
Das elektrische Bogenlicht übertrifft an Helligkeit alle anderen Lichtquellen, die wir auf Erden bis jetzt erzeugen können, ganz be-

deutend. Es ist deshalb ganz außerordentlich geeignet, um zur Beleuchtung von Städten, von Straßen und Plätzen zu dienen.

Der Flammenbogen kann nur entstehen, wie wir gesehen haben, wenn die Spannung des Stromes groß genug ist, um den Widerstand der Luft überwinden und einen starken Strom durch sie hindurchsenden zu können. Man muß deshalb zur Erzeugung des elektrischen Lichts Elektrizität aus Quellen von hoher elektromotorischer Kraft nehmen. Davy erzeugte das Licht zuerst, als er eine galvanische Säule anwendete, die aus 2000 Elementen hintereinander verbunden bestand. Allerdings konnte er dann den Flammenbogen so lange erhalten, bis die Kohlenenden auf 7 cm Entfernung voneinander abgebrannt waren. Für gewöhnlich aber läßt man die beiden Enden höchstens 3—6 mm auseinander stehen, weil dann die Regulierung des Bogens am sichersten auszuführen ist.

Für Beleuchtungszwecke wird bisher nur der Lichtbogen zwischen Kohlen angewendet. Daß man aber auch zwischen anderen Leitern den Lichtbogen erzeugen kann, ist oben bereits erwähnt worden. Für physikalische, insbesondere optische Versuche hat sich der Lichtbogen zwischen Elektroden aus Quecksilber von Wichtigkeit erwiesen. Dieser wird jetzt leicht und bequem in der Quecksilberbogenlampe von Arons erzeugt, die in Fig. 104 abgebildet ist. Die ganze Lampe besteht aus Glas. Man sieht das Quecksilber unten in den beiden Schenkeln, in welche durch die Ansätze Platindrähte eingeführt sind. Diese dienen zur Verbindung mit einer Batterie von mindestens 60 Volt Spannung. Die beiden Quecksilberkuppen berühren sich zunächst nicht. Durch langsames Neigen der Lampe kann man das Quecksilber aus dem einen Schenkel in den anderen überfließen lassen und sobald die bisher getrennten Quecksilbermassen sich berühren, geht der Strom hindurch und wenn die Röhre nun wieder vertikal gestellt wird, so entwickelt sich über den beiden Kuppen bei R der Lichtbogen, der hellgrün leuchtet und der nun stundenlang andauert. Zerlegt man das Licht dieses Bogens durch ein Prisma, so findet man in demselben die hellen grünen Quecksilberlinien.

Fig. 104.

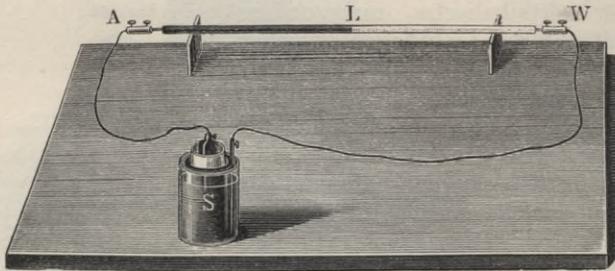


Während die bisher besprochene Joulesche Wärme in jedem Stück eines Stromkreises erscheint und eben nur das Äquivalent für die freierwerdende Arbeit ist, zeigt der elektrische Strom in manchen Fällen noch Wärmewirkungen anderer Art.

Wenn man den Schließungsdraht eines galvanischen Elementes so einrichtet, daß er nicht aus einem Metall, sondern aus zwei verschiedenen, aneinander gelöteten oder sonst fest miteinander verbundenen Metallen, z. B. aus Kupfer und Eisen besteht, so tritt an der Lötstelle noch eine andere Wärmewirkung auf. Es zeigt sich nämlich an ihr außer der Jouleschen Wärme noch eine besondere Erwärmung oder Abkühlung, je nach der Richtung, in welcher der Strom durch

die Lötstelle fließt. Am kräftigsten zeigt sich diese Wirkung, wenn man den Strom durch einen Stab gehen läßt, der aus einem Wismutstab und einem Antimonstab zusammengesetzt ist. In Fig. 105 ist S ein Daniellsches Element und der Strom geht vom Kupfer durch den Stab W A, der bei W aus Wismut, bei A aus Antimon besteht, und kommt dann von A zum Element zurück. Bei dieser Richtung des Stromes wird die Lötstelle L der beiden Metalle abgekühlt, sie wird kälter als die Umgebung. Damit die Joulesche Wärme, die ja immer vorhanden ist, diese abkühlende Wirkung möglichst wenig verdeckt, muß man die Stäbe ziemlich dick nehmen. Dadurch wird ihr Widerstand, also auch die Joulesche Wärme, klein. Wenn also der Strom vom Wismut zum Antimon geht, wird die Lötstelle kälter. Läßt man umgekehrt den Strom (d. h. immer den positiven Strom) vom Antimon durch die Lötstelle zum Wismut gehen, so wird die Lötstelle wärmer, als sie nach dem Jouleschen Gesetz werden sollte.

Fig. 105.



Wirkung des Stromes nach ihrem Entdecker, Peltier, die Peltiersche Wirkung und die positive oder negative erzeugte Wärme die Peltiersche Wärme. Die Peltiersche Wärme ist in unserem Falle positiv, also

eine wirkliche Erwärmung, wenn der Strom vom Antimon zum Wismut geht; negativ, also eine Abkühlung, wenn der Strom vom Wismut zum Antimon geht.

Diese abkühlende Wirkung des Stromes hat Lenz sehr deutlich durch einen Versuch gezeigt. Er machte in die Lötstelle zwischen einem Wismut- und einem Antimonstab ein Loch, füllte Wasser hinein und befestigte darin ein Thermometer. Dann legte er den ganzen Stab auf schmelzenden Schnee, so daß alles die Temperatur 0° hatte. Sowie er nun den Strom eines Daniellschen Elements vom Wismut zum Antimon gehen ließ, wurde die Lötstelle unter 0° abgekühlt, das Wasser kam allmählich zum Frieren und nach 5 Minuten war es vollständig gefroren und hatte eine Temperatur von $3,5^{\circ}$ C. unter Null.

Ganz so wie bei Wismut und Antimon tritt immer bei je zwei zusammengelöteten Metallen die Peltiersche Wärme auf, wenn ein Strom durch sie hindurchgesendet wird. In welcher Richtung der Strom fließen muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird, läßt sich natürlich nur aus der Erfahrung entnehmen. Das hängt von der Natur der zusammengelöteten Metalle ab. Die Erfahrung hat nun gelehrt, daß immer, wenn Wismut mit einem anderen Metall, Antimon, Eisen, Silber, Kupfer, Gold u. s. w. zusammengelötet ist, die Lötstelle abgekühlt wird, wenn der positive Strom vom Wismut zu dem anderen

Metall durch die Lötstelle geht. Es lassen sich überhaupt alle Metalle in eine Reihe so ordnen, daß man aus der Reihenfolge sogleich sagen kann, in welcher Richtung der Strom durch die Kombination zweier von ihnen fließen muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird. In der folgenden Reihe sind einige Metalle so zusammengestellt. Man nennt sie die thermoelektrische Spannungsreihe.

Die thermoelektrische Spannungsreihe.

Wismut,
Quecksilber,
Platin,
Gold,
Kupfer,
Zinn,
Blei,
Zink,
Silber,
Eisen,
Antimon.

Wenn man z. B. einen Stab hat, der aus Eisen und Kupfer zusammengelötet ist, und wenn man wissen will, in welcher Richtung man den Strom hindurchsenden muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird, so findet man aus obiger Reihe, daß man den Strom vom Kupfer durch die Lötstelle zum Eisen senden muß. Denn Kupfer steht in der Reihe vor dem Eisen.

Schickt man den Strom in der entgegengesetzten Richtung hindurch, so wird die Lötstelle erwärmt.

Zwischen der Peltierschen Wärme und der Jouleschen Wärme bestehen also die Unterschiede, daß erstens die Joulesche Wärme immer positiv, also immer eine wirkliche Erwärmung ist, mag nun der Strom in der einen Richtung durch den Schließungskreis hindurchfließen oder in der anderen. Die Peltiersche Wärme dagegen ist positiv, wenn der Strom in der einen, negativ, wenn er in der anderen Richtung fließt. Und daß zweitens die Joulesche Wärme in jedem Stück des Schließungsdrahtes vorhanden ist, während die Peltiersche Wärme nur an der Verbindungsstelle zweier verschiedener Metalle auftritt.

Bei dieser Peltierschen Wirkung des elektrischen Stromes stoßen wir nun zum erstenmal auf die Umkehrbarkeit von elektrischen Vorgängen.

Ebenso nämlich, wie ein elektrischer Strom an der Lötstelle zweier Metalle eine besondere Erwärmung oder Abkühlung hervorbringt, je nach seiner Richtung, ebenso bringt umgekehrt auch eine äußere Erwärmung oder Abkühlung der Lötstelle zweier zu einem geschlossenen Kreis verbundener Metalle einen elektrischen Strom hervor.

Man kann dies sehr leicht zeigen. In Fig. 106 ist *op* ein Wismutstreifen, an welchem ein Kupferbügel *m n* angelötet ist (bei *m* und *n*). In dem Hohlraum zwischen beiden Metallen befindet sich eine drehbar aufgesetzte Magnethadel. Sowie man nun die eine Lötstelle, etwa *on*,

erwärmt, entsteht ein elektrischer Strom, den man daraus erkennt, daß er die Magnetnadel ablenkt. Der Strom fließt in dem ganz geschlossenen metallischen Kreise, und zwar hat der positive Strom die Richtung des Pfeiles von dem Wismut durch die warme Lötstelle zum Kupfer und von diesem zurück. Ganz ebenso entsteht ein Strom, wenn man die eine Lötstelle, z. B. *on*, kälter macht als die andere, indem man sie z. B. mit Eis umgibt. Dann fließt der positive Strom vom Kupfer durch die kalte Lötstelle zum Wismut, also ebenso wie vorher durch die wärmere Lötstelle vom Wismut zum Kupfer. Man nennt diese Ströme Thermoströme oder auch thermoelektrische Ströme. Sie wurden von Seebeck im Jahre 1823 entdeckt. Wir haben also hier galvanische Ströme, welche nicht in galvanischen Elementen entstehen, sondern welche nur durch einfache Wirkung der Wärme hervorgerufen werden. Sobald man irgend zwei verschiedene Metalle zu

einem geschlossenen Kreis zusammenlötet und die eine Lötstelle auf eine andere Temperatur bringt als die andere, so fließt in diesem Kreis ein elektrischer Strom. Bei unserer Kombination von Wismut und Kupfer fließt der positive Strom immer durch die wärmere Lötstelle vom Wismut zum Kupfer. Bei allen anderen Kombinationen von je zwei Metallen hat der Thermoström ebenfalls eine Richtung, die von

der Natur der beiden Metalle abhängt. Wenn man so alle Metalle der Reihe nach miteinander in thermoelektrische Verbindung bringt, so kann man sie ebenfalls wieder in eine Reihe so ordnen, daß immer der positive Strom durch die erwärmte Lötstelle vom vorhergehenden zum folgenden Metall geht. Diese Reihe ist dieselbe, wie die schon vorher angeführte thermoelektrische Spannungsreihe:

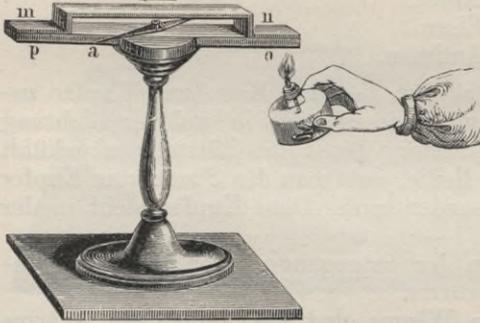
Wismut, Quecksilber, Platin, Gold, Kupfer, Zinn, Blei, Zink, Silber, Eisen, Antimon.

Wismut und Antimon stehen in der Reihe am weitesten auseinander. Sie geben also die stärksten Thermoströme.

Bei einem Thermoström ist, wie bei jedem anderen galvanischen Strom, zu unterscheiden zwischen der elektromotorischen Kraft, dem Widerstand und der Stromstärke.

Die elektromotorische Kraft in einer solchen thermoelektrischen Kombination, die man ein Thermoelement nennt, hängt natürlich ab von der Art der beiden Metalle, welche in Verbindung gebracht sind, und sie hängt wesentlich ab von dem Temperaturunterschied der beiden Lötstellen. Je größer der Unterschied der Temperaturen an den beiden Lötstellen ist, desto größer ist die elektromotorische Kraft des Thermoelements. Das gilt jedoch nicht bis zu allen Temperaturen. Bei höheren

Fig. 106.



Temperaturen wird oft die Struktur eines Metalles eine andere und infolgedessen ändert sich auch seine thermoelektrische Differenz mit einem anderen Metall, die elektromotorische Kraft wird dann bei größerer Temperaturdifferenz oft nicht größer, sondern kleiner.

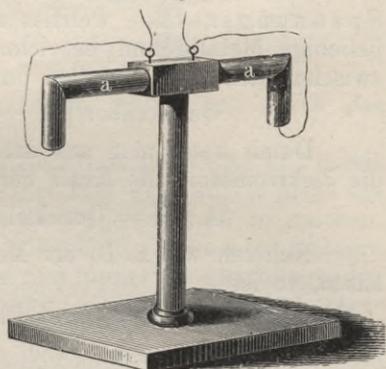
Der innere Widerstand eines Thermoelements ist im allgemeinen sehr klein, da das Element ja nur aus Metallen ohne Flüssigkeiten besteht. Man kann in den Kreis eines Thermoelements beliebige Widerstände einschalten, man kann den Strom eines Thermoelements durch alle möglichen Apparate gehen lassen. Zu dem Zwecke wird der eine der beiden Drähte des Thermoelements aufgeschnitten und seine freien Enden mit dem äußeren Stromkreis verbunden.

Von der elektromotorischen Kraft des Thermoelements und von dem gesamten Widerstand des Stromkreises hängt die Stärke des elektrischen Stromes genau so ab, wie wir es früher bei galvanischen Elementen gefunden haben, d. h. es gilt das Ohmsche Gesetz

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}.$$

Was nun die Größe der elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen betrifft, so bleibt diese nur dann konstant, wenn man die beiden Lötstellen des Elements auf konstanter, gleichbleibender Temperatur erhält. Zu dem Ende bringt man z. B. die eine Lötstelle in schmelzendes Eis, wo sie die Temperatur 0° bekommt, die andere in siedendes Wasser, wo sie die Temperatur 100° bekommt. Sehr brauchbar ist für diesen Zweck das Thermoelement Fig. 107 eingerichtet, das aus einem Wismutstab *aa* mit herabgebogenen Enden besteht, an welche Kupferdrähte angelötet sind. Diese beiden Kupferdrähte gehen durch zwei Ösen hindurch und ihre freien Enden werden dann durch beliebig lange oder kurze Leiter verbunden. Das eine herabgebogene Ende wird in ein Gefäß mit siedendem Wasser, das andere in eines mit schmelzendem Eis getaucht, und die elektromotorische Kraft des Elements bleibt dadurch konstant.

Fig. 107.



Die elektromotorischen Kräfte aller Thermoelemente aus Metallen sind sämtlich nur kleine Bruchteile eines Volt. Wir wollen sie in Millivolts, d. h. in Tausendstel-Volts, ausdrücken. Je nach der Reinheit der Metalle ist die elektromotorische Kraft von Thermoelementen oft sehr verschieden, sie hängt auch davon ab, ob die Metalle hartgezogen oder weich angewendet werden. Im folgenden sind eine Anzahl von Metallen mit Quecksilber kombiniert und ihre elektromotorischen Kräfte angegeben. Dabei zeigt das Zeichen $+$ an, daß der erzeugte Thermostrom durch die warme Lötstelle vom Quecksilber zum anderen

Metall geht, das Zeichen —, daß er durch die warme Lötstelle vom anderen Metall zum Quecksilber geht.

Elektromotorische Kraft in Millivolts (zwischen 0 und 100°).

Quecksilber-Wismut	— 6,70
„ -Nickel	— 1,66
„ -Kobalt	— 1,53
„ -Neusilber	— 1,08
„ -Platin	+ 0,004 bis + 0,59
„ -Aluminium	+ 0,36
„ -Zinn	+ 0,39
„ -Magnesium	+ 0,39
„ -Blei	+ 0,40
„ -Messing	+ 0,44
„ -Kupfer (rein)	+ 0,72
„ -Silber	+ 0,70
„ -Gold	+ 0,71
„ -Zink	+ 0,69 bis 0,73
„ -Kohle	+ 0,66 bis 1,45
„ -Kadmium	+ 0,87
„ -Eisen	+ 1,60 bis 1,73
„ -Antimon	+ 3,38

Für die thermoelektrischen Kräfte gilt nun das Gesetz der Spannungsreihe, welches sich so ausdrückt: Sind A und B zwei beliebige Metalle und bezeichnet man die elektromotorischen Kräfte zwischen den zwei Metallen durch A | B, so ist

$$\text{Quecksilber} | A + A | B = \text{Quecksilber} | B.$$

Damit kann man aus den obigen Zahlen für irgend zwei Metalle die elektromotorische Kraft berechnen. Denn es ist

$$A | B = \text{Quecksilber} | B - \text{Quecksilber} | A.$$

Nehmen wir z. B. als Metall A das Neusilber, als Metall B das Eisen, so ist

$$\begin{aligned} \text{Neusilber} | \text{Eisen} &= \text{Quecksilber} | \text{Eisen} - \text{Quecksilber} | \text{Neusilber} \\ &= 1,60 \quad \quad \quad + 1,08 \\ &= + 2,68 \text{ Millivolt.} \end{aligned}$$

Das positive Zeichen zeigt an, daß der Strom durch die warme Lötstelle vom Neusilber zum Eisen geht.

Die obige Kombination Wismut | Kupfer hat, wie man ebenso berechnen kann, die elektromotorische Kraft 7,42 Millivolt, die Kombination Wismut-Antimon sogar 10,08 Millivolt.

Viel stärkere thermoelektrische Kräfte erhält man, wenn man einige Halbmetalle wie Tellur und Selen oder Schwefelmetalle untereinander oder mit Kupfer in thermoelektrische Berührung bringt. Nimmt man z. B. Kupferkies und lötet es mit Kupfer zusammen und bringt die eine Lötstelle auf 100°, die andere auf 0°, so hat dieses Thermoelement eine elektromotorische Kraft von 66,6 Millivolt, bei einer Temperaturdifferenz von 150° gar von 100 Millivolt. Ebenso hat

z. B. das Thermoelement Kupferkies—Schwefelkies eine elektromotorische Kraft von 166,6 Millivolt. Zu wirksamen Thermoelementen sind diese Kombinationen aber kaum zu benutzen, weil der Kupferkies und Schwefelkies eine sehr geringe Leitungsfähigkeit besitzen, so daß die Stromstärke doch sehr klein wird, trotz der verhältnismäßig großen elektromotorischen Kraft.

Im allgemeinen sind also die elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen sehr klein. Sie werden um so größer, je größer der Temperaturunterschied der Lötstellen ist, solange eben die Struktur der Metalle nicht selbst merklich geändert ist.

Wird die eine Lötstelle auf sehr hohe Temperatur gebracht, während die andere etwa Zimmertemperatur hat, so nimmt die elektromotorische Kraft oft nicht nur nicht zu, sondern sogar ab, so daß sie bei vielen Kombinationen sogar bei gewissen Temperaturen ganz verschwindet. Bei noch höheren Temperaturen tritt zwar wieder eine

Fig. 108.

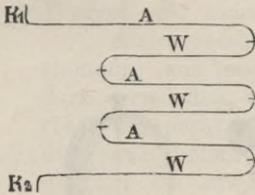
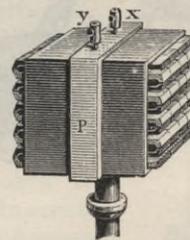


Fig. 109.



elektromotorische Kraft auf, aber der Strom fließt dann durch das Thermoelement in umgekehrter Richtung.

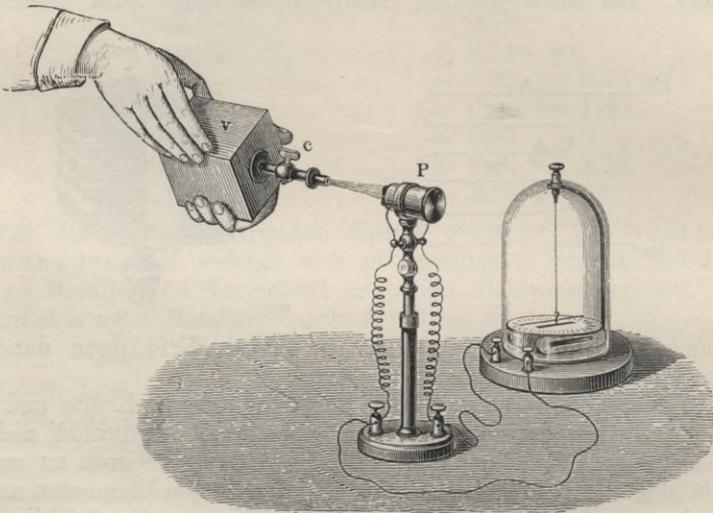
Um daher einigermaßen hohe elektromotorische Kräfte und damit zugleich starke Ströme zu bekommen, kann man gewöhnlich nicht das Mittel benutzen, die Temperaturdifferenz möglichst groß zu machen. Vielmehr muß man ganz ebenso wie bei galvanischen Elementen mehrere Thermoelemente hintereinander verbinden und immer die gleichliegenden Lötstellen derselben erwärmen. Man erhält so eine thermoelektrische Säule oder Thermosäule.

In Fig. 108 ist eine solche Kombination mehrerer Thermoelemente schematisch gezeichnet. Eine Reihe von Antimonstäben A sind an eine Reihe von Wismutstäben W angelötet, so daß immer ein Wismutstab zwischen zwei Antimonstäben liegt. Wenn man nun die gleichliegenden Lötstellen erwärmt, so fließt durch die warmen Lötstellen immer der Strom vom Wismut zum Antimon und die elektromotorischen Kräfte von den einzelnen Lötstellen addieren sich, so daß die in der Figur schematisch dargestellte Kombination eine dreifach so große elektromotorische Kraft hat als ein einzelnes solches Thermoelement. Die freien Enden dieser Säule K_1 und K_2 werden natürlich durch einen beliebigen äußeren Schließungsdraht verbunden. In Fig. 109 ist die Ansicht einer solchen Thermosäule gegeben, bei welcher eine große Menge von Antimon- und Wismutstäbchen aneinander gelötet sind, so daß ihre gleichliegenden Lötstellen alle auf der einen Seite sich befinden

und zugleich erwärmt oder abgekühlt werden. Die freien Enden des ersten und letzten Stabes gehen in die Klemmschrauben x und y und können dort durch einen Draht verbunden werden, durch den also dann der Strom von der Thermosäule fließt.

Bei geringen Temperaturdifferenzen ist die elektromotorische Kraft eine Thermosäule, wie oben erwähnt, diesem Unterschied der Temperaturen proportional. Hat man eine Thermosäule mit einem Galvanoskop verbunden, so wird also immer, wenn die eine Seite der Thermosäule erwärmt oder erkältet wird, ein Strom durch die Windungen des Galvanoskops gehen und die Nadel desselben ablenken. In Fig. 110 ist eine solche Verbindung, wie sie gewöhnlich benutzt wird, gezeichnet. Man sieht eine Thermosäule P von der meist ge-

Fig. 110.



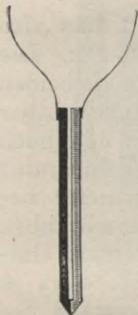
brauchten Form. Die eine Reihe von entsprechenden Lötstellen ist frei, damit man sie beliebig erwärmen und abkühlen kann, die andere ist durch eine Messinghülse gedeckt. An die freien Enden der Thermosäule sind Drähte angelötet, welche unten am Fuß in Klemmschrauben eingeschraubt sind, von welchen aus dann wieder Drähte zu dem Galvanoskop gehen, dessen Nadel die Ströme anzeigt. Man kann nun eine solche Verbindung sehr zweckmäßig dazu benutzen, um geringe Temperaturunterschiede anzuzeigen und auch zu messen.

Die geringste Temperaturerniedrigung oder -erhöhung, welche die freie Seite der Thermosäule erleidet, erzeugt einen Strom, der die Nadel des Galvanometers zum Ausschlag bringt. Wenn man z. B. aus dem Gefäße v, das komprimierte Luft enthält, durch Öffnung des Hahnes c die Luft ausströmen läßt, so wird die ausströmende Luft etwas kälter sein als die umgebende. Trifft diese die freie Seite der Thermosäule P, so wird diese erkältet, es entsteht ein Thermostrom

nach einer bestimmten Richtung, und die Nadel des Galvanoskops wird abgelenkt und zeigt dadurch die Abkühlung an. Ein gewöhnliches Thermometer würde diese geringe Temperaturänderung gar nicht zu erkennen geben.

Es ist oft nicht bequem, eine solche Säule anzuwenden, bei der die wirksame Fläche eine immerhin große ist. Oft ist es wünschenswert, die Temperatur an einem Punkte allein zu bestimmen und an diesen läßt sich die Thermosäule nicht bringen. Man wendet deshalb dazu oft ein einzelnes Thermoelement an, dem man eine zweckmäßige Form dafür gegeben hat. Sehr bequem ist dazu die thermo-elektrische Nadel (Fig. 111), bei der die zur Untersuchung dienende Lötstelle der beiden Metalle, z. B. Neusilber und Eisen, die Form einer Spitze hat, mit der man in die zu prüfende Stelle, z. B. einer Wurzel oder einer Rinde hineinsticht.

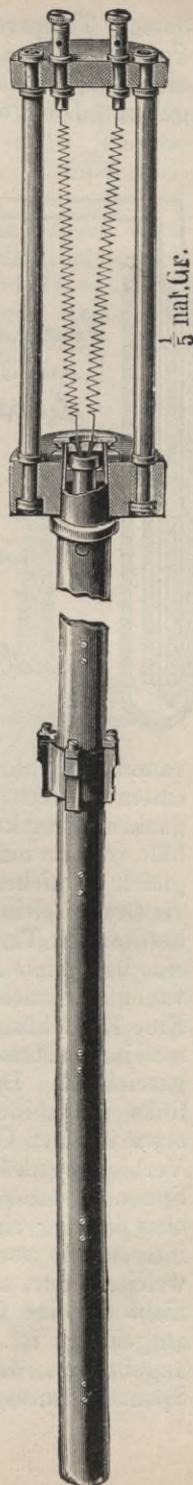
Fig. 111.



Andererseits aber kann man Thermo-elemente aus passenden Metallen auch dazu verwenden, um sehr hohe und sehr tiefe Temperaturen zu messen, für welche die gewöhnlichen Quecksilberthermometer, die nur bis etwa 350° nach oben und bis etwa -30° nach unten brauchbar sind, nicht mehr ausreichen. Die Apparate zur Messung sehr hoher Temperaturen, wie sie etwa in Öfen, in Flammen, in Schmelztiiegeln u. s. w. herrschen, nennt

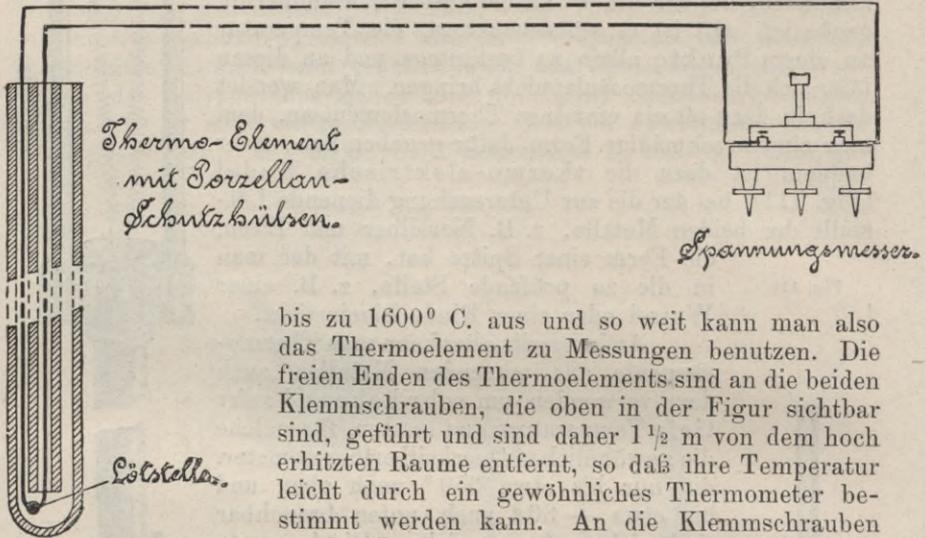
man Pyrometer. Wenn man ein Thermoelement aus Drähten bildet, deren Struktur sich bei den hohen Temperaturen nicht ändert, so wächst die elektromotorische Kraft desselben, und daher, wenn der Stromkreis einen unveränderlichen Widerstand besitzt, auch die Stromstärke immer mehr, je höher die Temperatur der erwärmten Lötstelle steigt. Man kann daher umgekehrt durch die Messung der Stromstärke die Temperatur der erwärmten Lötstelle bestimmen. Für hohe Temperaturen hat sich als sehr brauchbar und unveränderlich die Kombination von Platin und Platinrhodium erwiesen, welche von Le Chatelier für solche Messungen zuerst angewendet wurde. Ein solches thermoelektrisches Pyrometer von Hartmann & Braun in Bockenheim-Frankfurt zeigt Fig. 112. Dasselbe besteht aus einem Draht aus chemisch reinem Platin und einem Draht aus Platinrhodium (90 % Platin, 10 % Rhodium), die je 150 cm lang und in zwei feuerfesten Porzellanröhren untergebracht sind, welche in den Raum, z. B. den Ofen,

Fig. 112.



dessen Temperatur gemessen werden soll, eingeführt werden. Die Porzellanröhren werden noch, wo Stöße und dadurch Beschädigungen nicht ausgeschlossen sind, mit einem Schutzrohr aus Reinnickel umgeben. Die Porzellanröhren und das Nickelrohr halten Temperaturen

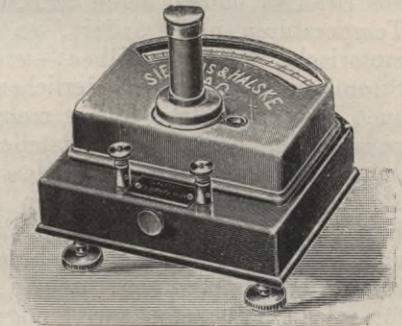
Fig. 113.



bis zu 1600° C. aus und so weit kann man also das Thermoelement zu Messungen benutzen. Die freien Enden des Thermoelements sind an die beiden Klemmschrauben, die oben in der Figur sichtbar sind, geführt und sind daher $1\frac{1}{2}$ m von dem hoch erhitzten Raume entfernt, so daß ihre Temperatur leicht durch ein gewöhnliches Thermometer bestimmt werden kann. An die Klemmschrauben werden Drähte angeschraubt, die zu einem Gal-

vanometer führen, das beliebig weit von dem Ofen entfernt, etwa in einem anderen Raum stehen kann. Wenn man den Widerstand des ganzen Stromkreises konstant erhält, so kann man das Galvanometer gleich so aichen, daß man direkt die Grade Celsius abliest; denn jeder bestimmten Temperatur entspricht eine bestimmte Ablenkung der Galvanometernadel und umgekehrt. Eine Einrichtung zu solchen pyrometrischen Messungen ist in Fig. 113 gezeichnet. Das Thermoelement links mit seinen Schutzröhren ist etwa in einen Ofen eingeführt und Verbindungsdrähte führen zu dem Spannungsmesser rechts. Als solches ist hier eines der Präzisionsinstrumente von Siemens & Halske (s. S. 79 u. 80) angewendet, bei welchem nur, um die Empfindlichkeit zu erhöhen, die bewegliche Spule nicht um eine feste Achse sich dreht, sondern vielmehr an einem Faden aufgehängt ist. Dieser Faden ist in dem schornsteinartigen Aufsatz angebracht, den man in der besonderen Zeichnung Fig. 114 des Spannungsmessers sieht.

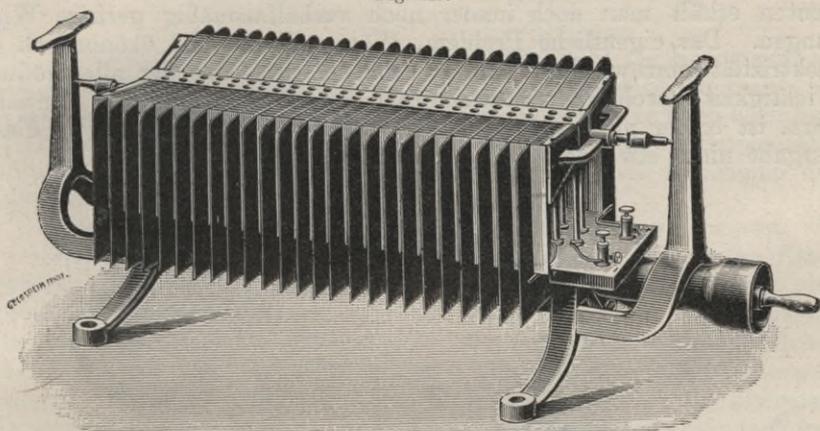
Fig. 114.



Um tiefe Temperaturen, wie man sie jetzt leicht durch flüssige Luft erzeugt, und die etwa bis -190° C. gehen, messen zu können, wendet man ebenfalls Thermoelemente in Verbindung mit einem Galvanometer an. Für diese Temperaturen eignet sich die Kombination aus Eisen und Konstantan. Erst durch die Benutzung solcher Thermoelemente ist die Messung sehr hoher und sehr tiefer Temperaturen überhaupt bequem und genau ausführbar geworden.

Man hat sich häufig bemüht, Thermosäulen von großer Wirksamkeit zu bauen, d. h. Thermosäulen, welche hohe elektromotorische Kraft mit geringem innerem Widerstand verbinden und dabei haltbar sind. Diese sollten durch Gas oder Kohlenfeuer geheizt werden und dadurch bequem brauchbare Stromerzeuger von verhältnismäßig großer

Fig. 115.



Wirksamkeit geben. Indes ist dieses Problem doch nur in verhältnismäßig kleinem Maßstab, wenn auch schon recht brauchbar, gelöst. Von Gülcher wurde eine bequeme und recht haltbare und praktische Thermosäule konstruiert, welche mit Gas heizbar ist und welche eine elektromotorische Kraft von 4 Volt liefert. Diese Säule ist in Fig. 115 abgebildet. Sie besteht aus 66 hintereinander geschalteten Elementen, welche aus Nickel und einer antimonhaltigen Legierung gebildet sind. Das Nickel ist in Form von Röhrchen angewendet, welche zugleich als Gasleitungsröhren dienen und innen im Apparat auf einer Platte stehen. Am oberen Ende ist an jedes Röhrchen ein Verbindungsstück aufgelötet, welches nach oben in eine Hülse ausläuft, in welche die antimonhaltige Legierung eingegossen ist. Diese Antimonelektroden sind winkelförmig gebogen und an ihre Enden sind lange Kupferstreifen angelötet, welche zur Abkühlung und zur Verbindung der Elemente dienen. In die oben sichtbaren Löcher werden kleine Schornsteine aus Asbest durch Glimmerröhrchen aufgesetzt. Es ist die Einrichtung so getroffen, daß selbst bei wechselndem Gasdruck die Säule immer konstant erwärmt wird. Der innere Widerstand dieser Säule

ist 0,65 Ohm. Sie kann also bei Kurzschließung (S. 69) einen Maximalstrom von $\frac{4}{0,65} = 6$ Ampère geben und ist stets durch Anzünden des Gases zum Betrieb bereit und erfordert nur verhältnismäßig wenig Gas (170 l per Stunde).

In den Thermoelementen findet eine direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität statt. Es wird der einen Lötstelle von außen Wärme zugeführt und diese erzeugt einen elektrischen Strom. Da die Wärme ein so mächtiges Agens in der Natur ist, da sie die Energie für unsere größten Maschinen liefert, so sollte man glauben, daß man durch Umwandlung von Wärme in Elektrizität auch sehr mächtige elektrische Wirkungen bekommen kann. Das ist aber bisher nicht der Fall. Die elektromotorische Kraft der Thermoelemente ist eine sehr geringe und selbst durch Kombination einer Reihe von solchen Elementen erhält man doch immer noch verhältnismäßig geringe Wirkungen. Das eigentliche Problem, Wärme direkt und ökonomisch in Elektrizität umzuwandeln, dieses Problem, das von der allergrößten Wichtigkeit sowohl in wissenschaftlicher, wie in praktischer Hinsicht wäre, ist bisher nicht gelöst und es erscheint sogar fraglich, ob diese Aufgabe nicht etwa dem Wesen der Elektrizität widerspricht.

6. Kapitel.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. Elektrolyse. Polarisationsströme.

Vielseitiger als alle anderen Naturkräfte steht die Elektrizität mit allen in Verbindung. Ebenso leicht wie der elektrische Strom Licht- und Wärmewirkungen hervorbringt, ebenso leicht bringt er auch chemische Wirkungen hervor, Wirkungen, die sowohl für die wissenschaftliche Untersuchung der Elektrizität, als für die praktische Benutzung derselben von der größten Wichtigkeit geworden sind.

Die Leiter des elektrischen Stromes sind, wie wir wissen, von zweierlei Art, Leiter erster und zweiter Klasse. Zu der ersten Klasse gehören alle Metalle, Kohle, Selen und eine Reihe von anderen nicht direkt metallischen Körpern. Zu den Leitern zweiter Klasse gehören alle zusammengesetzten Flüssigkeiten, die den Strom überhaupt leiten. Wenn nun der elektrische Strom durch eine solche leitende zusammengesetzte Flüssigkeit hindurchgeht, so verursacht er immer eine chemische Zersetzung dieser Flüssigkeit, eine chemische Zersetzung, die nach ganz bestimmten Gesetzen vor sich geht. Man nennt die Leiter zweiter Klasse deshalb auch gewöhnlich Elektrolyte, weil sie durch Elektrizität zersetzt werden (von λύειν, lyein, lösen, zersetzen). Den Vorgang der Zersetzung nennt man Elektrolyse. Wir haben schon früher das Wort Elektroden oft benutzt, um die Enden der stromzuführenden Leiter zu bezeichnen. Gerade bei der Elektrolyse wurde diese Bezeichnung zuerst von Faraday eingeführt. Will man nämlich den elektrischen Strom von einer galvanischen Batterie aus durch eine Flüssigkeit gehen lassen, so muß man in diese Flüssigkeit zwei Platten oder Drähte aus Metall eintauchen, von denen die eine Platte mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pol der Säule in Verbindung ist. Diese Platten oder Drähte nennt man speziell die Elektroden (von ὁδός, hodos, Weg, Bahn). Zur Unterscheidung nennt man die mit dem negativen Pol (Zinkpol) der Batterie verbundene Elektrode die Kathode, die mit dem positiven Pol verbundene die Anode (das eine von κατ', kat', weg, das andere von ἀν', an', hin — also wegführende Bahn und hinführende Bahn).

Taucht man zwei Elektroden von gleichem Metall, z. B. zwei Platinelektroden, oder auch von verschiedenem Metall in eine leitende Flüssigkeit und schickt man durch sie einen elektrischen Strom, so

wird die Flüssigkeit stets in ihre Bestandteile zerlegt, es findet stets eine Zersetzung der Flüssigkeit statt. Aber diese Zersetzung geht scheinbar nicht überall in der ganzen Flüssigkeit vor sich, sondern nur an den Elektroden selbst. Taucht man z. B. die beiden Platinplatten in Wasser und schickt den Strom von 2—3 Bunsenelementen hindurch, so sieht man an der positiven und an der negativen Platinplatte Gasblasen aufsteigen, und zwar an der positiven Sauerstoff, an der negativen Wasserstoff. Es ist gerade dieser Vorgang im Wasser kein einfacher, wir werden ihn daher erst nachher ausführlicher behandeln.

Leitende Flüssigkeiten sind im allgemeinen die Lösungen von Säuren, wie Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure in Wasser und die Lösungen von Salzen in Wasser. Gerade diese Lösungen von Salzen und Säuren sind für die Elektrolyse von besonderer Wichtigkeit, und wir werden sie daher hauptsächlich besprechen. Ein jedes Salz, z. B. schwefelsaures Kupfer (Kupfervitriol), enthält als einen Bestandteil ein Metall, hier Kupfer, der andere Bestandteil ist eine Säure oder Sauerstoff oder Chlor u. dergl., hier ist er Schwefelsäure. Läßt man nun eine Salzlösung elektrolysieren, so scheidet sich immer das Metall an der negativen Elektrode ab, der Rest des Salzes erscheint an der positiven Elektrode. Also in unserem Beispiel, wenn man eine Lösung von Kupfervitriol zersetzt, tritt das reine metallische Kupfer an der negativen Elektrode auf, bei Zinkvitriol scheidet sich das Zink, bei salpetersaurem Silber das Silber, bei Goldchlorid das Gold, bei Chlornatrium (Kochsalz) das Natrium an der negativen Elektrode ab. Man erkennt schon daraus die Wichtigkeit dieser Wirkung des elektrischen Stromes; denn es ist ja dadurch möglich, Metalle aus ihren Salzen in reinem Zustand auszuscheiden, ein Prozeß, der auf andere Weise nur durch große Hilfsmittel, wenn überhaupt, durchzuführen ist. Der andere Bestandteil des Salzes scheidet sich also an der positiven Elektrode ab. Man nennt die beiden Bestandteile eines Elektrolyten, in welche er durch den Strom zerlegt wird, seine Ionen (von τὸ ἰόν, to i-on, das Wandernde) und bezeichnet auch nach Faradays Vorgang den an der positiven Elektrode (Anode) auftretenden Bestandteil als Anion, den an der negativen (Kathode) auftretenden als Kation. Wir haben daher den Satz:

Bei jeder elektrolytischen Zersetzung scheidet sich das Metall an der Kathode ab.

Zu den Metallen gehört in diesem Satze auch der Wasserstoff, z. B. in der Schwefelsäure SO_4H_2 ist Wasserstoff H_2 das Kation und der Rest SO_4 das Anion.

Dieser allgemein gültige Satz, daß das Anion eines Elektrolyten an der Anode, das Kation an der Kathode frei auftritt, wird jedoch häufig verdeckt, so daß er scheinbar nicht richtig ist.

Es ist nämlich von vornherein einzusehen, daß wenn eine Flüssigkeit in ihre Bestandteile zerlegt wird, diese Bestandteile unter Umständen wieder rein chemisch auf die Flüssigkeit oder auf die Elektroden wirken können. Man erhält deshalb sehr häufig bei der Elektrolyse nicht die wirklichen Produkte der Zersetzung, sondern diejenigen

Produkte, die durch die rein chemische Einwirkung der Ionen auf die Flüssigkeit oder die Elektroden entstehen. Die elektrolytisch abgeschiedenen Bestandteile gehen, wie man sagt, sekundäre Prozesse ein. Schickt man z. B. den Strom zwischen Platinelektroden durch eine Lösung von Chlornatrium (Kochsalz) in Wasser, so sollte an der positiven Elektrode freies Chlor, an der negativen Natrium entstehen. Das Natrium aber wirkt im Moment seines Entstehens sofort auf das Wasser zersetzend und bildet Ätznatron und Wasserstoff, während das freie Chlor sich sofort mit der Platinelektrode zu Platinchlorid verbindet; man sieht also deshalb weder Natrium noch Chlor auftreten. Namentlich der positive Bestandteil, das Anion, welches gewöhnlich eine Säure oder Chlor oder ein anderer sehr reaktionsfähiger Stoff ist, tritt fast immer in chemische Verbindung mit dem Elektrodenmetall oder mit der Flüssigkeit. Wenn z. B. Zinkvitriol zwischen Kupferelektroden elektrolysiert wird, so tritt an der negativen Elektrode Zink auf, an der positiven Elektrode verbindet sich der entstehende Schwefelsäurerest sofort mit dem Kupfer der Elektrode zu schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol) und es bildet sich also an der positiven Elektrode Kupfervitriol durch einen sekundären Prozeß. Ein anderes Beispiel: Wenn man eine konzentrierte Lösung von Zinnchlorür (SnCl_2) zersetzt, so entsteht an der negativen Elektrode Zinn, an der positiven würde freies Chlor auftreten. Dieses wirkt aber sofort auf das gelöste Salz selbst, auf das Zinnchlorür, und verwandelt dieses in Zinnchlorid, so daß an der positiven Elektrode kein freies Chlor auftritt, sondern Zinnchlorid.

Es kann also der an der positiven Elektrode abgeschiedene Bestandteil eine große Menge von sekundären Prozessen eingehen.

Ebenso kann aber auch das Metall, das an der negativen Elektrode auftritt, sofort wieder in chemische Verbindung mit den anderen vorhandenen Stoffen treten, wenn es überhaupt eine energische chemische Aktionsfähigkeit hat.

So sind namentlich die Alkalimetalle, Kalium und Natrium, chemisch sehr wirksam und daher treten bei ihnen immer sekundäre Prozesse auf, sie wirken zersetzend auf das Wasser der Lösung. Läßt man z. B. eine Lösung von schwefelsaurem Natron (SO_4Na_2) zwischen Platinelektroden zersetzen, so scheidet sich an der negativen Elektrode das Metall, Natrium, ab, dieses zersetzt aber sofort das Wasser der Lösung in Hydroxyl (HO) und Wasserstoff. Das Hydroxyl verbindet sich mit dem Natrium in Wasser zu Natronlauge (NaHO), der Wasserstoff wird frei und tritt an der negativen Elektrode in Form von Blasen auf. Auch an der positiven Elektrode treten hierbei sekundäre Prozesse auf. Das dort sich abscheidende Anion SO_4 zerfällt in $\text{SO}_3 + \text{O}$, und der Bestandteil SO_3 bildet mit dem Wasser (H_2O) sofort Schwefelsäure SO_4H_2 , während der Sauerstoff frei wird und in Form von Blasen an der positiven Elektrode auftritt. Es sollte sich also bei der Elektrolyse von schwefelsaurem Natrium (SO_4Na_2) an der negativen Elektrode Natrium, an der positiven SO_4 bilden. In Wirklichkeit bildet sich aber durch sekundäre Prozesse an der negativen Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff. Gerade solche sekundäre Prozesse waren es,

welche bei der ersten Entdeckung der Elektrolyse einen großen Irrtum erzeugten. Leitet man nämlich einen elektrischen Strom mittels Platinplatten durch ein Gefäß mit gewöhnlichem Wasser, so entwickelt sich an der negativen Elektrode immer Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff. Man glaubte deshalb natürlich zuerst, daß das Wasser durch den Strom direkt in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt würde. Spätere Untersuchungen haben aber gezeigt, daß das nicht der Fall ist. Ganz reines Wasser, welches von allen Spuren von aufgelösten Salzen befreit ist, leitet den elektrischen Strom fast gar nicht, ist ein fast vollkommener Isolator, kann also auch nicht elektrolysiert werden. Wenn das Wasser einigermaßen gut leitet, wie es bei den erwähnten Versuchen über Elektrolyse des Wassers der Fall war, so enthält es immer eine Reihe von Salzen in mehr oder minder großen Quantitäten aufgelöst, namentlich von Natron- und Kalisalzen. Durch den Strom werden nun diese Salze zersetzt und die Metalle an der negativen Elektrode zersetzen das Wasser, verbinden sich mit dem Sauerstoff und lassen den Wasserstoff frei werden und sich entwickeln. Der Rest der Salze verbindet sich an der positiven Elektrode mit dem Wasserstoff des Wassers und läßt Sauerstoff frei werden. So treten bei dem Durchgang des Stromes durch Wasser allerdings Wasserstoff und Sauerstoff, die Bestandteile des Wassers, auf, aber nicht durch direkte Elektrolyse, sondern durch sekundäre Prozesse. Dasselbe geschieht, wenn man Wasser mit irgend einer Säure, z. B. Schwefelsäure, ein wenig ansäuert. Dann wird von der Schwefelsäure (SO_4H_2) an der negativen Elektrode Wasserstoff frei, an der positiven Elektrode zerfällt der Rest SO_4 in $\text{SO}_3 + \text{O}$ und der Sauerstoff tritt frei auf. Oder wenn man Salzsäure ClH dem Wasser zusetzt, so wird das Kation H frei, und das Anion Chlor Cl verbindet sich mit dem Wasserstoff des Wassers zu ClH und der Sauerstoff des Wassers tritt auch hier durch sekundäre Prozesse frei auf.

Woher kommt es nun aber, daß bei der Elektrolyse die freien Bestandteile immer nur an den Elektroden auftreten? Wenn der Strom auf die Flüssigkeit zersetzend wirkt, so muß er doch das in der ganzen Ausdehnung der Flüssigkeit tun, durch welche er geht, und nicht bloß an den Elektroden, an den Eintritts- und Austrittsstellen? Die Erklärung für diese Erscheinungen bietet die Theorie der Lösungen von Clausius-Arrhenius, welche mit allen aus ihr gezogenen Folgerungen bisher ausnahmslos bestätigt worden ist. Nach dieser Theorie besteht jedes zusammengesetzte Molekül, z. B. Chlornatrium NaCl , aus zwei Bestandteilen, die von vornherein schon und dauernd elektrisch, aber entgegengesetzt elektrisch sind, dem positiven Metall und dem negativen Rest. Das Molekül ist daher unelektrisch. Wenn ein solches Salz in einer Flüssigkeit, etwa Wasser, aufgelöst wird, so darf man aber nicht annehmen, daß in dem Wasser lauter Chlornatrium-(Kochsalz-)Moleküle selbst schwimmen. Vielmehr bringt der Vorgang der Lösung eine weitgehende Dissoziation dieser Moleküle hervor. Die einzelnen Kochsalzmoleküle sind in der Lösung in ihre Atome geteilt, und zwar kann man sich den Grund dieser Dissoziation so vorstellen, daß jedes Molekül in der Flüssigkeit sich rasch und heftig

bewegt, dabei an andere Moleküle anstößt und dadurch in seine Bestandteile zertrümmert wird. Diese Atome, die also starke elektrische Ladungen besitzen, sind die Ionen des Moleküls. Es gehen also in der Flüssigkeit fortwährend Trennungen und Wiedervereinigungen dieser Ionen vor sich, jedoch so, daß der Hauptteil aller Moleküle dissoziiert ist. Diese Vorstellung von der Natur einer zersetzbaren Flüssigkeit ist noch ganz unabhängig von den Erscheinungen der Elektrolyse. Wenn nun in eine solche dissoziierte Flüssigkeit zwei Elektrodenplatten hineingestellt werden, von denen die eine positiv elektrisch, die andere negativ elektrisch ist, so wirken die Elektrizitäten dieser Platten anziehend und abstoßend auf die elektrischen Ladungen der Ionen. Die negative Elektrode zieht die positiv geladenen Metallionen an, die positive Elektrode den negativen Rest. Im Innern der Flüssigkeit findet also eine fortschreitende Bewegung, eine Wanderung aller Kationen nach der einen, aller Anionen nach der anderen Richtung statt. Bei dieser Wanderung sind jedoch im Innern der Flüssigkeit überall dieselbe Zahl von positiven und negativen Ionen vorhanden. Das Innere der Flüssigkeit bleibt also scheinbar unverändert.

Anders ist es an der Grenze, an den Elektrodenplatten selbst. Dort kommen immerfort an die negative Elektrode positive Metallionen heran. Diese geben nun ihre Ladung an die Elektrode ab und bleiben unelektrisch an ihr haften. Ebenso werden die Anionen an der positiven Elektrode unelektrisch und bleiben an ihr, resp. wenn sie gasförmig sind, gehen sie an ihr in die Luft.

Nach dieser Theorie ist es also nicht der Strom, welcher die Moleküle zersetzt. Vielmehr sind die Moleküle schon zum größten Teil zersetzt und der Strom bringt nur eine bestimmte Bewegung dieser Teilmoleküle, Ionen, hervor.

Obwohl diese Theorie auf den ersten Anblick etwas künstlich erscheint, schließt sie sich doch mit merkwürdiger Präzision allen, selbst den feinsten Erscheinungen, die bei der Untersuchung von zusammengesetzten Flüssigkeiten auftreten, an und hat sich daher jetzt allgemeine Anerkennung erworben.

Unabhängig von jeder Theorie ist es jedenfalls Tatsache, daß der Strom zusammengesetzte leitende Flüssigkeiten zerlegt, und daß die Bestandteile nur an den Elektroden auftreten.

Die genauere quantitative Untersuchung der elektrolytischen Erscheinungen hat sich nun offenbar mit einer Reihe von Fragen zu beschäftigen, von denen die erste folgende ist: Wenn eine bestimmte Verbindung, z. B. Chlorsilber, durch den Strom zersetzt wird, wieviel Chlor und wieviel Silber tritt dann gleichzeitig an den Elektroden auf?

Diese Frage beantwortet sich folgendermaßen: Es ist bekannt, daß die Chemie für jeden Stoff eine gewisse Zahl, das Atomgewicht, gefunden hat, welche in Verbindung mit der chemischen Formel einer Verbindung sofort anzeigt, wieviel Gewichtsteile von jedem der konstituierenden Stoffe in einer Verbindung vorhanden sind.

Wenn z. B. die Chemie für Chlor (Cl) das Atomgewicht 35,5

und für Silber (Ag) das Atomgewicht 108 angibt, und wenn sie die Formel für Chlorsilber AgCl schreibt, so heißt das: 35,5 Gewichtsteile (g, cg, mg u. s. w.) Chlor verbinden sich mit 108 Gewichtsteilen (g, cg, mg u. s. w.) Silber zu 143,5 Gewichtsteilen Chlorsilber.

Oder wenn Schwefel (S) das Atomgewicht 32, Sauerstoff (O) das Atomgewicht 16, Kupfer (Cu) das Atomgewicht 63,5 hat, und wenn die Formel für Kupfervitriol geschrieben wird



so heißt das, daß 32 Gewichtsteile Schwefel mit 64 Gewichtsteilen Sauerstoff und 63,5 Gewichtsteilen Kupfer sich zu 159,5 Gewichtsteilen Kupfervitriol verbinden.

Bei jeder elektrolytischen Zersetzung treten nun an den Elektroden die Bestandteile gerade in dem Gewichtsverhältnis auf, in dem sie in der zersetzten Verbindung stehen. Wird z. B. Chlorsilber elektrolysiert, so treten an der negativen Elektrode immer 108 Gewichtsteile Silber auf, wenn an der positiven Elektrode immer 35,5 Gewichtsteile Chlor entstehen; wird Kupfervitriol elektrolysiert, so entstehen an der negativen Elektrode 63,5 Gewichtsteile Kupfer, während an der positiven 96 Gewichtsteile SO_4 auftreten. Oder wenn Zinkchlorid elektrolysiert wird, dessen Formel ist ZnCl_2 , so treten, da das Atomgewicht des Zinks 65,2, das des Chlors 35,5 ist, an der negativen Elektrode immer 65,2 Gewichtsteile Zink auf, während an der positiven 71 Gewichtsteile Chlor entstehen.

Man erkennt also, daß jede Substanz molekülweise zersetzt wird, d. h. die Gewichtsmengen der abgeschiedenen Ionen stehen in demselben Verhältnis, in dem sie in dem Molekül stehen. Die Gewichtsmengen der Bestandteile in einer Substanz nennt man aber ihre chemischen Äquivalentgewichte. Es folgt also daraus der Satz:

In einer bestimmten Flüssigkeit stehen die Mengen der abgeschiedenen Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte.

Gehen nun die abgeschiedenen Ionen sekundäre chemische Prozesse mit den Elektroden oder der Flüssigkeit ein, so verbindet sich nach den Gesetzen der Chemie auch wieder jedes von den Ionen immer mit so viel Gewichtsteilen der Elektrode oder der Flüssigkeit, als ihm chemisch äquivalent wird.

Wenn also z. B. schwefelsaures Natron Na_2SO_4 durch den Strom zerlegt wird, so daß an der negativen Elektrode Na_3 , d. h. 2×23 Gewichtsteile Natrium entstehen, so zersetzt dieses Natrium die ihm äquivalente Menge von Wasser, bildet $2(\text{NaOH})$ und scheidet aus dem Wasser H_2 ab, also gerade so viel Wasserstoff, als dem abgeschiedenen Natrium chemisch äquivalent ist.

Mit anderen Worten: Wenn Elektrolyse stattfindet, so treten entweder die Bestandteile des Elektrolyten selbst oder die durch chemische Umsetzung erzeugten sekundären Produkte immer in chemisch äquivalenten Mengen auf.

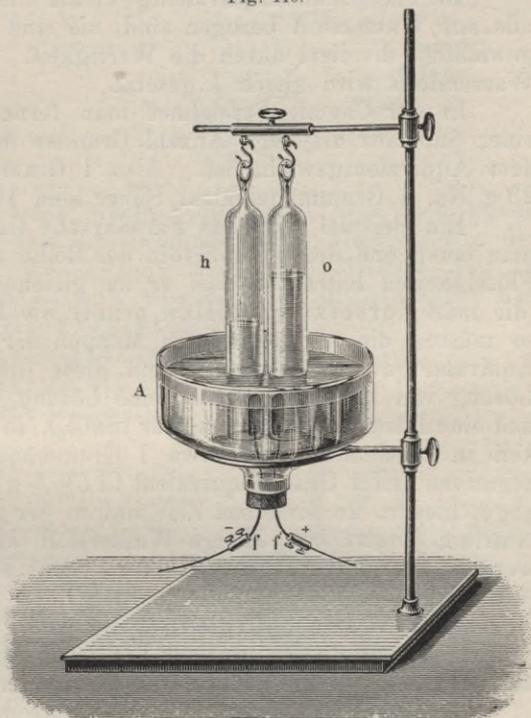
Man kann dies bei der Zersetzung von Wasser, welche ja durch sekundäre Prozesse vor sich geht, leicht experimentell zeigen. Aus

etwas angesäuertem Wasser erhält man, wie erwähnt wurde, durch die Elektrolyse mittelst sekundärer Prozesse Wasserstoff und Sauerstoff, die beiden Bestandteile des Wassers. Man kann diese beiden Gase, wenn sie sich entwickeln, getrennt auffangen, wenn man jede Elektrode einzeln in ein oben geschlossenes, mit Wasser gefülltes Gefäß bringt. Einen solchen Apparat zeigt Fig. 116. Die beiden Glasröhren *o* und *h* werden mit Wasser gefüllt und tauchen in die Schüssel *A* ein, welche ebenfalls mit Wasser gefüllt ist, so daß das Wasser in den beiden Röhren durch das in *A* befindliche Wasser in Verbindung steht. In jede der beiden Röhren taucht nun eine Elektrode von Platin ein, welche durch einen Kork, der die Schüssel *A* unten verschließt, hindurchgesteckt ist. Bei *f* und *f'* sind Klemmschrauben, in welche die Drähte vom Element eingeklemmt werden. Sowie nun der Strom in die Elektroden kommt und durch das Wasser hindurchgeht, entwickelt sich an der einen Elektrode (in *h*) Wasserstoff, an der anderen (in *o*) Sauerstoff. Diese Gase steigen in den Röhren in die Höhe und drücken das Wasser allmählich aus diesen heraus.

Wenn man diesen Versuch anstellt, so sieht man sofort, daß von dem Wasserstoff in derselben Zeit doppelt so viel (dem Volumen nach) aufsteigt, als vom Sauerstoff. Die Röhre *o* ist nur immer halb so weit mit Gas gefüllt als die Röhre *h*. Da nun Sauerstoff 16mal so schwer ist als Wasserstoff, so sieht man, daß dem Gewicht nach immer 8mal so viel Sauerstoff wie Wasserstoff entwickelt wird, oder immer, wenn 1 g Wasserstoff auftritt, treten 8 g Sauerstoff zugleich auf. Nun sind aber in einem Wassermolekül immer 8 Gewichtsteile (1 Äquivalent) Sauerstoff mit einem Gewichtsteil (Äquivalent) Wasserstoff verbunden. Man erkennt also, daß das Wasser durch sekundäre Prozesse so zersetzt wird, daß die Gewichte der auftretenden Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen.

Die zweite Frage ist nun die: Wenn man einen und denselben Strom der Reihe nach durch verschiedene zersetz-

Fig. 116.



bare Flüssigkeiten gehen läßt, in welchem Verhältnis stehen dann die in jeder von diesen Flüssigkeiten zersetzten Mengen zu einander?

Die Antwort auf diese Frage hat Faraday durch eine große Reihe von Versuchen gegeben. Diese Antwort lautet: Durch denselben Strom werden in allen elektrolysierten Flüssigkeiten in derselben Zeit die Bestandteile in demjenigen Mengenverhältnis abgeschieden, welches gleich dem Verhältnis ihrer chemischen Äquivalentgewichte ist.

Die chemischen Äquivalentgewichte sind bestimmte Zahlen, welche alle auf Wasserstoff bezogen sind, sie sind nämlich gleich den Atomgewichten, dividiert durch die Wertigkeit. Das Äquivalentgewicht des Wasserstoffs wird gleich 1 gesetzt.

In der Chemie bezeichnet man ferner als Grammäquivalent einer Substanz diejenige Anzahl Gramme der Substanz, welche gleich dem Äquivalentgewicht ist. Also 1 Grammäquivalent Natrium sind 23 g Na, 1 Grammäquivalent Silber sind 107,7 g Ag u. s. w.

Ein Beispiel wird das Faradaysche Gesetz klar machen. Wenn man einen und denselben Strom der Reihe nach durch drei Gefäße mit Flüssigkeiten leitet, so daß er zu gleicher Zeit in den drei Gefäßen (die man Zersetzungszellen nennt) die Flüssigkeiten elektrolysiert, so müssen die abgeschiedenen Mengen der Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen. Sind diese drei Flüssigkeiten z. B. eine Lösung von Kochsalz (ClNa), eine Lösung von Schwefelsäure (SO_4H_2) und eine Lösung von Zinnchlorür (SnCl_2), so wird in der ersten Flüssigkeit in bestimmter Zeit etwa 1 Grammäquivalent Na (23 g) an der negativen und 1 Grammäquivalent Cl (35,5 g) an der positiven Elektrode abgeschieden. In derselben Zeit muß in der zweiten Flüssigkeit die dem Natrium äquivalente Menge Wasserstoff an der Kathode entwickelt werden, also 1 Äquivalent H (1 g, nicht etwa $\text{H}_2 = 2$ g) und an der Anode entsteht also die Menge $\frac{1}{2} \text{SO}_4 (= 48$ g), welche dem einen Äquivalent Wasserstoff gleichwertig ist. In der dritten Flüssigkeit endlich entsteht an der positiven Elektrode 1 Grammäquivalent Cl (35,5 g, nicht etwa $\text{Cl}_2 = 71$ g) und die äquivalente Menge Zinn, also $\frac{1}{2} \text{Sn} = 59$ g.

Da die Mengen der an jeder Elektrode abgeschiedenen Ionen bei verschiedenen Flüssigkeiten im Verhältnis der Äquivalentgewichte stehen, so steht auch die gesamte Menge der durch Elektrolyse zersetzten Substanzen in allen Flüssigkeiten im Verhältnis der Äquivalentgewichte, es nimmt also in einer bestimmten Zeit, während welcher die Elektrolyse vor sich geht, die Menge des Chlornatriums ab um $35,5 + 23 = 58,5$ Gewichtsteile, die der Schwefelsäure um $\frac{1}{2} (96 + 2) = 49$ Gewichtsteile und die des Zinnchlorürs um $\frac{1}{2} (118 + 71) = 94,5$ Gewichtsteile.

Ein Strom ferner, um ein anderes Beispiel zu nehmen, der aus Wasser in einer bestimmten Zeit 1 g Knallgas entwickelt, scheidet in derselben Zeit 3,522 g Kupfer aus Kupfervitriol und 11,99 g Silber aus salpetersaurem Silber ab, weil die Zahlen 1 : 3,522 : 11,99 sich wie die Äquivalentzahlen des Knallgases, des Kupfers in Kupfervitriol, des Silbers in salpetersaurem Silber verhalten. Es ist nämlich das Äqui-

valentgewicht des Knallgases $\frac{1}{2} (\text{H}_2 + \text{O}) = 9$, das des Kupfers $\frac{1}{2} \text{Cu} = 31,75$, das des Silbers $\text{Ag} = 107,7$, und diese stehen gerade in dem oben angegebenen Verhältnis.

Diese gesetzmäßigen Beziehungen werden uns sofort neue Mittel für die Messung von elektrischen Strömen gewähren.

Die dritte wichtige Frage ist nun die: Von welchen Verhältnissen des elektrischen Stromes hängt die Menge der abgeschiedenen Substanzen ab? Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Menge der abgeschiedenen Ionen erstens abhängt von der Dauer des

Stromes, nämlich um so mehr wächst, je länger man den Strom hindurchgehen läßt, und daß sie zweitens allein abhängt von der Intensität des Stromes. Es hängt also die Menge der in jeder Sekunde elektrolytisch abgeschiedenen Stoffe bei jedem bestimmten Elektrolyten allein ab von der Intensität des Stromes, von der Stromstärke. Dies läßt sich durch Versuche leicht nachweisen.

Wenn man eine Stromverzweigung macht, wie in Fig. 117, und sowohl in den Hauptzweig 1, wie auch in jeden der Zweige 2 und 3 je eine Zersetzungswelle V_1, V_2, V_3 einschaltet, z. B. je einen Platintiegel mit einer Lösung von salpetersaurem Silber, und wenn man ferner noch in die Zweige 2 und 3 beliebige Widerstände W_2 und W_3 einschaltet, so ist ja in jedem der drei Zweige die Stromstärke verschieden und es zeigt sich, daß auch in jeder der drei Zersetzungszellen verschiedene Mengen Silber sich auf der Kathode niederschlagen. Die Stromstärke in 1 ist nun gleich der Summe der Stromstärken in 2 und 3 und man findet auch, daß die Silbermenge, die sich in der Zersetzungszelle V_1 niedergeschlagen hat, gleich der Summe der in V_2 und V_3 erhaltenen Silbermengen ist. Ferner verhalten sich die Stromstärken in 2 und 3 umgekehrt wie die Widerstände dieser Zweige (S. 72) und ebenso findet man auch das Verhältnis der Silbermengen in V_2 und V_3 . Man kann diesen Versuch auf verschiedene Weise variieren, immer aber findet man dasselbe Resultat, daß die Menge einer elektrolytisch abgeschiedenen Substanz nur abhängt erstens von

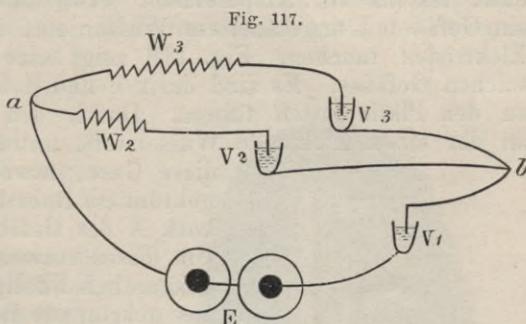
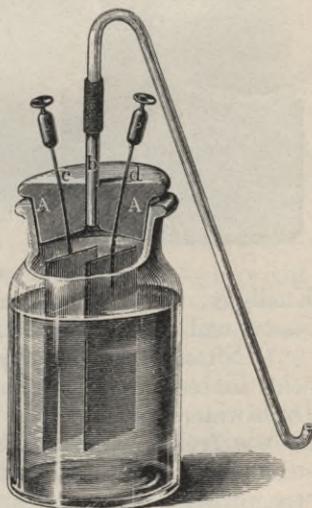


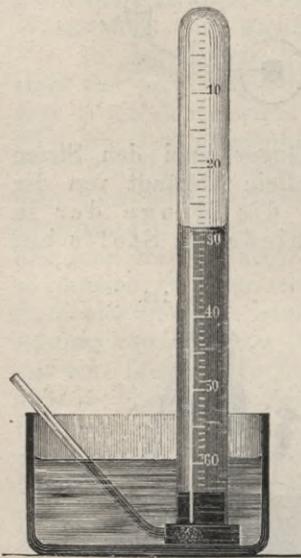
Fig. 118.



der Dauer des Stromdurchgangs und zweitens von der Intensität des Stromes.

Man kann den Versuch bequem auch in folgender Form machen. Man schaltet in einen Stromkreis, der etwa drei Bunsenelemente enthält, erstens ein Ampèremeter (etwa das von S. 63) und zweitens ein Gefäß mit angesäuertem Wasser ein, in welches Platinplatten als Elektroden tauchen. Fig. 118 zeigt eine zweckmäßige Form eines solchen Gefäßes. Es sind darin c und d die Zuleitungsdrähte, welche zu den Platinplatten führen. Durch den Strom entwickelt sich nun an der einen Elektrode Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff, und diese Gase entweichen zusammen durch das gekrümmte Rohr b, welches in den Verschlusskork A des Gefäßes luftdicht eingesteckt ist. Um dieses entweichende Gasmischung, welches bekanntlich Knallgas heißt, aufzufangen, führt das gekrümmte Rohr in eine mit Wasser gefüllte, geteilte Röhre, welche in einer mit Wasser gefüllten Schüssel steht, wie Fig. 119 zeigt. Die Gase steigen aus dem gekrümmten Rohr in die geteilte Röhre und treiben das Wasser aus dieser Röhre hinaus. Die Röhre ist so geteilt, daß der Rauminhalt zwischen je zwei Teilstrichen gleich 1 cm ist. Man kann also auf ihr sofort ablesen, wie viel Kubikzentimeter Knallgas in der bestimmten Zeit, während welcher man den Strom hat durchgehen lassen, aus dem Zersetzungsapparat entwickelt wurden.

Fig. 119.



Macht man nun diesen Versuch, so findet man bei diesem Strom von drei Bunsenschen Elementen erstens an dem Ampèremeter eine bestimmte Zahl von Ampères und zweitens ein bestimmtes Volumen von abgeschiedenem Knallgas, wenn man den Strom z. B. 10 Minuten hat hindurchgehen lassen und ihn dann unterbrochen hat.

Nimmt man aber jetzt statt dreier Bunsenschen Elemente z. B. zehn hintereinander geschaltete, schaltet aber außerdem noch so viel Drahtwiderstand ein, bis wieder dieselbe Zahl von Ampères vorhanden ist wie früher, und schließt man den Strom wieder 10 Minuten lang, so findet man, daß jetzt genau ebensoviel Knallgas entwickelt wird, wie vorher.

Je größer die Intensität des Stromes ist, desto mehr Knallgas wird in 1 Minute ausgeschieden, je geringer sie ist, um so weniger. Diese Beziehung kann man auch, und das ist von großer Wichtigkeit, umgekehrt benutzen. Je mehr Knallgas durch einen Strom in bestimmter Zeit entwickelt wird, desto größer ist die Stärke des Stromes, je weniger entwickelt wird, desto kleiner. Man kann also direkt die abgeschiedene Menge Knallgas als Maß der Stromstärke benutzen. Werden durch einen Strom z. B. in der Minute 5 cm Knall-

gas entwickelt, durch einen anderen 10 ccm in der Minute, so beweist uns dies, daß die Stärke des Stromes im zweiten Falle doppelt so groß ist, als im ersten Falle.

Da man also den in Fig. 118 und 119 abgebildeten Apparat direkt zur Messung der Stromstärke benutzen kann, indem die entwickelte Menge Knallgas direkt ein Maß für die Intensität des Stromes ist, so nennt man diesen Apparat ein Voltameter, oder genauer ein Knallgasvoltameter.

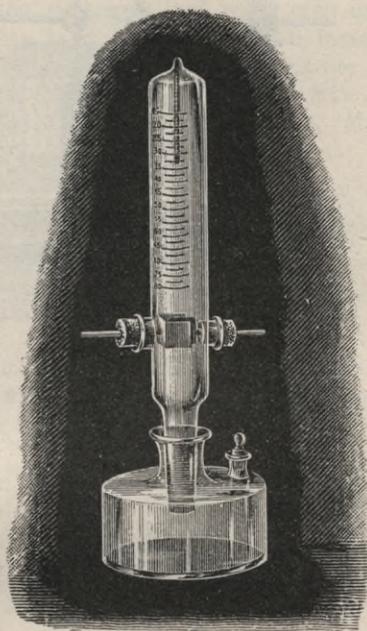
Ein Strom von einer bestimmten Stärke scheidet in jedem Knallgasvoltameter in gleicher Zeit immer die gleiche Menge Knallgas ab.

Man braucht also nur ein für allemal zu bestimmen, wie viel Knallgas unsere Einheit der Stromstärke, 1 Ampère, in 1 Sekunde aus einem Knallgasvoltameter entwickelt, um dann durch eine solche voltametrische Messung jederzeit die Stärke eines beliebigen Stromes in Ampères angeben zu können. Ein Ampère entwickelt nun, wie exakte Versuche lehren, in 1 Sekunde 0,09328 mg (= 0,1740 ccm bei normalem Druck und normaler Temperatur), d. h. in 1 Minute 10,440 ccm Knallgas. Man kann danach stets die Stärke eines Stromes in Ampères bestimmen, wenn man nur den Strom zugleich durch ein Knallgasvoltameter gehen läßt und die von dem Strome in 1 Minute abgeschiedene Menge Knallgas (dem Gewicht oder dem Volumen nach) mißt und durch die obige Zahl dividiert.

In eine handliche Form hat F. Kohlrausch das Knallgasvoltameter (Wasservoltameter) gebracht. Dasselbe besteht, wie Fig. 120 zeigt, aus einem in Kubikzentimeter geteilten weiten Rohr, welches durch einen Schliff in den Hals eines weiten Gefäßes eingesetzt wird. Gefäß und Rohr werden mit Wasser gefüllt, welches etwas mit Schwefelsäure versetzt ist. In dem Rohr befinden sich zwei Platinelektroden, von denen die eine gabelförmig die andere umfaßt. Die Zuleitungsdrähte gehen durch Kautschukstopfen nach außen. Das entwickelte Knallgas treibt das Wasser aus dem geteilten Rohr heraus und sein Volumen wird dann direkt an der Röhre abgelesen, seine Temperatur an dem in der Röhre befindlichen Thermometer. Das Instrument wird von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. konstruiert.

Statt aus der Menge des abgeschiedenen Knallgases kann man ebensogut aus der Menge irgend einer anderen elektrolytisch abgeschiedenen Substanz die Stromstärke bestimmen. Praktisch im Ge-

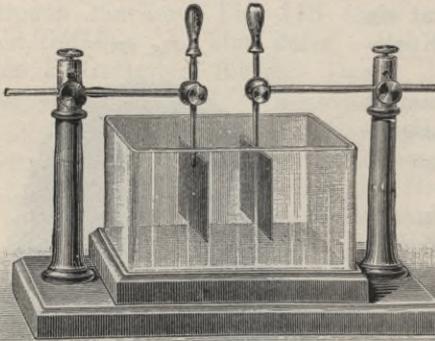
Fig. 120.



brauch sind außer dem Knallgasvoltmeter noch das Kupfervoltmeter und das Silbervoltmeter.

Beim Kupfervoltmeter (Fig. 121) tauchen zwei Platinplatten in eine Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol). Läßt man

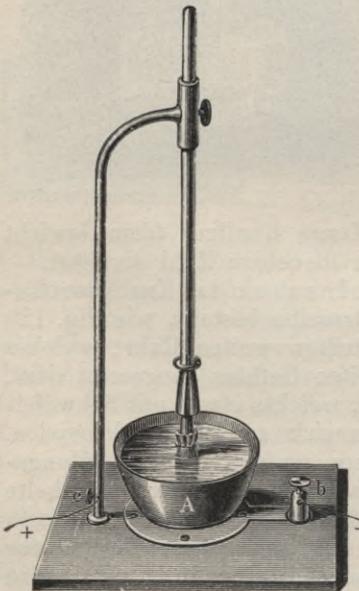
Fig. 121.



den Strom hindurchgehen, dann scheidet sich auf der negativen Platinelektrode Kupfer ab und aus der Menge des abgeschiedenen Kupfers kann man sofort die Stärke des Stromes in Ampères bestimmen. Man wird also die negative Platinplatte trocken vor dem Versuch wägen, sie in das Kupfervoltmeter hängen, dann den Strom hindurchgehen

lassen (z. B. 1 Minute lang) und sie dann mit dem auf ihr niedergeschlagenen Kupfer wieder wägen, nachdem man sie vorher abgetrocknet hat. Der Unterschied des Gewichts gibt das Gewicht des in 1 Minute abgeschiedenen Kupfers an. Nun scheidet der Strom 1 Ampère in 1 Minute 19,69 mg Kupfer ab. Man hat also aus der abgeschiedenen Menge des Kupfers auch sofort die Stromstärke in Ampères. Um bei dem Kupfervoltmeter genaue Resultate zu bekommen, muß man die Kupfervitriollösung ganz konzentriert nehmen und die beiden Elektroden möglichst groß machen. Man nimmt am besten für jedes Ampère Stromstärke die wirksame Oberfläche jeder Kathode zu 40 Quadratcentimeter.

Fig. 122.



Für das Silbervoltmeter, bei welchem eine Lösung von salpetersaurem Silber angewendet wird, benutzt man gewöhnlich eine Form, welche in Fig. 122 abgebildet ist. Die Lösung von salpetersaurem Silber befindet sich in einem Tiegel A von Platin, welcher auf einem metallischen Boden steht, der eine Klemmschraube b zum Zuleiten des Stromes hat. Dieser Platintiegel dient nämlich gleich als negative Elektrode, an der sich also das elektrolytisch abgeschiedene Silber ansetzt. Als positive Elektrode wird ein kleines

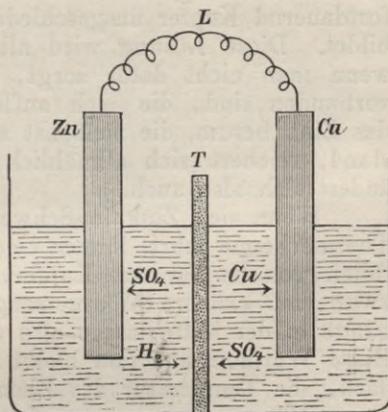
schraube b zum Zuleiten des Stromes hat. Dieser Platintiegel dient nämlich gleich als negative Elektrode, an der sich also das elektrolytisch abgeschiedene Silber ansetzt.

Stäbchen von Silber in die Lösung eingetaucht. Bei der Elektrolyse der Lösung scheidet sich also Silber an dem Platintiegel ab, der Rest des Salzes, die Salpetersäure, scheidet sich an der positiven Elektrode, dem Silber, ab und verbindet sich mit diesem gleich wieder zu salpetersaurem Silber, welches sich in der Flüssigkeit auflöst. Man hat dadurch den Vorteil, daß die Lösung immer gleichmäßig konzentriert bleibt. Denn gerade so viel Silber, wie sich an den Platintiegel ansetzt, wird nach dem Faradayschen Gesetz von dem Silberstab aufgelöst. Hat man nun den Platintiegel vor dem Versuch trocken gewogen und wägt man ihn, nachdem man den Strom z. B. 1 Minute lang hat durchgehen lassen, wieder, nachdem er getrocknet ist, so gibt die Gewichts-differenz die in 1 Minute abgeschiedene Menge Silber. Nun scheidet ein Strom von der Stärke 1 Ampère in 1 Minute 67,10 mg Silber ab. Man hat also aus der Gewichts-differenz sofort die Stromstärke in Ampères.

Das letzte Beispiel des Silber-voltameters hat uns schon auf eine Erweiterung unserer Betrachtungen geführt. Wir hatten bis dahin angenommen, daß die Elektroden, welche in die elektrolytische Flüssigkeit tauchten, beide von gleichem Metall sind, also etwa Platinelektroden. Das ist aber durchaus nicht notwendig. Die Elektrolyse von Flüssigkeiten durch den Strom findet stets in gleicher Weise statt, mögen die Elektroden nun aus demselben oder aus verschiedenen Metallen bestehen. Immer, wenn ein elektrischer

Strom durch eine zersetzbare Flüssigkeit fließt, findet Zersetzung, Elektrolyse, statt. Daraus folgt, daß auch in einem geschlossenen galvanischen Element selbst, das ja auch von seinem eigenen Strom durchflossen wird, elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeiten eintreten muß, und daß diese Zersetzung auch genau nach dem Faradayschen Gesetz vor sich gehen muß. Und das ist in der Tat der Fall. Wird z. B. ein Daniellsches Element geschlossen, so daß es von einem Strom durchflossen wird, so werden die beiden Flüssigkeiten zersetzt. In Fig. 123 steht ein Zinkstab (Zn) in Schwefelsäure (SO_4H_2), ein Kupferstab Cu in Kupfervitriol (CuSO_4). Die beiden Flüssigkeiten sind durch eine Tonplatte T getrennt. Das Kupfervitriol wird zerlegt in Kupfer (Cu) und SO_4 , welches nicht frei bestehen kann. Die verdünnte Schwefelsäure wird zerlegt in Wasserstoff (H_2) und SO_4 . In dem Element selbst ist nun Kupfer die negative Elektrode, denn der positive Strom fließt ja innerhalb des Elementes vom Zink zum Kupfer. Es wandern infolgedessen Cu und H_2 nach rechts, zum Kupfer hin, die beiden SO_4 nach links, zum Zink hin. Zunächst tritt daher das aus dem Kupfervitriol abgeschiedene Kupfer an die Kupferelektrode heran und diese bedeckt sich während

Fig. 123.



der Dauer des Stromes mit einer glänzenden Schicht von reinem metallischen Kupfer. Dem Rest SO_4 aus dem Kupfervitriol aber kommt von der elektrolysierten Schwefelsäure freier Wasserstoff H_2 entgegen und diese beiden Komponenten verbinden sich wieder zu Schwefelsäure H_2SO_4 . Der andere Bestandteil der elektrolysierten Schwefelsäure, SO_4 , geht zum Zink, welches in dem Element ja positive Elektrode ist, und verbindet sich mit diesem sofort zu schwefelsaurem Zink (Zinkvitriol SO_4Zn). Alle diese Trennungen und Vereinigungen gehen nach dem Faradayschen Gesetz in äquivalenten Mengen vor sich. Das Resultat dieser chemischen Vorgänge in der Kette ist also das, daß fortwährend Zink sich in Schwefelsäure auflöst und zu gleicher Zeit eine äquivalente Menge Kupfer sich an der Kupferelektrode niederschlägt. Aber man sieht, daß sich bei diesem Prozeß auch die Flüssigkeiten selbst fortdauernd ändern müssen, daß sie nicht immer dieselbe Zusammensetzung behalten. Denn aus der Kupfervitriollösung wird ja fortdauernd Kupfer ausgeschieden und dafür Schwefelsäure frisch gebildet. Diese Lösung wird also immer verdünnter an Kupfervitriol, wenn man nicht dafür sorgt, daß immer neue Kupfervitriolkristalle vorhanden sind, die sich auflösen können. Und die Flüssigkeit um das Zink herum, die zunächst aus verdünnter Schwefelsäure allein bestand, reichert sich allmählich immer mehr mit Zinksulfat an, verändert sich also auch.

Wenn sich Zink in Schwefelsäure auflöst, so entsteht, wie die Thermochemie lehrt, immer eine gewisse Wärmemenge; bei dem Ausfällen von Kupfer aus Kupfervitriol wird dagegen eine andere, und zwar viel kleinere Wärmemenge verbraucht. Die chemischen Vorgänge in der Kette lassen also eine gewisse Wärmemenge frei werden. Diese Wärmemenge nun bleibt nicht frei im Element, sie dient nicht dazu, die Temperatur des Elements zu erhöhen, sondern die Energie dieser Wärmemenge verwandelt sich eben (wenigstens zum Teil) in elektrische Energie und dient dazu, den elektrischen Strom zu unterhalten. Man kann daher auch direkt sagen, wenn in einem Element ein elektrischer Strom erzeugt und unterhalten wird, so wird die Energie, die Arbeitsmenge, die der Strom enthält, geliefert auf Kosten der Wärme, welche durch die chemischen Prozesse in der Kette frei wird.

Die Vorgänge in einem Elektrolyten, wenn ein Strom durch denselben hindurchfließt, lassen sich nach den oben dargestellten Erfahrungsstatsachen in sehr einfacher Weise auffassen. Immer, wenn ein Strom durch einen Elektrolyten geht, findet eine Abscheidung der Ionen an den Elektroden statt, d. h. nach der oben angeführten Theorie von Clausius-Arrhenius, es wandern dabei zugleich die positiven Ionen alle nach der Richtung der Kathode und die negativen Ionen nach der Richtung der Anode. Der Durchgang des Stromes durch einen Elektrolyten ist also stets verbunden mit einer Bewegung der körperlichen Atome des Elektrolyten, der Ionen. Diese Ionen sind aber selbst elektrisch, und zwar die Metallionen positiv, die Restionen negativ elektrisch. Es liegt daher also nahe, anzunehmen, daß es nur die Bewegungen dieser Ladungen der Ionen selbst sind,

welche den Strom in dem Elektrolyten bilden. Sobald die beiden Elektroden mit den Polen eines Elements in Verbindung gesetzt werden, fangen die Ionen in der Flüssigkeit an zu wandern. Die positiv elektrischen Ionen (die Metallionen) wandern nach der Kathode hin und jedes an der Kathode ankommende Ion gibt seine positive Ladung an die negativ geladene Kathode ab und wird unelektrisch und scheidet sich ab. Sofort aber kommen immer wieder neue positive Ionen an und transportieren also immer wieder neue positive Elektrizität nach der Kathode hin. Zu gleicher Zeit wandern die negativen Ionen nach der Anode hin und geben dort ihre Elektrizität ab und werden also selbst unelektrisch. Der Strom in einem Elektrolyten besteht also nach dieser Auffassung in der Wanderung der positiven Ionen nach der Kathode und der negativen Ionen nach der Anode, er ist nicht bloß mit einer solchen Doppelbewegung der geladenen Ionen verbunden, sondern er besteht in dieser Doppelbewegung.

Nun sagt aber das Faradaysche Gesetz aus, daß die Ionen in allen Flüssigkeiten immer in äquivalenten Mengen abgeschieden werden. Daher müssen sie sich auch in äquivalenten Mengen an der Stromleitung beteiligen. Das heißt mit anderen Worten: das Äquivalentgewicht eines beliebigen Ions muß dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich transportieren, wie das Äquivalentgewicht eines anderen Ions. Also wenn 1 g Wasserstoff eine gewisse Menge positiver Elektrizität (eine gewisse Anzahl Coulombs) stets mit sich führt, so müssen 23 g Natrium, 39 g Kalium, 31,6 g Kupfer, 107,7 g Silber dieselbe Anzahl Coulombs stets mit sich führen, und ebenso müssen 8 g Sauerstoff, 48 g SO_4 , 62 g NO_3 dieselbe Anzahl negativer Coulombs mit sich führen. Also folgt aus dem Faradayschen Gesetz:

Die Äquivalentgewichte der verschiedenen Ionen führen alle die gleiche Anzahl Coulombs mit sich und zwar positive, wenn sie Kationen, negative, wenn sie Anionen sind.

Es sieht also so aus, als ob jedes körperliche Ion mit einer gewissen positiven oder negativen Elektrizitätsmenge fest verbunden wäre, so daß jedes Äquivalent immer dieselbe Menge Elektrizität besitzt. Diese Folgerung gewährt einen sehr weitreichenden Ausblick in die Welt der Moleküle und Atome. Sie scheint zu zeigen, daß ebenso wie die gewöhnliche Materie aus getrennten, diskreten Teilen, eben den Atomen sich zusammensetzt, daß so auch die Elektrizität aus atomartigen Teilen besteht. Aus diesem Grunde bevorzugten wir auch im ersten Kapitel die Ansicht von Faraday, daß in einem Isolator jedes Molekül mit einer positiven und negativen Ladung, getrennt, versehen sei.

Wir können nun aber sogar berechnen, wieviel Coulombs mit jedem Grammäquivalent einer Substanz verbunden sind. Zu dem Zweck erinnern wir uns, daß wenn der Strom 1 Ampère während 1 Sekunde durch einen Stromkreis fließt, daß dann gerade 1 Coulomb durch den Stromkreis geht (S. 62). Nun scheidet der Strom 1 Ampère in 1 Sekunde (nach S. 145) 0,0011183 g Silber und die äquivalente Menge NO_3 (0,0006440 g) aus salpetersaurem Silber ab. Nach der obigen Darlegung besteht nun dieser Strom in dem Elektrolyten darin, daß

$\frac{1}{2}$ Coulomb positiver Elektrizität mit dem Silber nach der Kathode und zugleich $\frac{1}{2}$ Coulomb negativer Elektrizität mit NO_3 nach der Anode wandert. Folglich sind unsere 0,0011183 g Silber mit $\frac{1}{2}$ Coulomb fest verbunden, also ist 1 Grammäquivalent Silber (107,7 g) verbunden mit

$$\frac{107,7}{2 \times 0,0011183} = 48270 \text{ Coulomb.}$$

Ebensoviele Coulomb führt 1 Grammäquivalent jedes anderen Ions mit sich. Wir haben also den Satz:

Ein Grammäquivalent eines jeden Ions ist mit 48270 Coulomb (positiven oder negativen) verbunden.

Da bei der Zersetzung eines jeden Grammäquivalents einer Substanz die beiden Ionen entstehen, so gehen bei jeder elektrolytischen Zersetzung pro Grammäquivalent der zersetzten Substanz 96540 Coulomb durch die Flüssigkeit. Diese Zahl wird nach neueren Festsetzungen mit F bezeichnet.

Wenn nun in einem galvanischen Element, z. B. in einem Daniell, ein Strom fließt, so wird, wie wir gesehen haben, Zink in Schwefelsäure aufgelöst, wodurch sich Zinkvitriol bildet, und es wird Kupfer aus Kupfervitriol gefällt. Für jedes Grammäquivalent Zink, welches in Lösung geht, wird also 1 Grammäquivalent Kupfer niedergeschlagen und zugleich gehen 96540 Coulomb durch die Lösung und den Stromkreis von der positiven Elektrode zur negativen. Die Arbeit, die die elektrischen Kräfte dabei leisten, um diese Anzahl von Coulombs von der höheren Spannung zu der niederen zu treiben, ist

elektromotorische Kraft (in Volts) \times Elektrizitätsmenge (in Coulombs) (Benennung Volt-Coulomb)

also in unserem Falle gleich

elektromotorische Kraft \times 96540 (Volt-Coulomb).

Die chemischen Prozesse sind also mit einer solchen elektrischen Arbeitsleistung verbunden. Durch die chemischen Prozesse aber wird andererseits eine gewisse Wärmemenge entwickelt. Es wird nämlich bei der Auflösung von 1 Grammäquivalent Zink in Schwefelsäure, wie die Thermochemie lehrt, eine Wärmemenge von 53045 Einheiten (Grammkalorien) frei, bei der Abscheidung von Kupfer aus Kupfersulfat werden dagegen pro Äquivalent 27980 Kalorien verbraucht. Im ganzen werden also 25063 Kalorien bei dem Prozeß in der Kette frei. Es ist nun nicht notwendig, daß sich diese frei werdende Wärmemenge in der Kette ganz in elektrische Energie verwandelt. Es könnte noch ein Teil der Wärme dazu verwendet werden, die Temperatur des Elements zu erhöhen. Wenn aber, was in einzelnen Fällen tatsächlich geschieht, diese thermochemische Wärmemenge sich ganz in elektrische Energie umsetzt, so können wir sofort berechnen, wie groß die elektromotorische Kraft unseres Elements (des Daniells) in Volts sein muß. Es ist nämlich (nach S. 16) $1 \text{ Volt-Coulomb} = \frac{1}{9,81} \text{ Kilogrammometer,}$

und es ist andererseits, wie die mechanische Wärmetheorie zeigt, eine Grammkalorie gleich 0,424 Kilogrammometer. Also ist einerseits

die frei werdende Wärmemenge = $25\,065 \times 0,424$ Kilogrammometer, andererseits ist die geleistete elektrische Arbeit

$$= \frac{96\,540 \times \text{elektromotorische Kraft}}{9,81} \text{ Kilogrammometer.}$$

Da unter der ausgesprochenen Annahme diese beiden Größen einander gleich sein müssen, so ergibt sich die elektromotorische Kraft unseres Elementes

$$= \frac{25\,065 \times 0,424 \times 9,81}{96\,540} \text{ Volt} = 1,085 \text{ Volt.}$$

In der Tat ist die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes gerade so groß. Indes ist dieser Schluß nicht in allen Fällen richtig. Es ist ja durchaus nicht notwendig, daß die ganze Wärmemenge, die durch den chemischen Prozeß in dem Element frei wird, sich vollständig in elektrische Energie verwandelt. Es kann auch ein Teil von dieser Wärme dazu benutzt werden, um die Temperatur des Elementes zu erhöhen und nur ein Teil der chemischen Wärme (der Wärmetönung) wird dann in elektrische Energie verwandelt. Das ist sogar bei den meisten Elementen der wirklich eintretende Fall. Dann ist also die zu beobachtende elektromotorische Kraft kleiner, als sie aus der Wärmetönung sich berechnen würde. Es trifft aber in manchen Fällen auch der umgekehrte Fall ein, daß die elektromotorische Kraft größer ist, als sie sich aus der Wärmetönung berechnen würde. Dann kann die nötige Energie nur dadurch geliefert werden, daß das Element selbst, während der Strom fließt, sich abkühlt, daß ihm also Wärme entzogen wird, die sich in elektrische Energie umsetzt.

Der Durchgang des galvanischen Stromes durch eine Leitung, die ein Element enthält, ist nach dem Gesagten notwendig abhängig von den chemischen Prozessen, die in dem Element auftreten. Man kann aber daraus noch immer nicht einsehen, warum überhaupt ein Strom zu stande kommt. Wenn man z. B. einen Zinkstab in gesättigter Lösung von Zinksulfat hat, so findet dabei von selbst keine nachweisbare Auflösung des Zinks statt. Und wenn man Kupfer in gesättigter Kupfersulfatlösung stehen hat, so findet dabei auch weder eine Auflösung des Kupfers noch ein Ausfällen des Kupfers aus der Lösung statt. Bringt man also einen Zinkstab in Zinksulfat in eine Tonzelle und um diese herum Kupfersulfat mit metallischem Kupfer, so findet zunächst, wenn die Metalle nicht verbunden sind, gar kein nachweisbarer chemischer Prozeß statt, und man sieht nicht ein, woher es kommt, erstens, daß die Metalle sich dabei am Elektrometer entgegengesetzt elektrisch erweisen und zweitens, daß im Moment, wo wir die Metalle verbinden, auch ein Strom fließt und nun doch eine Auflösung des Zinks und ein Ausfällen des Kupfers vor sich geht. Zu der Erklärung dieser Vorgänge hat sich die Theorie der Lösungen,

die wir schon oben (S. 136) anführten, sehr geeignet gezeigt. Nach dieser Theorie sind also in der Lösung eines Salzes, z. B. des Kochsalzes, die aufgelösten Moleküle dissoziiert, d. h. eine große Anzahl der Moleküle sind in ihre Ionen zerfallen. Die in einem Lösungsmittel enthaltenen aufgelösten Substanzen verhalten sich nun in vieler Beziehung wie dieselben Substanzen, wenn sie in Gasform sind. So wie ein Gas jedes Volumen, das ihm dargeboten wird, vollständig ausfüllt, also sich von selbst verdünnt, wenn es nur Raum dazu hat, so verdünnt sich auch jede Lösung von selbst, wenn sie nur genügend Lösungsmittel hat. So wie also die Gasteilchen sich selbsttätig voneinander zu entfernen suchen, in größere Abstände zu kommen suchen, so suchen auch die gelösten Teilchen von selbst sich voneinander zu entfernen, größere Zwischenräume zwischen sich zu machen. Bei den Gasen zeigt sich dieses Bestreben, auseinanderzufliegen, dadurch an, daß die Gase auf ihre Gefäßwände einen Druck ausüben, einen um so größeren, je größer die Gasmenge ist, die in dem betreffenden Gefäß enthalten ist. Nach der angeführten Analogie können wir einem gelösten Stoff ganz ebenso einen Druck zuschreiben, den er ausübt, und der zwar nicht die Gefäßwände zu verschieben sucht, der aber den gelösten Stoff in immer größere Mengen Flüssigkeit hineinzutreiben und daher ihn zu verdünnen sucht. Diesen Druck, den man auch durch geeignete Methoden messen kann, nennt man den osmotischen Druck der aufgelösten Substanz. Je größer die Zahl der aufgelösten Moleküle (Grammmoleküle) in derselben Menge Flüssigkeit ist, um so größer ist der osmotische Druck derselben. Das Verhältnis der Zahl der aufgelösten Grammmoleküle einer Substanz zu der Gesamtzahl der Grammmoleküle der Lösung nennt man die Konzentration des betreffenden Stoffes in der Lösung und es ist also der osmotische Druck eines Stoffes in einer Lösung um so größer, je größer die Konzentration desselben ist.

Der osmotische Druck hat also die Tendenz, die Lösung zu verdünnen. Er könnte dies am einfachsten dadurch erreichen, daß er die aufgelösten Moleküle aus der Lösung treibt, also sie zum Ausfällen bringt. Nun aber ist ja bei den festen Körpern eine gleiche Tendenz vorhanden, nämlich die, sich in vorhandenen Flüssigkeiten aufzulösen. Wenn ein festes Salz mit einer Flüssigkeit in Berührung ist, so gehen von selbst Salzteilchen in die Flüssigkeit über, man kann also auch hier von einem Druck sprechen, der die Salzteilchen in die Flüssigkeit treibt. Diesen Druck bezeichnet man als den Lösungsdruck des festen Körpers. Und nun sieht man, daß der Lösungsdruck vom festen Körper in die Flüssigkeit hinein, der osmotische Druck der aufgelösten Substanz dagegen aus der Flüssigkeit hinaus wirkt, so daß die beiden sich entgegenwirken. Haben wir also jetzt eine verdünnte Salzlösung, so sucht zwar der osmotische Druck die aufgelösten Teilchen herauszutreiben und auszufällen; sobald aber ein Teilchen ausgefällt ist, wirkt der Lösungsdruck und treibt das Teilchen wieder in die Flüssigkeit. Solange also der Lösungsdruck der Substanz größer ist als der osmotische Druck, kann sich kein aufgelöstes Teilchen ausscheiden. Erst wenn die Lösung so konzentriert ist, daß ihr

osmotischer Druck größer als der Lösungsdruck der festen Substanz ist, scheiden sich die gelösten Teilchen aus und zwar so lange, bis die Konzentration der Flüssigkeit so weit verringert ist, daß ihr osmotischer Druck gerade gleich dem Lösungsdruck der festen Substanz ist. Dann ist Gleichgewicht zwischen der Lösung und der festen Substanz vorhanden.

Wenden wir nun diese allgemeinen Vorstellungen, die sich durch Einfachheit und Klarheit auszeichnen und die das Verhalten der Lösungen vollständig zu übersehen gestatten, auf den Fall der galvanischen Elemente an. Wenn wir einen Zinkstab in Wasser stellen, so wird das Zink vermöge des Lösungsdruckes zunächst sich auflösen, also Zinkteilchen in die Lösung zu treiben suchen. Bei Auflösung von Metallen nun muß man annehmen, da ja die Metallionen immer positiv geladen sind, daß sie eben Ionen, d. h. positiv elektrisch geladene Teilchen, nicht neutrale Moleküle in die Lösung senden. Dadurch wird nun das Wasser, welches die Zinkionen bekommt, positiv elektrisch werden, während das Zink, das positive Ladung verloren hat, dadurch negativ elektrisch zurückbleibt. Dadurch ist nun zunächst eine Vorstellung dafür gebildet, daß jedes Metall, das in Wasser taucht, sich negativ elektrisch erweist.

Aber eine weitere Folgerung dieser Ladungen ist nun die, daß überhaupt nur außerordentlich geringe Mengen des Metalls sich auflösen können. Denn die stark positiv geladenen Ionen und das stark negativ geladene Metall ziehen sich an und es wird also der Übergang weiterer Ionen in die Lösung dadurch verhindert, so daß also nur unwägbare Mengen des Metalls sich auflösen und dadurch schon den Spannungsunterschied zwischen Metall und Flüssigkeit hervorbringen.

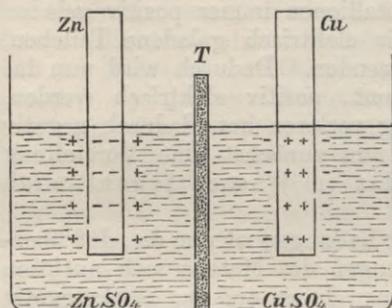
Ist nun aber die Flüssigkeit nicht reines Wasser, sondern eine Lösung des betreffenden Metallsalzes, so wird ein Unterschied eintreten, je nachdem der Lösungsdruck des betreffenden Metalles groß oder klein ist gegenüber dem osmotischen Druck der Lösung. Die edlen Metalle, Gold, Platin, Silber, Kupfer haben im allgemeinen sehr kleine Lösungsdrucke, die unedlen Metalle Zink, Kadmium, Eisen sehr große. Ist also nun ein Zinkstab in Zinksulfat, so haben die Zinkionen in der Lösung einen gewissen osmotischen Druck, einen um so größeren, je größer die Konzentration der Lösung ist. Dieser wirkt dem Lösungsdruck entgegen, immer aber bleibt der Lösungsdruck noch größer, so daß immer noch Zinkionen von dem Metall in die Flüssigkeit gesendet werden, das Metall sich negativ, die Flüssigkeit sich positiv ladet, wie in reinem Wasser, nur schwächer. Steht dagegen ein Kupferstab in Kupfervitriollösung, so ist im allgemeinen der osmotische Druck der Lösung größer als der Lösungsdruck des Kupfers, es werden sich also positive Kupferionen aus der Lösung auf dem Metall niederschlagen, das Metall wird positiv und die Lösung negativ elektrisch sein. Nachdem unwägbare Mengen niedergeschlagen sind, wird auch hier Gleichgewicht vorhanden sein, weil die elektrostatischen Kräfte den weiteren Vorgang verhindern. In Fig. 124 ist der Zustand dargestellt, den ein Zinkstab Zn in Zinkvitriollösung ($ZnSO_4$) und ein Kupferstab Cu in Kupfervitriollösung ($CuSO_4$), die durch eine Ton-

wand T getrennt sind, zeigen werden, wenn beide Metalle frei, nicht verbunden sind.

Werden nun aber die Metalle verbunden, so gleichen sich die Ladungen auf ihnen aus und infolgedessen kann nun das Zink neue Ionen in die Lösung senden, während aus der Kupferlösung sich von frischem Kupfer auf der Elektrode niederschlagen kann.

Man erkennt aus dieser Vorstellung sofort folgendes. Je geringer der osmotische Druck der Zinksulfatlösung ist, um so leichter können die Zinkionen aus dem Zink austreten, desto größer wird also der Spannungsunterschied zwischen Zink und Flüssigkeit sein. Umgekehrt,

Fig. 124.



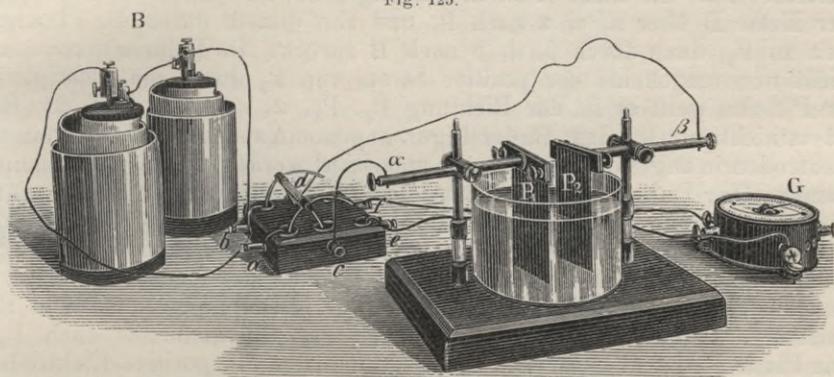
je größer der osmotische Druck der Kupfersulfatlösung ist, um so mehr Ionen werden aus der Lösung ausgefällt, um so größer wird also der Spannungsunterschied zwischen Kupfer und Flüssigkeit sein. Die elektromotorische Kraft des Elementes, welche die Summe beider Spannungsunterschiede ist, wird also wachsen, wenn die Kupfervitriollösung konzentrierter, die Zinksulfatlösung verdünnter genommen wird. Und Ähnliches findet bei jedem anderen Element statt. So sind nicht

bloß qualitativ, sondern quantitativ die Vorgänge bei der Stromerzeugung durch galvanische Elemente erklärt.

Kehren wir nun zurück zu der Elektrolyse von Flüssigkeiten, durch die ein Strom hindurchgeht. Wie wir schon mehrfach gesehen haben, ist jede von der Richtung des galvanischen Stromes abhängende Wirkung desselben im stande, umgekehrt wieder einen galvanischen Strom zu erzeugen. Dies zeigt sich auch bei den elektrolytischen Wirkungen des Stromes. Wenn man einen galvanischen Strom durch eine Zersetzungszelle schickt und durch ihn die Flüssigkeit elektrolysieren läßt, so wird die Zelle dadurch zu einem galvanischen Element, d. h. es entsteht in ihr eine elektromotorische Kraft, welche selbst umgekehrt im stande ist, einen Strom zu erzeugen. Man kann das in gewissen Fällen a priori einsehen. Lassen wir z. B. den Strom vermittelt zweier Platinplatten durch eine Lösung von salpetersaurem Silber gehen, so wird diese elektrolysiert, und es scheidet sich an der einen Platinplatte Silber ab, welches diese Platte überzieht, während an der anderen Platte Sauerstoff durch sekundäre Prozesse entweicht. In der Zersetzungszelle stehen also jetzt nicht mehr zwei Platten aus gleichem Metall, zwei reine Platinplatten, sondern eine reine, mit Sauerstoff bedeckte Platinplatte und eine mit Silber überzogene Platinplatte. Zwei verschiedene Metalle in einer Flüssigkeit sind aber elektrisch gegeneinander wirksam; folglich muß durch die Elektrolyse in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft erzeugt sein. Diese Forderung einer einfachen Überlegung zeigt sich nun tatsächlich in der Natur erfüllt. Aber nicht nur dann, wenn sich die eine Elektrode mit

einer Schicht eines anderen Metalles überzieht, tritt in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft auf. Selbst in Fällen, wo man eine Veränderung der Elektroden nicht erkennen kann und nicht vermuten sollte, sind die Elektroden nach dem Durchgang eines Stromes elektromotorisch gegeneinander wirksam. Tauchen wir z. B. zwei Platinplatten in angesäuertes Wasser und schicken wir einen Strom durch die Zersetzungszelle hindurch, so wissen wir, daß sich an der einen Elektrode Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff bildet. Diese Gase, sollte man meinen, verändern die Platinelektroden nicht, so daß diese hierbei nicht elektromotorisch gegeneinander wirksam werden können. Trotzdem werden sie es hier auch. Bei jeder elektrolytischen Zersetzung kommen die Elektroden in einen veränderten Zustand, der bewirkt, daß sie nun elektromotorisch gegeneinander wirksam sind. Man hat für diesen Zustand das Wort Polarisation eingeführt. Man sagt: die Elek-

Fig. 125.



troden werden polarisiert. Da also zwei polarisierte Elektroden elektromotorisch gegeneinander wirksam sind, so muß, wenn man sie durch einen Draht miteinander verbindet, durch diesen Draht und die Zersetzungsstelle ein elektrischer Strom fließen. Dies ist nun in der Tat der Fall und läßt sich sehr einfach experimentell zeigen. Man nennt diesen Strom, der von zwei polarisierten Elektroden ausgeht, den Polarisationsstrom. Wenn man also z. B. von einer Daniellschen Kette den Strom mittels zweier Platinelektroden in ein Gefäß mit angesäuertem Wasser sendet, so werden die Platinelektroden polarisiert. Trennt man nun die Platinelektroden von der Daniellschen Kette und verbindet sie mit einem Galvanometer, so schlägt die Nadel des Galvanometers aus und zeigt dadurch das Vorhandensein eines Stromes, des Polarisationstromes, an.

Auf einfache Weise wird diese abwechselnde Verbindung der Zersetzungsstelle einmal mit der galvanischen Kette und darauf mit einem Galvanoskop durch einen Kommutator wie den in Fig. 62 hergestellt, von dem die mittleren Querdrähte herausgenommen sind. Verbindet man wie in Fig. 125 zwei Bunsenelemente B mit den Quecksilbernäpfen a und b und die Zersetzungszelle P_1P_2 mit den

Näpfchen c und d, und legt den Bügel des Kommutators wie in dieser Figur nach links, so polarisiert der Strom die Elektroden in der Zersetzungszelle. Schlägt man dann aber den Bügel nach rechts, so ist die Zersetzungszelle $P_1 P_2$ nicht mehr mit den Bunsenschen Elementen, sondern mit dem Galvanoskop G verbunden, das an die Quecksilbernapfe e und f gelegt ist, und die Galvanoskopnadel macht einen Ausschlag und zeigt so den Polarisationsstrom an.

Ob dabei die Zersetzungszelle aus Schwefelsäure mit Platinelektroden oder sonst aus irgend einem Elektrolyten mit Elektroden aus irgend welchem Metall besteht, ist ganz gleichgültig; immer werden durch den Durchgang des Stromes durch eine elektrolytische Flüssigkeit die Elektroden polarisiert und dadurch wird in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft erzeugt.

Diese elektromotorische Kraft nun erzeugt einen Strom, dessen Richtung der des ursprünglichen, polarisierenden Stromes entgegengerichtet ist. Es fließt z. B. in der Fig. 125 der positive Strom von der Kette B über a, c, α nach P_1 und von diesem durch die Flüssigkeit zu P_2 , dann durch β , d, b nach B zurück. Im Polarisationsstrom fließt nun umgekehrt der positive Strom von P_2 durch die Flüssigkeit zu P_1 , also geht er in der Richtung $P_2, P_1, \alpha, c, e, G, f, d, \beta$. So ist es nicht nur bei dem in der Figur angenommenen Falle, daß Platinelektroden in angesäuertem Wasser polarisiert werden, sondern überhaupt immer. Der Polarisationsstrom hat immer in der polarisierten Zelle die entgegengesetzte Richtung als der ursprüngliche Strom, den man auch den polarisierenden Strom nennt. Die Platte P_1 ist mit dem positiven Pol der Batterie, P_2 mit dem negativen Pol verbunden. Nach der Polarisation fließt der Strom im Element von P_2 nach P_1 , also außerhalb von P_1 durch das Galvanometer nach P_2 . Die Platte P_1 ist also für den Polarisationsstrom die positive Elektrode. Allgemein ist diejenige Elektrode, die bei der Polarisation mit dem positiven Pol der Batterie verbunden war, auch die positive Elektrode für den Polarisationsstrom.

Schon während der polarisierende Strom fließt, werden die Elektroden in der Zersetzungszelle elektromotorisch gegeneinander wirksam und es fließt daher schon während der Polarisation von der Zersetzungszelle ein Strom durch den Schließungskreis dem polarisierenden Strom entgegen. Es wird also der Strom, der von einer Batterie, z. B. ein Paar Bunsen, durch eine Zersetzungszelle fließt, durch den in entgegengesetzter Richtung fließenden Polarisationsstrom geschwächt.

Daraus erkennt man zunächst, daß man auf den Strom, der durch eine Flüssigkeitszelle fließt, nicht ohne weiteres das Ohmsche Gesetz so anwenden kann, wie auf einen Strom, der durch einen metallischen Leiter fließt. Ging der Strom durch einen Leiter, so hat das Ohmsche Gesetz einfach den Ausdruck:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft der Batterie}}{\text{Gesamtwiderstand}};$$

hier aber, bei einer Flüssigkeit, wirkt der elektromotorischen Kraft der Batterie entgegen die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes.

Wir haben also zwei einander entgegenwirkende elektromotorische Kräfte und müssen also das Ohmsche Gesetz schreiben:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektrom. Kraft der Batterie} - \text{Elektrom. Kraft der Polarisation}}{\text{Gesamtwiderstand}}$$

Die Stärke der Polarisierung der Elektroden ist nun abhängig von der Natur der Elektroden und der zersetzten Flüssigkeit. Es werden ja durch den polarisierenden Strom die Anionen der Lösung zur Anode, die Kationen der Lösung zur Kathode getrieben, geben dort ihre Ladungen ab und bleiben als unelektrische Moleküle entweder ganz oder zum Teil an den Elektroden haften. Die gasförmigen Körper, wie Wasserstoff und Sauerstoff, entweichen zum Teil in die Luft, zum Teil werden sie von den Elektroden aufgenommen und okkludiert.

Nun aber haben diese an oder in den Elektroden sich ablagernden Schichten wieder die Tendenz, in Lösung überzugehen, sie haben wieder einen Lösungsdruck und dieser Lösungsdruck treibt sie wieder in die Flüssigkeit hinaus, entgegen der Richtung des polarisierenden Stromes. Das ist der Grund, warum der Polarisationsstrom die entgegengesetzte Richtung in der Flüssigkeit hat, wie der polarisierende Strom. Jedes polarisierte Element hat daher eine bestimmte elektromotorische Kraft, die abhängt von der Natur der Stoffe, die auf den Elektroden niedergeschlagen sind, und von der Natur der Flüssigkeit. Es wird also, wenn die Stärke des polarisierenden Stromes wächst, die elektromotorische Kraft des Polarisationselementes zuerst zunehmen bis zu diesem Wert, dann aber nahezu konstant auf der einmal erreichten Höhe bleiben, so daß eine Vergrößerung der polarisierenden Stromstärke dann keinen weiteren Erfolg mehr hat. Falls nun die elektromotorische Kraft des polarisierenden Stromes unter diesem Maximum liegt, so kann sie selbstverständlich die Elektroden der Zersetzungszelle nicht bis zum Maximum ihrer Polarisation laden; denn sowie die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes die des ladenden Elementes überwiegen würde, würde ja der Strom in umgekehrter Richtung fließen und die Polarisation wieder aufheben. Es ist dann also, bis zu diesem Maximum, die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes gleich der des polarisierenden Stromes. Bei Platinelektroden in Wasser z. B. fand man folgende Zahlen, welche die elektromotorische Kraft des polarisierenden und des Polarisationsstromes angeben:

Elektromotorische Kraft des polarisierenden Stromes.

1	Volt,
2	"
2,5	"
2,7	"
3	"
5	"

Elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes.

1	Volt,
2	"
2,5	"
2,7	"
2,7	"
2,7	"

Das Maximum der Polarisation liegt hier also bei 2,7 Volt; dies ist die höchste elektromotorische Kraft, die sich bei der Polarisation von

Platinplatten in Wasser erzeugen läßt. So hat ein jedes polarisiertes Element eine bestimmte elektromotorische Kraft.

Wenn man nun von einem polarisierten Element, welches man auch ein sekundäres Element nennt, den Strom durch einen Schließungskreis fließen läßt, so fließt er durch dieses Element selbst in umgekehrter Richtung, als vorher der polarisierende Strom geflossen war. Durch jeden Strom wird aber eine Flüssigkeit zersetzt, also muß auch der Polarisationsstrom in dem sekundären Element selbst Elektrolyse hervorbringen. Da er nun in umgekehrter Richtung fließt, wie die erste, so wird an der Platinplatte, die mit Sauerstoff bedeckt war, jetzt Wasserstoff erzeugt, und an derjenigen, die mit Wasserstoff bedeckt war, jetzt Sauerstoff erzeugt. Folglich nimmt die Dicke der fremden Schicht auf den Platten allmählich ab, wenn der Strom fließt, und immer mehr ab, je länger er fließt. Wenn schließlich die ab-geschiedenen Schichten auf den Platinplatten ganz neutralisiert, ganz verschwunden sind, so hört der Polarisationsstrom ganz auf. Der Polarisationsstrom aus einer polarisierten Zelle dauert also nur eine bestimmte Zeit hindurch, so lange, bis die chemische Veränderung auf den Elektroden wieder ganz zurückgebildet ist.

Natürlicherweise kann man eine Reihe von sekundären Elementen auch hintereinander oder nebeneinander verbinden. Man bekommt dann eine Polarisationsbatterie, oder Sekundärbatterie. Man kann also durch eine Reihe von solchen sekundären Elementen eine Batterie von sehr großer elektromotorischer Kraft bekommen, die außerordentlich starke Ströme liefert, aber natürlich nur eine gewisse Zeit hindurch. Zu neuem Gebrauch muß man dann die Batterie von neuem polarisieren oder, wie man sagt, laden. In der technischen Anwendung bezeichnet man diese Sekundärbatterien als Akkumulatoren, weil sie gestatten, die Energie des polarisierenden Stromes aufzusammeln und anzuhäufen. In Kapitel 3 des zweiten Theiles werden diese Akkumulatoren ausführlicher besprochen. Hier sei nur erwähnt, daß die jetzt gebräuchlichen Akkumulatoren aus Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure bestehen. Beim Polarisieren durch einen äußeren Strom, beim Laden des Akkumulators, wird die eine Bleiplatte durch den herantretenden Sauerstoff auf eine gewisse Dicke in Bleisuper-oxid verwandelt, während die andere zu reinem Blei wird. Wenn der Akkumulator geladen ist, so hat er eine elektromotorische Kraft von 2 Volt und kann nun bei der Verbindung der Pole durch einen äußeren Schließungskreis, bei der Entladung, so lange Strom abgeben, bis seine Ladung nahezu aufgebraucht ist. Solche Bleiakkumulatoren sind nicht bloß im großen sehr bequem, wie im zweiten Theil besprochen wird, sondern auch für den Gebrauch im kleinen, zu Experimenten, sehr empfehlenswert. Fig. 126 zeigt einen kleinen, bequem tragbaren Akkumulator von 2 Volt Spannung. Bei a und b sind die Pole. Die Zelle ist von einem geschlossenen Ebonitkästchen umgeben.

Fig. 126.

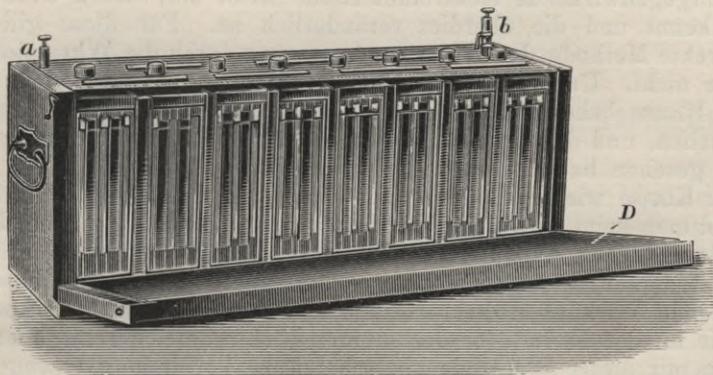


Fig. 127 zeigt einen größeren Akkumulator von 16 Volt Spannung, der also acht größere Zellen enthält. Diese sind in einem tragbaren Holz-

kasten mit beweglicher Seitenwand D enthalten, die für gewöhnlich zugeklappt wird. Bei a und b sind die Pole der Batterie.

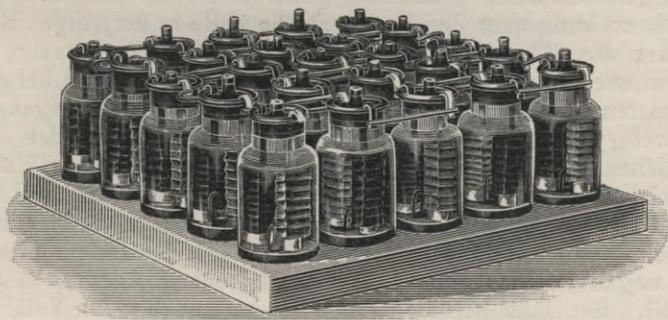
Eine große Reihe von kleinen Akkumulatoren, mehrere tausend, hintereinander geschaltet, die also Spannungen von mehreren tausend

Fig. 127.



Volts geben, werden als Hochspannungsakkumulatoren bezeichnet. Fig. 128 gibt eine Ansicht einer Batterie von 25 solcher kleinen Zellen, wie sie in der technischen Reichsanstalt benutzt werden. Jedes einzelne Glas enthält zwei Bleiklötze als Elektroden und ist oben dicht abgeschlossen. Ein Glasröhrchen führt in das Innere des Glases und erlaubt einerseits eine Füllung des Glases mit Schwefelsäure, andererseits ein

Fig. 128.



Entweichen der bei der Ladung auftretenden Gase. Natürlich muß man zur Ladung einer solchen Hochspannungsbatterie, wenn man etwa 110 Volt im ladenden Strom zur Verfügung hat, immer je eine Reihe von 50 Zellen einzeln laden, oder mehrere Reihen von 50 Zellen parallel schalten. Schaltet man dann die Reihen alle oder zum Teil hintereinander, so kann man also Ströme von sehr hoher Spannung erhalten. Da bei solch hochgespannten Strömen es sehr auf die Isolation aller Teile ankommt, so sind die einzelnen Elemente vollkommen isoliert aufgestellt.

Das Auftreten der Polarisation in einer von einem Strome durchflossenen Flüssigkeit klärt uns nun auch auf, warum es nicht möglich ist, die Widerstände von Flüssigkeiten in derselben Weise durch die Methode der Wheatstoneschen Brücke zu bestimmen, wie die von festen Körpern. Fließt nämlich der Strom durch eine Flüssigkeit, so tritt eine entgegenwirkende elektromotorische Kraft auf, deren Größe man nicht kennt und die überdies veränderlich ist. Für diese gilt dann die direkte Methode der Widerstandsmessung durch die Wheatstonesche Brücke nicht. Um eine Flüssigkeit nun doch einfach, wie einen Leiter erster Klasse behandeln zu können, ist es notwendig, die Polarisation aufzuheben, und das geschieht eben durch Wechselströme, wie wir auf S. 97 gesehen haben. Gegen Wechselströme verhält sich ein Leiter zweiter Klasse wie ein Leiter erster Klasse. Es tritt keine Polarisation auf und man kann die Flüssigkeit dann ebenso behandeln wie ein Metall.

In manchen Fällen kann ein elektrischer Strom, wenn er durch eine Flüssigkeit, diese elektrolysierend, hindurchgeht, noch besondere auffallende Wirkungen hervorbringen. Es kann nämlich vorkommen, daß die an der einen oder der anderen Elektrode abgeschiedenen Substanzen mit dieser Elektrode eine chemische Verbindung erzeugen, die ein so schlechter Stromleiter ist, daß der Stromdurchgang dabei ganz oder fast ganz aufhört. Man sagt dann, es werde an der Elektrode ein Übergangswiderstand erzeugt. Das auffallendste Beispiel dafür gibt die Elektrolyse von Alaunlösungen, wenn die eine Elektrode und zwar die positive aus Aluminium besteht. Es scheidet sich dann durch einen hindurchgeschickten Strom an der Aluminiumelektrode Sauerstoff ab und dieser geht mit dem Aluminium eine Verbindung ein, die den Strom so schlecht leitet, daß der Stromdurchgang dadurch sofort aufgehoben wird. Wenn man elektromotorische Kräfte bis 22 Volt anwendet, so kann man durch eine solche Zelle in derjenigen Richtung, in welcher das Aluminium Anode ist, nur ganz schwache Ströme, solche von wenigen Milliampères hindurchbringen, während bei größeren angewendeten elektromotorischen Kräften trotz des Übergangswiderstands stetig wachsende Ströme hindurchgehen. Natürlich kann in einer solchen Zelle statt des Alauns irgend eine andere Flüssigkeit angewendet werden, welche nur die Eigenschaft haben muß, an der Anode Sauerstoff direkt oder durch sekundäre Prozesse zu entwickeln. Eine solche Zelle mit einer positiven Aluminiumelektrode und einer beliebigen negativen Elektrode (z. B. aus Blei oder Kohle) wirkt also wie ein Ventil. Sie läßt Ströme, deren Spannung bis 22 Volt beträgt, in der einen Richtung nicht hindurch, in der anderen Richtung, in der das Aluminium Kathode ist, wohl. Sie sperrt, wie der Verfasser gezeigt hat, von jeder angewendeten Spannung 22 Volt ab. Man nennt daher diese Zellen auch Ventillezellen oder Drosselzellen. Von ihnen wird im zweiten Teil Kap. 4 eine wichtige Anwendung beschrieben werden.

7. Kapitel.

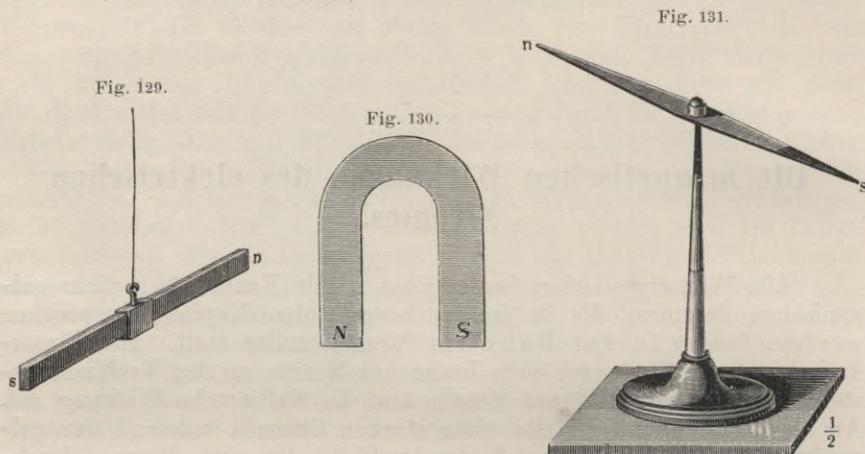
Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Alle Wirkungen oder, besser gesagt, alle Kennzeichen eines galvanischen Stromes, die in den vorhergehenden Kapiteln besprochen wurden, fanden in der Bahn des Stromes selbst statt. Der Stromkreis wurde erwärmt nach dem Jouleschen Gesetz, an den Verbindungsstellen zweier verschiedener Metalle trat die Peltiersche Wirkung auf. An der Unterbrechungsstelle eines starken Stromes entstand der galvanische Lichtbogen; Flüssigkeiten endlich, die vom Strome durchflossen wurden, wurden elektrolysiert, in ihre Bestandteile zerlegt.

Mit diesen bisher angeführten Erscheinungen sind aber die Wirkungen des galvanischen Stromes lange nicht erschöpft. Schon bei der Meßmethode, welche wir für den galvanischen Strom anwendeten, mittels eines Galvanometers, hatten wir die Wirkung des Stromes auf einen Magneten benutzt, indem die Ablenkung der Magnetnadel von ihrer natürlichen Nord-Südrichtung uns das Vorhandensein eines elektrischen Stromes anzeigte. Diese Wirkung ist jedoch nur eine ganz spezielle in einer großen, allgemeinen Klasse von Beziehungen, welche durch die fortgesetzten Untersuchungen der verschiedensten Physiker zwischen Elektrizität und Magnetismus aufgedeckt wurden. Man faßt die gesamte Lehre von den Beziehungen der elektrischen Ströme zum Magnetismus unter dem Namen „Elektromagnetismus“ zusammen.

Die Magnete, mit denen wir gewöhnlich operieren, haben bekanntlich zwei Pole, einen Nordpol und einen Südpol. Wir benutzen solche Magnete gewöhnlich in der Form von Stäben, wie Fig. 129, oder von Hufeisen, wie Fig. 130, oder von Nadeln, wie Fig. 131. Hängt man einen Magnetstab oder eine Magnetnadel auf, so daß sie sich horizontal frei drehen können, so stellen sie sich, wie man weiß, immer in eine ganz bestimmte Richtung. Dasjenige Ende, welches nach dem Norden der Erde zeigt, nennt man den Nordpol, das entgegengesetzte den Südpol des Magneten. Außer dieser Eigenschaft, sich immer in eine bestimmte Richtung zu stellen, hat aber jeder Magnet noch die bekannte wichtige Eigenschaft, daß er andere Magnete anzieht, resp. abstößt. Es sind die Gesetze der Anziehung und Abstößung von zwei Magnetpolen genau dieselben wie diejenigen der Anziehung und Abstößung von zwei elektrischen Körpern. Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an. Nur können wir niemals einen einzigen Magnetpol allein erzeugen,

sondern immer ist an demselben Stück Eisen auch der entgegengesetzte Pol vorhanden. Das ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber der Elektrizität. Denn bei dieser können wir einen Körper be-

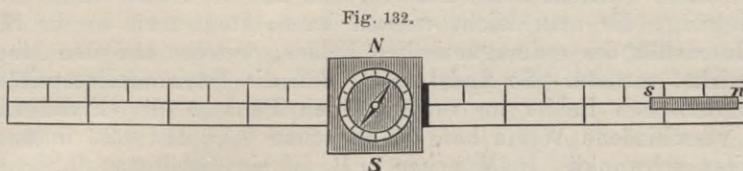


kanntlich positiv laden, etwa durch Reibung, und die negative Elektrizität einem ganz anderen, entfernten Körper mitteilen. Bei einem Magneten sind aber im Gegensatz dazu immer die beiden Pole an demselben Stück Eisen zusammen, niemals an getrennten Stücken, und daher hängen auch die Kräfte, die ein Magnet zeigt, immer von beiden Polen ab. Doch kann man den Magneten so lang machen, etwa eine lange magnetisierte Stricknadel nehmen, daß man oft im wesentlichen nur die Wirkung eines einzigen Poles beobachten kann.

Daß eine Magnetnadel von selbst immer nach Norden zeigt, erklärt man sich bekanntlich daraus, daß die ganze Erde selbst ein Magnet ist, deren Südpol im Norden liegt, so daß alle Nordpole von Magnetstäben sich nach ihm hindrehen. Man bezeichnet diejenige Richtung, in der sich eine drehbare Magnetnadel an einem beliebigen Ort der Erde einstellt, als den magnetischen Meridian dieses Ortes. Dieser stimmt ungefähr, aber nicht ganz mit dem geographischen Meridian dieses Ortes überein. Man muß also annehmen, daß an jeder Stelle der Erdoberfläche die Magnetnadel mit einer gewissen Kraft in die Richtung des Meridians gezogen und dort gehalten wird, so daß, wenn man die Nadel aus dem Meridian herausdreht, sie sich nach einigen Schwingungen wieder in denselben einstellt. Man sagt, die Erde besitze an jedem Punkt ihrer Oberfläche eine gewisse magnetische Horizontalintensität. Diese ist verschieden groß an den verschiedenen Punkten der Erde, in der Nähe der Pole ist sie größer als in mittleren Breiten, und wir werden bald ein Mittel finden, um sie der Größe nach zu messen.

Wir müssen nämlich, um die Erscheinungen des Magnetismus genau zu verstehen, versuchen, sie quantitativ in Zahlen auszudrücken. Schon aus dem bloßen einfachen Versuch, daß wir etwa einen in der

Hand gehaltenen Schlüssel von einem Magneten anziehen lassen, erkennen wir, daß verschiedene Magnete verschieden stark wirken. Man sagt von einem Magneten, der eine stärkere Wirkung ausübt als ein anderer, er habe ein größeres magnetisches Moment, und wir wollen zuerst versuchen, die magnetischen Momente verschiedener Magnete miteinander numerisch zu vergleichen. Das einfachste Mittel dazu ist folgendes. Wir setzen (Fig. 132) eine Kompaßnadel auf die Mitte eines geteilten Maßstabes und bringen unseren Magnetstab s, n ,



dessen Moment wir bestimmen wollen, in einige Entfernung von der Nadel in die Lage, die in der Figur bei s, n gezeichnet ist. Die Kompaßnadel wird infolge der magnetischen Wirkung des Stabes um einen kleinen Winkel aus dem Meridian herausgedreht werden. Bringen wir an Stelle von s, n andere, verschieden starke Magnetstäbe, so wird die Nadel um verschieden große Winkel sich drehen und diese Drehungen der Nadel bieten uns ein Maß für die Größe der magnetischen Momente unserer Stäbe. Wir können auch umgekehrt die verschieden starken Stäbe in verschiedene Entfernungen bringen, so daß die Nadel jedesmal um den gleichen Winkel sich dreht. Die Momente der einzelnen Stäbe verhalten sich dann umgekehrt wie die dritten Potenzen der Entfernung der Nadelmitte von der Mitte des Magnetstabes. Wir brauchen nun bloß noch einen bestimmten Stab als Einheit festzusetzen und also zu sagen, daß er die Einheit des magnetischen Moments haben soll, so können wir alle magnetischen Momente von Magnetstäben, Nadeln u. s. f. in diesen Einheiten ausdrücken. In den gewöhnlich gebrauchten Einheiten hat z. B. ein Magnetstab von der Größe, wie der in Fig. 129, wenn er kräftig magnetisiert ist, ein Moment von etwa 1000 Einheiten.

Sind irgendwo in einem Raume magnetische Kräfte aus irgend einer Ursache vorhanden, so wirken sie auf einen Magnetstab oder eine Magnetnadel, die drehbar aufgehängt sind, ein, indem sie den Stab oder die Nadel in solche Lage zu bringen suchen, daß diese sich in die Richtung der Kraft einstellen. Man kann daher umgekehrt aus der Richtung, in der sich eine kleine Magnetnadel einstellt, wenn sie frei beweglich ist, auf die Richtung der magnetischen Kräfte schließen. Davon werden wir bald eine Anwendung machen. Man bezeichnet einen Raum, in welchem aus irgend welcher Ursache magnetische Kräfte wirken, als ein magnetisches Feld. Insbesondere hat also die Erde auch ein magnetisches Feld. Je stärker die Kräfte sind, die ein magnetisches Feld auf einen gegebenen Magnetstab ausübt, umso größer, sagen wir, ist die Intensität des Feldes oder die Feldstärke.

Wir können nun offenbar mittels eines Magnetstabes, dessen mag-

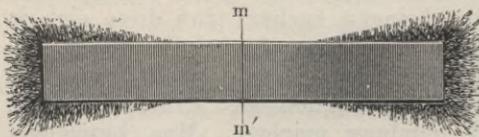
netisches Moment wir kennen, die Intensität des magnetischen Feldes der Erde in horizontaler Richtung, eben die sogenannte Horizontalintensität an jedem beliebigen Punkte messen. Hängen wir nämlich diesen Stab an einem Faden auf, so stellt er sich zunächst in den Meridian ein, und drehen wir ihn nun willkürlich etwas heraus, so wird er, sobald er losgelassen ist, wieder in die Meridianrichtung zurückzukehren suchen und wird infolgedessen Schwingungen um die Gleichgewichtslage machen. Je stärker die Intensität des magnetischen Feldes ist, um so rascher werden diese Oszillationen verlaufen, und aus der Dauer einer solchen Schwingung, die man leicht messen kann, kann man so die Stärke oder Intensität des erdmagnetischen Feldes, welches auf den Magnetstab wirkt, messen. So findet man, daß die Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche etwas verschiedene Werte hat, die zwischen 0,17 und 0,22 in unseren Einheiten schwankt. In München z. B. ist sie fast genau 0,20.

So wie wir hier die Intensität des magnetischen Feldes der Erde messen konnten, so können wir nun auch, wenigstens im Prinzip, die Intensität jedes magnetischen Feldes bestimmen, die von irgend einem beliebigen Magneten gebildet wird. Natürlich wird ein solches Feld verschiedene Intensität haben, je nachdem man nah an dem Magneten sich befindet, oder weit von ihm entfernt. So werden wir z. B. magnetische Felder finden, die so stark sind, daß ihre Intensität durch die Zahl 20000 ausgedrückt wird, die also 100000mal so große Intensität haben, wie das Horizontalfeld der Erde.

Doch wir wollen zunächst noch einige Eigenschaften der Magnete weiter besprechen.

Ein Magnet wirkt bekanntlich nicht bloß auf einen anderen Magneten mit Anziehungs- und Abstößungskräften, sondern er wirkt auch auf unmagnetisches Eisen, indem er dieses immer anzieht. Dies beruht auf einer Wirkung, die ganz analog ist der elektrischen Influenz. Wird nämlich ein unmagnetisches Stück weichen Eisens in die Nähe eines Magneten gebracht, so wird es schon dadurch selbst magnetisch, ganz so wie ein unelektrischer Körper in der Nähe eines elektrisierten durch Influenz elektrisch wird. Man sagt auch hier: ein Magnet erzeugt in einem unmagnetischen Stück Eisen Magnetismus durch magnetische Influenz oder Induktion. Deswegen wird weiches unmagnetisches Eisen von einem Magneten immer angezogen.

Fig. 133.



Denn jeder Pol erzeugt in dem genäherten Stück weichen Eisens in seiner Nachbarschaft den entgegengesetzten Pol und entfernt davon den gleichnamigen. Folglich über-

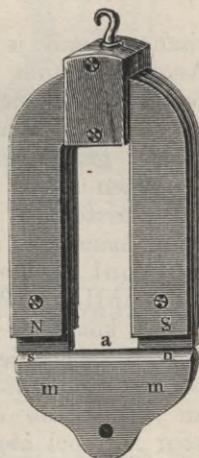
wiegt die Anziehung zwischen den zwei entgegengesetzten Polen, die nahe beieinander sind, und das influenzierte Stück Eisen wird angezogen. Man kann das sehr deutlich sehen, wenn man einen Magnetstab in Eisenfeilspäne einsteckt und herauszieht; diese bleiben, wie in Fig. 133, an den Enden des Magnetstabes haften, weil jeder Span zu einem Magneten geworden ist.

Wird ein induziertes Stück weichen Eisens von dem Magneten wieder entfernt, so hat es seinen Magnetismus vollständig verloren. Anders dagegen ist es mit dem Stahl. Ein durch Influenz magnetisiertes Stück Stahl behält immer ein wenig von seinem Magnetismus zurück, auch wenn es von dem influenzierenden Körper entfernt wird. Man kann bekanntlich unmagnetische Stücke von weichem Eisen und von Stahl durch Bestreichen mit einem schon vorhandenen Magneten magnetisieren. Auch hierbei zeigt es sich, daß das weiche Eisen seinen Magnetismus sehr rasch verliert, während Stahl ihn behält. Man macht daher dauernde Magnete, sogenannte permanente Magnete, immer aus Stahl. Im Gegensatz zu den permanenten Magneten nennt man diejenigen, welche nur so lange magnetisch bleiben, als der induzierende magnetische Körper in der Nähe ist, temporäre Magnete.

Ein jeder Magnet ist nicht bloß an seinen Polen magnetisch, sondern überall in seiner ganzen Ausdehnung. An den Polen treten nur die magnetischen Kräfte dadurch besonders scharf zu Tage, daß sie dort starke anziehende und abstoßende Wirkungen ausüben. Werden die Pole eines Magneten durch ein Stück Eisen (welches man den Anker nennt) verbunden, so sagt man, der Magnet ist geschlossen. Ein solcher Magnet übt viel geringere anziehende oder abstoßende Kräfte nach außen aus, als ein ungeschlossener, aber er ist trotzdem ein vollständiger Magnet und kann in anderer Weise auch sehr erhebliche magnetische Wirkungen ausüben, wie wir später sehen werden. Einen solchen geschlossenen Magneten nennt man auch einen pollosen Magneten, weil er eben keine freien Pole hat. Das einfachste Beispiel dafür bietet der in Fig. 134 gezeichnete Magnet NS mit seinem Anker mm, ein anderes Beispiel gibt ein magnetisierter Eisenring.

Nicht bloß Eisenkörper werden durch magnetische Induktion magnetisch, sondern, freilich in viel geringerem Grade, auch Nickel und Kobalt und in noch geringerem Grade die meisten anderen Körper, ja auch die Luft und andere Gase. Auch dies ist eine der großen Entdeckungen Faradays, daß er zeigte, daß der Magnetismus eine allgemeine Eigenschaft aller Körper ist, daß alle Substanzen denjenigen Zustand oder diejenige Bewegungsform des Äthers annehmen können, die wir eben Magnetismus nennen und die beim Eisen so überaus kräftig zu Tage tritt. Wenn daher ein Magnet vorhanden ist, welcher nach allen Richtungen magnetische Kräfte ausübt, und wenn in seine Nähe ein Stück weichen, unmagnetischen Eisens gebracht wird, so wird das sehr stark magnetisch, es konzentriert gewissermaßen die von dem Magneten ausgehenden Kräfte zum größten Teil in sich. Aber ein Teil der magnetischen Kräfte des Magneten wirkt auch außerhalb des Eisens auf die Luft oder die anderen vorhandenen Körper; die magnetische Induktion ist nicht ganz auf das Eisen konzentriert. Es findet, wie man

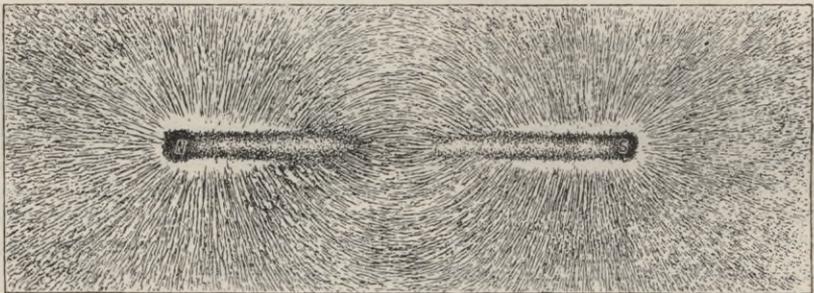
Fig. 134.



sagt, eine gewisse Streuung der magnetischen Kraft statt. Um also die Kraft eines Magneten an bestimmter Stelle möglichst auszunutzen, muß man Anordnungen treffen, daß diese Streuung der magnetischen Kraft möglichst gering ist, d. h. daß die magnetischen Kräfte möglichst auf den Raum konzentriert werden, in dem sie gebraucht werden sollen.

Die magnetischen Kräfte, die in einem bestimmten magnetischen Felde herrschen, kann man sich auf verhältnismäßig einfache Weise bildlich darstellen, und dadurch eine genaue Vorstellung von ihrer Richtung und von der Stärke des Feldes an jeder Stelle bekommen. Legen wir nämlich einen Magnetstab irgendwo auf einen Tisch, bringen über denselben ein Blatt Papier und streuen auf dieses Eisenfeilspäne, so ordnen diese sich so, daß sich immer in der Richtung der magne-

Fig. 135.



tischen Kraft je zwei Feilspäne aneinander lagern. Ein Bild dieser Anordnung gibt Fig. 135. Eine jede solche Linie, in der die Eisenfeilspäne sich aneinander reihen, nennt man eine magnetische Kraftlinie. Man sieht von den Polen aus die Kraftlinien nach allen Richtungen gehen und zwischen den Polen vom Nordpol zum Südpol in krummen Linien übergehen. Man hat auf diese Weise ohne weiteres eine Darstellung von der Richtung der magnetischen Kraft im Felde, wenn man nur noch festsetzt, daß die Kraftlinien immer vom Nordpol in die Luft ausströmen und in den Südpol einströmen sollen. Wenn man einen magnetischen Nordpol für sich herstellen könnte — was aber nicht möglich ist, da jeder noch so kleine Magnet zwei Pole hat, — so würde ein solcher Nordpol, wenn er in ein solches Feld gebracht werden und in ihm sich frei bewegen könnte, an jeder Stelle der Richtung einer Kraftlinie folgen. Er wird stets vom Nordpol abgestoßen und zum Südpol hingezogen.

Aber man kann mit den Kraftlinien noch mehr erreichen, wenn man sie nicht in unbegrenzter Zahl, sondern in bestimmter Zahl zeichnet. Zu dem Zweck denken wir uns, daß wir die Intensität des magnetischen Feldes an jedem Punkt ausgemessen haben und wollen zuerst annehmen, daß das Feld an allen Stellen dieselbe Intensität besitzt, wie es z. B. bei dem magnetischen Feld der Erde der Fall ist und wie es angenähert auch zwischen den Polen eines kräftigen Huf-

eisenmagneten der Fall ist. Die Intensität des Feldes ist dann eine bestimmte Zahl, z. B. bei dem Feld der Erde 0,5, bei anderen Feldern kann diese bis zu 20000 und mehr wachsen. Wir denken uns nun senkrecht zu der Richtung der durch Eisenfeile bezeichneten Kraftlinien eine Ebene und ziehen durch jeden Quadratcentimeter dieser Ebene gerade so viel Kraftlinien, als die Intensität des Feldes in obigen Einheiten beträgt. Also bei dem zuletzt erwähnten Feld würden wir durch jeden Quadratcentimeter, soweit das Feld diese Stärke hat, 20000 solche Linien in der Richtung vom Nordpol zum Südpol zu zeichnen haben. Bei dem Feld der Erde müßten wir auf je 2 qcm 1 Kraftlinie zeichnen. Hat das Feld nicht überall dieselbe Intensität, so ist an den verschiedenen Stellen desselben auch die Zahl der Kraftlinien, die wir pro Quadratcentimeter zu zeichnen haben, verschieden. Man sieht, daß nach dieser Konstruktion es genau dasselbe bedeutet, ob wir sagen, das magnetische Feld hat an einer Stelle die Intensität oder Feldstärke 200, oder ob wir sagen, an dieser Stelle sind pro Quadratcentimeter 200 Kraftlinien vorhanden. Die Einführung der

Fig. 137.

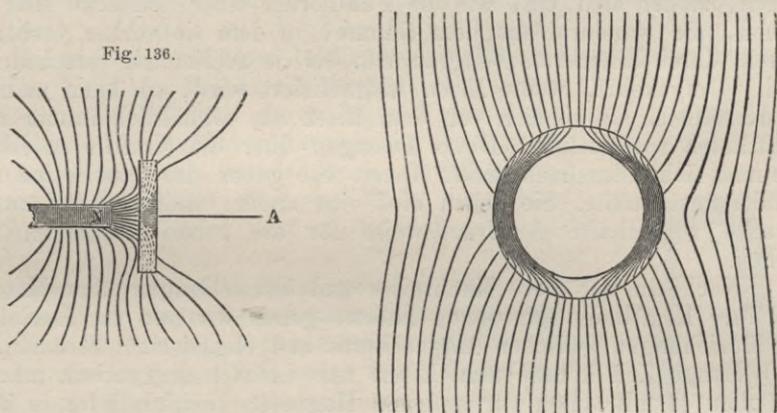


Fig. 136.

Zahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter, die zuerst etwas gesucht erscheint, bietet aber manche große Vorteile, wie sich namentlich im Kapitel 9 zeigen wird.

Wir wollen nun aus den Eigenschaften, die magnetische Körper zeigen, die Eigenschaften der Kraftlinien entnehmen. Zunächst ergibt sich ohne weiteres die folgende.

Bringt man in die Nähe des einen Pols eines Magnetstabes ein Stück weichen Eisens, so wird dieses induziert, und in den Raum zwischen dem Magneten und dem induzierten Eisen ist die Feldintensität sehr groß, weit größer als an anderen Stellen in der Nähe des Magneten, weil sich eben dem Nordpol N gegenüber ein Südpol S bildet. Es verlaufen also in Fig. 136 die Kraftlinien zwischen dem Pol N und dem induzierten Eisenstück A viel dichter als im übrigen Feld. Wir können dies als eine Eigenschaft der Kraftlinien ausdrücken

und sagen: weiches Eisen konzentriert die vorhandenen Kraftlinien des Feldes in sich. So werden auch in Fig. 137, wo ein Ring aus Eisen in einem von Kraftlinien durchzogenen Felde gezeichnet ist, die Kraftlinien in dem Eisenring konzentriert, sie biegen sich also in der Nähe desselben ab und durchsetzen ihn mit viel größerer Dichtigkeit, als sie außerhalb desselben haben. Da wo die Kraftlinien in weiches Eisen eindringen, erzeugen sie einen Südpol, wo sie das weiche Eisen verlassen, erzeugen sie einen Nordpol. Denn wir haben festgesetzt, daß die Kraftlinien eines Magneten immer vom Nordpol nach außen zum Südpol gehen sollen.

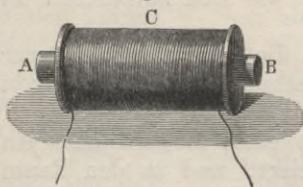
Die Kraftlinien, die von einem Magnetstab ausgehen, durchsetzen auch das Eisen des Magneten selbst, indem sie in diesem am Südpol eintreten und am Nordpol austreten. Innerhalb des Magneten also haben die Kraftlinien die Richtung vom Südpol zum Nordpol, außerhalb die vom Nordpol zum Südpol. Wird ein bisher unmagnetisches Stück Eisen magnetisch, so gehen von ihm Kraftlinien aus, die vorher nicht vorhanden waren. Verliert das Stück Eisen seinen Magnetismus, so verschwinden auch die Kraftlinien wieder. Man kann das letztere so ausdrücken, daß man sagt: die Kraftlinien, die vorher vorhanden waren, ziehen sich ein, wie die Fühlhörner einer Schnecke sich einziehen, sie wandern aus dem Raume, in dem sie vorher vorhanden waren, durch Einschrumpfung zurück, bis sie schließlich verschwunden sind. Umgekehrt, wenn Eisen magnetisiert wird, so kann man das so darstellen, als ob sich von dem Eisen aus allmählich immer mehr Kraftlinien vorstrecken. Diese Aussagen über die Kraftlinien lehren, wie man sieht, durchaus nichts Neues. Sie geben durchaus keine neue Erfahrungstatsache. Sie geben bloß eine andere und zwar für manche Zwecke vorteilhafte Ausdrucksweise für die schon bekannten Tatsachen.

Nachdem wir diese Kenntnisse und Vorstellungen über Magnete und ihre Kraftlinien gewonnen haben, gehen wir nun zur Darlegung der Beziehungen zwischen Magnetismus und elektrischen Strömen.

Lange Zeit konnte man Eisen nur dadurch magnetisch machen, daß man es mit schon vorhandenen Magneten bestrich, oder es deren Influenzwirkung aussetzte. Es war eine Entdeckung von hervorragender Wichtigkeit, als man erkannte, daß man dasselbe auch mit elektrischen Strömen erreichen kann.

Wenn man einen galvanischen Strom, mag er kommen, woher er wolle, spiralförmig um einen unmagnetischen Stab weichen Eisens herumführt, so wird der Eisenstab magnetisch. Um den Versuch zweckmäßig auszuführen, umwickelt man, wie Fig. 138 zeigt, einen Hohlzylinder von Holz C mit einer Reihe von Windungen aus übersponnenem Draht. Die Enden dieser Drahtwindungen führen nach außen und werden mit den Polen einer galvanischen Batterie verbunden. Es fließt also der Strom um diesen Zylinder in lauter spiralförmigen Win-

Fig. 138.



dungen. Wenn man nun in die Höhlung des Zylinders einen Stab unmagnetischen weichen Eisens AB hineinbringt, so wird der Stab außerordentlich kräftig magnetisch, und zieht anderes Eisen, z. B. einen Schlüssel an. Das eine Ende des Stabes wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Man nennt deshalb einen solchen mit Draht umwickelten Zylinder eine Magnetisierungsspule. Sowie man den Strom unterbricht, hört der Magnetismus in dem weichen Eisen AB auf und der angezogene Schlüssel fällt wieder ab. Das Eisen ist also nur durch die Wirkung des Stromes magnetisch geworden. Man nennt deshalb einen solchen Magneten, der durch den elektrischen Strom erst magnetisch wird, einen Elektromagneten.

Jeder Magnetstab hat einen Nordpol und einen Südpol; es fragt sich also zunächst, welches Ende des Stabes AB wird hier ein Nordpol, welches ein Südpol? Die Beantwortung dieser Frage wird durch eine Regel gegeben, die von Ampère ausgesprochen ist, und welche die Ampèresche Schwimmerregel heißt:

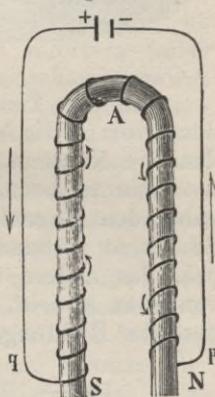
Denkt man sich in dem Draht der Magnetisierungsspule in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, so daß man mit dem Gesicht dem Magnetstab zugewendet ist, so ist immer dasjenige Ende des Stabes ein Nordpol, welches zur linken Hand liegt.

Es wird also bei einer bestimmten Richtung des positiven Stromes das eine Ende des Stabes ein Nordpol, das andere ein Südpol. Kehrt man durch einen Kommutator die Richtung des positiven Stromes in der Magnetisierungsspule um, so wird auch der Magnetismus in AB umgekehrt; dasjenige Ende, das vorher ein Nordpol war, wird jetzt ein Südpol und umgekehrt.

Ebenso wie man einen geraden Stab von weichem Eisen magnetisieren kann, kann man auch einen hufeisenförmig gebogenen Stab magnetisieren. Man braucht nur den Stab oder seine Enden mit Draht spiralförmig fortlaufend zu umwickeln. Fig. 139 zeigt einen solchen umwickelten Hufeisenmagneten. Man kann sich denken, daß der Eisenstab erst gerade gestreckt war und hintereinander nach derselben Richtung umwickelt war, und daß er dann erst hufeisenförmig gebogen wurde. Die Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel zeigt bei der durch die Pfeile angegebenen Richtung des Stromes, daß die beiden Pole bei S und N liegen. Nachdem der Stab hufeisenförmig gebogen ist, scheinen die beiden Enden in entgegengesetzter Richtung umwickelt zu sein. Umwickelt man sie faktisch in entgegengesetzter Richtung, so daß sie dem Anschein nach in gleicher Richtung umwickelt sind, so werden die beiden Enden des Hufeisens gleiche Pole, die entgegengesetzten Pole liegen dann oben in der Biegung des Hufeisens.

Auf diese Weise kann man also durch Herumsenden eines galvanischen Stromes um einen weichen Eisenkern außerordentlich starke

Fig. 139.



temporäre Magnete machen. Es ist in Fig. 140 eine oft benutzte Anordnung gezeichnet, welche zur Hervorbringung sehr starker Elektromagnete dient. Zwei dicke Zylinder aus weichem Eisen stehen auf einem festen Tisch, auf welchem sie durch eine Querplatte von Eisen unten verbunden sind.

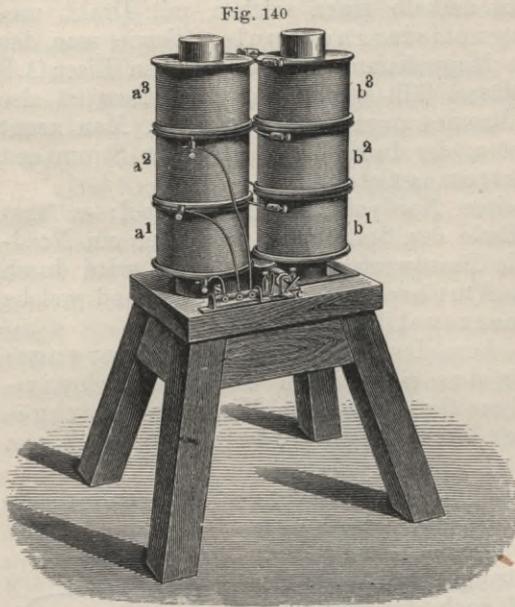
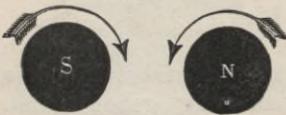


Fig. 140

Um jeden von den Eisenzylindern sind drei Magnetisierungsspulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ geschoben, durch welche der Strom hindurchgeschickt werden kann. Die Spulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ können nun nach Belieben so miteinander verbunden werden, daß die beiden herausragenden Enden des Eisenzylinders entgegengesetzt magnetisch werden, der eine ein Nordpol, der andere ein Südpol, oder daß sie beide Nordpole oder beide Südpole werden. Die erste Anordnung ist die am meisten anwendbare und angewendete.

An den Tisch sind gewöhnlich Klemmschrauben angebracht, um den Strom in die Magnetisierungsspulen einleiten zu können, und außerdem ein Kommutator, welcher dazu dient, die Pole der Magnete rasch wechseln zu können, oder auch den Strom ganz zu unterbrechen und daher den Magnetismus des Eisens ganz aufzuheben. Wenn man die Spulen so verbunden hat, daß das eine Ende des Hufeisens ein Nordpol, das andere ein Südpol ist, und man die Enden der Eisenstäbe von oben ansieht, so fließt der positive Strom um beide in entgegengesetzter Richtung, und man kann sich durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel sofort überzeugen, daß die in Fig. 141 gezeichnete Stromrichtung die richtige ist. Um stets sofort zu wissen, wie der Strom um einen Magnetpol fließt, kann man sich merken, daß er um einen Südpol, von oben gesehen, in der Richtung fließt, wie der Zeiger einer Uhr sich bewegt,

Fig. 141.



um einen Nordpol entgegengesetzt dem Zeiger einer Uhr.

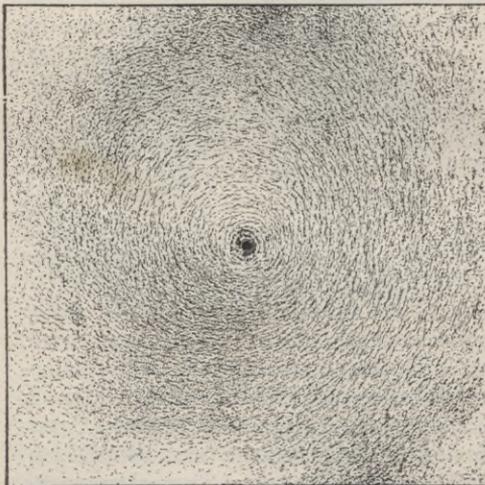
Sowie der Strom unterbrochen wird, hört der Magnetismus des Eisens auf. Doch ist das nicht ganz streng richtig. Es dauert nämlich immer eine gewisse kleine, aber meßbare Zeit, bis der Magnetismus aus dem Eisenkern verschwunden ist. Man nimmt zur Erklärung dieser magnetischen Erscheinungen an, daß in jedem, auch unmagne-

tischen, Eisenstücke die Moleküle stets von vornherein selbst magnetisch sind, daß sie aber alle ganz verschiedene Lagen und Richtungen haben, und daß die Wirkung der Magnetisierung, mag sie nun durch Bestreichen mit einem Magneten oder durch Herumführen eines Stromes hervorgebracht sein, darauf beruht, daß alle Moleküle des Eisens sich in dieselbe Richtung stellen. Ein Magnet wäre demnach ein Stück Eisen, bei welchem alle Moleküle gleich gerichtet sind. Es wird weiter angenommen, daß bei gewöhnlichem weichen Eisen die Moleküle infolge einer äußeren magnetisierenden Kraft sich ohne weiteres in ihre neuen Lagen einstellen, daß dagegen beim Stahl es nicht leicht ist, diese Richtungsänderung hervorzubringen. Die Stahlmoleküle hängen so fest miteinander zusammen, daß jeder Richtungsänderung eine erhebliche Kraft entgegenwirkt, die man Koerzitivkraft nennt. Wenn das der Fall ist, so ist es einleuchtend, daß ein Stück Stahl nicht leicht magnetisiert werden kann, sondern daß dies nur durch lange dauernde Einwirkung von magnetisierenden Kräften geschehen kann. Ebenso ist es aber auch einleuchtend, daß, wenn ein Stahlstück magnetisiert ist, es magnetisch bleiben muß. Denn die Koerzitivkraft hindert die Moleküle wieder in ihre alten unregelmäßigen Lagen zurückzukehren, sie bleiben also gleich gerichtet, das Stahlstück bleibt magnetisch. Anders ist es bei dem weichen Eisen. Bei diesem ist die Koerzitivkraft sehr gering, fast verschwindend. Infolgedessen wird weiches Eisen sofort magnetisch, wenn eine magnetisierende Kraft auf dasselbe wirkt, infolgedessen wird es aber auch bald wieder unmagnetisch, wenn die magnetisierende Kraft aufhört. Da aber auch weiches Eisen nicht ganz ohne Koerzitivkraft ist, so wird es auch nicht sofort in voller Stärke magnetisch, wenn der magnetisierende Strom geschlossen wird, sondern die volle Stärke entwickelt sich erst in einiger Zeit, die allerdings nur ein Bruchteil von einer Sekunde ist. Ebenso wird es auch nicht sofort nach dem Aufhören des magnetisierenden Stromes ganz unmagnetisch, sondern es verliert seinen Magnetismus erst allmählich, wenn auch in sehr kurzer Zeit. Daraus folgt eine bemerkenswerte Tatsache. Wenn man den Strom, der um einen weichen Eisenstab spiralförmig herumgeführt ist, allmählich verstärkt, so kommt das Eisen nicht sofort zu seiner vollen magnetischen Stärke, sondern bleibt noch etwas zurück, eben wegen der Koerzitivkraft, die überwunden werden muß. Umgekehrt, wenn die Stärke des magnetisierenden Stromes allmählich abnimmt, so nimmt der Magnetismus des Eisenstabes nicht in demselben Tempo ab, sondern er bleibt immer noch etwas größer, weil die Koerzitivkraft die Abnahme des Magnetismus verhindert. Bei gleicher magnetisierender Stromstärke ist also der erzeugte Magnetismus ein kleinerer bei aufsteigendem (stärker werdendem) Strom als bei absteigendem Strom. Diese Erscheinung, die also von der Koerzitivkraft herrührt, nennt man Hysteresis (Nachbleiben) des Eisens. Es tritt diese Eigenschaft bei vielen Anwendungen von Elektromagneten störend auf und man muß mit dieser Eigenschaft selbst des weichsten Eisens in manchen Fällen rechnen.

Man kann sich den Vorgang so vorstellen, als ob die Moleküle des Eisens bei ihrer Drehung, bei ihrer Richtungsänderung sich an-

einander reiben und dadurch verhindert werden, der einwirkenden Kraft sofort zu folgen. Bei jeder Reibung aber, bei jedem Überwinden eines Widerstandes wird bekanntlich Wärme entwickelt. Es muß daher auch in weichem Eisen durch das Magnetisieren und Entmagnetisieren Wärme entwickelt werden. Wird der Strom nur einmal geschlossen und dadurch der Magnetismus in dem Eisen erregt, so ist diese Erwärmung des Eisens unmerkbar. Die entwickelte Wärmemenge ist so klein, daß sie die Temperatur des Eisens nicht merklich verändern kann. Wenn aber, wie dies bei elektrischen Maschinen meistens geschieht, der Strom sehr rasch hintereinander geschlossen und geöffnet, wieder geschlossen und wieder geöffnet wird, oder wenn er rasch hintereinander verstärkt und dann wieder geschwächt wird, so daß der Magnetismus des Elektromagneten sich fortwährend rasch hintereinander

Fig. 142.



ändert, so wird infolge der Hysterisis jedesmal eine gewisse, wenn auch kleine Wärmemenge erzeugt, und diese kleinen Mengen summieren sich alle, so daß schließlich die Temperatur des Eisens ganz erheblich gesteigert wird, daß das Eisen sich sehr stark erhitzt. Es ist dies ein Übelstand, der bei den elektrischen Maschinen störend auftritt, wie wir später sehen werden.

Die Tatsache, daß ein Strom magnetisierend auf weiches Eisen wirkt, zwingt notwendig zu der Annahme, daß ein Strom in seiner Umgebung magnetische Kräfte

besitzt, wie ein Magnet. Wenn das der Fall ist, so muß man auch mittels Eisenfeile die magnetischen Kraftlinien eines Stromes erhalten können, wie man sie bei einem Magnetstab erhält. Das ist in der Tat möglich. Wenn man in Fig. 142 einen geradlinigen Draht durch die Ebene des Papiers senkrecht hindurchsteckt und einen starken Strom durch ihn hindurchsendet, so ordnen sich Eisenfeilspäne, die auf das Papier gestreut sind, so an, wie es die Figur zeigt, d. h. die magnetischen Kraftlinien des Stromes sind Kreise um den Draht herum.

Um jedes Stück eines Stromkreises herum sind also die magnetischen Kraftlinien Kreise. Hat man daher einen geschlossenen Kreisstrom, wie Fig. 143, so haben um jeden Teil des Drahtes herum die Kraftlinien die Richtung der kleinen Pfeile, d. h. sie durchschneiden die durch den Stromkreis begrenzte Ebene senkrecht, wie es die großen Pfeile anzeigen, d. h. die Kraftlinien gehen durch die Ebene des Stromkreises senkrecht hindurch.

Nehmen wir weiter eine Drahtspirale, wie Fig. 144, so gehen aus

demselben Grunde die Kraftlinien im wesentlichen parallel der Achse der Spirale hindurch. Die Kraftlinien schließen sich außerhalb wieder zu geschlossenen Figuren. Diese Kraftlinien müssen, wie es Kraftlinien immer tun, jedes Stück Eisen, in das sie eindringen, magnetisieren, wie es tatsächlich geschieht. Man nennt häufig eine solche Drahtspirale ein Solenoid (von $\sigma\omega\lambda\gamma\nu$, solen, Windung).

Die Intensität des magnetischen Feldes in einer solchen Spule ist um so größer, je mehr Windungen die Spirale auf 1 cm Länge hat und je stärker der Strom ist, der durch sie fließt. Drückt man die Stromstärke in Ampères aus, so bezeichnet man gewöhnlich das Produkt aus der Zahl der Windungen der Solenoids pro 1 cm Länge und der Stromstärke als die Zahl der Ampèrewindungen und kann also sagen, die Feldstärke eines Solenoids ist um so größer, je größer die Zahl der Ampèrewindungen ist. Man hat nun absichtlich die Einheiten, in denen man Feldstärken mißt und die Stromeinheit, 1 Ampère, in solchen Zusammenhang gebracht, daß die magnetische Feldintensität (S. 161) im Innern einer solchen Spule, die überall, außer

in der Nähe der Ränder, dieselbe ist, gerade gleich $\frac{5}{4}$ mal der Zahl der Ampèrewindungen ist (genauer ist der Faktor nicht $\frac{5}{4}$, sondern $\frac{4\pi}{10} = 1,2566$). Da wir nun die Zahl der magnetischen Kraftlinien,

Fig. 143.

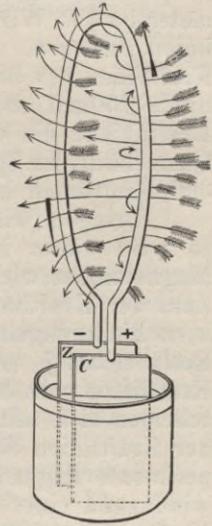
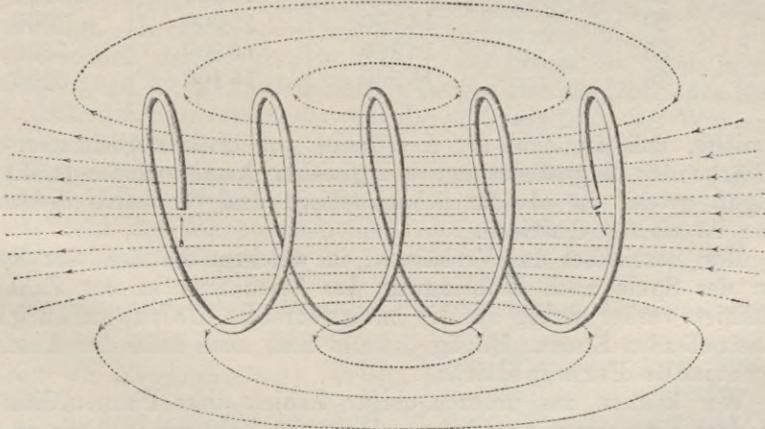


Fig. 144.



die wir pro Quadratcentimeter zeichnen, stets gleich der Feldstärke an der betreffenden Stelle machen wollten, so können wir sofort angeben,

wie viel Kraftlinien wir in einer solchen Stromspule haben. Hat z. B. die Spule auf jeden Zentimeter Länge 10 Windungen und wird sie von einem Strom von 4 Ampère durchflossen, so ist die Zahl der Ampèrewindungen 40 und die Zahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter ist 50. Wir haben also durch jeden Quadratcentimeter 50 Kraftlinien zu legen. Erinnern wir uns, daß bei dem Erdfeld die Zahl der Kraftlinien 0,5 betrug, so sehen wir, daß das Feld im Innern unserer Spule 100mal so stark ist, wie das der Erde. Die Gesamtzahl der Kraftlinien, die wir so zu zeichnen haben, hängt natürlich von dem Querschnitt der Spule ab. Ist dieser z. B. 6 qcm, so haben wir im ganzen 300 Kraftlinien im Innern der Spule.

Bringen wir nun in die Spule einen Stab von weichem Eisen, so wird dieses infolge der magnetisierenden Kraft selbst zu einem Magneten, entwickelt also für sich noch besonders Kraftlinien, und die Zahl der Kraftlinien, die jetzt durch die Spule, d. h. durch den Eisenkern hindurchgehen, wird bedeutend größer, weil eben das magnetische Eisen selbst je nach der Stärke seines Magnetismus mehr oder weniger Kraftlinien enthält oder aussendet. Die verschiedenen Eisensorten unterscheiden sich sehr wesentlich darin, in welchem Verhältnis sie die Zahl der Kraftlinien des Solenoids vergrößern. So hat sich z. B. durch Experimente folgender Zusammenhang ergeben für die Zahl der Ampèrewindungen einer Magnetisierungsspule (also für deren magnetisierende Kraft) einerseits, und andererseits für die Zahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter, die dadurch in den betreffenden Eisenkörpern entstehen. Und zwar sind in folgender Tabelle drei Sorten von Eisen enthalten, die man als Schmiedeeisen, Stahlguß und Gußeisen bezeichnet.

Zahl der Ampèrewindungen	Zahl der Kraftlinien pro 1 qcm		
	Schmiedeeisen	Stahlguß	Gußeisen
5	9000	11000	—
10	12000	13500	2300
15	13300	14500	3900
20	14400	15000	5000
25	14900	15500	5600
30	15300	15800	6200

Man sieht, daß die Zahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter, also die Stärke der Magnetisierung, bei gleicher Ampèrewindungszahl für Stahlguß größer ist als für Schmiedeeisen und für beide bedeutend größer ist als für Gußeisen.

Man bezeichnet das Verhältnis, in welchem die Zahl der Kraftlinien der Spule nach Einbringung des Eisenkerns zu der Zahl der Kraftlinien vorher steht, als die magnetische Leitungsfähigkeit des betreffenden Eisens. Häufig braucht man auch dafür den Ausdruck magnetische Permeabilität.

Wir können aus unseren obigen Zahlen diese Permeabilität für diese drei Eisensorten berechnen. Denn die Zahl der Kraftlinien, die in der leeren Spule pro Quadratcentimeter verlaufen, ist $\frac{5}{4}$ mal so

groß als die Zahl der Ampèrewindungen. Dadurch erhalten wir folgende Tabelle:

Zahl der Ampèrewindungen	magnetische Leitungsfähigkeit		
	Schmiedeeisen	Stahlguß	Gußeisen
5	1440	1760	—
10	960	1080	184
15	709	773	208
20	576	600	200
25	477	496	179
30	408	421	165

Man sieht, daß die magnetische Leitungsfähigkeit der verschiedenen Eisensorten nicht eine unveränderliche Größe ist, wie die elektrische Leitungsfähigkeit der Metalle, sondern daß sie um so kleiner wird, je stärker die magnetisierenden Kräfte sind, die auf das Eisen wirken. Der Magnetismus, den Eisenkörper annehmen, wächst also nicht proportional mit der magnetisierenden Kraft, sondern viel langsamer und nähert sich einer Grenze, über die er nicht hinausgeht.

Man kann in demselben Sinne auch von der magnetischen Leitungsfähigkeit anderer Körper als des Eisens sprechen. Für diese, z. B. die Luft oder Kupfer, ist die Leitungsfähigkeit offenbar gleich 1, weil sie eben die Zahl der Kraftlinien nicht vermehren, wenn man sie in die Spule bringt. Nur Nickel und Kobalt haben etwas größere Leitungsfähigkeiten als 1.

Diese Anschauungsweise, die zunächst etwas gezwungen aussieht, wird uns aber nun zu einer wichtigen neuen Auffassung der magnetischen Erscheinungen führen.

Nehmen wir einen geschlossenen Eisenring und umwickeln wir ihn ganz mit Draht. Durch den Draht fließe ein Strom. Dann ist es die Zahl der Ampèrewindungen, welche die magnetischen Kraftlinien hervorbringt. Je größer die Leitungsfähigkeit des Eisens, je größer der Querschnitt des Ringes, je stärker der Strom ist, und je mehr Windungen auf 1 cm Länge gehen, je kleiner also die Länge des Ringes (in der Mittellinie gemessen) bei gegebener Gesamtzahl der Windungen ist, um so mehr Kraftlinien gehen durch den Ring hindurch. Man kann daher hier ein ganz analoges Gesetz aufstellen, wie es das Ohmsche Gesetz bei einem elektrischen Strome ist. Bezeichnen wir nämlich die gesamte Zahl der Ampèrewindungen unseres Ringes, welche ja den Magnetismus erst erzeugt, als die magnetomotorische Kraft (diese Zahl ist, wie oben mit $\frac{5}{4}$ zu multiplizieren, um in Übereinstimmung

mit den einmal festgestellten magnetischen Maßen zu sein), und bezeichnen wir diejenige Größe, welche von der Leitungsfähigkeit, dem Querschnitt und der Länge des Ringes abhängt, als den magnetischen Widerstand des Ringes, so können wir sagen: die Zahl der Kraftlinien in unserem Ring ist gleich der magnetomotorischen Kraft dividiert durch den magnetischen Widerstand:

$$\text{Zahl der Kraftlinien} = \frac{\text{magnetomotorische Kraft}}{\text{magnetischer Widerstand}}$$

Was also im elektrischen Gesetz die Stromstärke ist, das ist hier bei dem magnetischen Gesetz die Zahl der Kraftlinien.

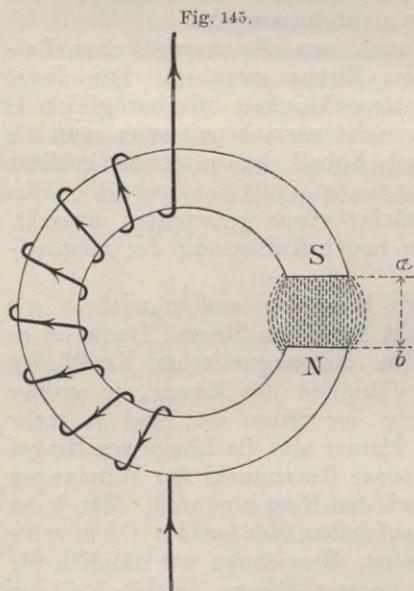
Der magnetische Widerstand eines Ringes verhält sich ganz ebenso wie der elektrische Widerstand eines Drahtes; er ist nämlich um so größer, je größer die Länge des Ringes, je kleiner der Querschnitt und je kleiner die Leitungsfähigkeit (für die betreffende Größe der Ampèrewindungszahlen genommen) ist:

$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{magnet. Leitungsfähigkeit}}$$

Ganz ebenso ist der

$$\text{elektrische Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{elektr. Leitungsfähigkeit}}$$

Zunächst gilt dieses Gesetz des Magnetismus nur für einen geschlossenen Eisenring, weil nur bei diesem tatsächlich alle Kraftlinien im Innern des Ringes verlaufen. Man kann aber mit großer Genauigkeit dasselbe Gesetz auch auf nahezu geschlossene magnetische Kreise anwenden, wenn man nur für den magnetischen Widerstand jedesmal die richtigen Werte annimmt. Betrachten wir z. B. in Fig. 145 den Eisenring, welcher an der Stelle SN aufgeschnitten ist, so daß dort eine Luftschicht sich befindet und daß der Ring dort zwei freie Pole hat.



Die Kraftlinien verlaufen in der Luftschicht, wie es die Figur zeigt, im wesentlichen geradlinig zwischen N und S und biegen sich nur wenig nach außen. Sie bauchen sich um so weniger aus, je enger die Luftschicht ist. Wir können nun für diesen Fall den magnetischen Widerstand berechnen, indem wir ihn aus zwei Teilen zusammensetzen. Es ist nämlich

der ganze magnetische Widerstand = magn. Widerstand des Eisens,
+ magn. Widerstand der Luft.

Wir wollen mit bestimmten Zahlen rechnen. Es sei der Querschnitt des Rings 2 qcm, die Länge des ganzen Ringes (d. h. die Länge der Mittellinie) 40 cm, die Länge der Luftschicht sei 1 cm. Die Leitungsfähigkeit des Eisens sei 1000. Wenn dann der Ring ohne Unterbrechung wäre, so wäre sein magnetischer Widerstand = $\frac{40}{2 \cdot 1000} = 0,02$.

Da er unterbrochen ist, so ist sein

$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{39}{2 \cdot 1000} + \frac{1}{2} = 0,0195 + 0,5 = 0,52.$$

Man sieht, daß der magnetische Widerstand infolge der vorhandenen Luftschicht mehr als 25mal so groß geworden ist, so daß die Zahl der Kraftlinien im zweiten Fall um das 25fache abgenommen hat, gegenüber der im ersten Fall.

Nehmen wir weiter den komplizierteren Fall, der in Fig. 146 dargestellt ist. Darin befindet sich innerhalb der Luftschicht wieder ein Stück Eisen A. Wir wollen annehmen, das Eisen A habe die Länge 0,8 cm, jede der beiden Luftschichten die Länge 0,1 cm. Dann ist der

$$\begin{aligned} \text{magnetische Widerstand} &= \frac{39}{2 \cdot 1000} \\ &+ \frac{0,8}{2 \cdot 1000} + 2 \cdot \frac{0,1}{2} = 0,0199 \\ &+ 0,1 = 0,12, \end{aligned}$$

also 6mal so groß, wie im Falle eines ganz geschlossenen Ringes. Wenn also durch den ganz geschlossenen Eisenring etwa 12 000 Kraftlinien hindurchgehen, so gehen im Falle der Fig. 145 bloß etwa 480, und im Falle der Fig. 146 etwa 2000 Kraftlinien durch den ganzen Kreis hindurch.

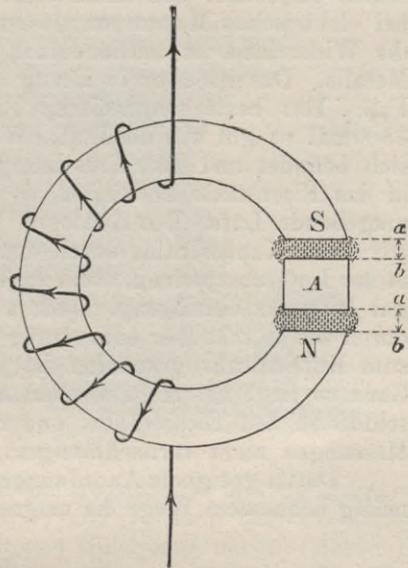
Man kann auch umgekehrt fragen, wie groß in diesen drei Fällen die Zahl der Ampèrewindungen sein muß, um jedesmal die gleiche Zahl der Kraftlinien, etwa 12 000, hervorzubringen. Nach dem Ohmschen Gesetz für den Magnetismus braucht man im ersten Fall eine magnetomotorische Kraft von $12\,000 \times 0,02 = 240$, welche $\frac{4}{5} \cdot 240 = 192$ Ampèrewindungen entspricht, im zweiten Fall $12\,000 \times 0,52 \times \frac{4}{5} = 4992$, im dritten Fall $12\,000 \times 0,92 \times \frac{4}{5} = 1152$ Ampèrewindungen.

Man sieht, wie stark man die gesamte Zahl der Ampèrewindungen vergrößern muß, um trotz des Luftspalts die gleiche Stärke der Magnetisierung des Eisens zu erzielen.

Dieses Ohmsche Gesetz für den Magnetismus wird bei der Berechnung von Dynamomaschinen, wo man es immer mit nahezu geschlossenen Kreisen zu tun hat, allgemein angewendet.

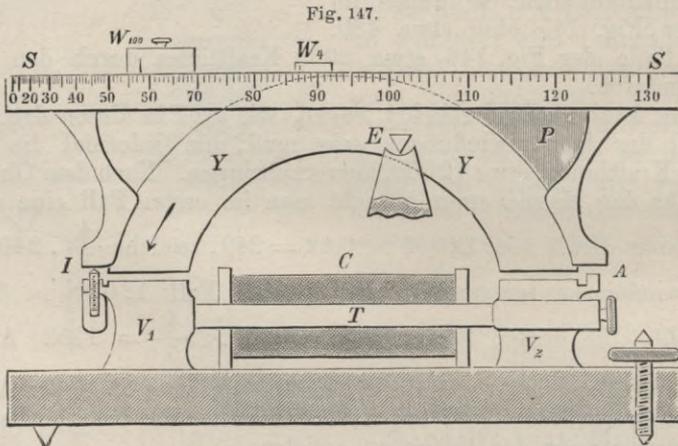
Aus der vollständigen Ähnlichkeit, die der magnetische Widerstand von Eisensorten mit dem elektrischen Widerstand von Drähten hat, ergibt sich nun auch, daß man verschiedene Eisensorten miteinander

Fig. 146.



in Bezug auf ihre magnetische Leitungsfähigkeit (Permeabilität) ganz ähnlich vergleichen kann, wie man verschiedene Drähte auf ihre elektrische Leitfähigkeit vergleicht. Ein naheliegendes Mittel dazu wäre, daß man magnetische Stäbe in derselben Weise anordnet, wie man es bei elektrischen Widerständen in der Wheatstoneschen Brücke tut, und dadurch magnetische Widerstände vergleicht. Indes zeigt sich hier, bei den magnetischen Messungen, doch ein wesentlicher Unterschied gegenüber den elektrischen Messungen. Die Luft nämlich ist bei elektrischen Messungen als ein vollkommener Isolator zu betrachten, ihr Widerstand ist millionenfach größer als der eines gleich langen Metalls. Das ist aber in Bezug auf den Magnetismus nicht mehr der Fall. Das beste magnetische Eisen leitet den Magnetismus nur ca. 3500mal so gut wie die Luft. Wenn daher ein Eisenstück in der Luft sich befindet und man Anordnungen trifft, daß magnetische Kraftlinien in das Eisenstück eindringen, so gehen immer auch Kraftlinien in die umgebende Luft. Das Analogon hätten wir bei der Elektrizität, wenn wir einen Kupferdraht, durch den wir den Strom senden wollen, nicht in der Luft ausspannen, sondern etwa in Quecksilber oder in einer sehr gut leitenden Salzlösung. Dann würde auch immer ein Teil des Stromes durch das Quecksilber oder durch die Salzlösung gehen, welche parallel zum Kupferdraht geschaltet ist, also im Nebenschluß zu ihm liegt. Ganz so liegt bei magnetischen Messungen die Luft immer im Nebenschluß zu den Eisenstäben, und man darf daher ihren Einfluß auf die Messungen nicht vernachlässigen.

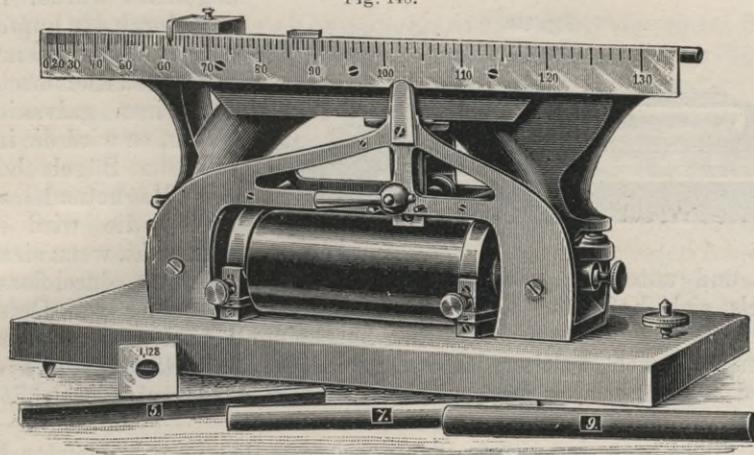
Durch geeignete Anordnungen gelingt es aber doch, auf verhältnismäßig bequemem Wege die magnetische Leitungsfähigkeit verschiedener



Eisensorten zu bestimmen, und zwar für verschieden große magnetisierende Kräfte, da ja die Leitungsfähigkeit des Eisens von diesen abhängt. Ein für derartige Messungen sehr geeigneter Apparat ist die magnetische Wage von Du Bois, von der Fig. 147 eine schematische Zeichnung und Fig. 148 die Ansicht gibt. Das zu untersuchende

Eisen wird in Form eines Stabes von 15 cm Länge und 1 qmm Querschnitt abgedreht und bildet dann, das ist das Prinzip des Instruments, den einen Teil eines vollständigen magnetischen Kreises. Der Eisenstab, in der Figur ist er mit T bezeichnet, wird zu dem Ende zwischen die Eisenbacken V_1 und V_2 geklemmt und befindet sich dabei im Innern

Fig. 148.



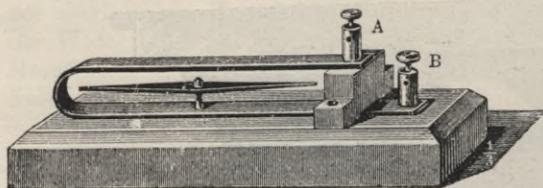
einer Drahtspule C, durch welche Ströme zwischen 0 und 30 Ampère gesendet werden. Über den Backen V_1 und V_2 kann sich ein kreisförmiges eisernes Joch YY mit geringem Spielraum um die Achse E drehen. Die Achse liegt nicht symmetrisch zu dem Joch. Um das Gleichgewicht zu erhalten, ist rechts ein Bleiklotz P als Ausgleich angebracht. Durch die Schraube I und den Anschlag A ist die Bewegung des Jochs begrenzt. Wenn nun das Joch im Gleichgewicht ist, solange kein Strom durch C fließt, so muß es sich doch sofort nach links, in der Richtung des Pfeiles drehen, wenn ein Strom durchgesendet wird. Dann wird nämlich T mit dem Backen V_1 und V_2 magnetisch und sie ziehen das induzierte Joch an. Obwohl dieses nun symmetrisch induziert wird, so muß es sich doch drehen, weil eben der Drehpunkt exzentrisch, also die Hebelarme ungleich sind. Durch Verschiebung eines Laufgewichtes W_{100} von 100 g Gewicht oder bei kleinen Kräften eines anderen W_4 von 4 g Gewicht kann man nun das Joch wieder zum Einspielen bringen. Das Laufgewicht kompensiert also die magnetische Anziehung. Die magnetische Anziehung ist aber von dem magnetischen Moment des Stabes abhängig. Dadurch ist das magnetische Moment und daher auch die magnetische Leitungsfähigkeit des betreffenden Eisens leicht zu messen.

Die bisher besprochene Magnetisierung von Eisen durch elektrische Ströme ist aber nur eine der magnetischen Wirkungen des galvanischen Stromes.

Wir haben schon häufig provisorisch von den Eigenschaften der Galvanoskope und Galvanometer Gebrauch gemacht, um aus diesen das

Vorhandensein und die Stärke eines elektrischen Stromes zu erkennen und zu messen. Oerstedt, Professor in Kopenhagen, war es, welcher zum ersten Male die Beobachtung machte, daß unter dem Einfluß eines elektrischen Stromes, der durch einen Stromkreis fließt, eine in der Nähe befindliche Magnetnadel aus ihrer natürlichen Richtung, der Nord-Südrichtung, die sie unter dem Einfluß des Erdmagnetismus einnimmt,

Fig. 149.



abgelenkt wurde. Führt man durch den kupfernen Bügel in Fig. 149 mittels der beiden Klemmschrauben einen galvanischen Strom, so wird die innerhalb des Bügels befindliche Magnetnadel abgelenkt. Sie wird auch abgelenkt, wenn sie ober-

halb und unterhalb oder zur Seite des vom Strome durchflossenen Bügels sich befindet. Dies war die Grundentdeckung von Oerstedt. Die wichtigsten Fragen bei dieser Erscheinung sind nun offenbar die beiden: 1. nach welcher Richtung wird die Magnetnadel durch einen Strom abgelenkt? 2. von welchen Umständen hängt die Größe der Ablenkung ab?

Führt man den Strom, der durch den Bügel in der letzten Figur geht, erst durch einen Kommutator, so findet man, daß bei jeder Umkehrung der Richtung des Stromes auch die Nadelablenkung umgekehrt wird. Ging der Nordpol der Nadel das eine Mal nach vorn aus dem Bügel heraus, so geht er beim Umkehren des Stromes nach hinten aus dem Bügel heraus. Die Richtung, nach welcher eine Magnetnadel abgelenkt wird, hängt also von der Richtung des Stromes ab, der auf sie wirkt. Nun hat Ampère gefunden, daß hierbei ganz dieselbe Schwimmregel gilt, welche bei der Magnetisierung von Eisenkörpern gültig war (S. 167). Denkt man sich in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, mit dem Gesicht der Magnetnadel zu, so wird der Nordpol der Magnetnadel nach links abgelenkt.

Die Kraft also, welche der Strom auf eine drehbar befestigte Magnetnadel ausübt, ist eine drehende. Der Strom übt, wie man sagt, ein Drehungsmoment auf die Nadel aus. Dieses Drehungsmoment sucht die Nadel stets senkrecht zu dem Strom zu stellen. Wir wissen (S. 171), daß die magnetischen Kraftlinien einer solchen Stromschleife, wie in Fig. 143, senkrecht zu der Ebene des Stromkreises stehen. Gerade in diese Richtung, in die Richtung der Kraftlinien des Stromes, sucht sich die Magnetnadel einzustellen.

Eine Magnetnadel, die von einem Strome beeinflusst und gedreht wird, steht also unter dem Einfluß zweier Kräfte. Erstens wirkt auf sie der Erdmagnetismus, welcher sie immer in die bestimmte Süd-Nordrichtung zu zwingen sucht. Zweitens wirkt auf sie der Strom, welcher sie aus dieser Richtung abzulenken sucht. Wäre der Erdmagnetismus nicht vorhanden, so würde der schwächste Strom schon

die Magnetnadel so drehen, daß sie senkrecht zu der Richtung des Stromes steht. Da der Erdmagnetismus aber die Nadel in der Nord-Südrichtung zu halten und, wenn sie aus dieser abgelenkt ist, sie in dieselbe zurückzudrehen sucht, so ist die Ablenkung der Nadel aus der Nord-Südrichtung nur so groß, daß die Drehung, die der Erdmagnetismus hervorbringt, und die Drehung, die der Strom herbeiführt, sich das Gleichgewicht halten.

Die Größe der drehenden Kraft, welche von einem Strom auf einen Magneten ausgeübt wird, und überhaupt die Größe der magnetischen Wirkungen eines Stromes hängt, wie experimentelle Untersuchungen gezeigt haben, direkt ab von der Stärke des Stromes. Unter sonst gleichen Umständen übt ein Strom von 2 Ampère Stärke eine doppelt so große magnetische Kraft aus, wie ein Strom von 1 Ampère. Ferner aber hängt die Größe der Kraft auch ab von der Lage und Entfernung des Stromes von dem Magneten. Um das Gesetz dafür aussprechen zu können, können wir uns am einfachsten folgender Vorstellung bedienen. Wir denken uns einen geschlossenen Kreisstrom, in welchem der Strom eine bestimmte Stärke hat. Dieser Stromkreis umschließt eine Fläche von gewisser Größe. Die gesamte Kraft nun, die dieser Stromkreis auf einen Magnetpol ausübt, ist gerade so groß und hat gerade dieselbe Richtung, wie die Kraft, welche ein kurzer Magnetstab ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Kreises hindurchgesteckt gedacht werden kann. Und dabei muß die magnetische Stärke dieses gedachten Magnetstabes, sein magnetisches Moment (oben S. 161), so bemessen sein, daß es gleich dem Produkt aus der Stärke des Stromes und der von ihm umschlossenen Fläche ist. Die Wirkung des Stromkreises ist genau dieselbe, wie die des so konstruierten Magneten. Dieses Gesetz der elektromagnetischen Wirkung eines Stromes nennt man das Biot-Savartsche Gesetz. Dieses läßt sich daher folgendermaßen aussprechen:

Die magnetische Kraft, die ein Stromkreis ausübt, ist gleich der Kraft, welche ein kurzer Magnetstab ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt ist und dessen Moment gleich dem Produkt aus der Stärke des Stromes und der Größe der vom Strom umflossenen Fläche ist.

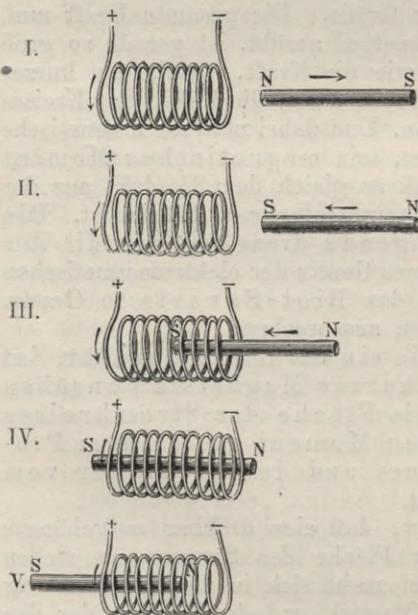
Aus diesem Gesetz folgt sofort, daß eine drehbar aufgehängte Magnetnadel sich senkrecht zu der Fläche des Stromes zu stellen suchen muß. Denn eine Magnetnadel sucht sich in dieselbe Richtung zu stellen, wie der auf sie wirkende Magnet, und der Magnet, der den Strom ersetzt, hat ja seine Achse senkrecht zur Fläche des Stromes.

Bei dieser Fassung des Biot-Savartschen Gesetzes ersetzen wir also einen Strom durch einen Magneten von bestimmtem magnetischen Moment. Da wir nun die magnetischen Momente in bestimmtem Maß ausgedrückt haben, so ist damit nun auch die Einheit der Stromstärke, in der alle Stromstärken gemessen werden sollen, in bestimmter Weise festgesetzt, und die auf diese Weise definierte Einheit nennt man die elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Unsere Strom-einheit, 1 Ampère, ist gerade der zehnte Teil dieser so definierten Ein-

heit und gerade das Biot-Savartsche Gesetz war der Grund, daß diese Einheit für die Stromstärke gewählt wurde.

Für einen einfachen geschlossenen Stromkreis können wir nun auch die Zahl der Kraftlinien angeben, welche durch seine Fläche hindurchgelegt werden müssen. Die Zahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter ist ja gleich $\frac{5}{4}$ -mal der Zahl der Ampèrewindungen gewesen (oben S. 171). Da wir hier nur eine einzige Windung haben, so gibt die Zahl der Ampère, multipliziert mit $\frac{5}{4}$, direkt die Zahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter und folglich ist die gesamte, durch die Fläche des Stromkreises hindurchgelegte Kraftlinienzahl gleich dem Produkt aus dieser Fläche und der Zahl der Ampère (mal $\frac{5}{4}$), womit auch das Biot-Savartsche Gesetz eine anschauliche Bedeutung erhält.

Fig. 150.



Aus dieser Auffassung, daß sich ein Stromkreis ganz wie ein Magnet verhält, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises gesteckt ist, daß durch ihn Kraftlinien in bestimmter Menge hindurchgehen, lassen sich nun sämtliche elektromagnetischen Wirkungen leicht erklären. Nur der eine Unterschied herrscht zwischen einem Stromkreis, besonders einer Stromspule und einem Magneten, daß bei dem letzteren eben das Innere unzugänglich ist, während in den Hohlraum der Spule andere Körper hineindringen können.

Hatten wir bisher die drehenden Wirkungen betrachtet, die ein Stromkreis auf eine Magnethöhle ausübt, so können wir aus der Analogie sofort vermuten, daß ein solcher Stromkreis auch, wie ein Magnet, Anziehungs- und Abstoßungskräfte auf einen anderen Magneten ausüben wird.

Es lassen sich diese Wirkungen am besten zeigen, wenn man dem Stromkreis die Form einer Spirale gibt.

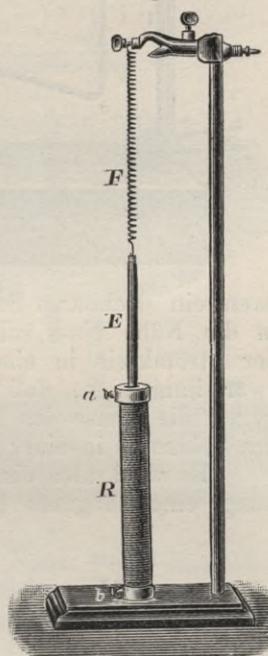
Befindet sich ein frei beweglicher Magnetstab in der Nähe einer festen, von einem Strom durchflossenen Drahtspirale, so treten zwei Wirkungen ein; erstens nämlich sucht sich der Magnet senkrecht zu der Ebene der einzelnen Spiralkreise zu stellen, d. h. der Magnet stellt sich in der Richtung der Achse der Spirale, zweitens aber, und das ist die Wirkung des Stromes auf den Magneten, die wir jetzt be-

sprechen wollen, wird der Magnet entweder in die Spirale hineingezogen oder von ihr abgestoßen. Die Kraftlinien der Spirale Fig. 150 gehen nämlich durch die Spule hindurch in der Richtung vom +Ende zum —Ende. In der Tat, wenn man sich in dem Strom der Spirale schwimmend denkt, mit dem Gesicht nach dem Innern der Spirale zu, so wird nach der Ampèreschen Regel ein Nordpol nach links erzeugt, also an dem —Ende. Von dort aus gehen also die Kraftlinien nach außen und schließen sich durch den Raum so, daß sie dann vom +Ende durch das Innere der Spule gehen. Bei dem Magnetstab SN in der Lage I gehen aber auch die Kraftlinien von N aus nach außen und diese treffen auf die entgegengesetzt gerichteten der Spule, stauen sich und bewirken, daß der Magnet abgestoßen wird. In Fig. II dagegen treffen die gleichgerichteten Kraftlinien vom —Ende und die in S eintretenden Kraftlinien zusammen; diese suchen sich anzuziehen und der Magnet wird infolgedessen, wie in Fig. II, III, IV zu sehen ist, in die Spule hineingezogen. In der Lage IV stößt das —Ende den Nordpol ebenso ab, wie das +Ende den Südpol, und infolgedessen bleibt der Magnetstab in dieser Lage im Gleichgewicht, und wenn er wie in V durch die Spirale teilweise hindurchgezogen worden ist, so wird er aus demselben Grunde von der Spirale wieder zurückgezogen, bis seine Mitte wieder mit der Spirale zusammenfällt.

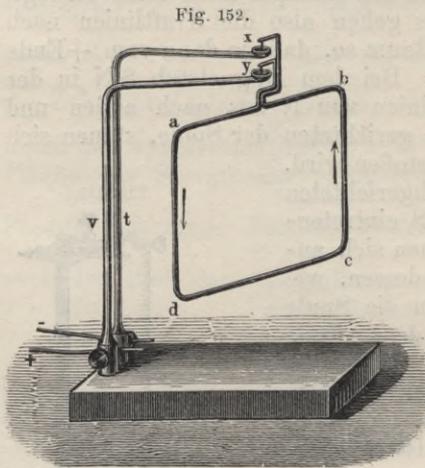
Ist der Stab NS nicht von vornherein ein Magnet, sondern ein Stab aus weichem, unmagnetisiertem Eisen, so wird er infolge der von der Stromspirale ausgehenden Kraftlinien magnetisiert und dann ebenso in die Spirale hineingezogen. Wenn man also z. B., wie in Fig. 151, eine Rolle R aufstellt, durch die man einen Strom schicken kann, und über dieser einen Stab aus weichem Eisen E an einer Spiralfeder F aufhängt, so wird im Moment des Stromdurchgangs der Eisenkern in die Rolle hineingezogen und bleibt darin, solange der Strom fließt. Sobald der Strom geöffnet wird, also zu fließen aufhört, springt der Eisenstab wieder aus der Rolle heraus. Eine stromdurchflossene Spirale zieht also immer einen Stab aus weichem Eisen in sich hinein. Wir haben von dieser Wirkung schon auf S. 62 Gebrauch gemacht, um ein Meßinstrument für die Stromstärken zu konstruieren.

Umgekehrt muß aber auch, wenn der Stromleiter beweglich und der Magnet fest ist, der Stromleiter sich bewegen und zwar sich ebenfalls so einstellen, daß die Richtung seiner Kraftlinien, die ja senkrecht zu seiner Ebene stehen, parallel der Achse des Magneten wird. Es ist, um diese Behauptung zu bestätigen, die erste Aufgabe, einen Stromkreis herzu-

Fig. 151.



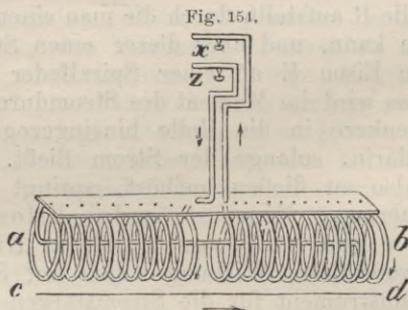
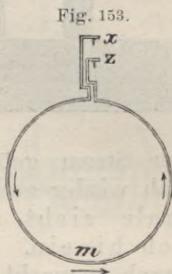
stellen, der frei beweglich ist, oder von dem wenigstens einzelne Teile frei beweglich sind. Dies wurde von Ampère erreicht durch das nach ihm benannte Ampèresche Gestell. Ampère ließ nämlich den Drahtkreis, dessen Bewegung untersucht werden sollte, mit Spitzen in Näpfchen tauchen, die mit Quecksilber gefüllt waren. Die Näpfchen waren auf leitenden Trägern befestigt. Die Fig. 152 gibt eine Ansicht eines solchen Ampèreschen Gestells.



Der Strom geht in die beiden metallischen Träger v und t , welche an ihrem oberen Ende Quecksilbernäpfe x und y tragen. In diese wird nun der bewegliche Stromkreis $abcd$ mittels Spitzen eingetaucht und kann sich also um diese Spitzen beliebig drehen, wenn er unter dem Einfluß von Kräften steht. Man kann entweder das Stromviereck $abcd$ in Fig. 152 in das Gestell hängen oder den runden Stromkreis in Fig. 153, oder die Spirale Fig. 154, welche

dann ein drehbares Solenoid ist. Sowie man dann einen Magneten in die Nähe eines solchen drehbaren Stromkreises bringt, stellt sich der Stromkreis in eine bestimmte Lage gegen den Magneten, und zwar immer so, daß die Ebene des Stromkreises senkrecht steht gegen die Achse des Magnets, daß also die Achsen des Magnets und des Solenoids in einer Linie liegen.

Es wird also ein solcher drehbarer Stromkreis durch die Wirkung eines Magnets ganz ebenso gerichtet, wie eine Magnetnadel.



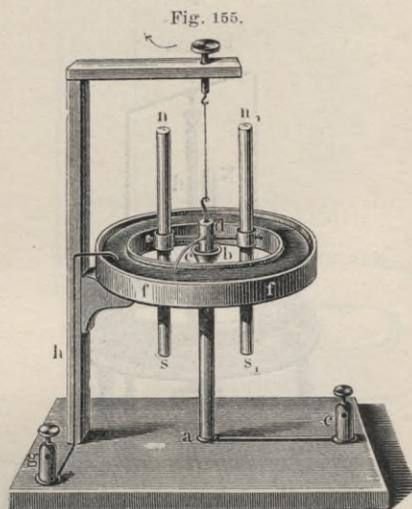
Folglich, das kann man sofort schließen, muß auch der Erdmagnetismus auf einen solchen Stromkreis einwirken, ganz ebenso wie er auf eine Magnetnadel einwirkt. Ebenso wie eine Magnetnadel sich von Süden nach Norden stellt, in die Richtung des magnetischen Meridians der Erde, ebenso muß sich auch ein drehbarer Stromkreis unter

dem Einfluß des Erdmagnetismus mit seiner Achse in die Süd-Nordrichtung stellen. Und dies ist in der Tat der Fall. Ein solcher Stromkreis nimmt, wenn er drehbar aufgehängt ist, von selbst eine ganz bestimmte Stellung ein. Er stellt sich nämlich so, daß seine Achse von Süden nach Norden zeigt, daß also seine Ebene senkrecht steht auf dem magnetischen Meridian.

Wenn man ein von einem Strom durchflossenes Solenoid fest aufstellt und in seine Nähe einen drehbaren Magneten bringt, so sucht sich der Magnet also parallel zur Achse des Solenoids zu stellen. Kehrt man nun durch einen Kommutator den Strom im Solenoid um, in dem Moment, wo der Magnet durch seine Ruhelage geht, so muß er sich nun weiter drehen, eine weitere halbe Umdrehung machen, da die Pole des Solenoids jetzt vertauscht sind, und dieses Spiel kann man fortsetzen, wobei man mit der Hand den Kommutator immer zu den passenden Zeiten umlegt. Man kann aber dieses Umlegen des Kommutators auch von dem sich drehenden Magneten selbst besorgen lassen, und so bekommt man dann — allerdings durch Zuhilfenahme eines Kommutators — eine dauernde Rotation eines Magneten in der Nähe eines Stromes, die immer weiter vor sich geht, solange der Strom fließt.

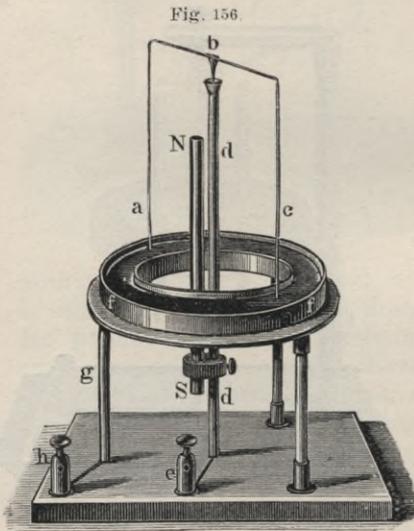
Läßt man umgekehrt den Magneten feststehen und stellt ein drehbares Solenoid auf, in dem man durch einen Kommutator den Strom in den passenden Momenten umkehrt, so bekommt man in derselben Weise eine dauernde Rotation eines Stromkreises in der Nähe eines Magneten.

Man kann aber auch durch eine geschickte Kombination von Magneten und Stromkreisen, wie Faraday gezeigt hat, es dahin bringen, daß ein Magnet dauernd um einen elektrischen Strom auch ohne Kommutator herumrotiert. Diese Anordnung sieht man in Fig. 155. Es sind die beiden Magnetstäbe ns und $n_1 s_1$, welche rotieren. Der galvanische Strom wird durch die Klemme c eingeführt und steigt in dem Metallstab ab auf. Ein aufgehängtes Metallstück d , an welchem die Magnete befestigt sind, taucht in das Schälchen mit Quecksilber, welches das Ende von b bildet. Dieses Metallstück d trägt den Draht e , welcher in die mit Quecksilber gefüllte Rinne ff taucht. Es fließt also der Strom von c durch ab in das drehbare Metallstück d und von diesem durch den Draht e in das Quecksilber bei f , von wo aus er durch den Draht h zur Klemme g und von da zum Element zurückgeführt wird. Der Stromteil def ist also mit den Magnetstäben beweglich, und es fängt nun, sowie der Strom fließt, das Magnetpaar an, sich zu drehen, und dreht sich so lange, bis der Strom unter-



brochen wird. Die Achse der Magnete steht eben hier vertikal und muß vermöge der Anordnung vertikal bleiben, die Kraftlinien aber des Stromkreises $a b e h g$ sind horizontal, also kann der Magnet nie mit seiner Achse parallel den Kraftlinien kommen und muß infolgedessen fortwährend rotieren.

Man kann sich sofort auch durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel überzeugen, daß die Magnete sich drehen müssen, und auch einsehen, nach welcher Richtung die Rotation stattfinden muß. Denkt man sich nämlich den positiven Strom z. B. in der Richtung $c a b$ fließend, so steht also der Ampèresche Schwimmer in $a b$ aufrecht, und wenn er den Magneten $n s$ ansieht, so muß dessen Südpol nach hinten (zur rechten Hand des Schwimmers), wenn er aber $n_1 s_1$ ansieht, so muß dessen Südpol nach vorn aus der Ebene der Figur abgelenkt werden, die Ablenkung der Südpole muß also bei beiden nach entgegengesetzten Richtungen gehen. Es greift also an diesem Magnetpaar ein Kräftepaar an, und ein solches Kräftepaar bringt immer eine Rotation hervor.



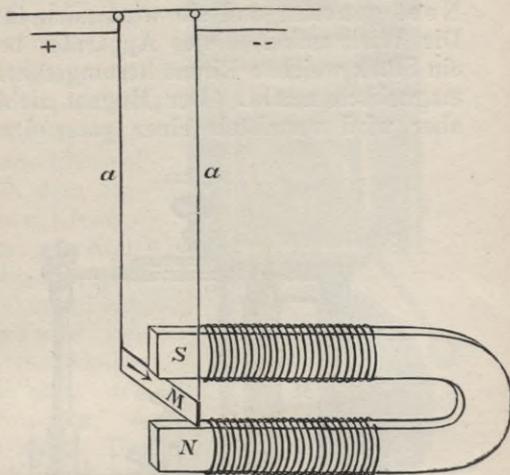
Diesen Versuch kann man nun aber ebenfalls umkehren, d. h. man kann es bewirken, daß eine stromdurchflossene Seite in kontinuierliche Rotation um einen Magneten herum kommt. Es ist dazu nur nötig, daß ein Teil des Stromkreises beweglich ist, während ein anderer Teil fest ist. Es dient dazu eine Einrichtung, wie sie in Fig. 156 gezeichnet ist. In dieser ist ein Teil eines Stromkreises $a b c$ durch die Spitze b beweglich in ein Quecksilbernapfchen gestellt, so daß

er sich um die Achse dd drehen kann. Die Enden des Stromkreises tauchen in die mit Quecksilber gefüllte Rinne f , in welche der Strom von dem Element durch die Klemme h eingeführt wird. Die Drehungsachse dd ist mit der Klemmschraube e verbunden, zu welcher der Leitungsdraht von dem anderen Pole des Elementes führt. Nun fließt also der positive Strom z. B. durch h und g in die Quecksilberrinne, steigt dann zu gleicher Zeit in a und c bis b und geht dann durch die Spitze b und die Metallachse d zur Klemmschraube e und zum Element zurück. Neben der Achse befindet sich ein Magnetstab NS . Die Kraftlinien der Stromteile dba und dbc sind horizontal und bleiben horizontal, die Achse des Magnets dagegen ist vertikal, folglich sucht der Stromleiter sich senkrecht zum Magneten zu stellen und kann daher in keiner Lage zur Ruhe kommen. Der Drahtbügel rotiert also dauernd um den Magnetpol herum. Kehrt man den Magnetstab um, so daß sein Südpol nach oben zeigt, oder kehrt man die Richtung

des Stromes in dem Drahtkreis um, so wird natürlich die Richtung der Rotation eine entgegengesetzte.

Die Richtung dieser Bewegung einzelner Stromteile in einem magnetischen Feld läßt sich immer aus der Ampèreschen Schwimmerregel entnehmen, einfacher aber noch aus einer Regel, bei welcher man die drei Finger der linken Hand, den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger zu Hilfe nimmt, durch welche man ja drei aufeinander senkrechte Richtungen markieren kann. Wenn man den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der magnetischen Kraftlinien des Feldes bringt, den Mittelfinger in die Richtung des Stromes in dem beweglichen Drahtstück, so gibt die Richtung des Daumens immer die Richtung an, nach der das Drahtstück sich bewegt. Diese Regel nennt man die Linke-Hand-Regel. Wir wollen mit dieser z. B. die Rotation des Drahtbügels in Fig. 156 untersuchen. Vom Nordpol N des Magneten gehen die Kraftlinien nach oben, also haben wir den Zeigefinger nach oben zu halten. Wenn der Strom im Draht cb von der

Fig. 157.



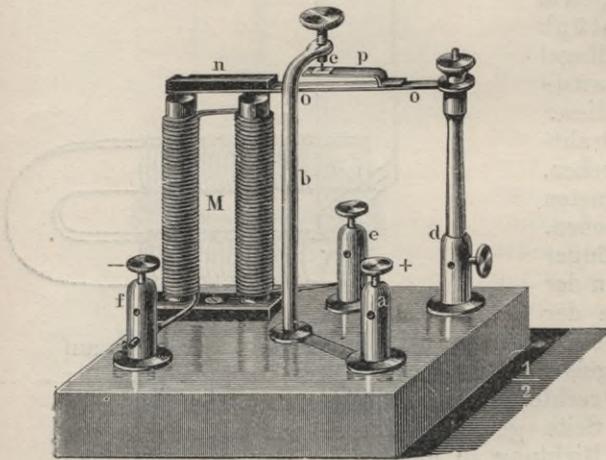
Quecksilberrinne nach b fließt, so haben wir den Mittelfinger oben auf der rechten Seite des Bügels nach b hin zu halten, folglich geht der Daumen nach hinten. Der rechte Teil des Bügels bewegt sich also nach hinten. Auf der linken Seite geht der Strom von a nach b , der Mittelfinger ist in dieser Richtung zu halten; der Daumen geht dann nach vorn, also bewegt sich die linke Hälfte des Drahtbügels nach vorn, d. h. der ganze Drahtbügel bewegt sich dabei im umgekehrten Uhrzeigersinn. Wird die Richtung des Stromes oder die der magnetischen Kraftlinien umgekehrt, so wird jedesmal auch die Richtung der Rotation umgekehrt.

Ein anderer, sehr übersichtlicher Fall der Bewegung eines Drahtstückes in einem magnetischen Felde ist durch Fig. 157 gegeben. Ein hufeisenförmiger Elektromagnet NS liegt horizontal da, so daß die Kraftlinien vom Nordpol N ausgehen und durch die Luft nach oben zum Südpol hin sich strecken. Der Zeigefinger ist also dabei nach oben zu halten. Zwischen den Schenkeln des Magneten ist ein dicker Metallstreifen M angebracht, der an zwei langen weichen Drähten aa hängt. Durch die Drähte und den Metallstreifen wird ein starker Strom gesendet. Fließt dieser durch den Metallstreifen von hinten in der Figur nach vorn, so ist der Mittelfinger in diese Richtung zu halten, folglich muß der Streifen in der Richtung des Daumens, also

nach links aus dem Magnetfelde herausgetrieben werden. In der Tat sieht man, sobald man den Elektromagneten erregt, den Streifen M aus dem magnetischen Felde herausfliegen.

Die elektromagnetischen Wirkungen aller Art haben nun sehr weitgehende Anwendungen gefunden, sowohl in technischer als in wissenschaftlicher Hinsicht. Hier sei zunächst eine auch für wissenschaftliche Zwecke wichtige Anwendung erwähnt. Die Magnetisierung nämlich von weichem Eisen durch einen herumgeleiteten Strom kann man dazu benutzen, um eine rasch schwingende, hin und her gehende Bewegung zu erzeugen; diese Anordnung hat ein Frankfurter Arzt Neef getroffen und sie wird nach ihm Neef'scher Hammer genannt. Die Wirksamkeit dieses Apparates beruht darauf, daß ein Strom um ein Stück weichen Eisens herumgeführt wird, dieses also, wenn er fließt, magnetisch macht. Der Magnet zieht dann einen Anker an; dadurch aber wird vermittels einer passenden Vorrichtung der Strom unter-

Fig. 158.



brochen und infolgedessen der Anker von dem Magneten wieder losgelassen, wodurch der Strom wieder geschlossen wird, und der Vorgang von neuem beginnt. Die Einrichtung eines solchen Hammers ist in Fig. 158 gezeichnet. Die Pole eines Elementes werden mit den Klemmen a und f verbunden, während zwischen d und e ein beliebiger Apparat oder Drahte eingeschaltet wird. Dann geht der Strom durch die Metall-

säule b zu der Platinspitze c, welche auf die Feder p drückt, so daß der Strom durch diese Feder zu o und d kommt und von dort durch den eingeschalteten Apparat nach e gelangt. Von e aus geht er durch die Windungen des Elektromagnets M nach f und von dort zum Element zurück. Wenn der Strom um den Elektromagneten fließt, wird dieser magnetisch und zieht den Anker n an. Dieser ist mit der Feder o und p verbunden, so daß zu gleicher Zeit die Feder p von der Platinspitze c weggezogen wird. Dadurch ist nun aber der Strom unterbrochen, folglich auch der Elektromagnet nicht mehr magnetisch. Infolgedessen wird n durch die Feder wieder in die Höhe geschleudert und die Verbindung mit c wieder hergestellt und nun beginnt das Spiel von neuem. Es wird also durch diesen Apparat eine schwingende Bewegung der Feder op und dadurch auch von selbst eine fortwährende Schließung und Unterbrechung des hindurchgeschickten Stromes bewirkt. Die Geschwindigkeit, mit der die Feder

schwingt, mit der also auch der Strom unterbrochen und geschlossen wird, hängt von der Länge und der Elastizität der Feder ab.

Eine direkte Anwendung wird von dem Neef'schen Hammer bei den elektrischen Klingeln gemacht. Man braucht offenbar nur an dem hin und her schwingenden Anker einen Klöppel zu befestigen, der auf eine Glocke schlagen kann, und die elektrische Klingel ist fertig. In der Tat zeigt Fig. 159 eine derartige einfache Klingel (Viktoriawecker von Mix & Genest in Berlin). Man sieht den Elektromagneten mit seinem Anker, der mit dem Klöppelstiel aus einem Stück gefertigt ist. An dem Anker sieht man die federnde Platte, die Unterbrecherfeder, die sich an die Kontaktspitze anlegen oder von ihr trennen kann. Der Strom wird von einem Element oben durch die beiden Klemmen dem Apparat zugeführt, geht von der einen Klemme zum Elektromagneten, von diesem zur Kontaktspitze und durch die Unterbrecherfeder zur anderen Klemme. Dadurch kommt der Anker, wie erklärt, in schwingende Bewegung, der Klöppel schlägt an die Glocke. Ist die Leitung vom Element nach den Klemmen des Weckers unterbrochen, so funktioniert die Klingel natürlich nicht. Um die Leitung vom Element zur Klingel beliebig, etwa von einem Zimmer aus, zu schließen oder zu unterbrechen, werden bekanntlich Kontaktknöpfe benutzt, deren äußere Ansicht in Fig. 160, deren Einrichtung durch Fig. 161 dargestellt ist. Der eine Draht, der vom Element in das Zimmer führt, ist mit der Feder f verbunden, und von der anderen Feder f_1 führt die Leitung weiter zur Klingel. Die beiden Federn f und f_1 sind für gewöhnlich getrennt, die Leitung vom Element zur Klingel ist also

Fig. 159.

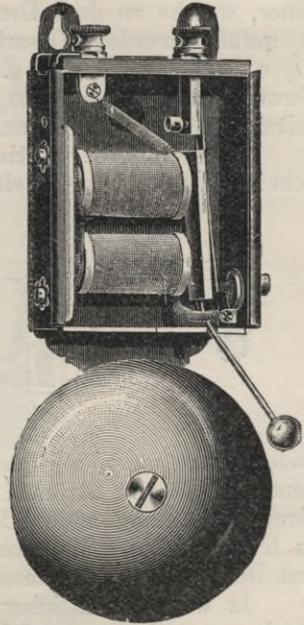


Fig. 160.

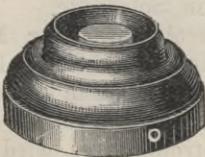
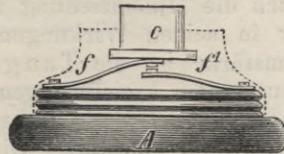


Fig. 161.



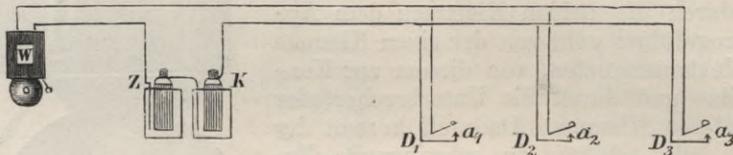
unterbrochen. Durch einen Druck auf den Elfenbeinknopf c wird aber f an f_1 angedrückt, der Strom geht durch f und f_1 vom Element zur Klingel und diese funktioniert.

Um von einer beliebigen Anzahl von Zimmern aus die Glocke ertönen lassen zu können, muß in jedem derselben ein solcher Kontakt-

knopf vorhanden sein und zwar werden diese Kontakte alle parallel geschaltet. Es wird nämlich, wie Fig. 162 zeigt, von der Batterie ZK der eine Pol Z mit der Klingel W verbunden und von der anderen Klemme der Klingel sowohl, wie von dem anderen Pol K der Batterie führen zwei getrennte Drähte bei sämtlichen Zimmern des Hauses vorbei, von denen aus geschellt werden soll. In jedem Zimmer z. B. in D_1 , werden zwei Drähte von dieser Leitung abgezweigt, von jedem Draht einer, welche zu dem Druckknopf D_1 mit seinem beweglichen Kontakt a_1 geführt werden. Dasselbe geschieht im Zimmer D_2 und im Zimmer D_3 u. s. f. Wird also z. B. in D_3 der Knopf gedrückt, so geht der Strom von Z durch W, a_3 , D_3 nach K. Element und Klingel sind also miteinander verbunden und die Glocke tönt.

Eine weitere praktische Anwendung der elektromagnetischen Erscheinungen bilden die elektrischen Motoren, Elektromotoren, bei

Fig. 162.



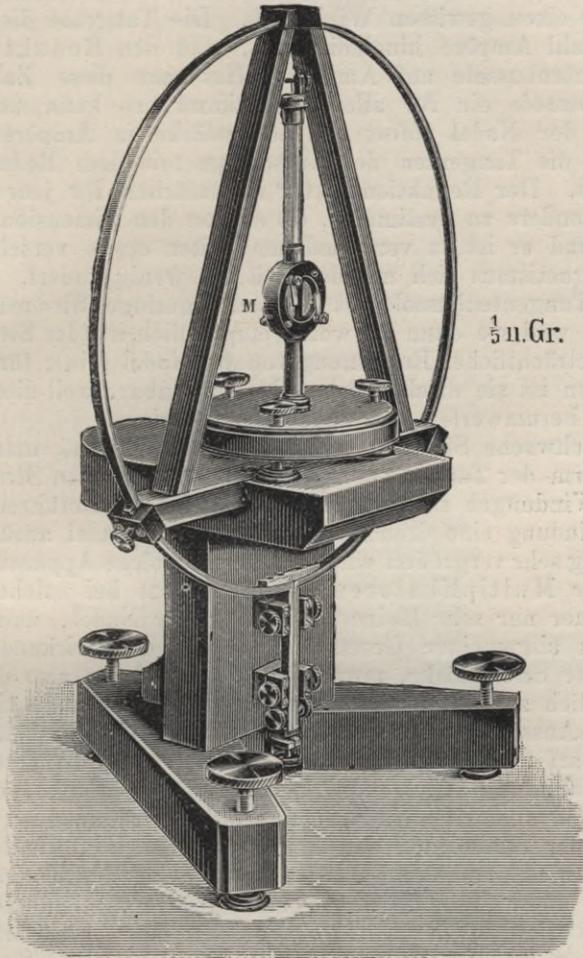
welchen Ströme unter dem Einfluß von Magneten oder Magnete unter dem Einfluß von Strömen rotieren und in den Stand gesetzt werden, ihre Rotation auf andere Maschinen zu übertragen und dadurch Arbeit zu leisten. Diese technisch wichtigen Anwendungen werden wir aber erst im zweiten Teil dieses Werkes behandeln.

In wissenschaftlicher Hinsicht aber haben die elektromagnetischen Wirkungen ihre ausgedehnteste Anwendung gefunden bei der Konstruktion von Galvanometern. Da nämlich die elektromagnetischen Kräfte immer direkt von der Stromstärke abhängen, um so stärker sind, je stärker diese ist, so kann man aus den Wirkungen dieser Kräfte direkt auf die Stromstärke schließen. Und zwar sind alle die verschiedenen Erscheinungen des Elektromagnetismus dazu benutzt worden, sowohl die Drehung von Magnetnadeln unter dem Einfluß von Strömen, wie die Drehung von Strömen unter dem Einfluß von Magneten, wie endlich die Hineinziehung von Magneten in Solenoide.

Der in seinen Wirkungen übersichtliche Apparat zur Messung der Stromstärke ist die Tangentenbussole (Fig. 163). Dieselbe besteht aus einem kreisförmigen Strom A, der auf einen in seiner Mitte befindlichen Magneten M drehend wirkt. Der Stromkreis A ist auf einem Holzgestell befestigt. Die Ebene des Stromkreises wird in den magnetischen Meridian, also angenähert in die Süd-Nordrichtung gestellt. Der Strom sucht den Magneten senkrecht zu seiner Ebene zu stellen, seiner Kraft aber wird entgegengewirkt durch den Erdmagnetismus, der den Magneten in die Süd-Nordrichtung bringen will, und der Magnet stellt sich daher für jede Stromstärke in eine bestimmte Stellung, er wird um einen Winkel abgelenkt, dessen Tangente um so größer

ist, je größer die Stromstärke ist. Daher der Name des Apparates. Als Magneten nimmt man gewöhnlich, wie in der Figur, einen kleinen magnetisierten Ring, der an einem Faden aufgehängt ist und einen

Fig. 163.



Spiegel trägt, um seine Drehung messen zu können. Das Instrument wird in dieser Konstruktion von Hartmann & Braun in Frankfurt am Main ausgeführt.

Die Tangentenbussole gibt die Stromstärken in einem willkürlichen Maß, das von ihren Dimensionen abhängig ist. Um die durch eine Tangentenbussole oder ein anderes Galvanometer angegebenen Stromstärken sofort in Ampère auszudrücken, muß man das Galvanometer aichen, oder wie man es nennt, den Reduktionsfaktor desselben bestimmen. Zu diesem Zweck braucht man nur die Tangenten-

bussole zusammen mit einem Voltmeter, z. B. einem Silbervoltmeter, in einen Kreis einzuschalten und einen beliebigen Strom hindurchzusenden. Aus der abgeschiedenen Menge Silber kann man nach den auf S. 145 angegebenen Zahlen sofort die Stärke des benutzten Stromes in Ampère angeben. Derselbe Strom lenkt die Nadel der Tangentenbussole um einen gewissen Winkel ab. Die Tangente dieses Winkels in diese Zahl Ampère hineindividiert, gibt den Reduktionsfaktor der Tangentenbussole auf Ampère. Hat man diese Zahl für eine Tangentenbussole ein für allemal bestimmt, so kann man für jeden Ausschlag der Nadel sofort die Stromstärke in Ampère berechnen, wenn man die Tangenten der Ausschläge mit dem Reduktionsfaktor multipliziert. Der Reduktionsfaktor ist natürlich für jede Tangentenbussole besonders zu bestimmen, da er von den Dimensionen derselben abhängt, und er ist zu verschiedenen Zeiten etwas verschieden, weil der Erdmagnetismus sich mit der Zeit ein wenig ändert.

Die Tangentenbussole ist für sehr geringe Stromstärken nicht anwendbar, weil sie dann zu wenig empfindlich ist (der Stromring muß immer in beträchtlicher Entfernung von der Nadel sein); für sehr große Stromstärken ist sie direkt auch nicht anwendbar, weil diese die Nadel vollständig herumwerfen und anders magnetisieren.

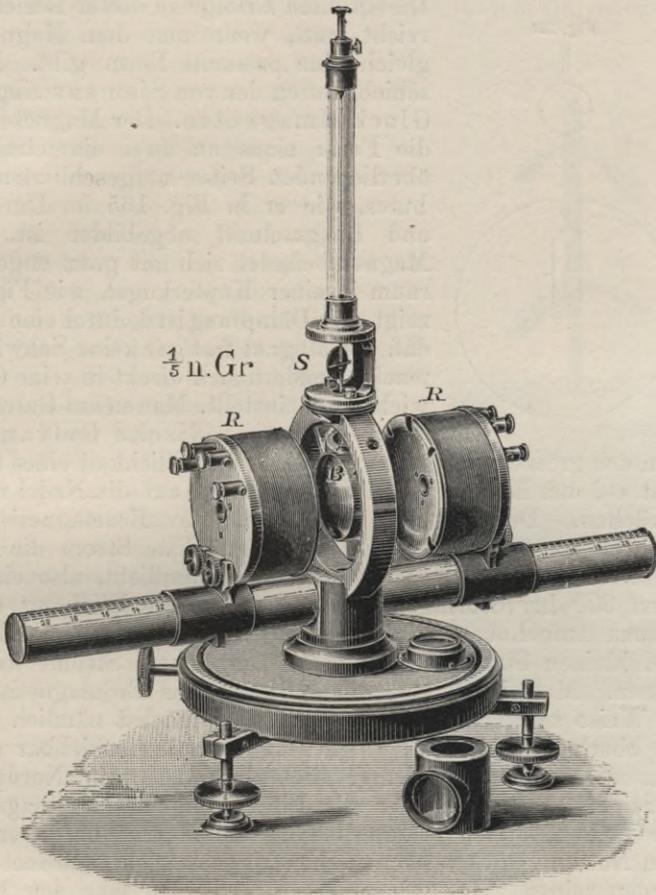
Um schwache Ströme messen zu können, muß man daher die einfache Form der Tangentenbussole verlassen und den Strom vielmehr in vielen Windungen sehr eng um die Nadel herumführen, wodurch, da jede Windung eine drehende Kraft auf die Nadel ausübt, die Gesamtwirkung sehr vergrößert wird. Man nennt solche Apparate Galvanometer oder Multiplikatoren. Man benutzt bei solchen Galvanometern immer nur sehr kleine Ausschläge der Nadel, und diese sind nach einem allgemeinen Gesetz der Physik den wirkenden Kräften, also hier der Stromstärke, proportional. Man kann also die Galvanometer wirklich zur Strommessung verwenden, wenn man sich stets auf sehr kleine Ausschläge der Nadel beschränkt. Um diese kleinen Ausschläge scharf messen zu können, wird die Poggendorffsche Methode der Spiegelablesung angewendet, welche darin besteht, daß mit der Nadel des Galvanometers ein Spiegelchen fest verbunden ist, in welchem das Bild einer Skala durch ein Fernrohr beobachtet wird. Schon bei dem Quadrantelektrometer (S. 39) und eben bei der Tangentenbussole haben wir diese Methode angewendet gesehen. Jede Drehung der Nadel zeigt sich so durch ein Spiegelbild eines anderen Teilstrichs der Skala an und ist dadurch bequem meßbar. Die Skala befindet sich dicht unter dem Fernrohr in ungefähr derselben Höhe wie der Spiegel, und zwar in beliebigem Abstand von ihm, gewöhnlich zwischen 1 und 3 m. Die kleinsten Ablenkungen der Nadel zeigen sich dadurch schon durch große Ablenkung der Teilstriche der Skala im Spiegel an.

Man hat gewöhnlich für jedes Galvanometer verschiedene Rollenpaare, um größere oder geringere Widerstände und mehr oder weniger Umwindungen zur Verfügung zu haben, und es wird häufig die Einrichtung so getroffen, daß die Rollen in verschiedenen Entfernungen von der Magnetonadel festgestellt werden können.

Die Ansicht eines solchen Galvanometers mit verschiebbaren Rollen,

eines Wiedemannschen Spiegelgalvanometers neuerer Form von Hartmann & Braun, gibt Fig. 164. In der Glasröhre hängt ein Kokonfaden, der oben befestigt ist und an den unten ein Spiegelchen S angehängt ist, das man in der Figur frei sieht. An dem Spiegel hängt dann weiter unten ein kleiner ringförmiger Magnet, der in der Figur nicht sichtbar ist, sondern der sich in der Höhlung einer kupfernen

Fig. 164.



Büchse B befindet. Zu beiden Seiten dieser Kupferbüchse befinden sich, auf einem Metallrohr mit Teilung verschiebbar, zwei Drahtrollen RR, die dicht an die Kupferbüchse herangeschoben oder auch von ihr entfernt gehalten werden können. Das kleine, rechts unten besonders abgebildete Gehäuse mit Glasfenster wird über den Spiegel geschoben, um Luftströmungen zu verhindern. Man beobachtet die Drehungen des Spiegels durch das Fenster mittels Fernrohr und Skala.

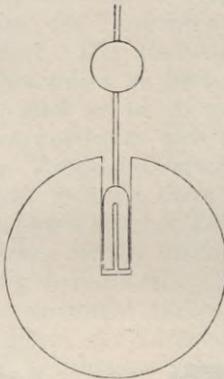
Sehr lästig ist bei derartigen Messungen das langsame Schwingen

des Magneten um seine jeweilige Gleichgewichtslage herum. Man bringt infolgedessen Vorrichtungen an, um die Schwingungen zu dämpfen, d. h. um zu bewirken, daß der Magnet sofort ohne viele Schwingungen in seine neue Lage übergeht. Dies wird gewöhnlich, wie gerade bei dem eben beschriebenen Instrument, dadurch erreicht, daß man den Magneten in einer ihn sehr eng umschließenden Hülle aus Kupfer schwingen läßt. Es entstehen dann, wie wir im 9. Kapitel sehen werden, Induktionsströme, welche die Bewegung des Magnetes sehr rasch dämpfen.

Fig. 165.



Fig. 166.



Die größten Erfolge in dieser Beziehung erreicht man, wenn man dem Magneten zugleich eine passende Form gibt. Dies geschieht durch den von Siemens eingeführten Glockenmagneten. Der Magnet hat dann die Form eines an zwei diametral gegenüberliegenden Seiten aufgeschlitzten Fingerhutes, wie er in Fig. 165 im Durchschnitt und Längsschnitt abgebildet ist. Dieser Magnet befindet sich mit ganz engem Spielraum in einer Kupferkugel, wie Fig. 166 es zeigt. Die Dämpfung ist dadurch eine so rapide, daß der Magnet fast gar keine Schwingungen macht, sondern sich direkt in seine Gleichgewichtslage einstellt. Man nennt Galvanometer dieser Art aperiodische Galvanometer.

Von der größten Bedeutung für die Empfindlichkeit eines Galvanometers ist es, den Einfluß des Erdmagnetismus auf die Nadel möglichst abzuschwächen. Denn in der Tat, wenn der Erdmagnetismus gar nicht wirkte, so würde ja schon der schwächste Strom die Magnetnadel senkrecht zu der Ebene stellen, die er umfließt, also einen Ausschlag von 90° hervorbringen. Je mehr also die Wirkung des Erdmagnetismus aufgehoben wird, desto größere Ausschläge erhält man schon bei kleinen Stromstärken, desto schwächere Ströme kann man also messen. Man kann nun die Wirkung des Erdmagnetismus auf doppelte Weise schwächen oder aufheben. Zunächst nämlich dadurch, daß man oberhalb der Nadel einen Magnetstab verschiebbar anbringt. Gibt man diesem Stab diejenige Richtung, daß sein Nordpol nach Norden zeigt, so schwächt er die Einwirkung des Erdmagnetismus. Denn die Erde läßt sich bekanntlich als ein Magnet auffassen, dessen Südpol im Norden liegt (weswegen eben Magnetnadeln mit dem Nordpol nach Norden zeigen). Ein solcher Magnetstab, den man den Astasierungsmagneten nennt, kann dem Galvanometermagnete beliebig genähert werden und so die Einwirkung des Erdmagnetismus mehr oder minder schwächen, so daß man dadurch fast jeden beliebigen Grad der Astasie hervorbringen kann.

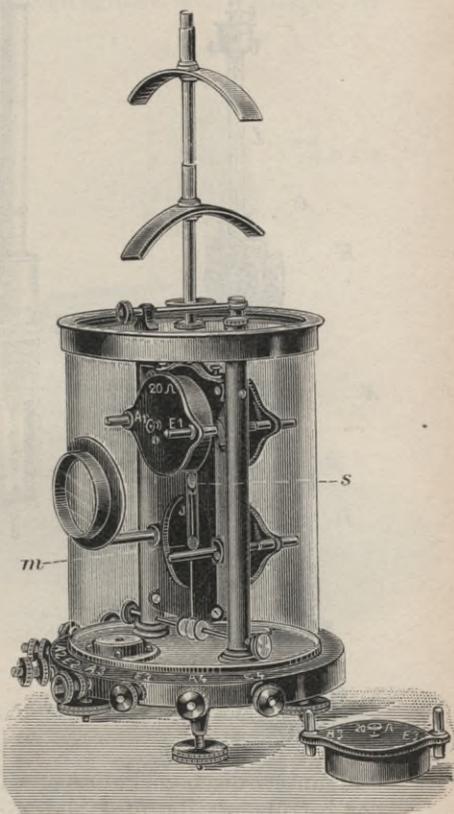
Je stärker die Astasierung eines Galvanometers ist, desto geringer ist also die Kraft, mit der der Erdmagnetismus die Galvanometernadel in die Gleichgewichtslage zurückzuziehen sucht. Wird daher die Nadel durch den Strom abgelenkt, so werden die Schwingungen, die sie um die Gleichgewichtslage herum ausführt, immer langsamer, je stärker

astasiert das Galvanometer ist, eben weil die Kräfte, die die Nadel beeinflussen, geringere sind. Mit der Erhöhung der Astasie ist also bei jedem Galvanometer eine Vergrößerung der Schwingungsdauer verbunden, so daß man sogar umgekehrt aus der Angabe der Schwingungsdauer der Magnetnadel auf den Grad der Astasierung bei einem und demselben Instrument schließen kann. So sagt man, ein Galvanometer sei astasiert bis auf 6 Sekunden oder 20 Sekunden Schwingungsdauer.

Ein zweites Mittel, um die Einwirkung des Erdmagnetismus möglichst zu verringern, besteht darin, daß man in dem Galvanometer nicht einen Magneten (Nadel-, Ring-, Glockenmagneten), sondern zwei entgegengesetzt liegende Magnete fest miteinander verbunden drehbar aufhängt. Ein solches Magnetpaar nennt man ein astatisches Nadelpaar und ein Galvanometer, das ein solches enthält, ein astatisches Galvanometer. Solche wurden zuerst von Sir W. Thomson konstruiert und heißen deshalb Thomson-Galvanometer. Mit geringen Veränderungen werden sie jetzt von verschiedenen physikalischen Werkstätten geliefert. So zeigt Fig. 167 ein astatisches Galvanometer nach Dubois und Rubens (verfertigt von Keiser & Schmidt in Berlin). Dasselbe besitzt zwei sehr leichte und feine Magnetsysteme übereinander, von denen eines bei *m* sichtbar ist. Jedes der Systeme besteht aus einer Anzahl von kleinen Magnetstäbchen, und beide Systeme sind fest miteinander verbunden und astatisch, d. h. sie liegen entgegengesetzt. Zwischen beiden ist ein Spiegelchen *s* an dem gemeinschaftlichen Träger angebracht. Jedes Magnetsystem sitzt in der Mitte eines Rollenpaares. Das Galvanometer hat also 4 Rollen. In der Figur sind die beiden oberen Rollen, die vordere und

hintere zusammengeschoben, so daß man das obere Magnetsystem nicht sieht. Unten ist die vordere Rolle fortgenommen und man sieht in der Mitte, vor der hinteren Rolle, das untere Magnetsystem *m*. Das ganze System ist in einem Glasgehäuse gegen Luftzug geschützt. Da die beiden Magnetsysteme nicht mit Sicherheit ganz gleich stark hergestellt werden können, so ist in dem Instrument noch für eine Astasierung durch einen äußeren Magneten Sorge getragen. Zu dem Zweck sitzen auf der Metallstange oberhalb des Glasgehäuses zwei gebogene Magnet-

Fig. 167.



stäbe auf, welche auf der Stange nach oben und unten verschoben oder gedreht werden können, so daß sie die höchste Astasierung hervorbringen können. Die Magnetsysteme werden bei diesem Instrument nicht an Kokonfäden, sondern an Quarzfäden aufgehängt.

Diese Thomson-Galvanometer sind die empfindlichsten Instrumente, die man bisher konstruiert hat. Man kann mit ihnen noch

Ströme messen, die bloß den hunderttausendmillionsten Teil eines Ampère (10^{-11} Ampère) an Stärke besitzen.

Leider aber sind diese feinen Instrumente heutzutage in sehr vielen Fällen nicht mehr anwendbar, oder wenigstens ist ihre hohe Empfindlichkeit nicht mehr auszunutzen. Die Astasierung nämlich, durch welche die Nadeln dem Einfluß des Erdmagnetismus entzogen sind, bewirkt ja andererseits, daß die Nadeln keine sichere Ruhelage mehr haben. Solange der Erdmagnetismus wirkt, stellt sich jede Nadel in den magnetischen Meridian. Ist der Erdmagnetismus ohne Einfluß, so ist eine solche Ruhelage nur noch durch die Torsion des Aufhängefadens bestimmt. Daraus folgt, daß äußere Störungen, z. B. bewegte Eisenmassen, ferner Ströme, die in der Erde fließen, weiter Ströme, die in benachbarten Drähten zirkulieren, daß diese alle die Nadel beeinflussen. Und da nun in großen und kleinen Städten jetzt immer mehr starke Ströme zu Beleuchtungs- und Arbeitszwecken und zu elektrischen Bahnen oberirdisch

und unterirdisch zirkulieren, so ergibt sich daraus in sehr vielen Fällen das betrübende Resultat, daß die Nadel solcher Galvanometer mit ihrem Spiegel in fortwährender unregelmäßiger Bewegung ist, so daß Messungen nur in Ausnahmismomenten möglich sind. Selbstverständlich gibt es immer noch Orte genug, an denen man diese Instrumente benutzen könnte, aber gerade da, wo sie sonst hauptsächlich angewendet wurden, sind sie heute fast nicht mehr brauchbar.

Hier hilft nun glücklicherweise eine andere Konstruktion von Galvanometern aus, welche in den letzten Jahren immer mehr vervollkommen wurde. Die Galvanometer dieser neueren Art werden Deprez-Galvanometer genannt, da sie nach einem von Deprez zuerst an-

Fig. 168.

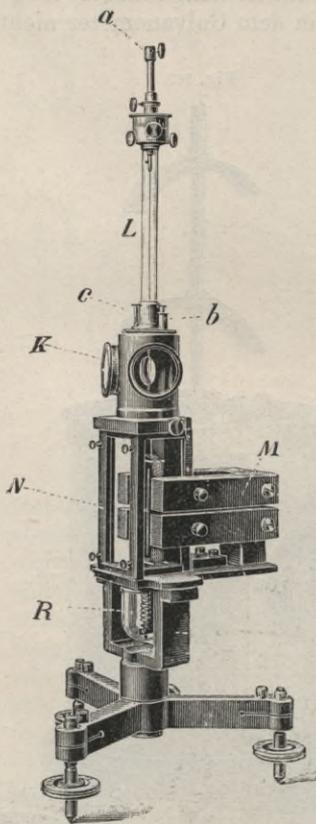
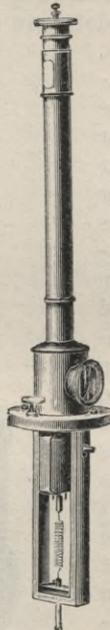


Fig. 169.



gegebenen Prinzip gebaut wurden, oder auch, wegen ihrer Konstruktion, Spulengalvanometer.

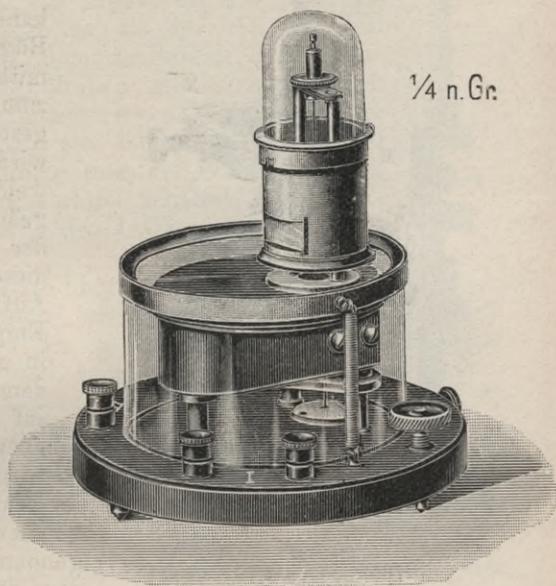
Bei diesen Galvanometern läßt man nicht einen Magneten unter dem Einfluß eines Stromes sich drehen, sondern man läßt umgekehrt einen Strom unter dem Einfluß eines Magneten sich drehen. Der fest aufgestellte Magnet, der das Feld erzeugt, in welchem der Strom sich bewegt, wird nun sehr stark gewählt, so daß alle Änderungen des Erdmagnetismus, alle in der Nähe befindlichen Ströme u. s. w. gar keinen merklichen Einfluß auf die Stärke des benutzten magnetischen Feldes haben. Dadurch ist also das Instrument sofort vollkommen unabhängig von äußeren Störungen. Der bewegliche Teil besteht also aus einer Drahtrolle, welche

in dem magnetischen Feld aufgehängt ist, und welcher nun der zu messende Strom zugeführt wird. Bei dem Deprez-Galvanometer von Edmann (Fig. 168) sieht man zwei zusammengeschaubte starke Magnete M, einen Hufeisenmagneten darstellend. Zwischen den Polen desselben befindet sich die bewegliche Drahtrolle, die durch einen feinen Metalldraht (in der Röhre L) oben aufgehängt ist und die unten in eine metallische Spiralfeder R ausgeht. Durch den Metalldraht und die Spiralfeder wird der Strom zu- und abgeleitet (bei b und c). Bei K befindet sich der Spiegel. Die Drahtrolle S ist, wie man in der Fig. 169 sieht,

die nur den beweglichen Teil des Instrumentes zeigt, auf einen rechteckigen Rahmen gewunden. Sie besteht aus vollständig unmagnetischem Kupferdraht, und in ihrem Innern befindet sich noch ein fester Eisenzylinder E, um die magnetischen Kraftlinien möglichst auf die Rolle zu konzentrieren. Die Empfindlichkeit dieser Instrumente erreicht beinahe die der Nadelgalvanometer. Der ganze mittlere Teil ist durch einen Glaskasten geschützt. Auf die Güte des Magnetstahls und die Eisenfreiheit der Kupferdrähte ist bei diesen Instrumenten die größte Sorgfalt zu verwenden.

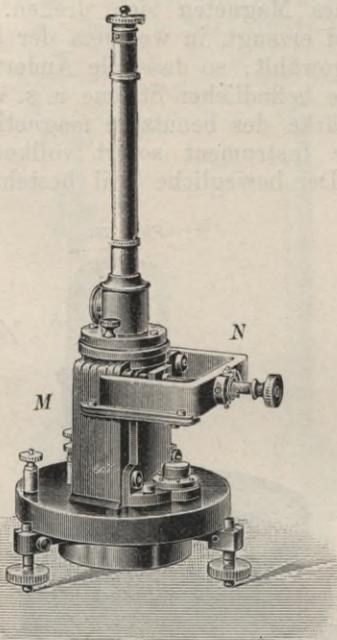
Solche Deprez-Galvanometer werden jetzt von verschiedenen Fabriken nach demselben Prinzip, aber in äußerlich sehr verschiedenen Formen ausgeführt. So zeigt Fig. 170 ein solches, sehr praktisches Galvanometer von Hartmann & Braun. In dem Glasgefäße sieht man den Magneten. Die drehbare Spule ist an feinem Metalldraht in dem Aufsatz aufgehängt.

Fig. 170.



Eine Neuerung ist bei dem Deprez-Galvanometer von Siemens & Halske angebracht, das in Fig. 171 abgebildet ist. Bei diesem

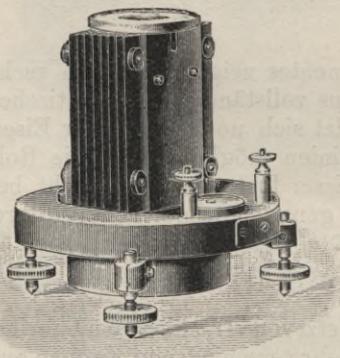
Fig. 171.



steht zunächst das Magnetsystem M, das bei den vorher erwähnten Instrumenten horizontal liegend angeordnet ist, vertikal und umfaßt die bewegliche Spule mit ihrem Eisenkern, die oben an dem Torsionskopf aufgehängt ist. Die Neuerung besteht nun darin, daß an dem Magnetsystem M ein sogenannter „magnetischer Nebenschluß“ N angelegt werden kann. Derselbe besteht aus einem Bügel aus weichem Eisen, welcher mittels einer Schraube ganz oder zum Teil über das Magnetsystem geschoben werden kann. Dadurch wird das magnetische Feld, in welchem sich die Spule befindet, geändert, indem nämlich ein Teil der Kraftlinien des Magneten in diesen Nebenschluß hineingeht. Auf diese Weise kann man die Empfindlichkeit des Instrumentes in gewissen Grenzen ändern, bei dem gezeichneten Instrument bis auf 40 Proz., wodurch man eine

gewünschte Empfindlichkeit nach Belieben einstellen kann. Die Fig. 172 stellt das magnetische Gehäuse des Instrumentes, Fig. 173 die drehbare Spule mit dem Eisenkern und

Fig. 172.



der Aufhängeröhre, die in sehr bequemer Weise im Ganzen herausgenommen werden können, besonders dar.

Benutzt man also bei allen diesen Galvanometern nur kleine Ablenkungen des beweglichen Teils, die man durch Fernrohr und Skala beobachtet, so kann man dadurch Stromstärken miteinander vergleichen. Und wenn man nur noch den Reduktionsfaktor kennt, so kann man die so gemessenen Stromstärken auch in Ampère angeben. Man bestimmt den Reduktionsfaktor eines Galvanometers wieder dadurch, daß man einen Strom, dessen Stärke in Ampère man kennt, durch

das Galvanometer schickt und den Ausschlagwinkel beobachtet.

Will man starke Ströme mit Spiegelgalvanometern messen, so

darf man dieselben natürlich nicht direkt durch die Galvanometer gehen lassen, weil die Drähte dieser Galvanometer eben nur für sehr schwache Ströme bestimmt sind und durch starke Ströme verbrennen würden. Man hilft sich dann dadurch, daß man in das Galvanometer nur einen ganz kleinen bekannten Bruchteil des ganzen Stromes schickt. Dies geschieht dadurch, daß man das Galvanometer in eine Zweigleitung bringt, wie Fig. 174 es zeigt. Man sagt dann, das Galvanometer liegt im Nebenschluß. Von E aus geht der Strom, dessen Stärke man messen will. An den Punkten a und b liegt das Galvanometer im Nebenschluß an, das nun die Stärke in seinem Zweige aGb direkt anzeigt. Kennt man nun noch den Widerstand des Galvanometers und den Widerstand von ab, so ist die Stromstärke in ab nach unseren Sätzen auf S. 72 um so viel größer als die in G, als der Widerstand von ab kleiner ist als der von G. Die Stromstärke im Hauptstrom ist dann die Summe der Stromstärken in G und in ab. Gewöhnlich gibt man jetzt den Rollen oder Spulen der Galvanometer einen Widerstand, der sich in Dekaden ausdrückt, also von 1 Ohm, 10 Ohm, 100 oder 1000 Ohm und ebenso nimmt man als Widerstand ab, zu dem man das Galvanometer parallel schaltet, einen einfachen dekadischen Widerstand, also 1 Ohm oder 0,1 oder 0,01 Ohm u. s. w.

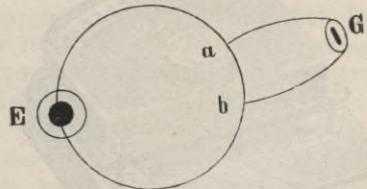
Da bei den Galvanometern nach der Deprezschen Form die Ausschläge der Spule unabhängig von äußeren Einflüssen und die Drehungen der beweglichen Rolle nahe proportional der Stromstärke sind, so kann man solche Galvanometer mit einer Skala versehen, die man direkt in Ampère teilen kann. Man nennt solche Apparate, welche direkt ohne Rechnung die Stromstärke in Ampère abzulesen gestatten, Ampèremeter, und diejenigen, welche in der Zweigleitung (nach S. 104) angewendet, direkt die Spannung in Volt abzulesen gestatten, Voltmeter.

Solche Präzisions-Volt- und -Ampèremeter werden von Siemens & Halske nach dem Deprezschen Prinzip in folgender Form ausgeführt: Ein flacher, kräftiger Magnetstab ist so umgebogen, daß seine beiden Pole einander gegenüberstehen. Fig. 175 zeigt die eine (rechte) Hälfte eines solchen Magnetstabes, die linke Hälfte, die ebenso gebildet ist, ist fortgelassen. Die beiden Pole des Magneten sind mit massiven Polschuhen P versehen (von denen wieder bloß der rechte sichtbar ist), die halbzylindrisch ausgeschnitten sind, so daß sie zwischen sich einen zylinderförmigen Raum zur Aufnahme der beweglichen Spule freilassen. In diesem Raum steht aber zunächst ein eiserner Hohlzylinder, der nur einen Zwischenraum von 2 mm Breite zwischen sich und den Wandungen der Polschuhe läßt.

Fig. 173.

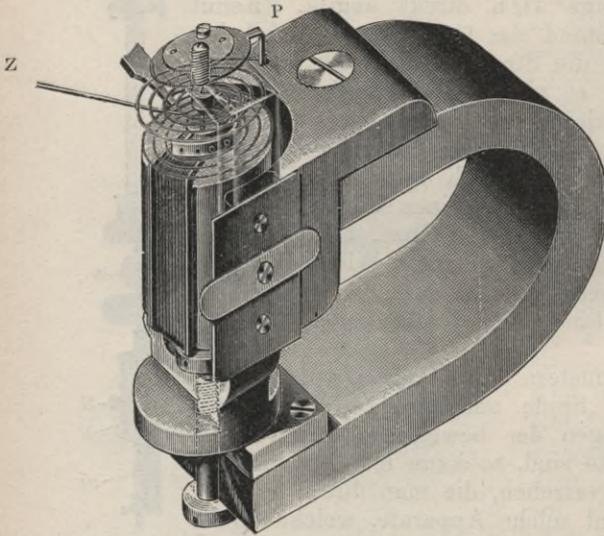


Fig. 174.



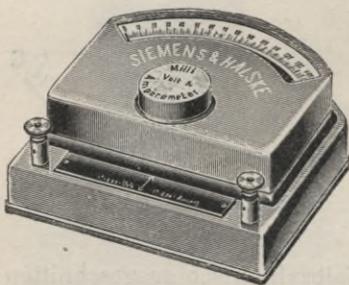
Da der Hohlzylinder magnetisch induziert wird, so entsteht in dem ringförmigen Zwischenraum ein sehr starkes magnetisches Feld. In diesem kann sich nun die bewegliche Spule drehen. Diese ist aus dünnem Draht auf einen leichten Kupferrahmen gewickelt, der Rahmen selbst hat eine Achse, die oben und unten auf Edelsteinen gelagert ist. Die Achse trägt einen langen Zeiger Z, der auf einer Skala spielt. Die Achse ist nun durch zwei flache Spiralfedern oben an dem Gehäuse befestigt, so daß, wenn sie sich dreht, die Federn aufgewunden werden, und zwar so lange, bis ihre Torsionskraft der Kraft, mit der die Spule gedreht wird, das Gleichgewicht hält. Die Federn dienen zugleich zur Zuführung des Stromes in die Spule. Geht also ein Strom durch die Spule, so sucht die Spule sich so einzustellen, daß die Ebene ihrer Windungen senkrecht zu den Kraftlinien steht (s. S. 182). Die Torsion der Spiralen stemmt sich dieser Bewegung entgegen, und so kommt die Spule je nach ihrer Stromstärke in bestimmter Lage zur Ruhe.

Fig. 175.



Die Anordnung des magnetischen Feldes und der Spule bewirkt, daß die Ausschläge des Zeigers direkt den angewendeten Stromstärken proportional sind. Diese Instrumente, deren äußere Ansicht Fig. 176 zeigt, werden gewöhnlich so eingerichtet, daß jeder Grad der Skala einem Milliampère oder einem Zehnte Milliampère entspricht. Hat das Galvanometer, wie das in der Figur gezeichnete, 1 Ohm Widerstand, so gibt, wenn es im Nebenschluß gebraucht wird, jeder Grad eine Spannung von 0,001 Volt an. Da die Skala in 150 Grade geteilt ist, so geht der Meßbereich des Instrumentes für sich als Voltmeter von 0,001 bis 0,15 Volt. Durch Vorschaltwiderstände bei der Benutzung im Nebenschluß kann man den Meßbereich,

Fig. 176.



wie auf S. 105 besprochen wurde, bis 1500 Volt erhöhen. Ebenso mißt das Instrument als Ampèremeter direkt Stromstärken von 0,001 bis 0,15 Ampère. Mit Nebenschlüssen von geringem Widerstand, bis

zu $\frac{1}{19999}$ Ohm, kann man (nach S. 107) den Meßbereich bis auf 3000 Ampère erhöhen.

Alle Galvanometer lassen sich also ursprünglich zur Vergleichung von Stromstärken benutzen. Hat man den Reduktionsfaktor bestimmt, das Galvanometer geeicht, so kann man die Stromstärke direkt in Ampère angeben.

In eine Zweigleitung gebracht, dienen die Galvanometer mit großem Widerstand zur Vergleichung von Spannungsdifferenzen, und wenn man das Galvanometer geeicht hat, so kann man direkt die Spannungsdifferenzen in Volt bestimmen.

Bei der Benutzung zu diesen beiden Zwecken macht das Galvanometer, wenn ein Strom durch dasselbe hindurchgeht, einen dauernden Ausschlag, den man eben mißt und aus dem man die Stromstärke in Ampère oder die Spannung in Volt bestimmt.

Man kann aber jedes Galvanometer noch zu einem anderen sehr wichtigen Zweck benutzen. Bei einem dauernden Strom, der durch den Draht des Galvanometers fließt, geht in jedem Moment eine bestimmte Elektrizitätsmenge durch den Draht. Die Stromstärke ist ja gleich der pro Sekunde durch jeden Querschnitt fließenden Elektrizitätsmenge, und ein solch dauernd fließender Strom bringt eine dauernde Ablenkung der Magnetnadel oder der Spule im Galvanometer hervor. Wenn man aber nur eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. diejenige, die sich auf der einen Belegung einer geladenen Leydener Flasche befindet, durch den Draht des Galvanometers fließen läßt, so erhält man nicht einen dauernden Strom, sondern einen momentanen Strom. Durch einen solchen bekommt die Nadel des Galvanometers gewissermaßen einen Stoß, so daß sie aus ihrer Ruhelage sich herausbewegt. Aber da der Stoß sofort aufhört, so bleibt die Nadel nicht abgelenkt, sondern kehrt nach einigen Schwingungen wieder in ihre Ruhelage zurück.

Der momentane Strom bewirkt, daß die Nadel von ihrer Ruhelage aus einen Ausschlag macht, der aber nicht anhält. Je größer die Elektrizitätsmenge ist, die momentan durch den Draht fließt, um so größer ist dieser erste Ausschlag. Man sieht, daß, wenn man den ersten Ausschlag, den die Nadel dabei macht, beobachtet, daß man daraus ein Maß für die ganze Elektrizitätsmenge hat, die durch den Draht geflossen ist.

Ein Galvanometer, das für diesen Zweck gebraucht wird, bezeichnet man als ballistisches Galvanometer. Jedes gewöhnliche Nadelgalvanometer eignet sich dazu, nur muß seine Dämpfung gering sein. Man nimmt daher gewöhnlich den Kupferdämpfer aus einem Galvanometer heraus, wenn man es ballistisch verwerten will. Um die Elektrizitätsmenge, die durch den ersten Ausschlag gemessen wird, in Coulomb auszudrücken, muß man wieder den Reduktionsfaktor für diese ersten Ausschläge bestimmen, d. h. man muß bestimmen, wie groß der erste Ausschlag ist, den eine bekannte Anzahl Coulomb hervorbringt. Dieser Reduktionsfaktor ergibt sich übrigens aus dem gewöhnlichen Reduktionsfaktor, wenn man noch die Schwingungsdauer der Nadel und die Dämpfung kennt.

Mit einem so geeichten ballistischen Galvanometer ist es also möglich, die Zahl der Coulomb zu bestimmen, welche bei einem sehr

kurz dauernden Strom durch den Galvanometerdraht hindurchgegangen sind. Diese Methode hat eine große Anwendbarkeit für viele Zwecke. Zunächst aber interessiert es uns hier, daß es auf diese Weise möglich ist, die Kapazität eines Kondensators zu messen.

Haben wir nämlich einen Kondensator, z. B. zwei einander gegenüberliegende Platten, und verbinden wir die eine Platte mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pol einer Batterie, so muß von der Batterie so viel Elektrizität auf die Platten überströmen, bis die Spannungsdifferenz der Platten gleich der Spannungsdifferenz der mit ihnen verbundenen Batteriepole ist und die Menge der auf dem Kondensator liegenden, also von der Batterie hinübergeströmten Elektrizität ist dann (S. 14)

Elektrizitätsmenge = Kapazität \times Spannungsdifferenz.

Die Spannungsdifferenz kennt man aber; diese ist gleich der elektromotorischen Kraft der angewendeten Batterie. Die herübergeströmte Elektrizitätsmenge kann man aber ballistisch in Coulomb messen, und so kann man daraus die Kapazität berechnen. Um die Elektrizitätsmenge zu messen, die auf dem Kondensator enthalten ist, verbindet man nach der Ladung die beiden Platten des Kondensators durch das ballistische Galvanometer. Der erste Ausschlag desselben gibt die Zahl der Coulomb an, die von der positiven zur negativen Platte übergeströmt ist. Der Spannungsunterschied der Batterie wird durch ein Voltmeter gemessen, und so findet man aus diesen beiden Beobachtungen

$$\text{Kapazität in Farad} = \frac{\text{Anzahl der Coulomb}}{\text{Spannungsdifferenz in Volt}}$$

Auf diese Weise hat man in dem Galvanometer auch ein Mittel, um Kapazitäten zu messen.

Die ladende Batterie muß dabei allerdings recht hohe Spannung haben, weil die Kapazitäten der gewöhnlichen Kondensatoren und Leydener Flaschen von der Größenordnung des Mikrofarads, nicht des Farads sind. Bei einer Leydener Flasche von $\frac{1}{10}$ Mikrofarad Kapazität bringt 1 Volt Spannungsunterschied an den Belegungen nur eine Elektrizitätsmenge von einem Zehnmillionstel-Coulomb auf den Kondensator.

Auf diese Weise kann man nun auch, wie man leicht einsieht, die Dielektrizitätskonstante einer Substanz (S. 28) messen. Wenn man zwischen zwei Kondensatorplatten einmal Luft als Zwischenmedium hat, das andere Mal die zu untersuchende Substanz, z. B. Glas, so ist die Kapazität des Kondensators beidemal verschieden. Und wenn man diesen Kondensator beidemal von derselben Batterie aus ladet und durch dasselbe Galvanometer entladet, so verhalten sich die ersten Ausschläge des Galvanometers in beiden Fällen wie die beiden Kapazitäten des Kondensators. Das Verhältnis der Kapazitäten nannten wir aber die Dielektrizitätskonstante der angewendeten Substanz. So vielmal größer als der Ausschlag des Galvanometers im zweiten Fall gegenüber dem im ersten ist, so groß ist die Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums (Glas) bezogen auf Luft als Einheit.

8. Kapitel.

Die Kraftwirkungen elektrischer Ströme aufeinander (Elektrodynamik).

Die elektromagnetischen Erscheinungen, die wir in dem vorhergehenden Kapitel behandelt haben, ließen sich alle in kurzer Weise so zusammenfassen, daß galvanische Ströme, Stromkreise, sich genau ebenso verhielten, wie Magnete. Ein Solenoid (eine von einem Strom durchflossene Drahtspirale), wenn es beweglich aufgehängt war, stellte sich in den magnetischen Meridian wie ein Magnet, es wurde von einem Magneten angezogen und abgestoßen wie ein Magnet, es hatte seinen Nord- und Südpol wie ein Magnet, es übte auf einen Magneten Anziehungs- und Abstößungskräfte aus wie ein Magnet, es machte weiches Eisen magnetisch wie ein Magnet. Der Gedanke liegt nahe, daß nun zwei stromdurchflossene Solenoide, zwei Stromkreise aufeinander ebenso mit anziehenden und abstößenden Kräften wirken werden wie zwei Magnete. Man hätte dann zwischen zwei Strömen allein, ganz ohne Magnete, anziehende und abstößende Kräfte. Dieser Gedanke zeigte sich bestätigt. Es war Ampère, welcher diese Einwirkung von galvanischen Strömen aufeinander untersuchte, und welcher durch scharfsinnige Experimente und Überlegungen diese Wirkungen elektrischer Ströme aufeinander vollständig aufklärte. Man nennt die gesamte Lehre von den mechanischen Kräften, die galvanische Ströme aufeinander ausüben, Elektrodynamik.

Um die mechanischen Wirkungen von galvanischen Strömen aufeinander studieren zu können, mußte Ampère die Ströme, wenigstens teilweise, beweglich machen. Es wird also bei diesen Untersuchungen am besten wieder das Ampèresche Gestell angewendet, das schon im vorigen Kapitel (S. 182) beschrieben wurde. Dem beweglichen Stromkreis muß man dann einen festen nähern, um die Anziehungen oder Abstößungen bestimmen zu können. Wenn man in Fig. 177 durch das Ampèresche Gestell (links in der Figur) einen Strom in der durch die Pfeile angegebenen Richtung hindurchsendet und diesem beweglichen Stromkreis den festen Stromkreis gf (rechts) nähert, so tritt folgendes ein:

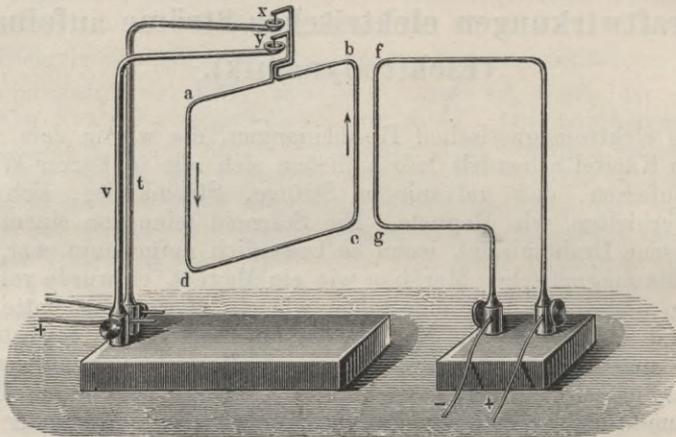
Fließt der positive Strom in gf von unten nach oben, also in gleicher Richtung wie in cb , so wird cb von gf angezogen. Fließt der Strom in fg von oben nach unten, also in entgegengesetzter Rich-

tung wie in *cb*, so wird *cb* abgestoßen. Ganz ebenso verhält sich die Seite *ad* des beweglichen Stromkreises. Fließt der Strom in *fg* in gleicher Richtung wie in *ad*, so wird *ad* angezogen, *cb* abgestoßen, fließt der Strom in *fg* in entgegengesetzter Richtung wie in *ad*, so wird *ad* abgestoßen, *cb* angezogen. Es ergibt sich daraus der Satz:

Zwei parallele gleichgerichtete Ströme ziehen einander an, zwei parallele, in entgegengesetzter Richtung fließende Ströme stoßen einander ab.

Da ein beweglicher Drahtkreis, wie der in Fig. 177 gezeichnete,

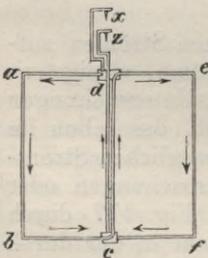
Fig. 177.



schon von selbst unter dem Einfluß des Erdmagnetismus eine gewisse bestimmte Stellung einnimmt, wie wir S. 182 gesehen haben, indem seine Ebene sich senkrecht zum magnetischen Meridian stellt, so tritt diese Anziehung und Abstößung zweier paralleler Ströme hierbei nicht so deutlich auf. Um daher von der Einwirkung des Erdmagnetismus,

welche bei diesen Untersuchungen nur störend wirken kann, frei zu sein, hat Ampère einen sogenannten *astatischen Stromkreis* konstruiert, welcher in Fig. 178 abgebildet ist. In diesem fließt nämlich in den beiden äußeren Drähten der Strom nach einer und derselben Richtung, ebenso in den beiden mittleren Drähten. Denken wir uns jede Drahthälfte durch einen kleinen Magneten ersetzt, der senkrecht durch die Ebene des Drahtes hindurchgesteckt ist, so ist der nach vorn zum Beschauer hingerrichtete Pol dieses Magneten für den Stromkreis *bcd a* ein Nordpol, für den Stromkreis

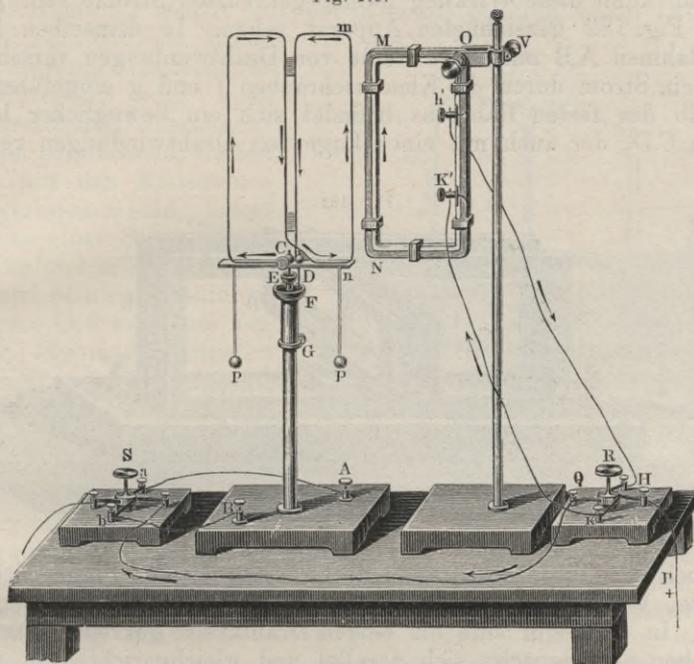
Fig. 178.



c d e f ein Südpol. Die beiden Hälften zusammen verhalten sich also wie ein *astatisches Magnetpaar*, und daher hebt sich auch die Wirkung des Erdmagnetismus auf den ganzen Stromkreis auf, und dieser bleibt in jeder Lage in Ruhe, stellt sich nicht senkrecht zu dem magnetischen Meridian. Nähert man nun diesem *astatischen Leiter* jetzt einen festen

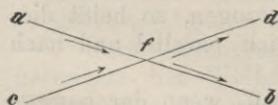
Stromkreis, so kann man deutlich sehen, daß parallele, gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete Ströme sich abstoßen. Als festen Stromkreis nimmt man zweckmäßig nicht bloß einen einfachen Draht, wie in Fig. 177, sondern einen ganzen Rahmen mit vielen nebeneinander und aufeinander liegenden Drähten, in denen allen der

Fig. 179.



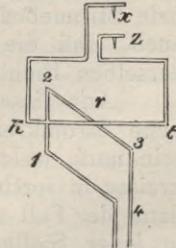
Strom in derselben Richtung fließt. Eine solche Anordnung zeigt Fig. 179. Auf dem Stativ G steht beweglich der astatische Stromkreis, MN ist der mit Draht umwundene Rahmen. Ströme von 3 bis 4 Ampère Stärke werden durch die Klemmschrauben in die Drähte geleitet und können durch die Kommutatoren R und S kommutiert werden. In der Figur sind die Ströme in mn und MN gleich gerichtet. Diese ziehen sich also an und stellen sich einander parallel.

Fig. 180.



Nach der Untersuchung von parallelen Stromteilen ging Ampère über zu der Untersuchung von gekreuzten Stromteilen. Zwei gekreuzte Ströme können entweder in einer und derselben Ebene liegen, wie die beiden Ströme in Fig. 180, oder sie können in verschiedenen Ebenen liegen, wie in Fig. 181. Für beide Fälle gilt ein und dasselbe Gesetz. Zwei gekreuzte Ströme haben immer einen

Fig. 181.

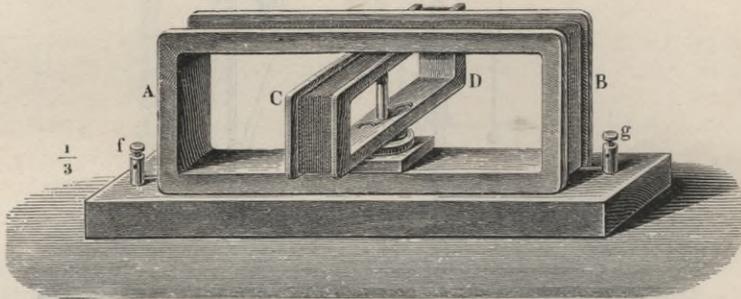


Kreuzungspunkt, entweder einen wirklichen, wie in Fig. 180 den Punkt *f*, oder einen gedachten, wie in Fig. 181 den Punkt *r*. Das Gesetz, das Ampère für diese gekreuzten Ströme gefunden hat, lautet nun:

Zwei gekreuzte Ströme suchen sich in jedem Fall so zu stellen, daß sie parallel werden und der Strom in ihnen nach derselben Richtung fließt.

Man kann diese Wirkung zweier gekreuzten Ströme sehr gut an dem in Fig. 182 gezeichneten Apparat sehen. In demselben ist ein fester Rahmen *AB* mit einer Reihe von Drahtwindungen versehen, in welche ein Strom durch die Klemmschrauben *f* und *g* eingeführt wird. Innerhalb des festen Rahmens befindet sich ein beweglicher leichter Rahmen *CD*, der auch mit einer Lage von Drahtwindungen versehen

Fig. 182.

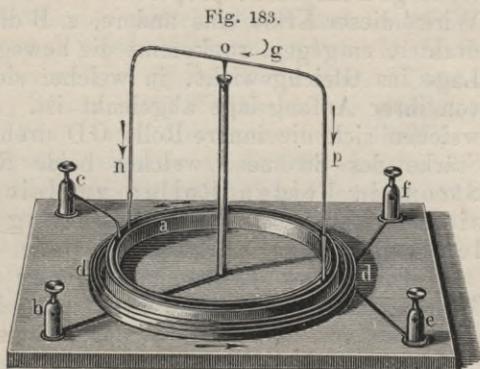


ist. Auch in diese Drähte kann durch eine, in der Figur nicht gezeichnete, Vorrichtung mittels Quecksilbernäpfchen ein Strom geführt werden. In der Figur sind die beiden Drahtkreise gekreuzt gezeichnet. Sie streben also danach, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen, und in der Tat fängt der innere Rahmen sich unter der Einwirkung der Ströme an zu drehen, bis die Drahtwindungen einander parallel stehen und die Ströme in ihnen gleichgerichtet sind.

Diese beiden qualitativen Gesetze der Wirkung paralleler und gekreuzter Ströme lassen sich in dem einen Satz zusammenfassen, daß zwei Ströme sich, welche Stellung sie auch zueinander haben, immer parallel und gleichgerichtet zu stellen suchen. Denkt man sich durch jede Stromebene ihre magnetischen Kraftlinien gezogen, so heißt dies auch, daß die Kraftlinien zweier Stromkreise sich parallel und nach derselben Richtung einzustellen suchen.

Aus diesem Satz aber ergibt sich sofort, daß, wenn der bewegliche Stromkreis drehbar angebracht ist, eine Anordnung zu treffen sein muß, welche bewirkt, daß er unter dem Einfluß des festen Stromkreises in fortlaufende und weitergehende Rotation kommt. Das wird dann der Fall sein, wenn die Kraftlinien des beweglichen Stromkreises in jeder Stellung senkrecht zu denen des festen Stromkreises sind. Dann suchen sich diese immer parallel zu stellen, können aber die parallele Lage nicht erreichen. Die Anordnung muß also ganz entsprechend den oben S. 183 und 184 angeführten sein, bei welchen

ein Stromkreis und ein Magnet aufeinander wirkten. Ein solcher elektrodynamischer Rotationsapparat ist in Fig. 183 gezeichnet. Von der Klemme b führt ein Draht in eine Metallsäule, welche oben in einem Quecksilbernäpfchen vermittels einer Spitze den Draht no trägt. Der Strom geht in der Säule nach oben und dann durch die beiden Drähte n und p nach unten. Diese tauchen in eine mit Quecksilber gefüllte Rinne a , welche mit der Klemme c durch einen Draht verbunden ist. Um die Rinne herum liegt ein kreisförmiger Kupferstreifen, oder auch ein spiralförmig zusammengelegtes Kupferband, dessen Enden mit den Klemmen e und f verbunden sind. Leitet man nun einen Strom durch den Kupferstreifen, so wird der Bügel po sich zu drehen anfangen, und zwar bei den in der Figur gezeichneten Stromrichtungen entgegengesetzt der Richtung, in welcher der positive Strom durch den Kupferstreifen fließt. Bei dieser Anordnung (und bei jeder anderen ähnlichen) rotiert, wie man sieht, nicht der ganze geschlossene Leiter, sondern nur ein Teil desselben, der eben durch Quecksilber trotz seiner Bewegung immer leitend mit dem anderen Teil verbunden bleibt. Einen ganzen geschlossenen Stromkreis kann man nie durch einen Strom, ebensowenig wie durch einen Magneten, in Rotation versetzen.



Was nun die Größe der Kräfte betrifft, die zwei geschlossene Stromkreise aufeinander ausüben, so hängt diese einerseits davon ab, welche Lage und Entfernung die beiden Stromkreise gegeneinander haben, und andererseits hängt sie ab von der Stärke der Ströme, die durch die beiden Leiterstücke fließen. Je stärker jeder der beiden Ströme ist, desto größer ist auch die Kraft, mit welcher die Stromkreise aufeinander wirken. Die (elektrodynamische) Kraft zwischen zwei geschlossenen Stromkreisen hängt immer ab von dem Produkt der Stromstärken in ihnen, sie ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer dieses Produkt ist.

Durch eine große Reihe sehr sorgfältiger und scharfsinniger Experimente hat Wilhelm Weber die elektrodynamische Kraft genau zahlenmäßig untersucht. Es diente ihm zu dieser Untersuchung eine feste und eine bewegliche Drahtrolle, welche er in verschiedene Lagen gegeneinander und in verschiedene Entfernungen voneinander bringen konnte und durch welche er Ströme verschiedener Stärke senden konnte. Es zeigte sich dabei, daß die Kraft, mit welcher die bewegliche Drahtrolle von der festen angegriffen wurde, unter sonst gleichen Umständen (gleicher Lage und gleicher Form) direkt abhängt und nur abhängt von dem Produkt der Stromstärken, die in den beiden Rollen herrschen. Weber konstruierte daher umgekehrt einen Apparat, das Elek-

trodynamometer, bestehend aus einem festen und einem beweglichen Stromkreise, in welchem man direkt durch die Ablenkung des beweglichen Stromkreises auf die Größe des Produktes der Stromstärken schließen konnte, welche in beiden Stromkreisen herrschen. Eine einfache Anordnung dieses Apparates war schon in Fig. 182 gezeichnet. Sendet man also einen und denselben Strom durch beide Drahtrollen hintereinander, so ist die Kraft, mit welcher die bewegliche Rolle gedreht wird, proportional dem Quadrat der Stromstärke. Wirkt dieser Kraft eine andere, z. B. die Torsionskraft eines Aufhänge- drahtes, entgegen, so kommt die bewegliche Rolle in einer bestimmten Lage ins Gleichgewicht, in welcher sie um einen bestimmten Winkel von ihrer Anfangslage abgelenkt ist. Es gibt daher der Winkel, um welchen sich die innere Rolle CD dreht, ein Maß für das Quadrat der Stärke des Stromes, welcher beide Rollen durchfließt. Wird der Strom in beiden Rollen zugleich kommutiert, so ändert sich daher weder die Richtung noch die Größe der Ablenkung.

Ein solches Elektrodynamometer läßt sich also als Apparat zur Messung der Stromstärke benutzen. Die Größe der Kraft hängt ja direkt ab von dem Quadrat der Stromstärke. Und die Kraft wird ja leicht durch den Winkel gemessen, um welchen sich die bewegliche Rolle unter ihrem Einfluß dreht. Mit einem Elektrodynamometer kann man aber nun auch, was man mit Voltametern und Galvanometern nicht kann, die Stärke von Strömen messen, deren Richtung rasch hintereinander wechselt, von Wechselströmen, wie solche von den Induktionsapparaten und den Wechselstrommaschinen geliefert werden. In der Tat bleibt ja die Ablenkung der beweglichen Rolle dieselbe, wenn der Strom in entgegengesetzter Richtung durch das Elektrodynamometer geleitet wird, falls er eben in beiden Rollen zugleich kommutiert wird.

Bei allen Elektrodynamometern verschiedener Form befindet sich eine bewegliche Rolle innerhalb einer festen Rolle. Die Form der Rollen kann verschieden sein. Wir beschreiben hier zunächst nur das Elektrodynamometer für schwache Ströme von F. Kohlrausch, von dem Fig. 184 die Ansicht gibt (ausgeführt von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M.). Dasselbe ist, wie alle feinen Instrumente für schwache Ströme, zur Spiegelablesung eingerichtet. Die bewegliche Rolle, die in Fig. 185 besonders gezeichnet ist, besteht aus Drähten, die, wie man in der Figur sieht, auf einen Elfenbeinrahmen aufgewunden sind. An dem Rahmen ist ein Spiegel befestigt, den man durch das Fenster des Apparates mittels eines Fernrohres beobachtet. Die bewegliche Rolle hängt an einem Metallfaden, der oben an dem Kopf der Glasröhre befestigt ist. Die Achse der beweglichen Rolle trägt unten ein Platinblech, welches in ein Gläschen mit Schwefelsäure taucht. Dies dient einerseits dazu, um der beweglichen Rolle den Strom zuzuführen, andererseits aber um die Schwingungen der Nadel zu dämpfen. Man kann einen und denselben Strom durch die feste und die bewegliche Rolle senden, oder auch durch jede einen anderen Strom. In der Ruhelage sind die Drahtwindungen der beweglichen Rolle senkrecht zu denen

der festen Rolle. Wird ein Strom durch beide Rollen gesendet, so sucht sich die bewegliche Rolle parallel der festen zu stellen, dreht sich also und tordiert dabei den Aufhängedraht. Sie bleibt daher in einer Lage in Ruhe, in welcher die elektrodynamische Kraft der Ströme gerade gleich der Torsionskraft des Aufhängedrahtes ist. Das Instrument ist sehr empfindlich, insbesondere für die schwächsten Wechselströme. Bei der Messung von Flüssigkeitswiderständen mittels der Wheatstoneschen Brücke nach der Kohlrauschschen Methode (S. 97), bei welcher ja durch die ganze Wheatstonesche Kombination Wechselströme gesendet werden, kann man dieses oder ein ähnliches Elektrodynamometer in die Brücke einschalten. Andere Elektrodynamometer und andere Anwendungen derselben werden wir in Kapitel 10 „Wechselströme“ behandeln.

Die vollständige Analogie, welche zwischen Stromkreisen, insbesondere Solenoiden, und

Fig. 184.

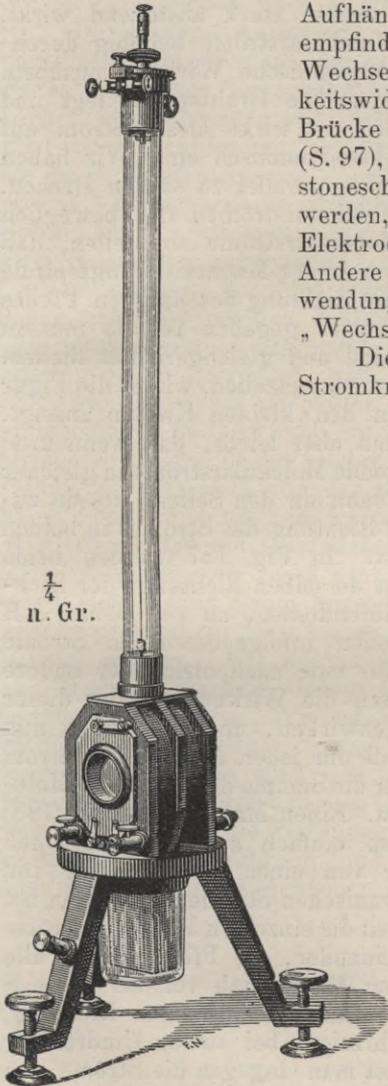
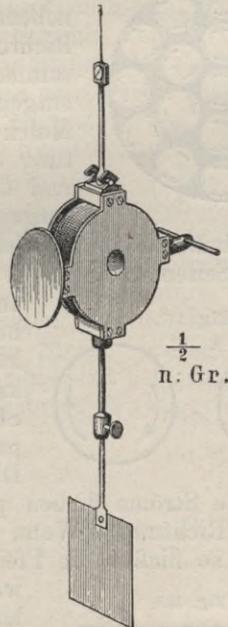


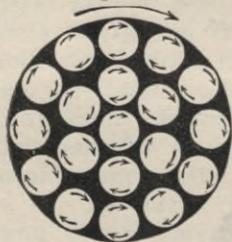
Fig. 185.



Magneten, besteht, führte Ampère auf die Idee, daß man sich die Wirkungen eines Magneten erklären könne, wenn man ihn als ein System von galvanischen Kreisströmen ansähe. Wenn man annimmt, daß um jedes Molekül des Eisens, ob das Eisen nun magnetisch ist oder nicht, ein galvanischer Strom im Kreise herumfließt, so lassen

sich alle Wirkungen eines Magneten durch die elektrodynamischen Wirkungen dieser Ströme, die Ampère Molekularströme nennt, erklären. In gewöhnlichem, unmagnetischem weichen Eisen liegen alle Moleküle mit ihren Molekularströmen ganz beliebig wirr durcheinander. Wenn dann ein bestimmter Molekularstrom nach außen z. B. anziehend wirkt, so gibt es immer einen anderen, der ebenso stark abstoßend wirkt. Ein Stück Eisen, in welchem also die Molekularströme beliebig durcheinander liegen, kann gar keine elektrodynamische Wirkung ausüben. Wenn man aber um dieses Stück Eisen eine Drahtspirale legt und einen Strom durch diese hindurchsendet, so wirkt dieser Strom auf jeden einzelnen der Molekularströme elektrodynamisch ein. Wir haben gesehen, daß gekreuzte Ströme sich immer parallel zu stellen streben. Wenn also die Moleküle mit ihren Molekularströmen frei beweglich sind, so müssen sich alle einzelnen Molekularströme so stellen, daß sie parallel und gleichgerichtet dem Strom in der Magnetisierungsspirale sind. Wenn daher in Fig. 186 durch die Richtung des äußeren Pfeiles die Richtung des magnetisierenden Stromes gegeben ist, so müssen alle Molekularströme diesem Strom parallel und gleichgerichtet fließen.

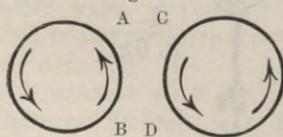
Fig. 186.



Sie müssen sich also so einstellen, wie es die Figur durch die Pfeile in den kleinen Kreisen anzeigt. Daraus erkennt man aber leicht, daß wenn zwei nebeneinander liegende Molekularströme in gleicher Richtung fließen, dann an den Seiten, wo sie zusammentreffen, die Richtung des Stromes in beiden entgegengesetzt ist. In Fig. 187 werden beide Molekularströme in derselben Richtung, der Richtung der Pfeile, durchflossen, an den Seiten AB und CD aber fließen infolgedessen die Ströme entgegengesetzt, der eine nach oben, der andere

nach unten. Es heben sich infolgedessen die Wirkungen aller dieser inneren Seiten auf, da sie sich entgegenwirken, und man kann nun

Fig. 187.



annehmen, daß um jeden Magnet ein Strom herumfließt, der die Summe der äußersten Molekularströme ist. Einen Magnetstab (Fig. 188) kann man also einfach auffassen als einen Stab, welcher von einer großen Reihe von parallelen galvanischen Strömen umflossen ist. Die Pfeile stellen die einzelnen Molekularströme

dar. Alle Ströme fließen parallel zu einander, die Pfeile haben alle dieselbe Richtung. Wenn man nun den Magnetstab von der Seite S ansieht, so fließen die Pfeile um dieses Ende in derjenigen Richtung,

Fig. 188.



welche ein Uhrzeiger bei seiner Umdrehung hat. Betrachtet man dagegen die Ströme von dem mit N bezeichneten Ende, so fließen sie entgegengesetzt, wie der Zeiger der Uhr sich dreht. Obwohl also alle Molekularströme in

gleicher Richtung fließen, ist der Sinn der Stromrichtung für den Außenraum bei dem einen Ende ein anderer als bei dem anderen. Das eine Ende wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Da wir bei der Magneti-

sierung durch einen Strom bereits gesehen haben (S. 168), daß um den Südpol der magnetisierende Strom in der Richtung des Uhrzeigers fließt, so können wir sofort sagen, daß auch die Molekularströme um den Südpol die Richtung des Uhrzeigers haben werden. In der Fig. 188 sind die Molekularströme auch so gezeichnet.

Durch diese Auffassung eines Magneten als eines Systems von parallelen Kreisströmen, die manchmal von Vorteil ist, obwohl ihre Bedeutung früher überschätzt wurde, kann man nun alle elektromagnetischen Erscheinungen auf elektrodynamische zurückführen. So kann man die Anziehung und Abstoßung von Magneten aufeinander erklären als die elektrodynamischen Anziehungen und Abstoßungen der Molekularströme. Ebenso ist die Anziehung und Abstoßung von Magneten und Solenoiden nur ein spezieller Fall der elektrodynamischen Wirkung von zwei Solenoiden aufeinander.

Wir hatten bei allen früher betrachteten Wirkungen des elektrischen Stromes, bei den Wärme-, Licht- und chemischen Wirkungen eine merkwürdige Reziprozität gefunden. Jede Wirkung, die ein elektrischer Strom hervorrief, war, wenn sie von der Richtung des Stromes abhängt, umgekehrt im stande, selbst wieder einen elektrischen Strom zu erzeugen. Es liegt nahe, zu vermuten, daß auch alle die Wirkungen, welche wir in den beiden letzten Kapiteln besprochen haben, Wirkungen, welche ja wesentlich von der Richtung des Stromes abhängen, umgekehrt selbst im stande sein werden, elektrische Ströme hervorzubringen. Wir sahen, daß ein elektrischer Strom Eisen magnetisch macht; wir können fragen, ob nicht auch umgekehrt Magnetisierung von Eisen einen elektrischen Strom hervorbringt. Wir werden diese Frage mit Ja beantwortet sehen. Wir sahen, daß durch elektrische Ströme Magnete bewegt werden. Wir können fragen, ob nicht auch durch Bewegung von Magneten Ströme erzeugt werden. Auch diese Frage wird mit Ja beantwortet werden. Wir sahen, daß durch einen festen galvanischen Strom ein beweglicher bewegt wird, ja sogar in dauernde Rotation kommen kann. Es wird sich umgekehrt zeigen, daß durch die bloße Bewegung eines galvanischen Stromes auch Ströme erzeugt werden können. Kurz alle die Wirkungen, welche wir bis jetzt betrachtet haben, gestatten eine Umkehrung, und diese umgekehrten Wirkungen werden Induktionswirkungen genannt.

9. Kapitel.

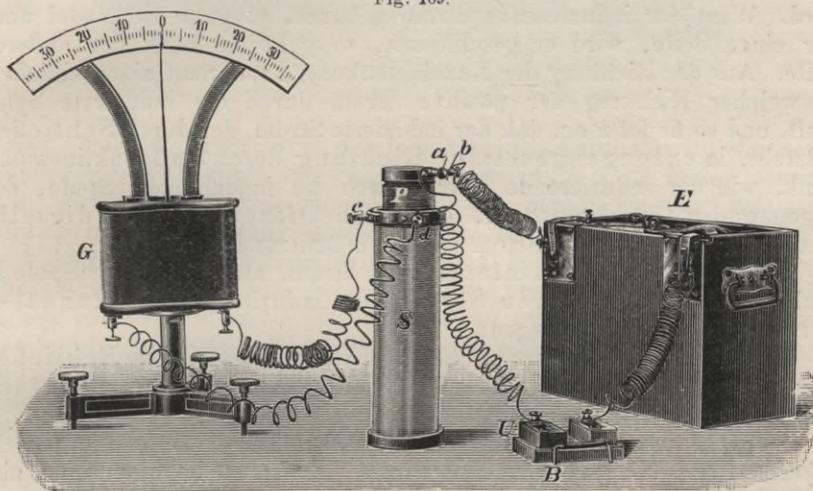
I n d u k t i o n.

Michael Faraday, dessen Name bei der Entwicklung unserer Kenntnisse von der Elektrizität in allererster Reihe genannt werden muß, Michael Faraday ist es, von dem die so überaus wichtigen und interessanten Erscheinungen der elektrischen Induktion nicht nur entdeckt, sondern auch fast vollständig erforscht wurden. Faraday ging aus von den Erscheinungen der elektrischen Influenz, die lange bekannt waren. Ein jeder elektrisch geladene Körper bringt auf einem anderen, in seiner Nähe befindlichen, durch Influenz ebenfalls Elektrizität hervor. Die bloße Anwesenheit eines elektrischen Körpers ist im stande, einen vorher unelektrischen Körper elektrisch zu machen. Sollte nicht auch bei den Erscheinungen des Galvanismus etwas Ähnliches stattfinden? Sollte nicht auch durch einen Strom, der in einem Leiter fließt, in einem anderen in der Nähe befindlichen geschlossenen Leiter ein elektrischer Strom erregt werden? Diese Frage stellte sich Faraday und suchte sie durch geschickt ausgedachte und ausgeführte Versuche zu beantworten. Was er fand, entsprach nicht ganz seinen ursprünglichen Vermutungen; die von ihm entdeckten Erscheinungen waren so auffallend und wunderbar, daß er seine Anschauungen oft modifizieren mußte. Aber mit dem größten experimentellen Scharfsinn und Geschick wußte er die Erscheinungen so zu verfolgen, daß fast alles, was wir von ihnen wissen, sein Werk ist. Man muß in den Originalberichten Faradays nachlesen, wie viele mühevollen und schwierige Versuche fehlschlugen, wie endlich nach einer großen Reihe von vielfach variierten Experimenten sich eine Spur der Wirkung zeigte, welche er suchte, und wie er dann diese Spur verfolgte und ausbeutete, um einen richtigen Begriff von Faradays Genie zu bekommen. Jetzt, wo diese Erscheinungen genau bekannt sind, ist es nicht mehr nötig, den mühevollen stufenweisen Weg zu gehen, den Faraday einschlagen mußte, jetzt können wir bald mitten in die Erscheinungen hineingreifen und von vornherein diejenigen Bedingungen annehmen, die sich als vorteilhaft erwiesen haben.

Immer, wenn ein elektrischer Strom in einem Stromkreis geöffnet oder geschlossen wird, entsteht in einem in der Nähe befindlichen geschlossenen Leiter ein momentaner elektrischer Strom.

Die beiden Leiterkreise sind also ganz voneinander getrennt, es existiert gar keine leitende Verbindung zwischen ihnen und doch entsteht durch das Öffnen und Schließen eines von einem Strome durchflossenen Leiters in einem eben noch ganz stromlosen, geschlossenen Drahtkreis ein momentaner galvanischer Strom. Um diese Erscheinung leicht hervorzurufen, ist es notwendig, daß die beiden Stromkreise sich sehr nahe aneinander befinden. Man nimmt deshalb am besten zwei Hohlzylinder von Holz und wickelt auf jeden von ihnen einen Draht spiralförmig auf. Den engeren Zylinder stellt man in die Höhlung des weiteren hinein. So hat man zwei getrennte Drähte, die einander sehr nahe sind. In Fig. 189 sind diese beiden Zylinder mit P und S bezeichnet. Die Enden des Drahtes auf dem weiten Zylinder S sind

Fig. 189.



nach zwei Klemmschrauben c und d geführt, die des Drahtes auf dem engen Zylinder P nach a und b. Nun verbindet man die äußere Spule mit einem Galvanoskop G und die innere Spule unter Einschaltung eines Unterbrechers U (wie er auf S. 80 beschrieben wurde) mit einem Element E (hier einem Akkumulator). Man hat so zwei geschlossene Leiterkreise; in dem inneren fließt fortwährend ein Strom, in dem äußeren nicht. Sowie man aber nun den Strom in dem inneren Drahtkreis unterbricht, indem man den Bügel B, wie es in der Figur gezeichnet ist, aus den Quecksilbernäpfchen des Unterbrechers herausnimmt, wird die Nadel des Galvanoskops momentan abgelenkt, kehrt aber sofort wieder zurück. Sowie man den Strom in der inneren Spirale wieder schließt durch Eintauchen des Bügels B, wird die Nadel wieder abgelenkt, aber ebenfalls nur einen Moment und kehrt auch sofort wieder zurück. Es wird also in der Tat durch die Öffnung oder Schließung des Stromes in P ein momentaner Strom in dem Leiter S erregt, in dem Leiter, welcher gar keine Verbindung mit P

hat, welcher nur in der Nähe von P sich befindet. Man nennt diese momentanen Ströme Induktionsströme und kann also sagen, beim Öffnen und Schließen des Stromes in P wird in S ein momentaner Strom induziert. Man nennt die Spule P die induzierende Spule, die Spule S die induzierte oder Induktionsspule. Die Induktionsspule S wird gewöhnlich aus sehr feinem Kupferdraht verfertigt, welcher mit Seide umspunnen ist, damit man viele Windungen nebeneinander und übereinander bringen kann, ohne daß sie in leitende Verbindung kommen. Die Spule P besteht aus dickem Kupferdraht, damit der Strom in ihr recht stark wird.

Wenn man aber die durch die momentanen Induktionsströme hervorgebrachten Ausschläge der Nadel des Galvanoskops betrachtet, so findet man, daß ein Unterschied in der Richtung des Ausschlages stattfindet, je nachdem der induzierende Strom geöffnet oder geschlossen wird. Wird der induzierende Strom geöffnet, so geht die Nadel nach der einen Seite, wird er geschlossen, so geht sie nach der anderen Seite. Aus der Richtung der Nadelablenkung kann man aber schließen, in welcher Richtung der positive Strom durch die induzierte Spule läuft, und so findet man, daß der induzierte Strom, der durch Schließen entsteht, in entgegengesetzter Richtung durch die Induktionsspule läuft, wie der induzierende Strom durch die induzierende Spule, daß dagegen der Induktionsstrom, der durch Öffnen entsteht, dieselbe Richtung hat wie der Strom in der induzierenden Spule.

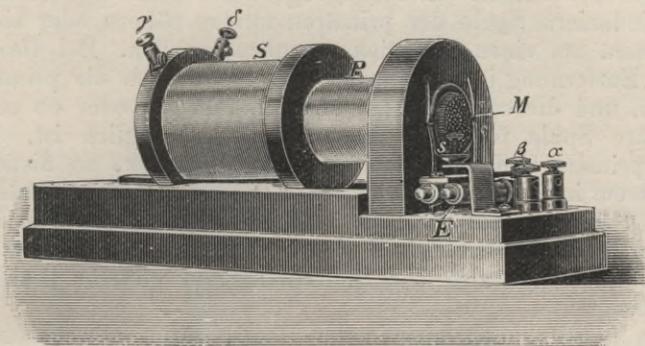
Man bezeichnet den induzierenden Strom, also den in der Spule P, auch oft als den primären Strom, den induzierten als sekundären Strom und kann also sagen:

Der Induktionsstrom (sekundäre Strom) hat beim Schließen die entgegengesetzte, beim Öffnen die gleiche Richtung wie der primäre Strom.

Taucht man rasch hintereinander den Bügel B in die Quecksilbernäpfcchen ein und zieht ihn wieder heraus, so bekommt man also rasch hintereinander momentane Induktionsströme nach der einen und nach der anderen Richtung. Wenn diese Ströme sehr rasch hintereinander folgen, so daß sich ein Strom nach der einen Richtung sehr rasch an den vorhergehenden nach der anderen Richtung anschließt, so nennt man sie Wechselströme. Es kann also ein Stromkreis auch von Wechselströmen durchflossen werden, ebenso wie er von einem Strom von gleichbleibender Richtung durchflossen wird. Bei Wechselströmen wechselt die Richtung des positiven Stromes in dem Stromkreis immerfort, und zwar sehr rasch hintereinander. Es ist natürlich nicht möglich, dadurch, daß man den Draht aus dem Quecksilber mit der Hand herausnimmt und wieder einsteckt, sehr schnell wechselnde Ströme in der Induktionsspule zu bekommen. Wenn man aber den primären Strom, bevor er in seine Spule kommt, durch einen Neefschens Hammer (o. S. 186) gehen läßt, so bewirkt dieser ja selbsttätig rasch aufeinander folgende Schließungen und Öffnungen des Stromes und man bekommt daher in der induzierten Spule fortwährend Induktionsströme, bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung. Eine Einrichtung dazu zeigt Fig. 190. Von einem Element geht der

Strom zu den beiden Klemmen α und β und von diesen um den Elektromagneten E des Neef'schen Hammers, der hier horizontal liegt, dann durch die primäre Spule P des Induktionsapparates und von dieser durch die Spitze s und die Feder des Hammers zum Element

Fig. 190.

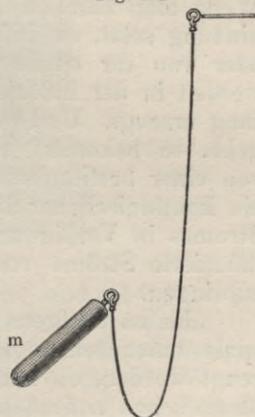


zurück. Sobald der Strom in der primären Spule fließt, wird die Feder angezogen und dadurch der Strom unterbrochen. Die Feder schnellt dann wieder zur Spitze und schließt den Strom wieder. Bei jeder Öffnung und Schließung entsteht dann in der sekundären Spule S ein Induktionsstrom. Solche Ströme sind z. B. für medizinische Zwecke sehr nützlich. Man führt dann die Enden der induzierten Spule, die zu den Klemmen γ und δ geleitet sind, in zwei Messingzylinder, wie in Fig. 191, und gibt diese dem zu elektrisierenden Menschen in die Hände. Dann gehen die Wechselströme durch den menschlichen Körper und üben in gewissen Fällen heilsame Wirkungen aus. Wir werden im Kapitel 10 uns ausführlicher mit Wechselströmen beschäftigen.

Bei jeder Öffnung und bei jeder Schließung des primären Stromes werden also in der Induktionsspule momentane Ströme erzeugt. Es ist aber gar nicht einmal nötig, einen Strom ganz zu unterbrechen, um einen Induktionsstrom zu bekommen. Schon jede Schwächung oder Verstärkung des primären Stromes erzeugt in der Induktionsspule einen Induktionsstrom, und zwar hat in Bezug auf die Richtung des erzeugten Induktionsstromes die Schwächung dieselbe Wirkung wie die Öffnung, während die Verstärkung dieselbe Wirkung hat wie die Schließung.

Ja noch mehr. Es ist nur nötig, die eine Spule gegen die andere irgendwie zu verschieben, um einen momentanen Induktionsstrom zu bekommen. Wenn man durch die primäre Spule P, die in Fig. 190 gezeichnet ist, ohne Benutzung des

Fig. 191.



Hammers einen konstanten Strom fließen läßt (indem man etwa die Spitze so fest an die Feder anlegt, daß sie sich nicht trennen können) und die weitere Induktionsspule S nur über sie weg zieht oder schiebt, so erhält man in S schon einen Induktionsstrom. Schiebt man S nach der einen oder anderen Seite, so erhält man jedesmal einen Induktionsstrom, aber beide Male von entgegengesetzter Richtung. Man braucht also die induzierte Spule der primären nur zu nähern oder sie von ihr zu entfernen, um einen Induktionsstrom zu erhalten. Bei dieser Näherung und Entfernung ist es natürlich gleichgültig, ob die primäre Spule beweglich, und die sekundäre, induzierte, fest ist, oder ob umgekehrt die primäre Spule fest und die sekundäre beweglich ist. Nähert man die primäre und die induzierte Spule einander, so fließt der Induktionsstrom in S in entgegengesetzter Richtung wie in P, also ebenso wie beim Schließen des Stromes. Entfernt man dagegen S von P, so hat der Induktionsstrom in S dieselbe Richtung wie der Strom in P. Beim Entfernen hat also der Induktionsstrom dieselbe Richtung wie beim Öffnen.

Man hat es auch hier in der Hand, durch abwechselndes Annähern und Entfernen eines Stromkreises in einem anderen Leiterkreise fortwährend Ströme von abwechselnden Richtungen zu erzeugen. Geht die Annäherung und Entfernung der beiden Stromkreise sehr rasch hintereinander von statten, so schließen sich diese wechselnden Ströme so rasch hintereinander an, daß sie den Eindruck eines ununterbrochenen Stromes machen. Es entstehen wieder Wechselströme. Man kann aber hier schon erkennen, daß es sehr leicht ist, durch Induktion auch Ströme von konstanter Richtung in der induzierten Spule zu erzeugen. Wenn man nämlich die primäre Spule mit einem Kommutator in Verbindung setzt, so daß jedesmal, wenn sie der anderen Spule genähert oder von ihr entfernt wird, der Strom in ihr kommutiert wird, so werden in der induzierten Spule beide Male Ströme von derselben Richtung erzeugt. Und wenn die Annäherung und Entfernung rasch genug geht, so bekommt man in der induzierten Spule in der Tat Ströme von einer bestimmten Richtung, die sich ganz ebenso verhalten, wie ein kontinuierlicher Strom. Es ist also möglich, durch Bewegung eines Stromes in Verbindung mit einem passend eingerichteten Kommutator induzierte Ströme von konstanter Richtung in einem Kreise hervorzubringen.

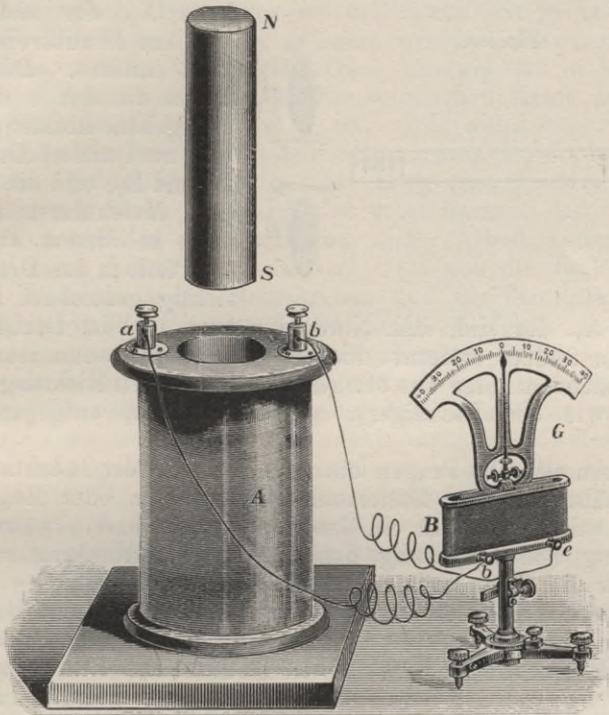
Es ist übrigens ausdrücklich zu erwähnen, daß in der Induktionsspule unter den angegebenen Umständen immer Induktionsströme erzeugt werden, ob nun die Spule vorher noch ganz stromlos war, oder ob sie schon außerdem von einem Strome durchflossen ist. In letzterem Fall addiert oder subtrahiert sich der momentane Induktionsstrom zu (resp. von) dem schon vorhandenen Strome, je nachdem ihre Richtungen gleich oder entgegengesetzt sind.

Die vielen Beziehungen, die wir zwischen galvanischen Strömen und Magneten gefunden haben, legen nun die Frage nahe, ob nicht auch Magnete in eben derselben Weise induzierend wirken können, wie Stromkreise. Und hiermit sind wir zu einer Reihe von Erscheinungen gekommen, die in den letzten Jahrzehnten der Elektrizität eine gewaltige

Wirksamkeit verschafft haben, zu Erscheinungen, welche die Grundlage der ganzen modernen Entwicklung der Elektrotechnik bilden. Man bezeichnet sie als Erscheinungen der Magnetinduktion und im Gegensatz dazu die eben behandelten Fälle als solche der Elektroinduktion.

Da ein Magnet sich bekanntlich genau so verhält, als ob er aus einer großen Menge von gleichgerichteten Molekularströmen bestände, so muß die Annäherung eines Magneten an eine geschlossene Draht-

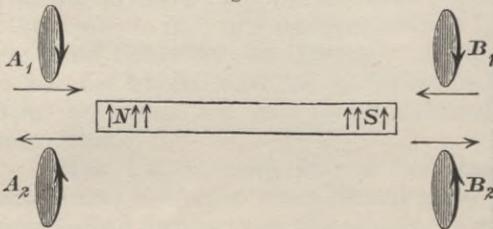
Fig. 192.



spule einen momentanen Induktionsstrom erzeugen, und ebenso muß durch die Entfernung des Magnets ein momentaner Induktionsstrom in der Drahtspule erzeugt werden. Diese Folgerung aus allen unseren bisherigen Kenntnissen zeigt sich nun in der Tat bestätigt. Wenn man in Fig. 192 den Magnetstab NS in die Drahtspule A, deren Enden durch ein Galvanoskop G verbunden sind, hineinstößt, so entsteht in der Spule ein momentaner Induktionsstrom, der die Magnetnadel des Galvanoskops zum Ausschlag bringt. Zieht man den Magneten aus der Drahtspule wieder heraus, so erhält man wieder einen momentanen Induktionsstrom, der aber nach der entgegengesetzten Richtung fließt. Aber nicht bloß das Hinein- oder Herausschieben, sondern jede Lagenänderung eines Magneten in Bezug auf die Drahtspule bringt einen Induktionsstrom hervor. Über die Richtung der Induktionsströme kann

man sich auch sofort klar werden, wenn man sich die Molekularströme gezeichnet denkt. Um den Südpol fließen die Molekularströme in der Richtung des Uhrzeigers, folglich fließen sie in der Drahtspule bei Annäherung eines Südpols umgekehrt, bei Annäherung eines Nordpols in derselben Richtung. Das Entgegengesetzte findet statt, wenn der Südpol oder Nordpol von der Spule entfernt wird. Dabei aber hat man natürlich zu beachten, daß man, um diese Uhrzeigerregel anzuwenden, von der Drahtspule immer nach dem betreffenden Pole hinzusehen hat. Es ist z. B. in Fig. 193 ein Magnetstab NS mit der Richtung der Molekularströme gezeichnet und links davon ein Drahtkreis A_1 , der sich nähert, und ein Drahtkreis A_2 , der sich entfernt. Die Ströme haben die durch die Pfeile angegebene Richtung. Rechts sind zwei andere Drahtkreise B_1 und B_2 , und die Richtung der Molekularströme zeigt auch in diesem Falle, daß die Pfeile in den Drahtkreisen richtig gezeichnet sind. Im

Fig. 193.



Drahtkreise A_1 , der sich dem Nordpol nähert, und im Drahtkreis B_2 , der sich vom Südpol entfernt, fließen die Ströme, wenn man sie von den entsprechenden Polen aus betrachtet, in derselben Richtung (nämlich umgekehrt wie der Uhrzeiger), absolut aber in entgegengesetzten Richtungen.

Es lassen sich alle Fragen über die Richtung der Induktionsströme bei der Annäherung oder Entfernung von Strömen oder Magneten an Drahtkreise sehr einfach in ein Gesetz zusammenfassen, wenn man an die Anziehung und Abstößung denkt, die ein Stromkreis auf einen anderen oder ein Stromkreis auf einen Magneten ausübt.

Man kann dieses Gesetz folgendermaßen aussprechen: Bei jeder Bewegung eines Stromes oder eines Magneten in der Nähe eines Drahtkreises entsteht in dem letzteren ein Strom. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob der Strom resp. der Magnet sich gegen den Drahtkreis bewegt, oder der Drahtkreis gegen den Strom resp. Magneten. Die Richtung des entstehenden induzierten Stromes ist immer eine solche, daß derselbe vermöge der elektrodynamischen (oder elektromagnetischen) Wirkung auf den induzierenden Strom resp. Magneten diesem die entgegengesetzte Bewegung erteilen würde.

Wird also z. B. in Fig. 193 der Stromdraht A_1 dem Nordpol genähert, so muß der Strom in ihm diejenige Richtung erlangen, daß der Stromdraht von dem Nordpol abgestoßen wird. In der Tat sehen wir an der Zeichnung der Pfeile, daß die Abstößung stattfinden würde, da gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete sich abstoßen. Dieses allgemeine Gesetz ist von Lenz ausgesprochen worden und heißt das Lenzsche Gesetz.

Das Lenzsche Gesetz hat übrigens eine tiefere Bedeutung. Es ist nämlich ein Ausdruck dafür, daß auch bei den Induktionsströmen das Gesetz von der Erhaltung der Energie gültig ist. Nehmen wir an, um das einzusehen, daß wir zwei Stromspulen A und B haben, in welchen je ein Strom nach derselben Richtung zirkuliert. A sei fest, B sei beweglich. Wir wissen aus dem elektrodynamischen Gesetz von Ampère, daß zwei gleichgerichtete Ströme sich anziehen suchen. Folglich bewegt sich der Stromkreis B auf A zu, er wird von A angezogen. Bei dieser Anziehung leisten aber die elektrischen Kräfte, die von A ausgehen, eine gewisse Arbeit. Woher kommt diese Arbeit? Welches ist ihr Äquivalent? Denn umsonst bekommen wir ja keine Arbeit in der Natur. Sie kann also nur geliefert werden auf Kosten der Energie des Stromes, welcher in A fließt. Diese Energie, die in jeder Sekunde gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft des Elementes und der Stromstärke im Kreise A ist, wird, wenn sonst keine äußere Arbeit geleistet wird, durch den Strom ganz in Joulesche Wärme verwandelt. Leistet der Strom aber noch eine positive Arbeit, wie hier, wo er den Strom B anzieht, so folgt daraus, daß die Joulesche Wärme in A um den ganzen Betrag dieser Arbeit kleiner sein muß, als wenn keine Arbeit geleistet wird. Da nun die Joulesche Wärme von dem Widerstand des Stromkreises und der Stromstärke abhängt, der Widerstand aber ja unverändert bleibt, so folgt, daß die Stromstärke in unserem Kreise A kleiner sein muß, wenn er den Kreis B anzieht, als wenn er das nicht tut. Die Folge der Bewegung von B nach A hin ist also eine Verringerung der Stromstärke in A, d. h. die Erzeugung eines neuen Stromes (Induktionsstromes), welcher dem vorhandenen entgegenfließt und ihn dadurch schwächt. Das ist nun in der Tat der Ausdruck des Lenzschen Gesetzes. Denn da der ursprüngliche Strom in A der Annäherung nach den Strom B anzuziehen suchte, so wird also durch die Annäherung von B an A in letzterem ein Strom erzeugt, welcher B abzustößen sucht.

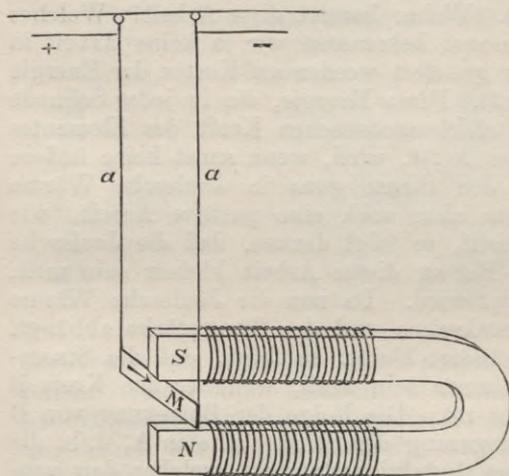
Was hier in dem einen Beispiel ausführlich entwickelt wurde, ist nun in allen anderen Fällen ganz ebenso durchzuführen, so daß wir also behaupten dürfen, das Lenzsche Gesetz ist eine notwendige Folge des Satzes von der Erhaltung der Energie.

Wir können die Richtung des durch Bewegung entstehenden Induktionsstromes auch durch eine Fingerregel darstellen, so wie wir oben (S. 185) die elektromagnetische Bewegung durch eine solche dargestellt haben. Hatten wir aber damals die Finger der linken Hand nehmen müssen, so werden wir jetzt, wegen des Lenzschen Gesetzes, die der rechten Hand anzuwenden haben. Wir halten also von der rechten Hand den Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Kraftlinien, den Daumen in die Richtung der Bewegung des induzierten Stromleiters, dann gibt der Mittelfinger die Richtung des entstehenden Induktionsstromes an. Diese Regel bezeichnet man als Rechte-Hand-Regel. An dem einfachen Beispiel, das wir schon oben S. 185 zur Untersuchung der Bewegung benutzt haben, die ein Strom in einem magnetischen Feld erfährt, können wir unsere Regel leicht anwenden. Bewegen wir das Drahtstück M (Fig. 194) nach rechts durch das Magnet-

feld, so ist der rechte Daumen nach rechts, der rechte Zeigefinger von unten nach oben zu halten, folglich geht der rechte Mittelfinger von hinten nach vorn und gibt uns die Richtung des dabei entstehenden Induktionsstromes an.

Diese Regel oder das Lenzsche Gesetz und ebenso eine weitere Regel, die wir bald kennen lernen werden, geben uns aber nur eben Aufschluß über die Richtung des entstehenden Induktionsstromes.

Fig. 194.



Wir müssen uns aber auch über die Stärke und überhaupt über die genaueren quantitativen Gesetze dieser Erscheinungen informieren.

Immer, wenn Elektrizität durch einen Drahtkreis fließt, muß eine elektromotorische Kraft vorhanden sein, welche die Elektrizität eben in Bewegung setzt. Wir müssen daher auch hier, bei den Induktionsströmen, zuerst nach der elektromotorischen Kraft der induzierten Ströme fragen.

Zunächst scheint bei dieser Untersuchung eine Schwierigkeit darin zu liegen, daß wir es ja mit zweierlei, scheinbar verschiedenen Arten von Induktion, der Elektroinduktion und der Magnetoinduktion zu tun haben. Indes, schon das Lenzsche Gesetz, das in beiden Fällen die Richtung des entstehenden Induktionsstromes in gleicher Weise auszudrücken lehrt, zeigt an, daß diese beiden Arten der Induktion auf eine und dieselbe Ursache zurückgeführt, also gleichartig behandelt werden können. In der Tat wissen wir ja bereits, daß ein Magnet und ein elektrischer Strom sich in der Beziehung ganz gleich verhalten, daß beide magnetische Kräfte ausüben.

Die magnetischen Kräfte eines Stromes sind es, ebenso wie die magnetischen Kräfte eines Magneten, welche die Induktionsströme in einem in der Nähe sich bewegenden Stromleiter hervorrufen. Dadurch sind die beiden Arten von Induktion auf dieselbe Erscheinung zurückgeführt; die Elektroinduktion ist ebenfalls eine Magnetoinduktion, indem nämlich die magnetischen Kräfte des primären Stromes die Induktion erzeugen.

Daraus folgt aber, daß wir am leichtesten und übersichtlichsten die quantitativen Verhältnisse der Induktionsströme werden darstellen können, wenn wir in allen Fällen Gebrauch machen von den magnetischen Kraftlinien, die ja sowohl in der Nähe eines Magneten, wie in der Nähe eines galvanischen Stromes vorhanden sind. Wenn sich ein Drahtstück in der Nähe eines Magneten bewegt, so durch-

schneidet es im allgemeinen immer die Kraftlinien desselben und ebenso, wenn es sich in der Nähe eines Stromkreises bewegt. Dieses Durchschneiden der Kraftlinien ist es, welches die Ursache für die Induktion ist. Wenn andererseits ein primärer Strom erst entsteht, so gehen von ihm aus die Kraftlinien nach außen und schneiden also wieder ein irgendwo in der Nähe befindliches Leiterstück. Wird umgekehrt der primäre Strom geöffnet, nachdem er bis dahin bestanden hat, so verschwinden die Kraftlinien; man kann sich vorstellen, daß sie allmählich von außen in den Stromkreis hineinrücken und dort aufhören; dabei schneiden sie also auch wieder ein in der Nähe befindliches Leiterstück. Kurz, in jedem Falle der Induktion finden wir, daß Kraftlinien die einzelnen Teile der induzierten Strombahn schneiden, indem sie entweder in der einen Richtung oder in der anderen Richtung durch die induzierten Leiter hindurchgehen.

Wenn wir einen Drahtkreis nehmen, dessen Enden mit einem Galvanometer verbunden sind, so können wir in diesem Draht auf verschiedenfache Weise Induktionsströme erzeugen und am Galvanometer beobachten. Jedes einzelne Stück des Drahtes wird dabei von Kraftlinien durchschnitten, bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne. Im ganzen treten dadurch in die von dem Drahtkreis umschlossene Fläche entweder Kraftlinien ein oder aus, es wird die Zahl der Kraftlinien, die die Fläche umfaßt, vermehrt oder vermindert. Die Geschwindigkeit, mit der diese Kraftlinienzahl sich ändert, diese ist es nun allein, welche die erzeugte elektromotorische Kraft bestimmt. Je größer die Kraftlinienzahl ist, die pro Sekunde in die Fläche hineintritt oder heraustritt, je größer also, wie wir es nennen wollen, die Geschwindigkeit ist, mit der die Kraftlinienzahl in der Fläche sich vermehrt oder vermindert, um so größer ist die erzeugte elektromotorische Kraft der Induktion. Und dabei bringen austretende Kraftlinien immer einen Strom im Uhrzeigersinne hervor, wenn man den Drahtkreis in der Richtung der Kraftlinien ansieht, eintretende eine solche im entgegengesetzten Sinne.

Aus diesem allgemeinen Gesetz folgt zunächst: je stärker der induzierende Magnet oder der induzierende Strom ist, um so größer ist bei sonst gleichen Verhältnissen die elektromotorische Kraft in der induzierten Spule. Denn in der Nähe eines stärkeren Magneten oder Stromes sind mehr Kraftlinien pro Quadratcentimeter vorhanden, als bei schwächerem Magnete oder Strom.

Ferner folgt daraus: je rascher der primäre Strom oder Magnet in seiner Stärke oder in seiner Lage verändert wird, um so größer ist die elektromotorische Kraft des Induktionsstromes. Von dem Material des induzierten Drahtes ist sie ganz unabhängig. Je rascher, also auch je plötzlicher die Unterbrechungen eines primären Stromes stattfinden, um so größer wird die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes.

Und endlich drittens: je größer die Anzahl der Windungen der induzierten Spule ist, um so größer wird die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes. Denn jede Win-

dung umfaßt eine Anzahl Kraftlinien und die gesamte Zahl der Kraftlinien, die pro Zeiteinheit ein- oder austreten, ist daher um so größer, je mehr Windungen die Spule hat.

Wir können die Größe der elektromotorischen Kraft des Induktionsstromes direkt gleich setzen der Zahl der pro Zeiteinheit in die Fläche hinein- oder aus ihr herausgehenden Kraftlinien. Indes wäre diese Einheit für praktische Zwecke zu klein. Man ist daher übereingekommen, diejenige elektromotorische Kraft als Einheit zu nehmen, bei der nicht eine, sondern 100 Millionen (10^8) Kraftlinien in der Zeiteinheit in die Fläche ein- oder austreten. Diese Einheit ist gerade das Volt, das wir schon immer angewendet haben. Wir haben z. B. in Fig. 195 ein

Fig. 195.

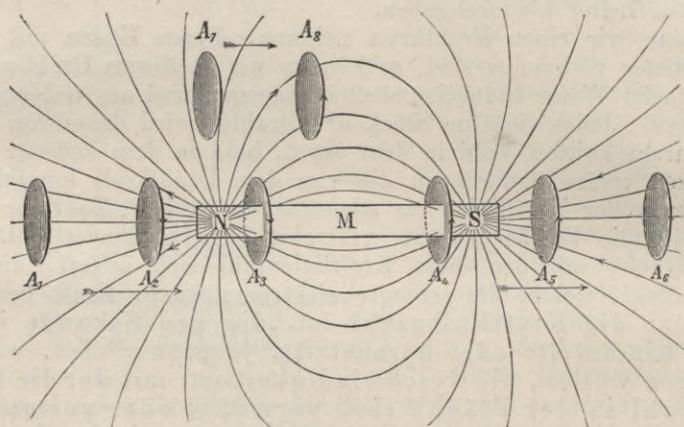


Bild der Kraftlinien eines Magnetstabes. Nehmen wir nun einen Drahtkreis, wie den bei A₁ gezeichneten, der eine bestimmte Fläche umschließt, und nähern wir ihn dem Nordpol bis A₂, so erkennt man, daß dabei mehr Kraftlinien durch ihn hindurchgehen als früher. An der Stelle A₁ durchsetzen drei Kraftlinien die Stromfläche, an der Stelle A₂ aber sechs. Wenn sich folglich die Stromfläche in 1 Sekunde von A₁ bis A₂ bewegen würde, so würde die elektromotorische Kraft durch die Zahl 3 ausgedrückt sein. Bewegt sich aber die Stromfläche in

$\frac{1}{1000}$ Sekunde von A₁ bis A₂, so ist die elektromotorische Kraft durch

die Zahl 3000 dargestellt. Nach unserer Festsetzung wäre in diesem zweiten Fall die elektromotorische Kraft 0,00003 Volt. Rückt die Fläche bis zum Nordpol N, so treten dabei am meisten Kraftlinien ein, rückt sie weiter, so nimmt die Induktion wieder ab und an der Stelle M bringt eine kleine Bewegung der Drahtfläche keine neuen Kraftlinien mehr hinein. Dort ist also der Induktionsstrom Null. Bei weiterem Fortschreiten treten mehr und mehr Kraftlinien aus der Fläche aus. Der Induktionsstrom bekommt daher die entgegengesetzte Richtung, wie sich zeigt, wenn man den Drahtkreis von A₄ über A₅ nach A₆

schiebt. Ebenso kann man aus der Zahl der eintretenden Kraftlinien die Richtung und die Größe der elektromotorischen Kraft bestimmen, wenn die Fläche sich oberhalb oder unterhalb des Magnets, wie von A_7 nach A_8 , bewegt.

Dasselbe Verfahren findet auch bei der Elektroinduktion seine Anwendung. Denn da jeder Stromkreis mit magnetischen Kraftlinien behaftet ist, so schneidet der sekundäre Leiter, wenn er dem primären Strom sich nähert oder sich von ihm entfernt, die Kraftlinien desselben und dadurch entsteht der Induktionsstrom. Wird der primäre Leiter unterbrochen, so verschwinden seine Kraftlinien, sie gehen also durch die Fläche des sekundären hindurch und erzeugen Induktion.

Um auch mittels der Kraftlinienvorstellung die Richtung des Induktionsstromes immer unzweifelhaft festzustellen, ist von Maxwell folgende Regel aufgestellt worden, die man die Maxwellsche Regel nennt: Man blicke auf die induzierte Spule immer in der Richtung der Kraftlinien (die vom Nordpol ausgehen und durch die Luft zum Südpol hingehen). Dann bringen austretende Kraftlinien immer einen Strom im Uhrzeigersinn, eintretende einen im entgegengesetzten Sinne hervor.

Vermittels der Betrachtung der Kraftlinien läßt sich nun in jedem Falle die Richtung des Induktionsstromes und die Größe der elektromotorischen Kraft bestimmen, die in einer Spule durch Bewegung induziert wird.

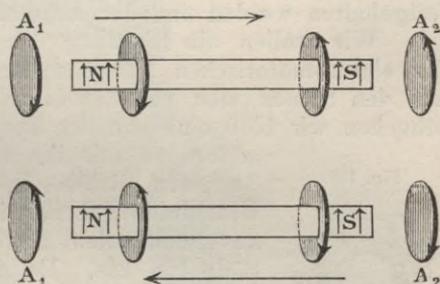
Wenn z. B. der Drahtkreis in Fig. 196 von der Stelle A_1 über den Magneten fortgezogen wird, bis zur Lage A_2 , so ändert sich in der Mitte des Magneten die Richtung des Induktionsstromes; wird er dann, wie es in der unteren Figur gezeichnet ist, umgekehrt von A_2 wieder über den Magneten fortgeschoben

bis A_1 , so erkennt man, daß bei dieser Hin- und Zurückbewegung 4 Induktionsströme von abwechselnd entgegengesetzten Richtungen entstehen. Die Ströme kehren sich um erstens auf jeder Seite des Magnetstabes, wenn der Drahtkreis statt entfernt zu werden, vielmehr angenähert wird, zweitens über der Mitte des Magnetstabes.

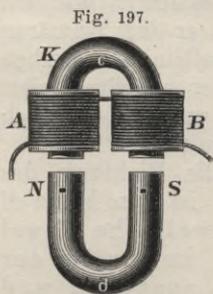
Dasselbe findet statt, wenn der Drahtkreis fest bleibt und der Magnet durch ihn hindurchgezogen wird, nach der einen und anderen Richtung. Sobald seine Mitte den Drahtkreis passiert hat, wechselt der Strom in ihm die Richtung und ebenso, wenn er seine Bewegung umkehrt.

Wir sind also jetzt im stande, durch einfache Bewegung einer Drahtspule in der Nähe von Magneten oder von Magneten in der Nähe von Drahtspulen elektrische Ströme zu erzeugen, ganz ohne Anwendung von galvanischen Elementen. Direkt allerdings bekommen wir immer Ströme von fortwährend wechselnder Richtung, aber es wird uns möglich

Fig. 196.



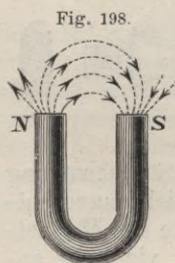
sein, diese Ströme durch Zuhilfenahme eines passend eingerichteten Kommutators in Ströme von konstant bleibender Richtung umzuwandeln. Wenn wir z. B. in Fig. 197 in *d* einen Magneten haben, der in *N* seinen Nordpol, in *S* seinen Südpol hat, und wenn wir jedem dieser Pole eine Drahtspule gegenüberstellen, die auf einen gebogenen Zylinder *K* aus weichem Eisen, den Kern, aufgeschoben sind,



so können wir durch Umdrehung dieser Spulen vor den Magnetpolen Wechselströme in jeder von ihnen erzeugen. Der Draht auf den beiden Spulen ist zusammenhängend. Wenn die eine Spule *A* sich von dem Nordpol *N* entfernt, entfernt sich die andere *B* zu gleicher Zeit von dem Südpol *S*. Damit nun diese Ströme sich in den Spiralen nicht entgegenwirken, sondern zusammensetzen, müssen die Windungen der Spiralen zweckmäßig ineinander übergehen, nämlich so, daß die beiden Schenkel in entgegengesetzter Richtung mit dem Draht unwickelt sind.

Sobald nun die beiden Drahtspulen sich zusammen bewegen, tritt in beiden die Induktion in Wirksamkeit, es werden in beiden Spulen elektromotorische Kräfte erregt, die sich addieren, und wenn die Enden der Spulen durch einen äußeren Stromkreis verbunden sind, so fließt durch das ganze System ein Induktionsstrom. Dabei ist es ganz gleich, ob der Magnet fest ist und die Spulen sich drehen, oder ob die Spulen festgehalten werden und der Magnet in Drehung versetzt wird.

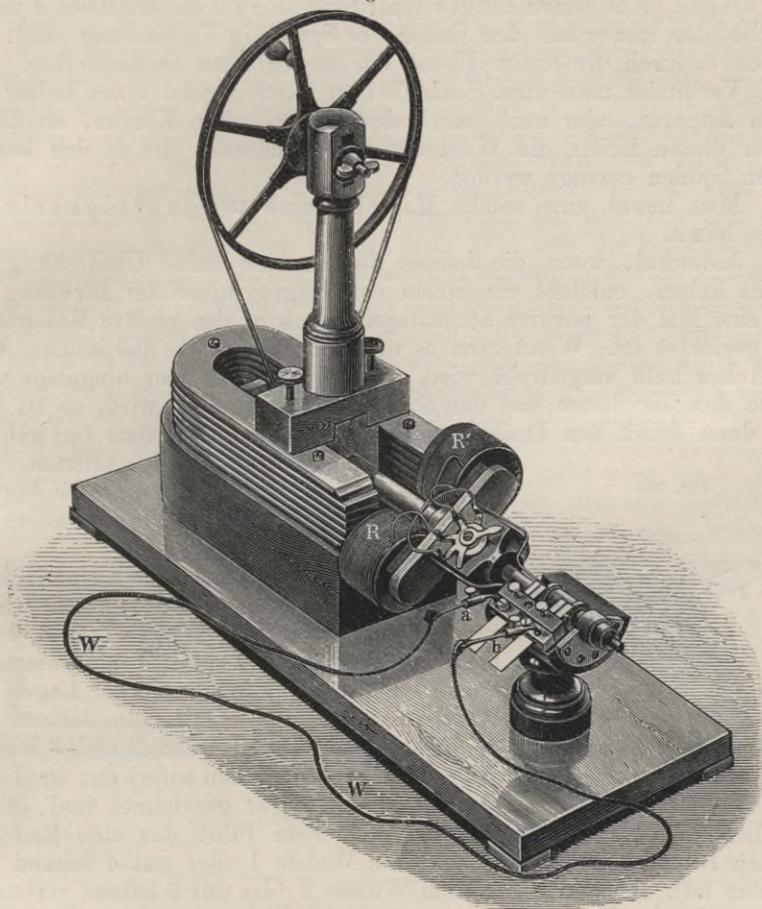
Wir wollen die Richtung des Induktionsstromes und die Größe der elektromotorischen Kraft zu bestimmen suchen, wenn der Kern mit den Spulen sich vor dem feststehenden Magneten dreht. Dabei brauchen wir bloß eine von den Spulen, etwa *A* zu betrachten, da die andere so mit ihr verbunden ist, daß die beiden induzierten Ströme in gleichem Sinne verlaufen. Die Kraftlinien gehen, wie Fig. 198 zeigt, vom Nordpol *N* aus nach allen Seiten in die Luft und gehen zum Südpol *S* hin. Es möge sich *A* in der Richtung des Uhrzeigers bewegen. Wenn die Spule *A* über dem Pole *N* steht, gehen alle Kraftlinien des Poles durch sie hindurch; fängt sie an, sich fortzubewegen, so treten mehr und mehr Kraftlinien aus ihr heraus, also fließt, nach der Maxwellschen Regel (S. 221), in der Richtung der Kraftlinien gesehen, der Strom in ihr im Sinne des



Uhrzeigers. Wir wollen die gezeichnete Reihe von Kraftlinien speziell ins Auge fassen, die von dem Nordpol in einem Bogen durch die Luft zum Südpol gehen. Dreht sich die Spule *A*, so gehen also die Kraftlinien, die erst von unten in die Spule eingedrungen sind, seitlich heraus: kommt dann die Spule bis über die Mitte ihres Weges, so dringen wieder immer mehr Kraftlinien in sie hinein, aber von oben, so daß also, von oben gesehen, der Strom umgekehrt wie ein Uhrzeiger, d. h. von unten gesehen, immer noch wie der Uhrzeiger fließt. Daraus folgt, daß sich die Richtung des Stromes auf dem ganzen Wege nicht ändert, wenn die Spule vom Nordpol zum Südpol sich dreht. Dreht sie sich

aber weiter, so dringen die von oben hereinkommenden Kraftlinien seitlich heraus und zugleich dringen von unten immer neue herein, so daß auf dem Weiterweg der Strom umgekehrt wie der Uhrzeiger fließt, während sich die Spule von S im Sinne des Uhrzeigers nach N dreht. Die Umkehrung des Stromes findet also statt, während die Spule gerade über den Polen sich vorbeibewegt. Am größten ist die elektromotorische

Fig. 199.



Kraft und daher auch der Strom dann, wenn die Spulen gerade um 90° von den Polen entfernt sind. Denn dort treten bei der Bewegung von unten die Kraftlinien aus, von oben die Kraftlinien ein, und wir haben gesehen, daß diese zusammenwirken. Bei jeder halben Umdrehung des Magnets oder des Kernes mit den Drahtspulen wird also die Richtung des Induktionsstromes in ihnen verändert. Die Spulen und der sie verbindende Draht werden von Wechselströmen durchflossen.

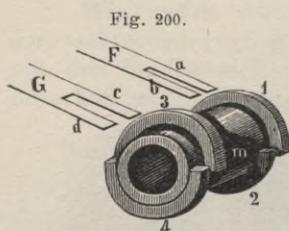
Die Einrichtung, die hier schematisch beschrieben wurde, ist nun in ähnlichen Formen vielfach wirklich ausgeführt. In dem Apparat in

Fig. 199 z. B. liegt ein kräftiger Magnet auf einer Unterlage, und vor seinen Polen werden zwei Spulen R und R', die auf Eisenkernen aufsitzen, vermittels eines Rades in rasche Rotation versetzt. Man nennt sie zuweilen Induktorrollen. Um von den beiden Enden des Drahtes dieser Rollen den Strom nach außen durch einen beliebigen Draht WW leiten zu können, werden diese Enden in zwei voneinander isolierte Ringe auf der metallischen Achse geführt, welche also mit der Achse und mit den Spulen sich drehen. Auf diesen Ringen schleifen nun zwei Metallfedern a und b, welche also immer mit den Enden der Spulen in Verbindung sind. Sie bilden dadurch die festen Enden der beweglichen Spulendrähte.

Verbindet man diese Schleiffedern durch irgend einen Leiter ww, einen Apparat, oder auch durch den menschlichen Körper, so fließen durch diesen Leiter die Wechselströme hindurch, die in den beweglichen Spulen erzeugt werden.

Man nennt eine solche Maschine eine magnetelektrische Maschine.

Jedesmal, wenn die beiden Spulen eine halbe Umdrehung gemacht haben, entsteht ein Strom von entgegengesetzter Richtung, da das eine Mal der positive Stromimpuls nach a, das andere Mal nach b hin gerichtet ist. Wenn man es nun aber einrichtet, daß immer, wenn die Achse halb umgedreht wird, auch ein Kommutator umgelegt wird, durch den der Strom von den Spulen zuerst geführt wird, so ist klar, daß dann durch den Draht zwischen a und b die Ströme fortwährend in derselben Richtung fließen müssen. Ein solcher Kommutator ist nun an diesem Apparat angebracht. Er ist in Fig. 200 besonders gezeichnet.



Auf der Achse sitzt nämlich eine Hülse m von Metall, auf welcher isoliert vier halbkreisförmige metallische Wülste 1, 2, 3, 4 aufsitzen. Die Wülste 1 und 3 und ebenso 2 und 4 entsprechen einander in der Lage. Die Wülste 1 und 4 sind miteinander leitend verbunden und ebenso 2 und 3, dagegen sind 1 und 4 von 2 und 3 isoliert. Die Wirkungsweise dieses Kommutators erhellt nun sofort aus der Figur. Die Schleiffedern F und G, die in der Figur gezeichnet sind, haben nämlich je zwei Zinken a b und c d. Nun führt das eine Ende der Spulen R und R' (Fig. 199) zu dem Wulste 1 (der mit 4 leitend verbunden ist), das andere zu dem Wulste 2 (der mit 3 leitend verbunden ist). Steht der Kommutator so wie in der Figur, so seien z. B. 1 und 4 mit dem positiven Ende des Spuldrahtes verbunden. Dann fließt der positive Strom, da a und c auf 1 und 3 schleifen, dagegen b und d in der Luft sich befinden, der Reihe nach durch

1, a, F → G, c, 3.

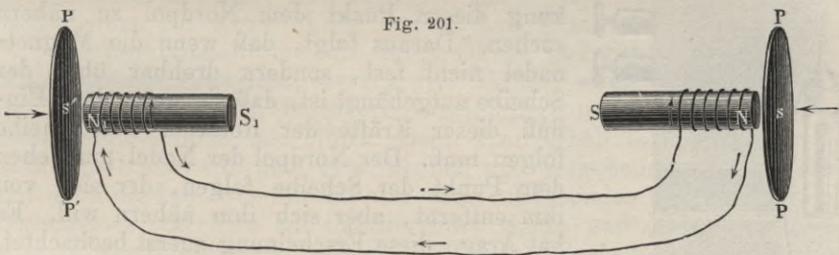
Hat sich die Achse um 180° gedreht, so sind 2 und 3 positiv, 1 und 4 negativ und es schleift jetzt b auf 2 und d auf 4, während a und c in der Luft sind. Nun geht der positive Strom durch

2, b, F → G, d, 4.

In beiden Stellungen der Achse fließt also der Strom durch den Verbindungsdraht von F nach G, man erhält also in dem Schließungskreise eine große Menge von aufeinanderfolgenden Strömen derselben Richtung, die von einem kontinuierlichen Strom nicht zu unterscheiden sind, wenn nur die Rotation der Drahtspulen eine sehr rasche ist.

Die bloße Aufwendung von Arbeit, um die Spulen vor den Magnetpolen zu drehen, hat uns also hier in den Stand gesetzt, elektrische Ströme zu erzeugen. In den galvanischen Ketten wird, wie wir gesehen haben, die elektrische Strömung dadurch erzeugt, daß Zink in ihnen aufgelöst wird. Die bei der Auflösung des Zinks entwickelte chemische Energie setzt sich direkt in elektrische Energie um. In den Thermosäulen haben wir die Energie der Wärme in elektrische Energie verwandelt. Jetzt haben wir direkt die Energie der Bewegung, die Arbeit, die wir zum Drehen unserer Spulen verwendet haben, in elektrische Energie umgesetzt. Dies ist der Punkt, an welchem die moderne Elektrotechnik mit Macht angegriffen hat und von dem aus sie ihre glänzenden Resultate erlangt hat. Wie sich die Entwicklung von dieser ersten, noch ziemlich primitiven Maschine, welche Arbeit in elektrische Energie verwandelt hat, bis zu den heutigen Riesenmaschinen gestaltet hat, werden wir im zweiten Abschnitt dieses Buches besprechen.

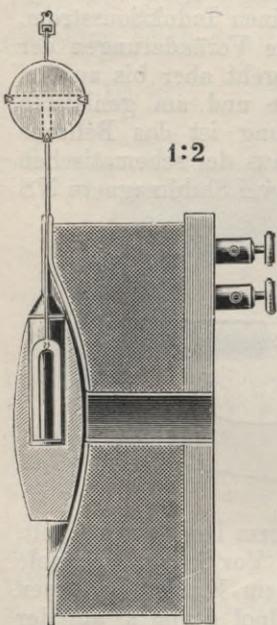
Eine jede Veränderung in der Lage und Stärke eines galvanischen Stromes oder in der Lage und Stärke eines Magneten erzeugt in einem in der Nähe befindlichen Drahtkreise einen Induktionsstrom. Bisher hatten wir immer einigermaßen erhebliche Veränderungen der Lage oder Stärke angenommen. Diese Wirkung geht aber bis zu den allerkleinsten Veränderungen. Das wunderbarste und am genialsten ausgedachte Beispiel dieser induzierenden Wirkung ist das Bellsche Telephon. Die Wirkungsweise desselben wird aus der schematischen Fig. 201 klar hervorgehen. In dieser Figur sind zwei Stahlmagnete NS



und N_1S_1 an ihren Nordpolen N und N_1 mit einem Draht umwickelt, der die beiden Magnete miteinander verbindet. Vor jedem Nordpole steht in der Nähe eine dünne Platte aus weichem Eisen. In diesen wird durch die Wirkung der Magnete je ein Südpol s und s' auf der den Magneten zugewendeten Seite induziert. Drückt man nun die eine Eisenplatte, z. B. s, ein wenig mit der Hand ein, so wird der Südpol dadurch dem Magneten und der diesen umgebenden Spirale genähert. Infolgedessen entsteht in dieser Spirale ein Induktionsstrom, welcher sich durch den Draht zu dem anderen Nordpol N_1 fortpflanzt und

diesen, da er umgekehrt wie der Zeiger einer Uhr um ihn fließt, verstärkt. Dadurch wird aber nun die Platte s' , infolge der stärkeren Wirkung des Nordpols N_1 , ein wenig an N_1 angezogen. Im Moment also, wo man s ein wenig gegen N herandrückt, wird s' ein wenig gegen N_1 herangezogen. Hätte man s ein wenig von N entfernt, so würde auch s' sich sofort von N_1 entfernen. Einer jeden noch so kleinen Bewegung von s entspricht also eine ebensolche Bewegung von s' . Wenn man nun gegen die Platte s spricht, so wird diese dadurch in sehr kleine Bewegungen, in sehr kleine Schwingungen versetzt. Jede Schwingung erzeugt einen Induktionsstrom und daher dieselbe Schwingung an der Platte s' . Diese Schwingungen der Platte s' teilen sich dann der Luft mit und so hört man in s' das, was in s hineingesprochen wurde. Wir werden im zweiten Teile Gelegenheit haben, uns mit der spezielleren Einrichtung des Telephons und mit den an diesem Schema angebrachten Verbesserungen näher zu beschäftigen.

Ebenso wie in Drähten, entstehen auch in ausgedehnten Metallmassen Induktionsströme durch Bewegung von Magneten oder Strömen. Wenn man z. B. eine kupferne Scheibe, wie es Arago getan hat, rasch um ihre Achse dreht und über derselben eine Magnetnadel fest aufstellt, so werden durch diese Bewegung der Kupferscheibe bei den Magnetpolen vorbei in der Scheibe Induktionsströme erzeugt. Die Richtung der Ströme ist dabei nach dem Lenzschen Gesetz wieder die, daß diese durch ihre elektromagnetische Wirkung die Scheibe in der entgegengesetzten Richtung fortreiben würden. Entfernt sich also z. B. in einem Moment ein Punkt der Scheibe von dem Nordpol der Magnetnadel, so würde diese elektromagnetische Wirkung diesen Punkt dem Nordpol zu nähern suchen. Daraus folgt, daß wenn die Magnetnadel nicht fest, sondern drehbar über der Scheibe aufgehängt ist, daß sie unter dem Einfluß dieser Kräfte der Rotation der Scheibe folgen muß. Der Nordpol der Nadel muß eben dem Punkt der Scheibe folgen, der sich von ihm entfernt, aber sich ihm nähern will. Es hat Arago diese Erscheinung zuerst beobachtet, aber erst durch Faradays Entdeckung der Induktionsströme wurde sie auf ihre Grundlage zurückgeführt.



Eine andere Folgerung dieser Erscheinung hat bei der Konstruktion von Galvanometern eine wichtige Anwendung gefunden. Wenn eine Magnetnadel in einem metallenen Gehäuse schwingt, so werden in diesem Metall ebenfalls Induktionsströme erregt und durch die elektromagnetische Anziehung wirken diese der Bewegung der Magnetnadel entgegen. Die Magnetnadel hört infolgedessen bald auf zu

schwingen, ihre Schwingungen werden rasch gedämpft. Man umgibt deshalb, wie wir S. 192 gesehen haben, bei vielen Galvanometern den Magneten mit einer solchen dämpfenden Kupferhülse und hat dadurch den Vorteil, daß die Nadel des Galvanometers sich rasch in ihre bestimmte Stelle begibt, ohne lange hin und her zu schwingen. Fig. 202 zeigt z. B. den Durchschnitt eines solchen Kupferdämpfers in dem oben (S. 191) abgebildeten Galvanometer von Hartmann & Braun. Man sieht den Glockenmagnet in dem Hohlraum einer Kupfermasse befindlich. Oben ist der Spiegel zu sehen, durch den die Bewegungen beobachtet werden, rechts ist der Durchschnitt der Multiplikatorwindungen gezeichnet.

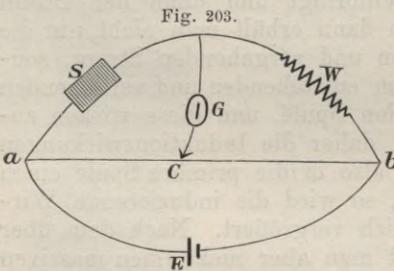
Allgemein nennt man die Ströme, die durch Induktion in ausgedehnten Metallmassen entstehen, (mißbräuchlich) Foucaultsche Ströme, oder jetzt besser Wirbelströme. Diese Wirbelströme sind häufig störend, besonders bei der Konstruktion von elektrischen Maschinen, weil zu ihrer Erzeugung ein gewisser Aufwand von Arbeit gehört, der aber nutzlos verbraucht wird, und weil diese Ströme sich nach dem Jouleschen Gesetz in Wärme umsetzen und schädliche Erhitzungen hervorbringen. Man hat deshalb bei den technischen elektrischen Maschinen sich bemüht, diese Wirbelströme zu verhindern, oder wenigstens abzuschwächen. Dieselben entstehen dort gerade in denjenigen magnetischen Eisenmassen, welche die wirksamen, induzierten Drähte tragen. Um diese Ströme zu verhindern, ist es notwendig, diese ausgedehnten Metallmassen in denjenigen Richtungen zu unterbrechen, in welchen die Wirbelströme fließen würden. Man macht deshalb Eisenkörper, in welchen Wirbelströme entstehen könnten, nicht aus einem massiven Stück, sondern setzt sie aus einer großen Reihe von einzelnen Eisenstücken zusammen, so daß in der Richtung der Wirbelströme keine zusammenhängende metallische Bahn vorhanden ist. Gewöhnlich nimmt man oxydierte Eisendrähte oder auch isolierte Eisenscheiben zur Konstruktion von solchen Metallmassen.

Die Induktionsströme, die durch Öffnen und Schließen eines primären Stromes entstehen, werden viel stärker, wenn man in die primäre Drahtspule einen Eisenkern hineinbringt und dann den Strom abwechselnd schließt und öffnet. Denn dann erhält man nicht nur die Induktionsströme von dem entstehenden und vergehenden Strom, sondern auch die Induktionsströme von dem entstehenden und vergehenden Magnetismus innerhalb der induzierenden Spule, und diese wirken zusammen, verstärken sich und machen daher die Induktionswirkungen viel kräftiger und stärker. Wenn man also in die primäre Spule einen Kern von weichem Eisen hineinbringt, so wird die induzierende Wirkung der primären Spule außerordentlich vergrößert. Nach dem über die Wirbelströme eben Gesagten nimmt man aber nicht einen massiven Eisenkern, sondern ein Bündel oxydierter Eisendrähte.

Mit den beiden bisher besprochenen Arten der Induktion, der Magnetoinduktion und Elektroinduktion, sind aber die Induktionserscheinungen noch nicht erschöpft. Es gibt noch eine dritte, besonders wichtige und interessante Art von Induktion, die ebenfalls von Faraday entdeckt wurde, die Selbstinduktion.

Ganz ebenso nämlich, wie ein galvanischer Strom bei seinem Entstehen und Verschwinden in einem in seiner Nähe befindlichen Drahtkreis Induktionsströme erzeugt, ganz ebenso erzeugt er auch in seiner eigenen Bahn derartige Ströme. Am einfachsten läßt sich diese Tatsache einsehen, wenn man einen spiralförmig gewundenen Draht nimmt und den Strom von einem galvanischen Element durch ihn hindurchsendet. Es fließt dann der Strom durch lauter parallel nebeneinander liegende Windungen. In dem Moment nun, wo der Strom unterbrochen wird, wird von jeder Windung auf die anderen Induktion ausgeübt; ebenso wird im Moment, wo der Strom geschlossen wird, auch in allen Windungen Induktion erregt. Man nennt diese Induktionsströme in der eigenen Bahn eines Stromes *Extraströme*. Beim Schließen eines Stromes fließt der erzeugte Extrastrom in entgegengesetzter Richtung durch die Spirale wie der ihn erzeugende primäre Strom. Der beim Schließen entstehende Extrastrom schwächt also den eigentlichen Strom. Daher kommt ein jeder Strom, wenn er geschlossen wird, nicht sofort zu seiner vollen Stärke, sondern erlangt diese erst allmählich, allerdings in sehr kurzer Zeit. Er kommt nämlich erst dann zu seiner vollen Intensität, wenn der Schließungs-extrastrom abgelaufen ist, seine Intensität wächst allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Werte. Beim Öffnen dagegen, wenn der Strom in einer Leitung unterbrochen wird, sucht der entstehende Öffnungsextrastrom in derselben Richtung zu fließen, wie der ursprüngliche Strom. Da der ursprüngliche Strom aber schon unterbrochen ist, so findet der Öffnungsstrom hier, in diesem einfachen Fall, keinen Weg mehr durch den Draht, ein eigentlicher Öffnungsextrastrom kommt also gar nicht zu stande. Trotzdem aber ist eine Tendenz für den Öffnungsstrom, eine elektromotorische Kraft vorhanden, welche unter geeigneten Umständen auch wirklich den Strom zum Fließen bringen kann.

Es ist zuerst nicht leicht, sich von dem Vorhandensein dieser Extraströme, die durch Selbstinduktion entstehen, eine klare Vorstellung zu verschaffen. Am einfachsten kann man sie, wenigstens den



Öffnungsextrastrom, experimentell auf folgende Weise erkennen. Man nimmt eine Spule mit vielen Windungen (in einer solchen werden die Extraströme, wie wir sehen werden, recht stark) und schaltet sie in einen Zweig einer Wheatstoneschen Drahtkombination ein, wie in Fig. 203. S sei diese Spule, E sei das galvanische Element, a, b ein ausgespannter Draht, W der Vergleichswiderstand, G sei ein empfindliches ballistisches Galvanometer

(S. 199) in der Brücke. Dann wissen wir, daß wir durch Verschieben des Kontaktes C auf der Brücke eine Stelle finden können, bei welcher das Galvanometer in der Brücke ganz stromlos ist. Die ganze Drahtkombination wird von Strömen durchflossen, nur die Brücke ist ohne Strom, und zwar ist die Stellung

von C nur abhängig von dem Verhältnis der Widerstände der vier Seitenzweige, S, W, aC, bC, gar nicht von der elektromotorischen Kraft des Elementes E. Man kann also kleine oder große elektromotorische Kräfte in E einschalten, ohne daß das Galvanometer einen Ausschlag macht, wenn es einmal auf Stromlosigkeit eingestellt ist. Wenn man nun aber, und das ist das Experiment, das den Extrastrom beweist, den Hauptstromkreis E a b öffnet, so sieht man die Nadel des Galvanometers einen plötzlichen Ausschlag machen und dann wieder in die Ruhelage zurückkehren. Dieser Nadelausschlag beweist, daß durch das Galvanometer ein momentaner Strom gegangen ist, und dieser rührt her von der Selbstinduktion in der Rolle S. Durch das Aufhören, Öffnen des primären Stromes in S ist eine elektromotorische Kraft der Selbstinduktion entstanden, welche durch S selbst und durch alle mit ihm verbundenen Leiter, also auch durch G, einen momentanen Strom sendet.

Wir können sogar, wenn wir dieses Experiment anstellen, noch mehr als bloß qualitativ das Vorhandensein des Öffnungsextrastromes erkennen, wir können auch, indem wir Spulen von verschiedener Größe und Form an die Stelle von S bringen, quantitativ bestimmen, wie die Größe der erzeugten elektromotorischen Kraft sich bei verschiedenen Spulen ändert. Tut man dies, so findet man zunächst, daß der Widerstand der Spule S nicht in Betracht kommt. Denn wenn man einen und denselben Draht das eine Mal frei ausgespannt, das andere Mal zu einer Spirale gewickelt an die Stelle S bringt, so findet man unter sonst gleichen Umständen den Ausschlag des Galvanometers das zweite Mal bedeutend größer, hunderte- und tausendmal so groß, wie im ersten Fall. Da der Widerstand des Drahtes in beiden Fällen derselbe ist, so sieht man, daß die Form des Drahtes eine wesentliche Rolle für die Größe des Extrastromes spielt. Verschiedene Rollen unterscheiden sich also dadurch, daß sie je nach ihrer Form, ob sie eng oder weit, lang oder kurz sind, viele oder wenige Windungen haben, unter sonst gleichen Umständen verschiedene Extrastrome erzeugen.

Und das ist ohne weiteres einzusehen. Denn die elektromotorische Kraft der Extrastrome hängt, wie die aller anderen Induktionsströme, ab von der Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinienzahl in der betreffenden Fläche sich ändert. Je rascher, je plötzlicher also einerseits die primäre Intensität sich ändert, um so stärker ist die elektromotorische Kraft, die Spannung des Extrastromes. Bei gleicher Änderung der Stromstärke wird aber die elektromotorische Kraft um so größer, je mehr Windungen die induzierte Spule hat, weil durch jede Windungsebene die Kraftlinien hindurchgehen. Daraus folgt, daß das Verhältnis, in welchem die erzeugte elektromotorische Kraft des Extrastromes zu der Geschwindigkeit steht, mit der die Stromstärke sich in der Spule ändert, daß dieses Verhältnis allein abhängig von der Windungszahl und Größe, also von der Form der Spule ist. Man nennt dieses Verhältnis den Koeffizienten der Selbstinduktion oder das Selbstpotential der betreffenden Spule. Das Selbstpotential einer Spule ist eine Größe, die, ebenso wie der Widerstand eines Drahtes, nur von der

Form, der Länge, dem Querschnitt, der Windungszahl der Spule, also nur von geometrischen Größen, gar nicht von der durch die Spule gehenden Stromstärke abhängt. Das Selbstpotential hängt aber, anders wie der Widerstand, nicht ab von dem Material des Drahtes. Für Kupfer-, Messing-, Aluminiumdrähte u. s. w. ist es unter sonst gleichen Umständen ganz dasselbe. Nur Eisendrähte machen wegen ihres stark magnetischen Charakters davon eine Ausnahme. Es besteht immer der Zusammenhang

Elektromotorische Kraft des Extrastroms = Selbstpotential \times Geschwindigkeit der Intensitätsänderung.

Man mißt das Selbstpotential von Drähten in einer bestimmten Einheit, welche man 1 Henry nennt. Wenn nämlich die Geschwindigkeit, mit der der Strom in einer Spule sich ändert, so groß ist, daß in jeder Sekunde sich die Stromstärke gerade um 1 Ampère ändert, so werden in Spulen verschiedener Form die dadurch entstehenden Extrastrome verschiedene elektromotorische Kraft haben. Eine Spule nun, in welcher die dann entstehende elektromotorische Kraft gerade 1 Volt ist, soll, nach dieser Festsetzung, gerade die Einheit des Selbstpotentials, 1 Henry, haben. Daraus folgt, daß für die Einheiten dieselbe Gleichung gilt

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Henry} \times \frac{1 \text{ Ampère}}{1 \text{ Sekunde}}.$$

Übrigens ist diese Einheit für die praktisch vorkommenden Fälle gewöhnlich zu groß und man nimmt deswegen den tausendsten Teil derselben als Einheit an und bezeichnet ihn als 1 Millihenry. Um einen ungefähren Begriff von der Größenordnung des Selbstpotentials von Spulen zu bekommen, kann folgende Angabe dienen. Ein Solenoid mit einer Drahtlage hat, wenn es 1 qcm Querschnitt und 1 m Länge besitzt und wenn auf ihm 1000 Drahtwindungen liegen, ein Selbstpotential von ungefähr 0,12 Millihenry, hat es 10 Drahtlagen von je 1000 Windungen, so ist das Selbstpotential auch ungefähr 10mal so groß.

Mittels der Wheatstoneschen Brücke, in der oben Fig. 203 gezeichneten Anordnung, kann man leicht die Selbstpotentiale verschiedener Spulen miteinander vergleichen. Denn der erste Ausschlag des (ballistischen) Galvanometers ist um so größer, je größer die elektromotorische Kraft des Extrastroms in der Spule S ist. Unter sonst gleichen Umständen, d. h. bei gleicher Geschwindigkeit der Intensitätsänderung ist aber diese um so größer, je größer das Selbstpotential der Spule ist. Also verhalten sich dann die Selbstpotentiale zweier Spulen wie die Ausschläge des Galvanometers. Je größer das Selbstpotential eines Leiters ist, um so stärker gespannt sind die Extrastrome, die in ihm bei Stromänderungen entstehen, je geringer das Selbstpotential ist, um so geringer. Spiralen haben großes Selbstpotential, gerade ausgespannte Drähte verhältnismäßig geringes.

Um daher die Extrastrome in einem Draht, auch wenn er lang ist und daher großen Widerstand besitzt, möglichst schwach zu machen,

muß man sein Selbstpotential möglichst klein machen. Bei einer Drahtspule kann man das dadurch bewirken, daß man den Draht bifilar wickelt, wie es Fig. 204 zeigt. Man biegt den Draht in der Mitte um und windet ihn nun so auf, daß die beiden Hälften immer nebeneinander liegen. Dann fließt offenbar der Strom in je zwei benachbarten Windungen immer nach der entgegengesetzten Richtung, und daher heben sich die Extraströme in den einzelnen Windungen gegenseitig auf. Eine solche Drahtrolle nennt man eine induktionsfreie oder bifilar gewickelte Drahtrolle. In den Widerstandskästen, die wir in Kapitel 4 besprochen haben, sind die Drahtrollen immer bifilar gewickelt.

Fig. 204.



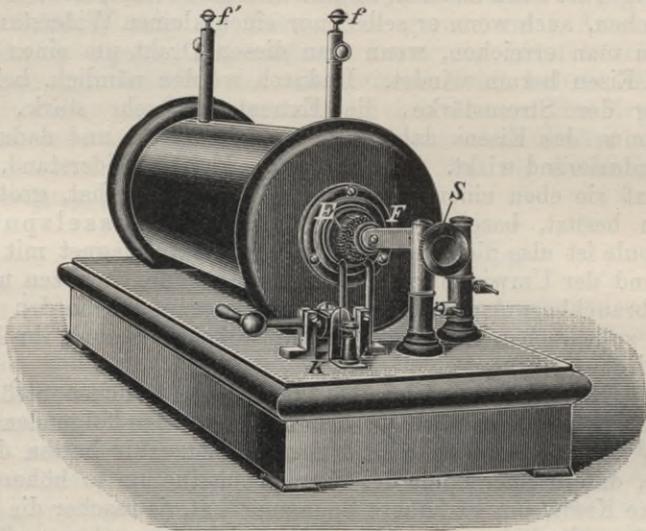
Will man umgekehrt die Extraströme in einem Draht möglichst stark machen, so muß man sein Selbstpotential möglichst groß machen, auch wenn er selbst nur einen kleinen Widerstand besitzt. Das kann man erreichen, wenn man diesen Draht um einen Kern aus weichem Eisen herum windet. Dadurch werden nämlich, bei gleicher Änderung der Stromstärke, die Extraströme sehr stark, weil der Magnetismus des Eisens dabei mit verändert wird und dadurch auch wieder induzierend wirkt. Eine Rolle, die kleinen Widerstand, aber dadurch, daß sie eben einen Kern von weichem Eisen hat, große Selbstinduktion besitzt, bezeichnet man häufig als Drosselspule. Eine Drosselspule ist also nichts anderes als ein Elektromagnet mit geringem Widerstand der Umwindung. Solche Drosselspulen besitzen unter Umständen brauchbare Anwendungsfähigkeit, worauf wir in den folgenden Kapiteln zu sprechen kommen werden, wobei sich auch ihr Name erklären wird.

Die Extraströme spielen bei allen veränderlichen Strömen eine sehr wichtige Rolle und wir werden in den beiden folgenden Kapiteln uns noch viel mit ihnen zu beschäftigen haben. Wir hatten das Gesetz gefunden, daß in einer Spule der Extrastrom eine um so höhere elektromotorische Kraft, um so höhere Spannung hat, je rascher die Intensität des primären Stromes sich ändert. Nun sieht man ohne weiteres, daß infolgedessen die Schließungs- und die Öffnungsextraströme sich nicht gleich verhalten können. Bei der Schließung eines Stromes wächst, wie oben erwähnt, die Stromstärke allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Endwert. Die Änderung der Stromstärke ist also keine plötzliche, sondern eine allmähliche und daher hat der Schließungsextrastrom eine verhältnismäßig geringe Spannung. Anders ist es bei der Öffnung eines Stromes. Gerade im Moment vor der Öffnung hat der primäre Strom noch seine volle Stärke und gleich darauf ist die Stromstärke gleich Null geworden. Die Änderung der Stromstärke bei der Öffnung eines Stromes ist daher eine sehr rasche, plötzliche, und daher folgt, daß der Öffnungsextrastrom eine sehr hohe Spannung haben muß, eine viel höhere als der Schließungsextrastrom. Dies ist nun auch in der Tat der Fall. Der Öffnungsstrom ist so hoch gespannt, daß er die Luftschicht zwischen den beiden Leitern, durch deren Trennung der Strom geöffnet ist, in einem Funken durchbricht. Obwohl er also keinen geschlossenen Weg durch den Draht

mehr findet, fließt er doch und zwar durch die Luftschicht zwischen den Unterbrechungsstellen. Öffnet man z. B. einen Strom dadurch, daß man einen Draht aus einem Quecksilbernapf herausnimmt, so wird der Öffnungsstrom so stark gespannt, daß ein heller Funke zwischen dem Quecksilber und dem Draht überspringt. Allgemein erhält man immer beim Öffnen eines nicht zu schwachen Stromes Funken, die man Öffnungsfunken nennt.

Eine weitere Folge dieser Verschiedenheit in dem Anwachsen und Abnehmen eines Stromes ist die, daß auch in einer von diesem Strom induzierten sekundären Spule die Öffnungsströme ebenfalls stärker gespannt sein werden, höhere elektromotorische Kraft haben müssen als

Fig. 205.



die Schließungsströme. Die Schließung des primären Stromes geht eben allmählich vor sich, weil der Extrastrom entgegenfließt, während die Öffnung rasch und plötzlich vor sich geht. Daher ist allgemein die Spannung von Öffnungsströmen eine viel höhere als die von Schließungsströmen.

Nachdem wir so die Eigenschaften und Gesetze der Induktionsströme, seien sie nun durch Magneto-, Elektro- oder Selbstinduktion entstanden, kennen gelernt haben, wird es nicht schwer sein, eine genaue Kenntnis von Apparaten uns zu bilden, die eine große Bedeutung in der Wissenschaft und Technik haben, nämlich von den Induktionsapparaten oder Transformatoren.

Wir sahen, daß wenn wir über eine primäre Spule eine sekundäre bringen, daß dann bei jeder Unterbrechung und Schließung des primären Stromes in jeder Windung der sekundären Spule eine elektromotorische Kraft erzeugt wird. Je größer also die Zahl der Windungen

auf der sekundären Spule ist, um so größer wird die erzeugte Spannung des Induktionsstromes.

Durch Vergrößerung der Windungszahl der induzierten Spule kann man also die elektromotorische Kraft der Induktionsströme außerordentlich steigern, auf viele Zehntausende von Volt bringen, da eben jede Windung dann die Kraftlinien schneidet und induziert wird. Man kann so von einem primären Strom mit geringer elektromotorischer Kraft, etwa 10—20 Volt, leicht einen sekundären Strom mit sehr großer elektromotorischer Kraft erzeugen. Die Apparate, welche dieses leisten, nennt man speziell Induktionsapparate.

Ein solcher Induktionsapparat (von Ernecke, Berlin) ist in

Fig. 206.

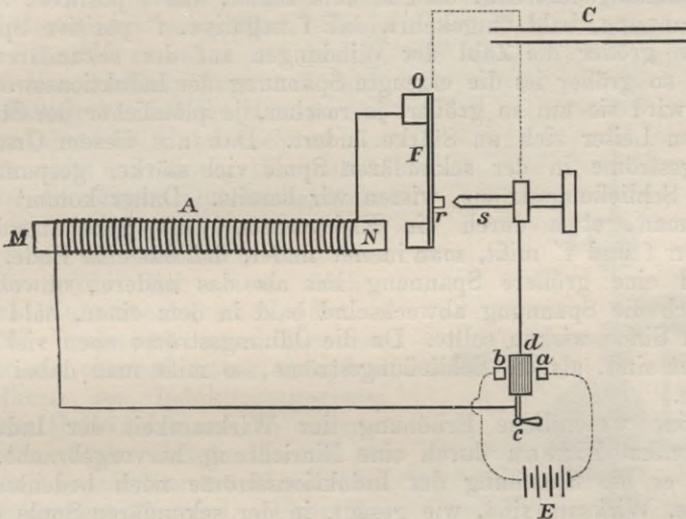


Fig. 205 gezeichnet. Das Schema desselben ist in Fig. 206 angegeben. Man sieht in diesem letzteren eine Drahtspule aus dickem Draht, A, die über einen Eisenkern MN gewickelt ist, welcher selbst aus einem Bündel Eisendrähte besteht. Dieses ist die primäre Spule. Um sie ist die äußere Spule, die nicht gezeichnet ist, isoliert herumgewickelt. Sie ist die induzierte Spule und besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes. In Fig. 205 sieht man nur den Eisenkern E, die beiden Spulen sind von einer Ebonithülle umgeben. Der primäre Strom geht (Fig. 206) von der Batterie E zunächst zu den Mittelklemmen a und b eines Kommutators, wie des in Fig. 63 gezeichneten, und von den Endklemmen c und d geht er zur primären Spule, aber durch einen Unterbrecher, einen Neef'schen Hammer, hindurch. Dieser besteht hier einfach aus einer Feder F, die an einem Fuß O befestigt ist und die ein Eisenstück gerade dem Eisenkern N gegenüber trägt. Andererseits trägt sie ein Platinstück r, welches gegen

die Spitze s , die verstellbar ist, sich anlegen oder von ihr sich fortbewegen kann. Liegen s und r aneinander an, so ist der Strom geschlossen, die Feder wird von dem Eisenkern angezogen, dadurch der Strom unterbrochen u. s. f. In Fig. 205 sieht man auch den Kommutator K und die Feder F des Unterbrechers, sowie die Schraube S , durch die die Spitze gegen das Kontaktstück bewegt werden kann. Die induzierte Spule hat ihre Enden bei f und f' und der induzierte Strom fließt von dort in diejenige Leitung, in welcher man ihn benutzen will. Die sekundäre Spule besteht hier aus sehr vielen Windungen, um die elektromotorische Kraft, die Spannung des sekundären Stromes zu erhöhen. Bei jeder Schließung und jeder Öffnung des primären Stromes durch den Hammer entsteht in der sekundären Spule ein Induktionsstoß; die Enden f und f' des sekundären Drahtes erhalten eine Spannungsdifferenz, bald in dem Sinne, daß f positive, f' negative Spannung, bald umgekehrt, daß f negative, f' positive Spannung hat. Je größer die Zahl der Windungen auf der sekundären Spule ist, um so größer ist die erzeugte Spannung der Induktionsströme und ebenso wird sie um so größer, je rascher, je plötzlicher der Strom im primären Leiter sich an Stärke ändert. Daß aus diesem Grunde die Öffnungsströme in der sekundären Spule viel stärker gespannt sind, als die Schließungsströme, wissen wir bereits. Daher kommt es, daß wenn man, etwa durch ein Elektrometer, die Spannungsdifferenz zwischen f und f' mißt, man immer findet, daß das eine Ende, z. B. f , dauernd eine größere Spannung hat als das andere, obwohl doch eigentlich die Spannung abwechselnd bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne wirken sollte. Da die Öffnungsströme eben viel stärker gespannt sind, als die Schließungsströme, so mißt man dabei nur die ersteren.

Eine wesentliche Erhöhung der Wirksamkeit der Induktionsapparate hat Fizeau durch eine Einrichtung hervorgebracht, durch welche er die Spannung der Induktionsströme noch bedeutend vergrößerte. Wirksam sind, wie gesagt, in der sekundären Spule die Öffnungsströme, die also in dem Moment entstehen, wo sich in Fig. 206 r von s abhebt. Bei dieser Unterbrechung des primären Stromes entsteht aber in der primären Rolle der Öffnungsextrastrom, der zwischen r und s große Spannung hervorruft, so daß zwischen r und s der Öffnungsfunke erscheint. Dieser Funke beeinträchtigt aber die Wirkung des Induktionsapparates. Denn er bildet eine Verlängerung der Dauer des primären Stromes. Der primäre Strom geht nicht momentan auf Null zurück, sondern allmählich, er dauert an, bis der Funke abgelaufen ist. Könnte man den Funken beseitigen oder verkleinern, so würde die Wirkung des Apparates erhöht werden. Das hat nun Fizeau getan, indem er die beiden Leiter r und s , zwischen denen die Unterbrechung stattfindet, mit den beiden Belegungen eines Kondensators verband. Dieser ist in der Figur oben als C gezeichnet. Er besteht gewöhnlich aus paraffiniertem Papier, dessen Seiten mit Stanniol belegt sind. Mehrere Schichten solcher Kondensatoren sind übereinander gelagert und die Belegungen der einen Seite, sowie die der anderen sind miteinander verbunden. Die Elektrizitätsmengen, die

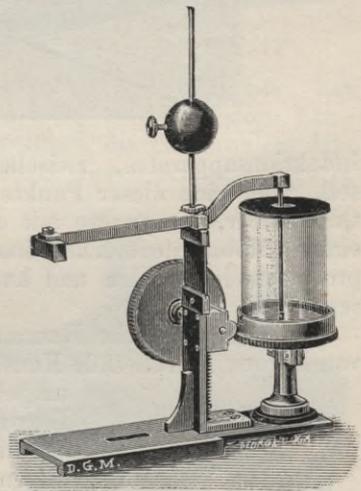
an der Unterbrechungsstelle r und s durch den Extrastrom entstehen, verbreiten sich über diesen Kondensator, der eine große Kapazität besitzt, und dadurch wird die Spannungsdifferenz an der Unterbrechungsstelle und mit ihr der Öffnungsfunke kleiner. Der Kondensator befindet sich gewöhnlich in dem Kasten, auf dem der Induktionsapparat montiert ist.

Solche Induktionsapparate, zum Teil von sehr erheblicher Größe, wurden zuerst in vollkommener Weise von Ruhmkorff in Paris konstruiert. Man nennt sie deswegen auch heute noch, selbst wenn sie von anderen gefertigt sind, zuweilen Ruhmkorffs. Da sie bisher hauptsächlich zur Erzeugung von elektrischen Funken benutzt wurden, werden sie auch häufig als Funkeninduktoren bezeichnet.

Auf die Konstruktion der Unterbrecher hat man in den letzten Jahren ganz besondere Sorgfalt verwendet und man hat sie in sehr verschiedener Art ausgeführt. Außer dem Federunterbrecher, der in Fig. 205 zu sehen und in Fig. 206 schematisch gezeichnet ist, wendet man vielfach einen auf demselben Prinzip beruhenden Hammer an, bei dem aber die Unterbrechung des Stromes nicht an einem Platinstück, sondern an einer Quecksilberfläche stattfindet, weil das Platin durch die Öffnungsfunken allmählich schlechter wirksam wird. Bei einem solchen Quecksilberunterbrecher, der in Fig. 207 besonders gezeichnet ist, schwebt ein eiserner Anker über dem Magnetkern des Induktionsapparates an einem Hebel, der auf der anderen Seite eine Spitze trägt, die in ein Gefäß mit Quecksilber taucht oder aus ihm herausgezogen wird. Über das Quecksilber in dem Gefäß schichtet man gewöhnlich Alkohol oder Wasser, um die Oxydation durch die Luft auszuschließen. Zuweilen montiert man die Unterbrecher derartig an die Induktionsapparate, daß man den Feder- und den Quecksilberunterbrecher auswechseln kann.

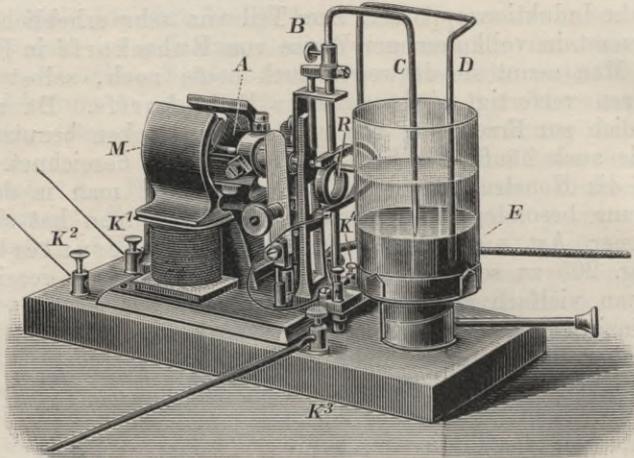
Die Feder- und die Quecksilberunterbrecher erlauben höchstens 20 Unterbrechungen des Stromes in der Sekunde zu erreichen. Um die Unterbrechungszahl zu vergrößern, hat man die beiden einfachen Apparate umgeformt. Bei den Quecksilberunterbrechern läßt man nämlich den Stift, der abwechselnd in das Quecksilber getaucht und wieder herausgezogen wird, von einem kleinen elektrischen Motor treiben. Man nennt diese Art der Unterbrecher deshalb Motorunterbrecher. In Fig. 208 ist ein derartiger gezeichnet, der von der Fabrik Voltorn in München konstruiert ist. Ein kleiner mit Draht umwickelter Eisenkern bei A, in den der Strom eines Akkumulators durch K_1 und K_2 eingeleitet wird, dreht sich zwischen den Polen eines Magneten M.

Fig. 207.



Seine Achse trägt exzentrisch einen Ring R, der bei seiner Drehung den Stift C auf und ab bewegt, wodurch dieser entweder in das Quecksilber E eintaucht oder herausgezogen wird. Von den Klemmen K_3 und K_4 geht die Verbindung nach denjenigen beiden Punkten des

Fig. 208.

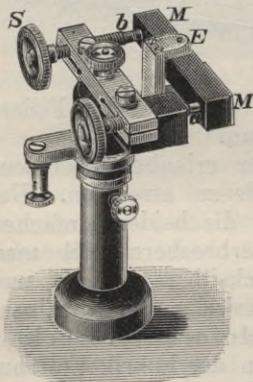


Induktionsapparates, zwischen denen die Unterbrechung stattfinden soll. Der eine dieser Punkte ist durch K_4 und den Stift D mit dem Quecksilber, der andere mit dem beweglichen Stift C verbunden. Mit einem Motorunterbrecher kann man mehr als 30 Unterbrechungen pro Sekunde erzielen und kann die Unterbrechungszahl auch bequem regulieren.

Der gewöhnliche Hammerunterbrecher ist durch eine besondere, von Deprez herrührende Konstruktion zu einem rascheren Unterbrecher umgeformt worden.

Der nach ihm genannte Deprez-Unterbrecher kann bis 45 Unterbrechungen pro Sekunde ausführen. Man sieht diesen Unterbrecher besonders gezeichnet in Fig. 209. Er besteht aus einem kleinen Stück aus weichem Eisen MM, welches um die Achse E drehbar ist. Das eine Ende (bei b) steht dem Eisenkern des Induktionsapparates gegenüber, wird angezogen, wenn dieses magnetisch ist, und unterbricht dadurch den Strom, der durch die verstellbare Spitze S und b geführt wird. Um das Eisenstück, wenn der Strom unterbrochen ist, wieder gegen die Spitze S zu legen, dient eine kleine Feder bei a, welche stärker oder schwächer gespannt werden kann. Die Kleinheit dieser Feder bewirkt, daß die

Fig. 209.



Schwingungen des Unterbrechers, der ja ganz symmetrisch gebaut ist, sehr rasche sind.

So gute Resultate auch die Deprez- und Motorunterbrecher liefern, so rasch und regelmäßig auch die Unterbrechungen mit diesen stattfinden, so werden sie doch weit übertroffen von zwei Unterbrechern, welche erst in den letzten Jahren konstruiert resp. erfunden sind. Außer der verhältnismäßig geringen Geschwindigkeit haben nämlich die bisher beschriebenen Unterbrecher auch den Nachteil, daß sie nicht erlauben, sehr starke Ströme zu unterbrechen, weil bei diesen die Öffnungsfunken so kräftig werden, daß sie die Unterbrecher ruinieren. Die Quecksilberunterbrecher sind in dieser Beziehung den Platinunterbrechern überlegen.

Um nun starke Ströme sehr viel rascher zu unterbrechen, als man es bisher konnte, hat die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) eine besondere Konstruktion des Quecksilberunterbrechers ausgeführt, die das Problem tatsächlich sehr vollkommen löst. Sie bezeichnet diesen Apparat, der in Fig. 210 in äußerer Ansicht dargestellt ist, als Turbinenunterbrecher. Der neue Gedanke ist dabei, daß erstens keine hin und her gehende Bewegung, sondern eine rotierende stattfindet, und daß zweitens nicht die festen Teile es sind, welche rotieren, sondern das Quecksilber selbst. In dem Gefäß, rechts in der Figur, befindet sich am Boden Quecksilber, bedeckt mit Alkohol. Fig. 211 zeigt das Innere dieses Gefäßes. In das Quecksilber taucht ein Metallrohr ein, von dem aus eine seitliche Ausflußöffnung, an der runden Scheibe in der Figur sichtbar, einem Quecksilberstrahl den Austritt gewährt. Die runde Scheibe wird noch von dem Alkohol bedeckt. Das Rohr wird durch einen Elektromotor (links in der Fig. 210) mittels Schnurübertragung in rasche Rotation versetzt und saugt das Quecksilber durch die Zentrifugalkraft auf, so daß es aus der horizontalen Ausflußöffnung in einem kräftigen Strahl ausspritzt. Der Strahl trifft nun auf einen Metallring, der mit Aussparungen versehen

Fig. 210.

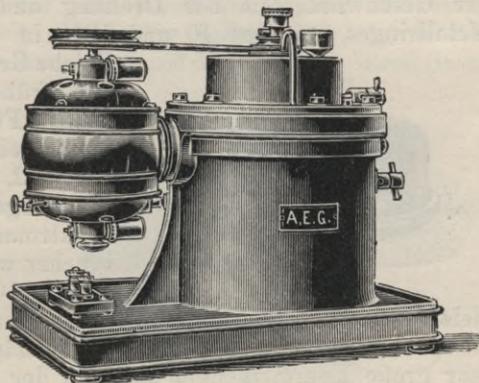
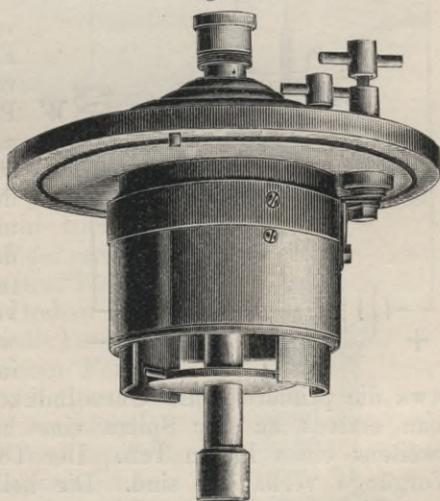
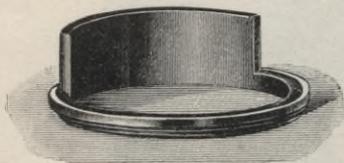


Fig. 211.



ist, so daß er abwechselnd das Metall trifft oder durch die Öffnung hindurchspritzt. Nun ist das Quecksilber mit dem einen Pol der Batterie verbunden, der Metallring mit der primären Spule des Induktionsapparates, und man sieht, daß man bei der Rotation des Quecksilbers abwechselnd Schließungen und Öffnungen des Stromes bekommt, die je nach der Geschwindigkeit der Drehung und der Zahl der Segmente des Metallringes zwischen 10 und 1000 in der Sekunde variieren können.

Fig. 212.

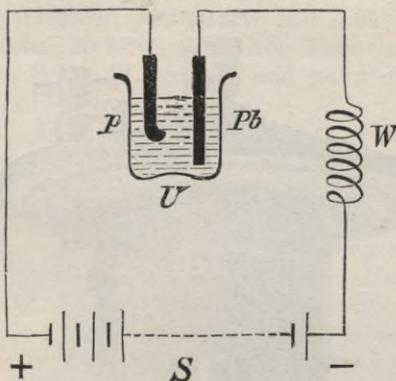


Solche Geschwindigkeiten lassen sich mit den früheren Unterbrechern nicht erzielen. Für gewöhnlich benutzt man den Unterbrecher mit einem Metallring, wie Fig. 212, bei welchem man 100 Unterbrechungen in der Sekunde erzielt. Der Elektromotor und der Turbinenunterbrecher werden mit einer Spannung von zirka 110 Volt betrieben, wie sie in

vielen Städten jetzt eingeführt ist. Durch die hohe Spannung erhält die primäre Spule sehr hohe Stromstärken und infolgedessen treten sehr große Energiemengen auch in der sekundären Spule auf.

Dasselbe, was dieser sorgfältig konstruierte Apparat leistet, dasselbe leistet ein Unterbrecher ganz anderer Art, der von Wehnelt erfunden wurde und der von ihm „elektrolytischer Unterbrecher“ genannt wurde, und der wenigstens für kurzen Gebrauch das Einfachste darstellt, was in diesem Gebiet bisher erfunden wurde.

Fig. 213.



Wenn man in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure, wie U in Fig. 213, zwei Elektroden eintaucht, von denen die eine eine große Platte Pb, etwa aus Blei, ist, während die andere aus einer Platinspitze p besteht, die durch ein Glasrohr hindurch in die Flüssigkeit geführt wird, und wenn man diese Elektroden mit den Polen einer großen Batterie S (etwa von 100 Volt Spannung) so verbindet, daß die Spitze Anode wird, und wenn man ferner noch in diesen Kreis eine Drahtrolle W,

etwa die primäre Rolle eines Induktionsapparates einschaltet, so sieht man erstens an der Spitze eine helle Leuchterscheinung und hört zweitens einen lauten Ton. Der Ton beweist, daß hier periodische Vorgänge vorhanden sind. Die helle Leuchterscheinung kommt von dem Glühen der Gase, welche sich an den Elektroden in großer Menge entwickeln. An der Spitze p entwickelt sich Sauerstoff. In der Tat finden in dieser Zelle sehr rasche Unterbrechungen und Schließungen des Stromes statt, so daß sie einen ganz selbsttätigen Unterbrecher darstellt. Die Ursache dieser Unterbrechungen ist nicht sofort einzusehen, sie ist auch keine einfache. Durch den Strom, der infolge der

Selbstinduktion der Rolle W allmählich ansteigt, wird zuerst an p Sauerstoff entwickelt, ferner aber wird, weil der Querschnitt der Strombahn an der Spitze am geringsten ist, dort die größte Joulesche Wärme entwickelt, so daß sich die an der Spitze anliegenden Flüssigkeitsteilchen in Dampf verwandeln. Der Sauerstoff und dieser Dampf werden durch die Hitze selbst glühend, der Strom geht durch die Gashülle hindurch von der Spitze in die Flüssigkeit. Bald aber zerlegt sich, durch die große Hitze, der Wasserdampf in Sauerstoff und Wasserstoff; diese Gase nehmen ein größeres Volumen ein, so daß die Gasschicht zwischen Spitze und Flüssigkeit so groß wird, daß der Strom nicht mehr hindurchgehen kann. Der Strom ist unterbrochen, wobei durch die Selbstinduktion ein starker Öffnungsfunke entsteht. Die Gasblasen steigen nun sofort in die Höhe, dadurch kommt die Flüssigkeit wieder in Berührung mit der Spitze und der Strom fängt wieder an zu fließen und es geht der Prozeß weiter. Das langsame Ansteigen des Stromes durch die Selbstinduktion der Rolle ist bei diesem Prozeß wichtig. Je nach der Selbstinduktion, der Größe der Spannung der Batterie und der Größe der Spitze erhält man auf diese Weise Unterbrechungen, deren Zahl zwischen 260 und 2000 in

der Sekunde variiert, also enorm groß ist. Eine Form dieses Unterbrechers ist in Fig. 214 gezeichnet (von Ernecke, Berlin). Auf der linken Seite der Flüssigkeitszelle sieht man als negative Elektrode eine Bleiplatte, auf der rechten Seite ist durch die Glaswand die positive Platinspitze hineingesteckt, die durch Drehen der Schraube weiter oder weniger weit in die Flüssigkeit tauchen kann. Bei einer anderen Form, Fig. 215, die von Siemens & Halske hergestellt wird, ist die Spitze nicht seitlich eingeführt, sondern geht vielmehr durch ein Porzellanrohr hindurch, das an dem Deckel des Apparates befestigt ist. Durch die Schraube aber kann sie weiter oder weniger weit aus dem Rohr hinausgeschraubt werden. Die andere Elektrode, die Bleiplatte, ist um das Rohr herumgelegt.

Der Wehneltunterbrecher hat nur den einen Übelstand, daß durch die starken Ströme sich die Flüssigkeit sehr rasch erhitzt, so daß

Fig. 214.

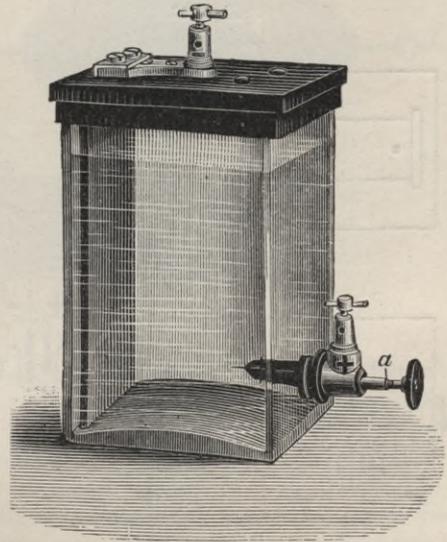


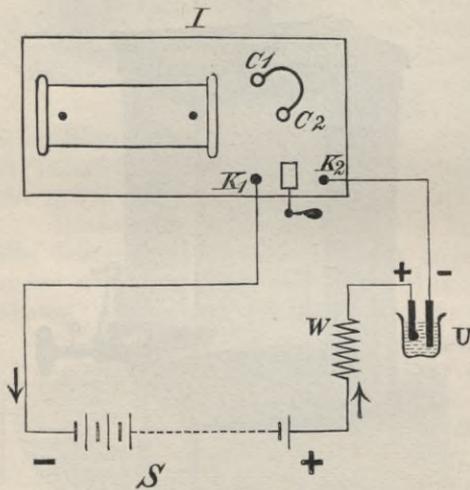
Fig. 215.



man den Strom nur immer ganz kurze Zeit hindurchsenden darf. Bei komplizierteren Ausführungsformen bringt man deswegen in das Gefäß noch ein Kühlrohr hinein, durch welches man dauernd Wasser zum Abkühlen der Schwefelsäure fließen läßt.

Will man einen solchen Unterbrecher zum Betrieb eines Funkeninduktors benutzen, so hat man nur den gewöhnlichen Unterbrecher (Platin- oder Quecksilberunterbrecher) kurzzuschalten, d. h. die beiden gewöhnlich getrennten Stücke desselben direkt oder durch einen dicken Draht zu verbinden. In Fig. 216 ist eine solche Schaltung gezeichnet.

Fig. 216.



Von der Batterie S (am besten etwa 100 Volt, es genügen aber schon 30 Volt) geht der Strom durch den Unterbrecher U zum Kommutator $K_1 K_2$ des Induktionsapparates. Der gewöhnliche Unterbrecher $C_1 C_2$ mit dem Kondensator ist kurzgeschaltet.

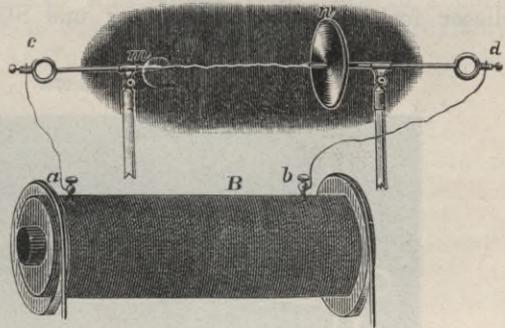
Die Spannung, die in der sekundären Spule solcher Induktionsapparate erzeugt wird, ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je mehr Windungen die sekundäre Spule hat. Durch Anwendung von sehr vielen Windungen (man hat bis zu 100 000 angewendet) kann man also mit den Induktionsapparaten sehr hohe Spannungen erzeugen. Wie wir

aber in dem ersten Kapitel gesehen haben, muß Elektrizität von hoher Spannung sehr sorgfältig isoliert werden, damit sie nicht entweicht. Es ist deshalb bei den Apparaten dieser Art immer notwendig, die Drähte sorgfältig zu isolieren. Dies geschieht dadurch, daß man sie ganz in Paraffin einbettet und jede Drahtlage von der anderen durch gut paraffiniertes Papier sorgfältig trennt.

Alle diejenigen Erscheinungen, zu denen eine große Spannung der Elektrizität gehört, lassen sich durch Induktionsapparate in vorzüglicher Weise ausführen. Wir haben insbesondere schon mehrfach gesehen, daß Elektrizität von hoher Spannung im Stande ist, den Widerstand leicht zu überwinden, welchen eine Luftschicht, die sich zwischen den Enden der Leitungsdrähte befindet, dem Strom entgegenstellt. Die Elektrizität aus einer Elektrisiermaschine geht leicht zwischen den Elektroden durch die Luft über. Es bildet sich der elektrische Funke, weil eben die Spannung der Elektrizität von einer Elektrisiermaschine sehr erheblich ist. Hier bei unseren Induktionsapparaten haben wir ebenfalls Elektrizität von außerordentlich hoher Spannung und wir können daher durch solche Induktionselektrizität auch die Erscheinungen des elektrischen Funkens erhalten, wie mit der Elektrisiermaschine.

Eine Einrichtung zu diesen Versuchen ist in Fig. 217 abgebildet. Man sieht darin die Induktionsrolle B, welche innen die induzierende Spule und einen Eisenkern enthält. Die Enden der Induktionsspule a und b sind durch Drähte mit den Enden d und c zweier verschiebbarer Metallstäbe verbunden, von denen der eine in einer Spitze m, der andere in einer Scheibe n endet. Sobald der Apparat im Gang ist, kommt induzierte Elektrizität von außerordentlich hoher Spannung an die Spitze m und die Scheibe n und durchbricht die Luftschicht dazwischen in einem glänzenden, klatschenden Funken. Je stärker die Spannung ist, um so weiter können Spitze und Scheibe auseinander gebracht werden, ohne den Funkenübergang aufhören zu lassen. Es ist daher umgekehrt die Größe des Abstandes, in dem gerade noch Funken übergehen, die sogenannte Schlagweite, ein Maß und ein

Fig. 217.



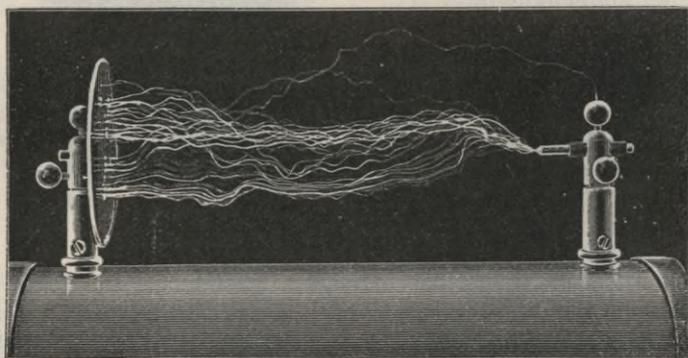
Kennzeichen für die Größe der erzeugten Spannung. Deswegen klassifiziert man die Induktionsapparate nach dieser Schlagweite und spricht von Apparaten mit 5, 10, 15 cm u. s. w. Schlagweite. Schlagweiten bis 30 cm lassen sich durch verhältnismäßig kleine und einfache Apparate erzeugen. Bei größeren Schlagweiten (man ist bis zu 1 m Länge bisher gekommen) macht die Herstellung genügender Isolation gegen die hohen Spannungen große Schwierigkeiten, doch werden so große Apparate jetzt von einigen Fabriken mit Sicherheit hergestellt, insbesondere geben die großen Induktionsapparate von Klingelfuß in Basel mit Sicherheit Funken von 1 m Länge, selbst bei einmaliger Unterbrechung des primären Stromes.

Wenn man Induktionsapparate mit den neueren Unterbrechern, dem Turbinen- oder dem Wehntunterbrecher betreibt, so werden diese Funkenerscheinungen viel glänzendere. Da man nämlich dann gewöhnlich einen Strom von 100—120 Volt Spannung in die primäre Spule hineinsendet, während man bei den Feder- und Quecksilberunterbrechern höchstens 16—20 Volt anwendet, so ist die Energiemenge, die in den primären Kreis hineingegeben wird, eine viel größere als sonst und daher ist auch die Energiemenge, die man im sekundären Kreis erhält, eine sehr große. Das heißt aber, bei gleicher Spannung in der sekundären Rolle ist die Stromstärke, die man erhält, eine viel größere. Infolgedessen bekommt man zwischen Spitze und Platte nicht bloß einen glänzenden Funken, sondern man bekommt ein glänzendes Funkenbüschel, einen ganzen Lichtstrom, der auch mit einem sehr betäubenden Getöse verbunden ist. In Fig. 218 ist eine Abbildung dieser Erscheinung gegeben, wie sie schon ein Induktionsapparat von 40 cm Schlag-

weite ergibt, wenn er mit einem dieser neuen Unterbrecher betrieben wird.

Es ist übrigens nicht notwendig, den primären Strom immer durch einen Unterbrecher öffnen und schließen zu lassen, um Induktionsströme zu erhalten. Das ist nur eine von den vielen Möglichkeiten, wie man Induktionsströme in der sekundären Spule erzeugen kann. Eine andere, vielfach benutzte Methode besteht darin, daß man Wechselströme durch die primäre Spule hindurchsendet, die man etwa in einer magnet-elektrischen Maschine (S. 223) erzeugt hat. Läßt man solche Wechselströme durch die primäre Spule hindurchgehen, so ändert sich ja in dieser fortwährend die Richtung und Stärke des Stromes und daher

Fig. 218.



müssen auch in einer die primäre umgebenden Spule fortwährend Induktionsströme entstehen, da jede Veränderung in dem primären Strom einen Induktionsstrom erzeugt.

Die elektromotorische Kraft, die Spannung der Induktionsströme ist, wie wir sahen, um so größer, je größer die Zahl der sekundären Windungen und je größer die primäre Stromstärke ist. Dies benutzt man in den Induktionsapparaten, um aus einem primären Strom von geringer Spannung (einigen Volt), aber verhältnismäßig großer Stärke umgekehrt durch Induktion Ströme von sehr hoher Spannung aber geringer Intensität zu erzeugen. Man kann aber auch umgekehrt durch Induktion die Stromstärke im sekundären Strom größer und die Spannung im sekundären Strom geringer machen als im primären. Wenn man nämlich die sekundäre Spule aus sehr wenigen, dicken Windungen macht und dagegen die primäre Spule aus sehr vielen Windungen bestehen läßt und durch sie Wechselströme von hoher elektromotorischer Kraft, aber dabei geringer Intensität hindurchsendet, so ist klar, daß in der sekundären Rolle die Verhältnisse gerade die entgegengesetzten werden. Es wird nämlich die induzierte elektromotorische Kraft verhältnismäßig klein, weil sehr wenig sekundäre Windungen vorhanden sind und weil die primäre Stromstärke gering ist. Dagegen kann der sekundäre Strom stark werden, weil der innere Widerstand sehr ge-

ring ist, indem er eben nur aus einigen Windungen dicken Drahtes besteht.

So hat man es also durch Induktionsapparate in der Hand, vermittels primärer Ströme von großer Intensität und geringer Spannung sekundäre Ströme zu erzeugen von großer Spannung und geringer Intensität und umgekehrt. Die in jeder Sekunde entwickelte Energie in einem elektrischen Strom ist ja (s. S. 114) das Produkt aus seiner Spannung und seiner Intensität. Man sieht also, daß man durch Induktion die elektrische Energie eines Stromes in andere Form bringen, verwandeln kann, ohne natürlich ihre Menge vergrößern zu können. Praktische Verwendung hat diese Umwandlung außer in den Induktionsapparaten erfahren in den Transformatoren, von welchen im zweiten Teil, Kapitel 4, die Rede sein wird.

10. Kapitel.

Die Wechselströme und Drehströme.

Die galvanischen Säulen und die Thermosäulen liefern, wenn sie durch den äußeren Stromkreis geschlossen werden, galvanische Ströme, welche dauernd dieselbe Richtung haben. Stets fließt im Stromkreis, z. B. eines Daniellschen Elements, der positive Strom vom Kupferpol durch den äußeren Stromkreis zum Zinkpol. Solche Ströme nennt man deshalb gleichgerichtete Ströme, oder kurz Gleichströme, und sie waren es lange Zeit allein, welche beachtet und genau studiert wurden. Ihr Grundgesetz ist das Ohmsche Gesetz.

Dagegen haben wir bei der Behandlung der Induktionserscheinungen zum erstenmal das Auftreten von Strömen anderer Art in einem Stromkreis kennen gelernt, von Strömen, deren Richtung rasch hintereinander wechselt und welche man deshalb Wechselströme nennt. Die Eigenschaften dieser Wechselströme wurden Jahrzehnte hindurch wenig näher untersucht. Man hielt sie lange Zeit für ein unerwünschtes Produkt der Induktion und suchte nach Mitteln, um aus ihnen durch passende Kommutierung Gleichströme entstehen zu lassen. Die eigentümlichen Erscheinungen und Gesetze dieser Ströme, oder vielmehr die eigentümlichen Modifikationen, die das Ohmsche Gesetz bei seiner Anwendung auf sie erfährt, wurden erst spät Gegenstand der allgemeineren Untersuchung. Dabei aber hat sich gezeigt, daß die Wechselströme uns viel mannigfaltigere Erscheinungen bieten als die Gleichströme, so daß sie vom wissenschaftlichen Standpunkt interessanter und vom praktischen Standpunkt mindestens ebenso wichtig sind, wie die Gleichströme, und wir wollen daher ihre Eigenschaften im Zusammenhang besprechen.

Wechselströme werden durch abwechselnde Induktionswirkungen leicht erzeugt, sei es durch Schließen und Öffnen eines primären Stromes, oder durch Verstärken und Schwächen, oder durch Annähern und Entfernen desselben an einen sekundären Kreis, oder bei der Magnetinduktion durch Erzeugung und Vernichtung eines Magneten, oder durch Nähern oder Entfernen desselben. Diese verschiedenen Erzeugungsweisen bringen in einer Induktionsrolle immer abwechselnd einen Strom in der einen Richtung, dann einen Strom in der entgegengesetzten Richtung hervor, die also in der Induktionsrolle selbst und in deren äußerem Schließungskreis fließen.

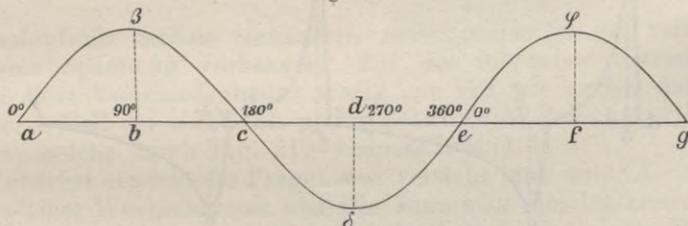
Um in die Verhältnisse einen näheren Einblick zu gewinnen,

nehmen wir an, daß wir unsere kleine Maschine haben, die in Fig. 190 auf S. 223 gezeichnet ist, in welcher durch gleichmäßige Drehung der Drahtrollen R und R' vor den Polen des Magneten Induktionsströme von abwechselnder Richtung erzeugt werden.

Die Spannungsdifferenz der beiden Enden der Drahtrollen (die zunächst offen, nicht durch den äußeren Stromkreis geschlossen seien) wird bei Beginn der Drehung zunächst eine bestimmte Größe bekommen, diese wird bis zu einem Maximalwert zunehmen, dann wieder abnehmen. Wenn die Rollen vor den Polen des Magneten gerade vorbeigehen, wird kein Strom induziert. Dann ist die Spannungsdifferenz Null. Drehen sich die Rollen weiter, so wird die Spannungsdifferenz zunächst wachsen, positive Werte bekommen, diese werden bis zu einem Maximum ansteigen, dann wieder abnehmen, bis die Rollen sich um 180° gedreht haben. Dann ist die Spannungsdifferenz der Enden wieder Null und bei weiterer Drehung wird sie nun negative Werte bekommen, das vorher positive Ende des Drahtes wird nun negativ sein und diese negative Spannungsdifferenz wird nun auch wieder bis zu einem Maximalwerte wachsen, dann abnehmen, durch Null hindurchgehen und dann wird die Spannungsdifferenz wieder positiv werden.

Wir können diesen Verlauf der Spannungsdifferenz, der elektromotorischen Kraft, leicht durch eine Zeichnung darstellen. In Fig. 219

Fig. 219.



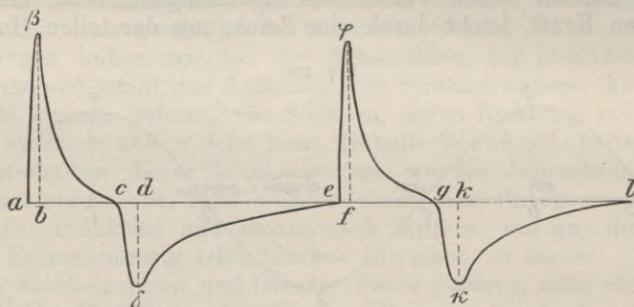
sind die Werte der elektromotorischen Kraft durch Linien dargestellt, die senkrecht auf die Linie ag gezeichnet sind. Im Punkt a ist die elektromotorische Kraft gleich Null. Der Punkt a entspricht also der Stellung der Rollen, bei denen sie gerade über den Magnetpolen sich befinden. Die elektromotorische Kraft wächst dann nach der einen Richtung bis zum Punkt b , wo sie am größten ist ($b\beta$), wo also die Rollen in einer Richtung sich um 90° gedreht haben. Sie nimmt dann ab bis zum Punkt c , wo sie Null wird. Dort haben sich die Rollen um 180° von der Anfangslage aus bewegt. Dann kehrt die elektromotorische Kraft ihre Richtung um, was durch die nach unten gezogenen Linien angedeutet ist. Sie wächst in dieser Richtung bis d , und nimmt dann wieder ab bis e . Am letzteren Punkte sind die Rollen nach einer Drehung von 360° gerade wieder in ihre ursprüngliche Lage gekommen, sie haben eine vollständige Umdrehung gemacht und nun wiederholt sich derselbe Vorgang von neuem. Man nennt die Zeit, in welcher eine solche vollständige Umdrehung gemacht wird, die Periode der Drehung. Und wir sehen, die elektromotorische Kraft des Wechselstromes hat dieselbe Periode, wie die Drehung des Rollenpaares. Nach

einer vollständigen Umdrehung (z. B. in $\frac{1}{100}$ Sekunde) durchläuft die elektromotorische Kraft wieder genau dieselben Werte. Man bezeichnet ferner die Winkel, um welche die Rollen sich von einer festen Anfangslage aus gedreht haben, als die Phasen der Bewegung. Bei der Phase 0 ist also die Spannung 0, bei der Phase 90° am größten u. s. w.

Werden nun die Enden unserer Rollen durch einen äußeren Leiter verbunden (von dem wir jetzt annehmen wollen, daß er kein erhebliches Selbstpotential [S. 229] besitzt, also etwa eine bifilar gewundene Rolle), so fließen durch diesen Draht die Wechselströme hindurch, d. h. Ströme, deren Intensität und Richtung sich ebenfalls periodisch ändert und zwar wird die Stromstärke ebenfalls durch eine solche Wellenkurve angegeben sein, wie in Fig. 219. Die Stromstärke wird also in a gleich Null sein, sie wird bis zu einem Maximum wachsen, dann wieder abnehmen bis Null; dann wird der Strom seine Richtung ändern, die Stromstärke in dieser Richtung wird wieder bis zu einem Maximum wachsen, dann abnehmen bis Null u. s. w.

Man erhält also auch periodische Veränderungen der Stromstärke in dem Schließungskreis. Dabei ist es aber gar nicht nötig, daß die

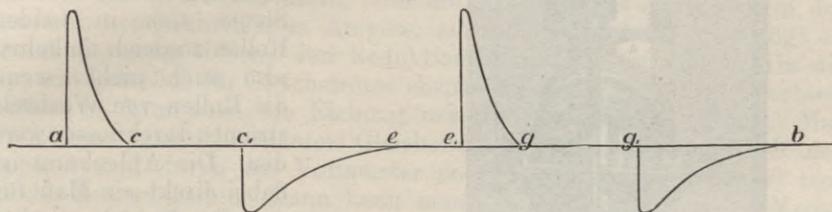
Fig. 220.



elektromotorische Kraft und die Stromstärke so regelmäßig ab- und zunehmen, wie es in unserer Figur gezeichnet ist und wie es bei der beschriebenen Anordnung tatsächlich der Fall ist. Nehmen wir z. B. an, wir erzeugen in einer Rolle Wechselströme dadurch, daß wir einen in der Nähe befindlichen primären Strom durch einen Neef'schen Hammer abwechselnd öffnen und schließen. Wir sahen (S. 231), daß der Öffnungsinduktionsstrom viel plötzlicher ansteigt und viel höhere elektromotorische Kraft hat, als der Schließungsstrom. Wenn daher der Neef'sche Hammer arbeitet, so wird der Verlauf der elektromotorischen Kraft und daher auch des Stromes in unserem sekundären Kreis etwa so sein, wie es Fig. 220 angibt. Im Moment des Öffnens bei a steigt die elektromotorische Kraft rasch an bis β und fällt sofort wieder bis Null; beim Schließen steigt die elektromotorische Kraft im umgekehrten Sinne langsamer und weniger hoch bis δ und fällt wieder bis Null u. s. w. Auch hier bekommt man periodische Ströme insofern, als nach jeder Öffnung und Schließung der Verlauf sich wiederholt, aber man bekommt keine einfach periodischen Wechselströme. Ja der Verlauf der induzierten Ströme in einer solchen Rolle ist sogar noch komplizierter.

Wenn nämlich der Neef'sche Hammer arbeitet, so macht er etwa 10 bis 30 Stromschließungen und Stromöffnungen in der Sekunde. Die Periode dieser Wechsel ist also $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{30}$ Sekunde. Innerhalb dieser Periode entsteht zuerst ein Öffnungsstrom, der stark ansteigt und rasch abfällt und der vielleicht im ganzen $\frac{1}{10000}$ Sekunde dauert. Dann ist eine ganze Zeit der Stromkreis stromlos, bis nach etwa $\frac{1}{15}$ Sekunde der Strom durch den Hammer geschlossen wird und nun der Schließungsstrom in der sekundären Spule weniger steil verläuft. Auch dieser dauert aber nur sehr kurze Zeit, etwa $\frac{1}{10000}$ Sekunde, und dann ist die Spule wieder stromlos, bis zur nächsten Öffnung. Der Verlauf der elektromotorischen Kraft wird also in Wirklichkeit durch eine Zeichnung wie in Fig. 221 dargestellt. Der Periode entspricht die Strecke a bis e₁. In dieser Periode sind aber nur zwei

Fig. 221.



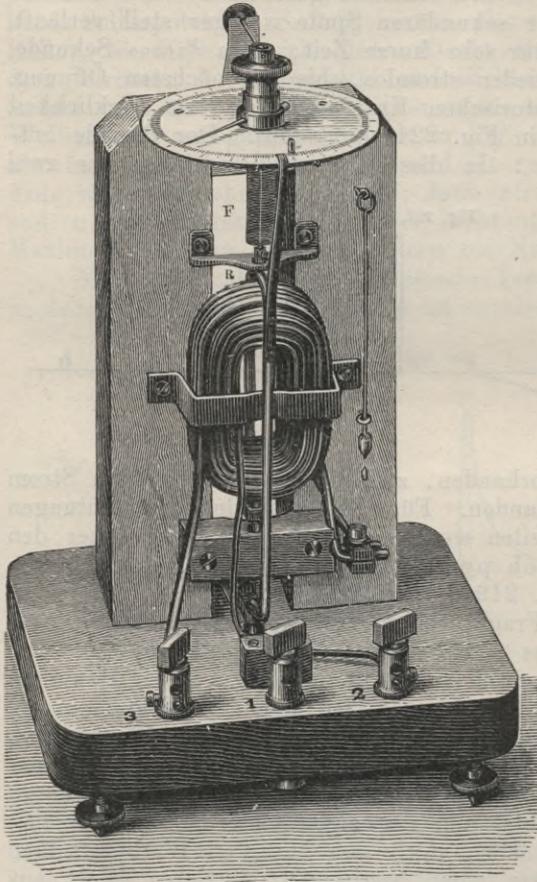
kurz verlaufende Ströme vorhanden, zwischendrin ist gar kein Strom und keine Spannung vorhanden. Für die folgenden Betrachtungen machen diese Verschiedenheiten wenig aus und wir wollen daher den einfacheren Fall der einfach periodischen Wechselströme betrachten, welche durch Fig. 219 dargestellt sind.

Zunächst entsteht die Frage: was versteht man unter der Stromstärke eines Wechselstroms und wie kann man dieselbe messen? Die Stromstärke wächst ja periodisch von Null an bis zu einem Maximum und nimmt dann wieder ab, es hat also bei einem Wechselstrom die eigentliche Stromstärke in jedem Moment einen anderen Wert. Man ist nun übereingekommen, unter der Stromstärke eines Wechselstromes eine mittlere Stromstärke während der Dauer einer Periode zu verstehen, also nicht das Maximum der eigentlichen Stromstärke (die Linien $b\beta$ resp. $d\delta$ in Fig. 219), noch den kleinsten Wert derselben — nämlich Null —, sondern einen bestimmten mittleren Wert aus allen Einzelwerten der Stromstärke.

Wie kann man nun die Stromstärke eines Wechselstromes messen, in Ampère ausdrücken? Jedenfalls nicht durch ein Voltmeter, denn ein solches reagiert nur auf Gleichströme; ebensowenig durch ein Galvanometer, denn die Magnetnadel würde durch die beiden aufeinanderfolgenden entgegengesetzten Ströme auch entgegengesetzt abgelenkt werden, also in Ruhe bleiben. Man kann also nur entweder die Wärmewirkungen (die Joulesche Wärme) oder die elektrodynamischen Wirkungen der Ströme zum Messen von Wechselströmen benutzen; denn die ersten sind ganz unabhängig von der Richtung des Stromes und die zweiten lassen sich auch so anwenden, daß die Stromrichtung ohne Belang ist.

Beide Methoden sind angewendet worden, wir wollen aber hier nur die zweite besprechen, die Messung von Wechselströmen durch Elektrodynamometer. Bei den Elektrodynamometern (S. 206) ist immer eine feste und eine bewegliche, vom Strom durchflossene Rolle vorhanden, von denen die letztere von der ersten abgelenkt wird mit

Fig. 222.



einer Kraft, die von dem Produkt der Stromstärken in beiden Rollen abhängt. Sind also beide Rollen von demselben Strom durchflossen, so hängt die Ablenkung von dem Quadrat der Stromstärke ab und ändert ihre Richtung nicht, wenn der Strom sich in beiden Rollen zugleich umkehrt, also auch nicht, wenn die Rollen von Wechselströmen durchflossen werden. Die Ablenkung ist dabei direkt ein Maß für das Quadrat der (mittleren) Stromstärke der Wechselströme. Ist daher das Elektrodynamometer geeicht, ist sein Reduktionsfaktor bestimmt (S. 189), so kann man aus seinen Angaben die Stromstärke eines Wechselstroms direkt in Ampère finden.

Ein solches Elektrodynamometer für schwache Ströme, welches zu rein wissenschaftlichen Messungen gebraucht wird, mit Spiegelablesung,

haben wir oben (S. 206) beschrieben. Für stärkere Ströme haben Siemens & Halske ein sehr brauchbares Elektrodynamometer konstruiert, das in Fig. 222 abgebildet ist. Die bewegliche Rolle besteht hierbei aus einem einzigen dicken Kupferstreifen, welcher an einer Feder F aufgehängt ist und mit Spitzen in Quecksilbernäpfchen taucht. Dieser Kupferstreifen trägt einen Zeiger, der auf eine Kreisteilung zeigt. Die feste Rolle R, deren Enden an die Klemmschrauben 1 und 2 geführt sind, besteht aus einigen Windungen eines ziemlich dicken Drahtes. Durch die Klemmschraube 1 wird der Strom erst in die feste Rolle eingeleitet, fließt dann durch die bewegliche Rolle und

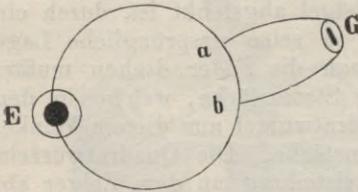
kommt zu der Klemmschraube 2 zurück. Um auch für sehr starke Ströme den Apparat benutzen zu können, ist bei R noch eine zweite feste Rolle angebracht, welche aus nur vier Windungen eines sehr dicken Drahtes besteht. Ihre Enden sind mit den Klemmschrauben 1 und 3 verbunden. Die Kraft, mit welcher der bewegliche Bügel abgelenkt wird, also auch die Drehung des Kupferbügels, ist also proportional dem Quadrat der Stromstärke. Der Apparat ist aber so eingerichtet, daß man, wenn der Kupferbügel abgelenkt ist, durch ein Zurückdrehen der Feder F ihn wieder in seine ursprüngliche Lage bringen kann. Der Winkel, um den man die Feder drehen mußte, gibt dann ein Maß für das Quadrat der Stromstärke, welche in den Drähten des Apparates herrscht. Die Quadratwurzel aus diesem Winkel gibt also direkt ein Maß für die Stromstärke. Die Quadratwurzeln aus den Winkeln liest man auf der Kreisteilung an dem Zeiger ab, der sich mit der Feder dreht. Um die Angaben des Apparates in den gewöhnlichen Einheiten, in Ampère, ausdrücken zu können, genügt es, den Apparat zu eichen, den Reduktionsfaktor zu bestimmen. Da der Apparat natürlich für Gleichströme ebenso brauchbar ist wie für Wechselströme, so kann man die Eichung mit Gleichströmen ausführen. Man braucht nur einen konstanten Gleichstrom zu gleicher Zeit durch den Apparat und durch ein Voltameter (z. B. ein Kupfervoltameter) hindurchgehen zu lassen. Dann kann man aus der abgeschiedenen Menge Kupfer nach S. 144 sofort die Stärke des Stromes in Ampère angeben. Die Ablesung an dem Elektrodynamometer ist ebenfalls der Stärke des Stromes proportional. Das Verhältnis beider Angaben ist der Reduktionsfaktor (auch Konstante des Apparates) genannt, und durch ihn reduziert man die Angaben des Elektrodynamometers auf Ampère.

Außer diesen Elektrodynamometern mit Rollen kann man aber auch noch eine zweite Art von Elektrodynamometern konstruieren, nämlich solche mit weichem Eisen. Wenn man nämlich statt der beweglichen Rolle eine Nadel aus unmagnetischem weichen Eisen innerhalb der festen Rolle aufhängt, so hat man offenbar ebenfalls ein Elektrodynamometer, welches auf Wechselströme reagiert. Denn der Strom, der in der festen Rolle zirkuliert, erregt in der Nadel aus weichem Eisen Magnetismus und macht sie also zu einer temporären Magnetnadel, die durch den Strom abgelenkt wird. Wechselt nun der Strom in der festen Rolle seine Richtung, so wechselt auch die Lage der Pole in der Nadel und die Nadel bleibt daher wieder nach derselben Richtung abgelenkt. Ein solches Elektrodynamometer mit weichem Eisen gibt also Ausschläge der Nadel, welche direkt ein Maß für die Stromstärke, nicht für das Quadrat derselben sind und in bekannter Weise durch Bestimmung des Reduktionsfaktors auf Ampère umgerechnet werden können. Damit ein solches, prinzipiell sehr vorteilhaftes Instrument aber wirklich exakt wirke, ist notwendig, daß das weiche Eisen der Nadel den Magnetismus *a tempo* annimmt und wechselt, gleichzeitig mit der Stromstärke, ohne etwas von dem früheren Magnetismus zurückzubehalten. Dies ist nur schwer und kaum auf die Dauer sicher zu erreichen, und daher sind die Elektrodynamometer nach diesem Prinzip

für wissenschaftliche Zwecke kaum, dagegen für technische Zwecke häufig im Gebrauch, wenn es bei diesen nicht auf die höchste Genauigkeit ankommt.

Wenn man so mit den Elektrodynamometern die Stärke von Wechselströmen messen kann, so kann man dieselben Apparate aber auch zur Messung von Spannungsdifferenzen benutzen. Sie messen bei Wechselströmen dann die mittlere Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten eines Stromkreises. Zu dem Zwecke hat man bloß (Fig. 223) ein solches Elektrodynamometer G als Zweigleitung an die beiden Punkte des Stromkreises a und b anzulegen, deren Spannungsdifferenz man messen will.

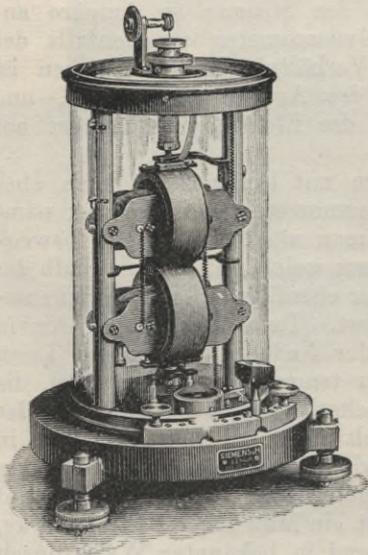
Fig. 223.



Die Angabe des Elektrodynamometers, die an der Teilung derselben abgelesen wird, ist direkt der gesuchten (mittleren) Spannungsdifferenz zwischen a und b proportional, aus genau demselben Grunde, wie ein Galvanometer in der Zweigleitung die Spannungsdifferenz mißt (S. 104).

Zur bequemen Ausführung dieser Messungen haben Siemens & Halske das in Fig. 224 abgebildete Spannungsdynamometer konstruiert.

Fig. 224.



Dasselbe enthält zwei feste Rollen aus Nickelindraht und um jede herum eine bewegliche Rolle aus Kupferdraht. Letztere beide sind miteinander verbunden und zwar so, daß sie im ganzen astatisch sind (s. S. 202), daß also der Erdmagnetismus auf sie nicht einwirkt. Der Strom durchläuft also die Windungen der oberen beweglichen Spule in entgegengesetzter Richtung wie die der unteren. Der zu messende Zweigstrom geht erst in die festen Spulen, dann durch Spiralfedern in die beweglichen. Letztere drehen sich und drehen zugleich eine Spiralfeder, an der sie aufgehängt sind. Diese wird, wie bei dem obigen Elektrodynamometer, zurückgedreht, bis die Spulen wieder die erste Lage gegeneinander haben, und ein Zeiger, der mit der Spirale verbunden ist,

zeigt auf der Kreisteilung den Winkel an, um den die Spirale zurückgedreht werden mußte. Der Kreis ist nun direkt in Volt eingeteilt, so daß man die Spannung direkt in Volt ablesen kann. Für höhere Spannungen ist der Apparat direkt zu empfindlich, die Kreisteilung würde nicht ausreichen. Deswegen sind am Boden des Apparates noch Widerstände angebracht, welche man durch den Stöpsel ein-

schalten kann und die die Empfindlichkeit auf die Hälfte, ein Drittel u. s. w. herabsetzen, so daß die Ablesung nicht direkt die Volt angibt, sondern 2-, 3-, 4mal so viel Volt, als man abliest.

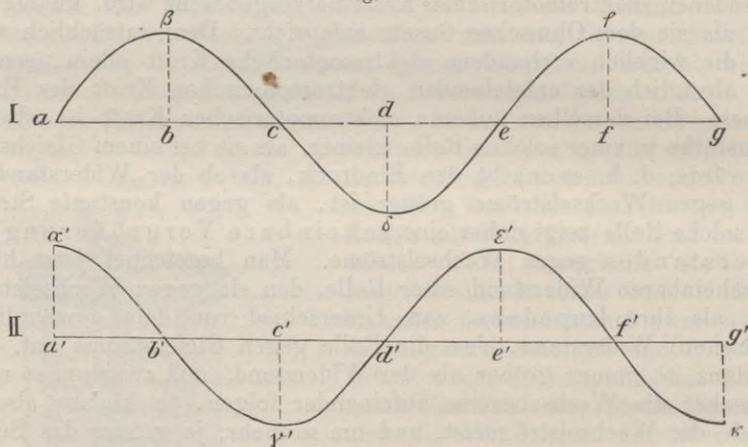
So haben wir also nun die Mittel, um die Stromstärken und Spannungen eines Wechselstromes zu messen.

Bisher hatten wir angenommen, daß der Wechselstrom durch eine Leitung gesendet wird, die kein erhebliches Selbstpotential hat, also etwa durch eine bifilar gewickelte Rolle. Wenn man aber Wechselströme durch einen Leiter sendet, dessen Selbstpotential (S. 229) erheblich ist, etwa durch eine gewöhnlich gewundene Drahtrolle oder noch besser durch eine Drosselspule (S. 231), so entstehen ja in diesem Leiter Extrastrome, weil die Richtung und die Stärke des Stromes sich fortwährend ändert. Und diese Extrastrome wirken immer der vorhandenen elektromotorischen Kraft entgegen. Daraus folgt aber, daß die Stromstärke, die in einer solchen Rolle von der vorhandenen elektromotorischen Kraft hervorgebracht wird, kleiner sein wird, als sie dem Ohmschen Gesetz entspricht. Denn tatsächlich wirkt nicht die wirklich vorhandene elektromotorische Kraft allein, sondern diese abzüglich der entstehenden elektromotorischen Kraft des Extrastromes. Bei derselben äußeren elektromotorischen Kraft ist also die Stromstärke in einer solchen Rolle kleiner, als sie bei einem Gleichstrom sein würde, d. h. es macht den Eindruck, als ob der Widerstand der Rolle gegen Wechselströme größer ist, als gegen konstante Ströme. Eine solche Rolle zeigt daher eine scheinbare Vergrößerung des Widerstandes gegen Wechselströme. Man bezeichnet jetzt häufig den scheinbaren Widerstand einer Rolle, den sie gegen Wechselströme zeigt, als ihre Impedanz, zum Unterschied von dem gewöhnlichen (Ohmschen) Widerstand, den die Rolle gegen Gleichströme hat. Die Impedanz ist immer größer als der Widerstand, und zwar um so mehr, je rascher die Wechselströme aufeinander folgen, je kleiner also die Periode der Wechselströme ist, und um so mehr, je größer das Selbstpotential des Leiters ist. Bei einem geraden Draht ist der Unterschied zwischen Impedanz und Ohmschen Widerstand gewöhnlich zu vernachlässigen, bei einer unifilar gewundenen Rolle dagegen ist es sehr erheblich. Bei einer bifilar gewickelten Rolle (S. 231), die kein Selbstpotential besitzt, ist der Unterschied gleich Null. Eine solche bifilar gewickelte Rolle hat also bei Wechselströmen denselben Widerstand, wie bei Gleichströmen. Aus diesem Grunde muß man z. B. die Widerstandsrollen, welche man in den Widerstandskästen (Kap. 4) braucht, stets bifilar wickeln, wenn man sie auch für Wechselströme benutzen will. Man unterscheidet deshalb bei Wechselströmen immer die Leitungen, durch die der Strom fließt, als induktionsfreie, wenn sie kein erhebliches Selbstpotential besitzen, und als induktive, wenn sie ein solches von erheblicher Größe besitzen. Ganz induktionsfrei ist natürlich streng genommen gar keine Leitung. Man sieht sofort, daß eine stark induktive Leitung, wie etwa eine Drosselspule, die in den Kreis einer Wechselstromspannung eingeschaltet ist, den Strom viel mehr schwächt, als es ihrem gewöhnlichen Widerstand entspricht. Es kommt eben nicht ihr Widerstand, sondern ihre Impedanz in Be-

tracht. Deswegen gerade bezeichnet man solche Spulen mit großem Selbstpotential als Drosselspulen, weil sie den Strom (aber nur einen Wechselstrom) gewissermaßen abdrosseln.

Noch wesentlichere Unterschiede zeigen sich aber zwischen Gleichströmen und Wechselströmen, wenn wir nun zwei Ströme gleichzeitig betrachten, also z. B. einen Wechselstrom sich verzweigen lassen. Zwei verschiedene Gleichströme unterscheiden sich nur durch ihre Stromstärke und ihre Richtung. Wenn daher zwei solche Gleichströme zu gleicher Zeit durch einen und denselben Draht fließen, so ist die Stromstärke in dem Draht die Summe oder die Differenz der beiden einzelnen Stromstärken. Ganz anders ist es bei Wechselströmen. Zwei verschiedene Wechselströme können sich durch drei verschiedene Dinge unterscheiden. Erstens kann die (mittlere) Stromstärke in beiden verschieden sein, wie bei Gleichströmen. Zweitens kann die Periode

Fig. 225.



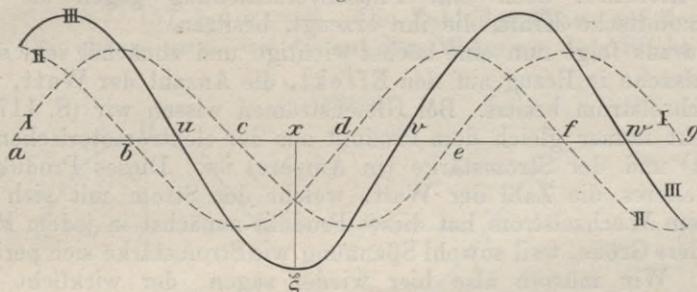
bei beiden verschieden sein, der eine kann z. B. eine Periode von $\frac{1}{100}$ Sekunde, der andere eine von $\frac{1}{250}$ Sekunde haben. Aber selbst wenn die Perioden beider Wechselströme gleich sind, können sie sich noch dadurch unterscheiden, daß sie nicht gleichzeitig ihre maximalen Werte erreichen, also auch nicht gleichzeitig durch Null hindurchgehen und ihre Richtung ändern. Dieser Unterschied besteht aber darin, daß die beiden Wechselströme verschiedene Phasen haben.

Wenn wir z. B. in unserer Maschine auf S. 223 außer den Rollen RR' noch zwei andere miteinander verbundene Rollen auf derselben Achse anbringen, so jedoch, daß diese beiden um je 90° von R und R' abstehen, so wird, wenn die Achse mit den Rollen rotiert, immer das eine Rollenpaar im Maximum der Induktion sein, wenn auf das andere gerade keine Induktion ausgeübt wird und umgekehrt. Die Ströme der beiden Rollenpaare haben dann dieselbe Periode, aber einen Phasenunterschied von 90° gegeneinander; denn man müßte das eine Rollenpaar um 90° drehen, damit es in demselben Stromzustand wäre, in welchem gerade das andere Rollenpaar ist. Durch eine Zeichnung

kann man sich solche zwei Wechselströme von gleicher Periode, aber mit einem Phasenunterschied leicht versinnlichen. In Fig. 225 sind zwei Wechselströme gezeichnet, deren Phasen um 90° verschieden sind. In den Punkten a und a', also in demselben Moment, herrscht in I die Stromstärke 0, in II aber die maximale Stromstärke $a' a'$. In den Punkten b und b' ist umgekehrt in I die maximale Stromstärke βb , in II die Stromstärke 0 vorhanden. In den Punkten c und c' ist in I wieder die Stromstärke 0, in II die maximale Stromstärke $c' \gamma'$ nach der entgegengesetzten Seite vorhanden u. s. w.

Denken wir uns nun von den beiden Rollenpaaren die Ströme gleichzeitig durch denselben äußeren Draht geschickt, so addieren sich in jedem Moment die vorhandenen Stromstärken. In Fig. 226 sind die beiden früheren Kurven I und II punktiert gezeichnet und die Kurve III, die stark ausgezogen ist, gibt in jedem Moment die Summe

Fig. 226.



der Stromstärken, sie stellt die Resultante der beiden Wechselströme dar. Man sieht daraus zunächst, daß die maximale Stromstärke in der Resultante zwar größer ist, als die maximale Stromstärke in jedem der beiden Wechselströme, aber kleiner als die Summe der beiden ist. Man sieht zweitens, daß die Periode der Resultante dieselbe ist wie die der beiden Wechselströme (zwischen u und w ist dieselbe Strecke wie zwischen a und e oder wie zwischen b und f). Aber die Phase der Resultante ist eine andere, als die der beiden Wechselströme. Denn während die Kurve II im Punkt b durch Null nach unten hindurchgeht, die Kurve I im Punkt c, geht die Resultante III im Punkte u — zwischen beiden — durch Null hindurch. Ihr Phasenunterschied gegen I ist also nicht Null — dann würde sie bei c durch Null gehen, auch nicht 90° — dann würde sie bei b durch Null hindurchgehen — sondern liegt zwischen 0° und 90° . In unserem Fall ist er gleich 45° . Allgemein sehen wir daraus: wenn zwei Wechselströme von gleicher Periode, aber von verschiedener Phase durch einen Draht gesendet werden, so hat der resultierende Wechselstrom eine andere Phase als jeder der ihn zusammensetzenden Wechselströme, es tritt, wie man es nennt, eine Phasenverschiebung ein.

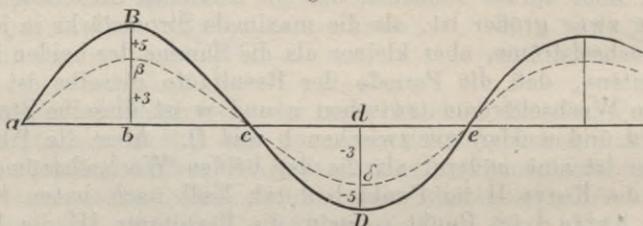
Die Phase resp. der Phasenunterschied tritt also als neues, unangenehm komplizierendes Element ein, wenn man es mit Wechsel-

strömen zu tun hat. Der Phasenunterschied hat nun verschiedene Folgen, durch welche die Wechselströme sich ganz anders verhalten, wie Gleichströme.

Wenn man eine periodische elektromotorische Kraft auf einen Leiter wirken läßt, welcher Selbstpotential (S. 229) besitzt, also etwa auf eine Drosselspule, so muß der Strom in diesem Leiter eine andere Phase haben, als die elektromotorische Kraft, die Stromumkehrungen können in ihm nicht in demselben Moment stattfinden, in welchem die Umkehrungen der elektromotorischen Kraft stattfinden. Denn außer der gegebenen elektromotorischen Kraft wirkt dann ja auf den Leiter noch die elektromotorische Kraft des Extrastromes, die Selbstinduktion, und zwar ist diese am größten, wenn die Stromstärke durch Null hindurchgeht und ihre Richtung wechselt, sie hat also eine andere Phase als die äußere elektromotorische Kraft, und daher muß der Strom selbst, der von dem Zusammenwirken der beiden elektromotorischen Kräfte herrührt, auch eine Phasenverschiebung gegen die äußere elektromotorische Kraft, die ihn erzeugt, besitzen.

Daraus folgt nun eine höchst wichtige und zunächst sehr sonderbare Tatsache in Bezug auf den Effekt, die Anzahl der Watt, welche ein Wechselstrom besitzt. Bei Gleichströmen wissen wir (S. 117), daß der Effekt immer gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft (in Volt) und der Stromstärke (in Ampère) ist. Dieses Produkt gibt ohne weiteres die Zahl der Watt, welche der Strom mit sich führt. Bei einem Wechselstrom hat dieses Produkt zunächst in jedem Moment eine andere Größe, weil sowohl Spannung wie Stromstärke sich periodisch ändern. Wir müssen also hier wieder sagen, der wirkliche Effekt eines Stromkreises ist der Mittelwert aus allen Effekten, die er während

Fig. 227.

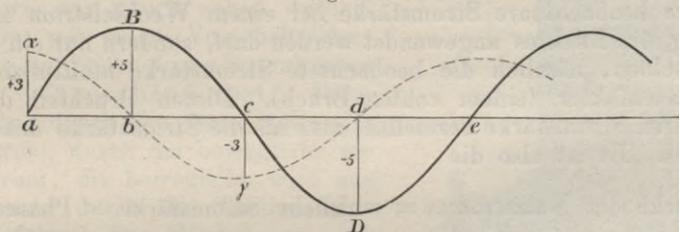


einer Periode hat. Wenn nun keine Phasendifferenz zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft stattfindet, d. h. wenn der Stromkreis ohne beträchtliches Selbstpotential, also induktionsfrei ist, so ist der Mittelwert der Watt gleich dem Produkt aus dem gemessenen Mittelwerte der Stromstärke und dem gemessenen Mittelwerte der Spannung. Dann hat man also noch immer denselben Fall wie bei Gleichströmen. Ist aber eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung vorhanden, so ist die Anzahl der Watt stets kleiner als dieses Produkt. Untersuchen wir, um dies einzusehen, die beiden extremen Fälle, in denen einmal die Phasendifferenz 0° (also keine Phasendifferenz), das andere Mal die Phasendifferenz 90° zwischen

Strom und Spannung vorhanden ist. In Fig. 227 und 228 soll die dick ausgezogene Linie die Stromstärke, die punktiert gezogene die Spannung bedeuten, und zwar wollen wir ihnen bestimmte Zahlenwerte zuschreiben. In Fig. 227 haben Strom und Spannung die gleiche Phase, beide fangen bei a mit 0 an, erreichen gleichzeitig ihre größten positiven Werte bei b ($b\beta = +3$ für die Spannung und $bB = +5$ für den Strom), nehmen wieder ab, gehen gleichzeitig bei c durch Null hindurch, bekommen negative Werte und zwar gleichzeitig ihr negatives Maximum bei d (nämlich $d\delta = -3$ für die Spannung und $dD = -5$ für die Stromstärke) und nach Ablauf einer Periode kommen beide gleichzeitig nach e mit dem Wert Null. Die Zahl der Watt, welche der Strom mit sich führt, ist der Mittelwert aus dem Produkt der Volt und der Ampère. Einige Einzelwerte dieses Produktes sind folgende:

Bei a ist das Produkt gleich Null, bei b ist das Produkt gleich 15 ($+3 \times +5 = 15$), bei c ist es 0, bei d wieder gleich 15 ($-3 \times -5 = 15$), bei $e = 0$. Die Zahl der Watt auf dem Wege a c ist also ebenso groß, wie die auf dem Wege c e . Der Effekt hat also

Fig. 228.



einen zwischen 0 und 15 Watt liegenden Wert, sagen wir den Wert $7\frac{1}{2}$ Watt.

Ganz anders ist es bei Fig. 228, wo Stromstärke und Spannung eine Phasendifferenz von 90° haben. Hier ist bei a die Stromstärke Null und die Spannung gleich $a\alpha$, gleich 3, also das Produkt gleich Null, bei b ist die Stromstärke gleich 5, aber die Spannung gleich Null, also das Produkt wieder Null; bei c ist das Produkt ebenfalls Null, weil die Stromstärke, und bei d ist es Null, weil die Spannung gleich Null ist. In den zwischenliegenden Punkten haben wir zwar immer Watt, welche nicht gleich Null sind, aber wir haben abwechselnd positive und negative Werte von gleicher Größe. Zwischen a und b sind die Stromstärke und Spannung, beide positiv, ihr Produkt also auch positiv, zwischen b und c ist aber die Stromstärke positiv, die Spannung negativ, ihr Produkt also negativ und zwar ebenso groß, aber negativ, wie zwischen a und b . Daraus folgt, daß der ganze Effekt eines solchen Stromes gleich Null ist.

Ein Wechselstrom, dessen Stromstärke eine Phasendifferenz von 90° gegen die äußere Spannung hat, die ihn erzeugt, hat den Effekt Null, d. h. er führt keine Energie mit sich, er führt keine Watt.

Man bezeichnet einen solchen Strom deshalb als wattlosen Strom (oder auch als Leerstrom, idle current).

Vollkommen wattlose Ströme kann man allerdings nicht herstellen, aber man kann sich diesem Zustand, bei dem Strom und Spannung einen Phasenunterschied von 90° haben, sehr nähern.

Haben wir nun einen Wechselstrom, dessen Phasendifferenz gegen die Spannung nicht die extremen Werte 0° und 90° , sondern dazwischen liegende Werte hat, so ist der Effekt dieses Stromes abhängig von dieser Phasendifferenz. Die Zahl der Watt, die ein solcher Strom mit sich führt, ist gleich dem Produkt aus der Spannung (in Volt), und der Stromstärke (in Ampère), aber noch multipliziert mit einer Zahl, die zwischen 1 und 0 liegt, also einem echten Bruch, der von der Phasendifferenz abhängt. Wir wollen ihn den Phasenfaktor nennen. (Er ist einfach gleich dem Kosinus der Phasendifferenz.) Der Phasenfaktor ist 1 für die Phasendifferenz 0° , er ist 0 für die Phasendifferenz 90° , und es ist allgemein

Effekt eines Wechselstroms = Spannung \times Stromstärke \times Phasenfaktor.

Es sieht also so aus, und es ist auch in der Tat so, als ob nicht die ganze beobachtbare Stromstärke bei einem Wechselstrom zur Berechnung des Effektes angewendet werden darf, sondern nur ein Bruchteil derselben, nämlich die beobachtete Stromstärke multipliziert mit dem Phasenfaktor (einem echten Bruch). Diesen Bruchteil der beobachtbaren Stromstärke bezeichnet man als die Stromstärke des Nutzstromes. Es ist also die

Stromstärke des Nutzstromes = wirkliche Stromstärke \times Phasenfaktor

und es ist der

Effekt eines Wechselstromes = Spannung \times Stromstärke des Nutzstromes.

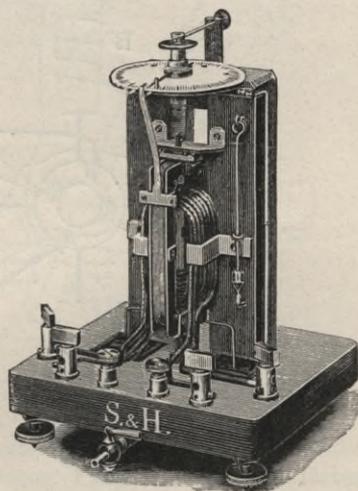
Wirkt in dem Stromleiter, dessen Effekt man messen will, keine erhebliche Induktion, ist er also induktionsfrei, etwa ein gerade ausgespannter Draht oder eine Glühlampe oder eine Bogenlampe, so ist der Phasenfaktor nahezu gleich 1. Wirkt aber erhebliche Selbstinduktion in dem Stromstück, besteht er z. B. aus einer Drosselspule oder einem sonstigen Elektromagnete oder einem Elektromotor, ist also der Widerstand induktiv, so kann der Phasenfaktor nahezu gleich Null werden.

Aus diesen Überlegungen folgt nun auch, daß die Messung des Effektes in einem von Wechselströmen durchflossenen Leiter keine einfache Sache ist. Und zwar aus doppeltem Grunde. Zunächst muß man überhaupt wissen, wie groß der Phasenfaktor in dem betreffenden Leiter im speziellen Falle ist. Durch eine besonders auszuführende Messung des Selbstpotentials läßt sich dieser zwar bestimmen, aber immerhin in umständlicher Weise. Wir können auf diese Messung des Phasenfaktors nicht eingehen, sondern nehmen an, er sei auf irgend eine Weise bestimmt, sei uns also bekannt. Dann aber ist

noch die zweite Schwierigkeit vorhanden, daß das Meßinstrument selbst gewöhnlich auch noch einen Phasenfaktor in die Anordnung hineinbringt.

Zur Messung des Effektes von Wechselströmen haben Siemens & Halske das Elektrodynamometer in passender Form verwendet, als sogenanntes Arbeitsdynamometer. Dasselbe ist in Fig. 229 gezeichnet. Es ist im Prinzip ebenso eingerichtet wie das Elektrodynamometer für Strommessung, welches auf S. 248 abgebildet ist. Der Apparat besitzt eine feste Drahtrolle, bestehend aus einigen Windungen dicken Drahtes und eine bewegliche Drahtrolle, die aufgehängt und in bekannter Weise an einer Torsionsfeder befestigt ist. Die bewegliche Drahtrolle, deren Windungsebenen senkrecht zu denen der festen Rolle stehen, besteht aus einem Rahmen mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes. Nun wird das Instrument zur Arbeitsmessung so verwendet, daß man die feste Spule direkt in den Stromkreis einschaltet, dessen Effekt man messen will, daß man aber die bewegliche Spule (wie wir gleich sehen werden, zusammen mit einem Vorschaltwiderstand) an den Enden dieses Stromkreises in den Nebenschluß legt. Dann fließt also durch die feste Rolle der Hauptstrom, durch die bewegliche ein Zweigstrom, die bewegliche wird abgelenkt und durch die Torsionsfeder zurückgeführt. Der Winkel, um den die Feder gedreht wird, hängt ab von dem Produkt der beiden Stromstärken und von der Phasendifferenz zwischen ihnen. Die Stromstärke im Zweigstrom aber ist wieder der Spannung an den

Fig. 229.

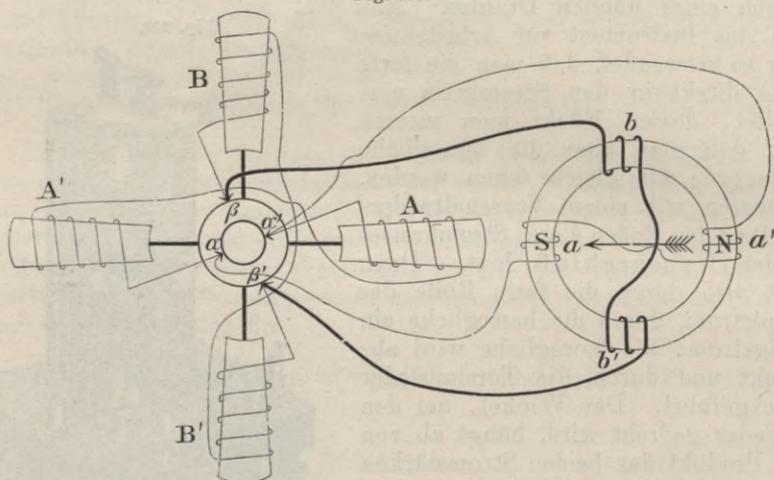


Enden proportional. Man erkennt daher, daß der Drehungswinkel der Torsionsfeder dem Produkt aus Stromstärke und Spannung in dem Stromstück proportional ist, wenn man dafür sorgt, daß im Nebenschlußkreis eine möglichst geringe Phasenverschiebung gegen den Hauptstrom stattfindet. Das kann man nun dadurch erreichen, da ja die bewegliche Spule selbst viele Windungen haben muß, an sich also großes Selbstpotential hat, daß man noch einen sehr großen Widerstand ohne merkliches Selbstpotential vor sie schaltet, ebenfalls in den Nebenschluß. In der Tat wird das Arbeitsdynamometer bei Wechselstrom immer nur so gebraucht. Faktisch bewirkt ein solcher großer induktionsfreier Widerstand, daß im Nebenschluß der Strom stark geschwächt wird, daß daher die Extrastrome selbst ebenfalls geschwächt werden, und daß mithin die Phasendifferenz gegen die Spannung an den Enden eine kleine wird, die meistens zu vernachlässigen ist.

So unerfreulich kompliziert nun auch die Betrachtung von Wechselströmen infolge dieser Phasendifferenzen wird, so bringt doch anderer-

seits gerade die Phasendifferenz verschiedener Wechselströme eine Wirkung hervor, die eine sehr große praktische Bedeutung erlangt hat. Wir wollen zwei Wechselströme mit einer Phasendifferenz von 90° uns wieder so erzeugt denken, daß wir (Fig. 230) zwei Rollenpaare AA' und BB' nehmen, die, um 90° gegeneinander verstellt, vor den Polen eines Hufeisenmagnets rotieren. Von den Enden $\alpha\alpha'$ des einen Rollenpaares A führen wir die Drähte so, daß sie einen feststehenden Ring aus weichem Eisen an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen umwickeln, wie es die Figur bei a und a' anzeigt. Auch von den Enden $\beta\beta'$ des anderen Rollenpaares wollen wir Drähte zu dem Ring führen, die ihn an zwei um 90° von den ersten abstehenden Stellen

Fig. 230.

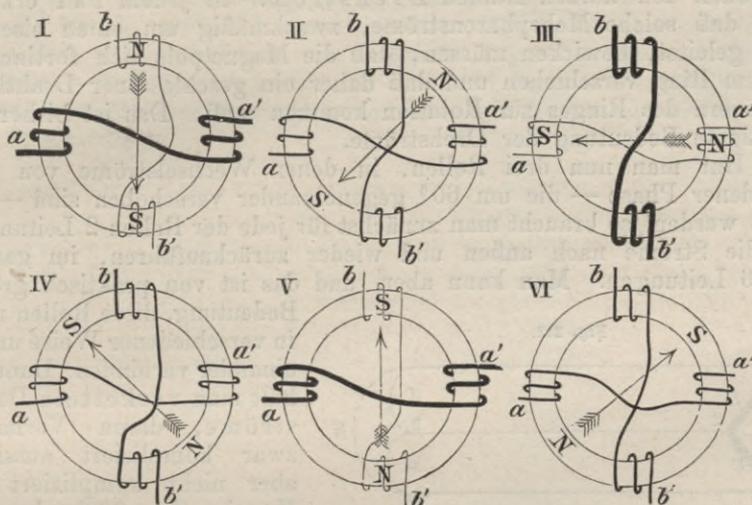


bei b und b' umwickeln. Wenn nun die Wechselströme in den beiden Leitungen fließen, so hat vermöge des Phasenunterschiedes der eine Strom in demselben Moment die größte Stärke, in dem der andere gerade die Stärke Null hat. In der Figur ist die verschiedene Stromstärke in den Umwindungen durch verschieden dicke Linien angedeutet. Man sieht den starken Strom bei bb' , den Strom Null bei aa' . Der Eisenring wird nun durch den Strom in bb' magnetisiert und zwar so, daß der Nordpol an den Stellen N und S liegen, wie man sich durch die Ampèresche Schwimmerregel überzeugt. Eine Magnetnadel, die im Innern des Ringes sich auf einer Spitze drehen kann, wird also eine Lage annehmen, wie sie durch den großen Pfeil gezeichnet ist.

Wenn nun die Rollen A und B , die die Ströme erzeugen, sich drehen, dann erreichen abwechselnd die Ströme um aa' und die um bb' , aber nicht gleichzeitig, ein Maximum, werden dann zu Null, bekommen dann wieder einen maximalen, aber negativen Wert u. s. w. Dadurch aber verschieben sich auch die Pole des Ringes. Man erkennt das aus

Fig. 231. In I ist der Strom aa' stark, der Strom bb' schwach, die Magnetnadel nimmt die gezeichnete Lage ein. Wenn die Rollen, welche die Ströme erzeugen, sich um 45° gedreht haben, dann sind die Ströme in aa' und in bb' gleich stark, so wie es Fig. II zeigt, dann befinden sich die Pole des Eisenringes bei N und S, und die Magnetnadel bekommt die schiefe Lage. In der folgenden Figur ist der Strom bb' im Maximum, der Strom aa' gleich Null, die Pole im Ringe haben sich also weiter gedreht nach NS und die Magnetnadel ist ihnen ge-

Fig. 231.



folgt. Und so geht das weiter. Man sieht als Resultat, daß, wenn die beiden Wechselströme von verschiedener Phase durch die festen Windungen um den festen Ring geleitet werden, daß dann die Magnetnadel im Innern in fortlaufende Drehung kommen muß, daß sie sich so lange drehen muß, als die Ströme fließen. Statt der Magnetnadel können wir auch ein Stück unmagnetischen Eisens in die Mitte bringen. Dies wird dann erst durch magnetische Induktion magnetisch und muß sich ebenso drehen. Ja auch wenn man einen geschlossenen Drahtkreis, der sich um die Achse drehen kann, hineinbringt, so muß auch dieser sich drehen. Denn es werden in ihm Induktionsströme erzeugt und diese Ströme, also der ganze Drahtkreis, werden von dem wandernden Pole angezogen. Diese Erscheinung ist von großer Wichtigkeit geworden, da sie es gestattet, durch Wechselströme Drehungen hervorzubringen und dadurch Arbeit zu leisten. Auf ihr beruhen die sogenannten Induktionsmotoren, die wir im zweiten Abschnitt besprechen werden.

Ein solches System von mehreren Wechselströmen, deren Phasen verschieden sind, hat also wichtige Eigenschaften, welche gerade von dem Phasenunterschied abhängen. Man nennt solche zusammenwirkende

Wechselströme Mehrphasenströme. Hat man zwei Rollenpaare, deren Phasenunterschied $90^\circ \left(\frac{180^\circ}{2} \right)$ ist, so erzeugen diese Zweiphasenströme, drei Rollenpaare, deren Phasenunterschied je gleich $60^\circ \left(\frac{180^\circ}{3} \right)$ ist, erzeugen Dreiphasenströme, vier Rollenpaare, mit dem Phasenunterschied $45^\circ \left(\frac{180^\circ}{4} \right)$, würden Vierphasenströme erzeugen u. s. w.

Dem dreiphasigen Wechselstrom, der am meisten benutzt wird, gibt man auch den kurzen Namen Drehstrom. In jedem Fall erkennt man, daß solche Mehrphasenströme, zweckmäßig um einen eisernen Ring geleitet, bewirken müssen, daß die Magnetpole sich fortlaufend in dem Ring verschieben und daß daher ein geschlossener Drahtkreis in Innern des Ringes zur Rotation kommen muß. Das ist bisher die wichtigste Bedeutung der Drehströme.

Hat man nun drei Rollen, in denen Wechselströme von verschiedener Phase — die um 60° gegeneinander verschoben sind — erzeugt werden, so braucht man zunächst für jede der Rollen 2 Leitungen, um die Ströme nach außen und wieder zurückzuführen, im ganzen also 6 Leitungen. Man kann aber, und das ist von praktisch großer

Bedeutung, diese Rollen noch in verschiedener Weise untereinander verbinden. Dann erhält man verkettete Drehströme, deren Verhalten zwar kompliziert aussieht, aber nicht kompliziert ist. Es seien (Fig. 232) a b c drei Rollen, in denen Drehströme erzeugt werden. Sie haben je 60° Phasenunterschied gegeneinander, so daß, wenn in a die Phase Null ist, in b die Phase 60° , in c die Phase 120° herrscht. Dann kann man die drei Rollen so

Fig. 232.

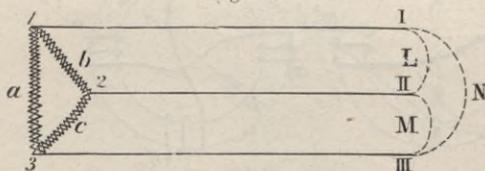
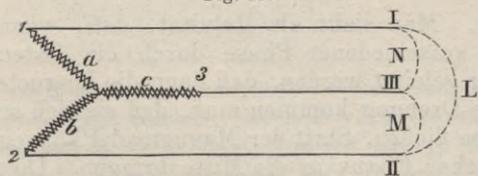


Fig. 233.



verbinden, wie es die Fig. 232 angibt. Man sagt dann, die Rollen seien in Dreieckschaltung. Man kann aber auch die drei Rollen so verbinden, wie in Fig. 233, dann sagt man, sie seien in Sternschaltung. Man kann nun sowohl in der ersten, wie in der zweiten Figur von den Stellen 1, 2, 3 die Leitungen I, II, III fortführen und diese am Ende untereinander verbinden, und zwar auch wieder in Dreieckschaltung I und II bei L, II und III bei M, I und III bei N, wie es in den Figuren gezeichnet ist. In jeder der drei Leitungen fließt dann ein Wechselstrom und man erkennt, daß der Strom bei L eine andere Phase haben muß, als der Strom bei M und als der bei N, daß also bei L, M und N Drehstromwirkungen auftreten werden, trotzdem die Rollen verkettet sind. Bei L in Fig. 232 wird etwa die

Phase 30° , bei M die Phase 90° , bei N die Phase 150° herrschen, die wieder je einen Unterschied von 60° haben. Bei der Sternschaltung der Rollen in Fig. 233 setzt sich der Wechselstrom bei L im wesentlichen zusammen aus den beiden gegeneinander verschobenen Strömen von a und b, der in M aus b und c und der in N aus a und c, daher treten auch bei L, M und N wieder ebensolche Phasenverschiebungen auf.

Das Auftreten dieser Phasenunterschiede als neues Element bei elektrischen Wechselströmen kompliziert zwar die Betrachtungen, aber man sieht ein, daß dadurch die Wechselströme in vielfältigere Kombinationen gebracht werden können, als die Gleichströme. Darauf gerade beruht die Bedeutung der Wechselströme für die Wissenschaft und die Praxis, und es hat sich gezeigt, daß die Wechselströme, die lange Zeit wissenschaftlich und praktisch kaum beachtet wurden, an Bedeutung fortwährend gewachsen sind und für die Theorie der Elektrizität wie für ihre Anwendungen sich noch fruchtbarer erweisen als die Gleichströme.

11. Kapitel.

Die elektrischen Schwingungen.

Obwohl es durch die neueren Unterbrecher, den Turbinen- und den elektrolytischen Unterbrecher, möglich ist, einen Strom auf einfache Weise ein- bis zweitausendmal in der Sekunde zu unterbrechen, und dadurch in einer Induktionsspule Wechselströme mit der Periode $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{1}{2000}$ Sekunde zu erzeugen, so sind doch diese Wechsel nur äußerst langsam gegen diejenigen, welche, wie man allmählich erkannt hat, die Natur selbst durch einfache Mittel erzeugt. In Wirklichkeit kommen bei unseren Experimenten, ohne daß wir etwas dazu tun, wechselnde elektrische Ströme vor, die in jeder Sekunde 100000mal, millionenmal, ja sogar milliardenmal ihre Richtung ändern. Solche außerordentlich rasch wechselnde elektrische Bewegungen nennt man elektrische Schwingungen oder Oszillationen und das Mittel, durch welches sie entstehen, ist der elektrische Funke. Wenn man einen Kondensator durch einen elektrischen Funken entladet, oder wenn man zwischen den Enden einer Induktionsspule einen Funken übergehen läßt, oder wenn man endlich einen beliebigen geladenen Leiter vermittels des angenäherten Fingers durch einen Funken sich entladen läßt, so erhält man jedesmal elektrische Schwingungen. Die Perioden dieser Schwingungen sind außerordentlich kleine, sie variieren je nach der Kapazität der Leiter, zwischen denen der Funke übergeht, von dem zehntausendsten bis zum hundertmillionsten, ja sogar tausendmillionsten Teil einer Sekunde. In allen Fällen aber ist es der elektrische Funke, welcher den Anlaß zu elektrischen Schwingungen gibt, und wir können auch leicht einsehen, wieso er dieses tut. Der wesentliche Grund zur Entstehung solcher Oszillationen ist nämlich das Auftreten von Extraströmen bei der Entladung durch einen Funken.

Wir wollen, um dieses einzusehen, die Entladung eines Kondensators oder einer Leydener Flasche genauer betrachten.

Wenn eine Leydener Flasche geladen ist, so befindet sich auf der einen Belegung, etwa der inneren, positive Elektrizität, auf der anderen negative Elektrizität und zwar auf jeder gleich viel, eine gewisse Zahl Coulomb. Wird nun die innere Belegung mit der äußeren durch einen Leiter verbunden, indem man etwa, wie in Fig. 234, jede der beiden Belegungen in einen verschiebbaren Draht ausgehen läßt und die Drähte einander nähert, so fließt die positive Elektrizität von

innen nach außen, also in unserer Figur von oben nach unten, die Leydener Flasche wird entladen, und zwar springt ein Funke zwischen den Leitern bereits über, bevor sie noch zur Berührung gekommen sind. Durch die Leiter und diesen Funken geht also die Entladung vor sich, die Elektrizität fließt durch die Leiter und die Luft. Der ganze Vorgang geht zwar in sehr kurzer Zeit vor sich, aber man kann doch verfolgen, wie sich in dieser kurzen Zeit die Verhältnisse gestalten. Auf den beiden Belegungen der Flasche ist ja eine bestimmte Spannungsdifferenz vorhanden und diese treibt nach dem Ohmschen Gesetz die Elektrizität durch die Drähte und die Luft. Durch diesen Übergang nimmt aber zugleich die Menge der Elektrizität auf jeder der beiden Belegungen ab, da sie sich eben durch den Strom ausgleichen, und daher wird die Spannungsdifferenz auf beiden Belegungen kleiner. Die elektromotorische Kraft, die die Elektrizität in Bewegung setzt, wird also in den aufeinander folgenden Abschnitten der Zeit bei der Entladung immer geringer, und daher nimmt auch die Stromstärke bei der Entladung einer solchen Flasche rasch, in äußerst kurzer Zeit, von einem größten Werte an, ab. Da nun aber bei jeder Veränderung der Stromstärke in einem Leiter Extrastrome auftreten, so müssen also auch hierbei die Extrastrome wirksam sein. Im ersten Moment, wo der Entladungsstrom anfängt, beginnt auch der Extrastrom, welcher die entgegengesetzte Richtung hat wie dieser. Der Entladungsstrom gehe von der Belegung b nach a, dann geht dieser Extrastrom von a nach b. Der eigentliche Entladungsstrom wird nun rasch so schwach, daß dieser Extrastrom überwiegt. Daher bewegt sich im ersten Moment die Elektrizität von b nach a, gleich darauf aber von a nach b. Der Extrastrom nimmt aber ebenfalls an Stärke sofort ab und es entsteht ein neuer Extrastrom, welcher nun wieder von b nach a gerichtet ist und in einem folgenden Moment den ersten Extrastrom überwindet, so daß sich nun die Elektrizität wieder von b nach a bewegt und so fort. Man erhält also tatsächlich das merkwürdige Resultat, daß der Entladungsstrom nicht, wie man eigentlich glauben sollte, direkt von b nach a geht, sondern daß er, gerade wegen der Wirkung der Extrastrome, abwechselnd von b nach a, dann von a nach b, dann wieder von b nach a geht u. s. w.

Kurz man erhält eine oszillierende Entladung, man erhält elektrische Schwingungen. Damit diese aber eintreten können, müssen die jedesmaligen Extrastrome stark genug sein, um die vorhergehenden Ströme zu überwinden, d. h. die oszillatorische Entladung kann nur eintreten, wenn das Selbstpotential der Leitung, durch welches ja die Extrastrome bedingt werden, mindestens einen bestimmten Wert hat, welcher in bestimmter Beziehung zu dem Widerstand der ganzen Leitung und zu der Kapazität der Leydener Flasche steht. Ist diese Bedingung aber erfüllt, so entladet sich eine Flasche oder ein Kondensator tatsächlich oszillatorisch. In bestimmten aufeinander folgenden

Fig. 234.



Zeiten, die allerdings sehr nahe beieinander liegen, kehrt sich die Richtung des Stromes zwischen den beiden Belegungen um. Die Zeit, die zwischen einer Umkehrung des Stromes und der folgenden verfließt, nennt man die Periode der elektrischen Schwingungen. Die Tatsache der oszillierenden Entladung hat zum ersten Male Feddersen bei der Entladung der Leydener Flaschen beobachtet. Er stellte nämlich derjenigen Stelle gegenüber, an welcher der Funke entstehen sollte, einen Spiegel auf, der sich sehr rasch um eine Achse drehte, einen sogenannten Drehspiegel. In der kurzen Zeit, die der Funke andauert, dreht sich dann der Spiegel um einen Winkel, der umso größer ist, je größer die Drehungsgeschwindigkeit ist. Da nun ein Spiegel einen Lichtstrahl immer unter demselben Winkel zurückwirft, unter dem er aufgefallen ist, so ist klar, daß man das reflektierte Bild des Funkens dabei zu einem Bande, einem Lichtbande ausgezogen zu sehen erwarten mußte. Das war auch tatsächlich der Fall, aber mit einer unvorhergesehenen Modifikation.

Fig. 235.



Es ergab sich nämlich, daß das Bild das Aussehen hatte wie in Fig. 235. Man sieht, daß in dem Lichtband (das photographiert wurde) eine Reihe von dunklen Stellen mit hellen

Zwischenräumen vorhanden ist, ein Beweis dafür, daß die Entladung periodisch aussetzt und wieder beginnt, kurz, daß Oszillationen vorhanden sind. Es gelang auch Feddersen leicht, aus einem solchen Bilde die Periode dieser Oszillationen zu messen. Wenn man nämlich die Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels und den Abstand der photographischen Platte vom Spiegel kennt, so kann man aus der Länge des ganzen Lichtbandes die Dauer des ganzen Funkens berechnen. Ist z. B. der Abstand der Platte vom Spiegel 1 m und dauert der Funke eine Sekunde lang, so würde das Bild des Funkens, wenn der Spiegel sich in dieser Sekunde 500mal vollständig herumdreht, einen Lichtstreifen darstellen, der 1000mal einen Kreis von 1 m Radius umfaßt. Da nämlich das auffallende Licht vom Spiegel immer unter demselben Winkel zurückgeworfen wird, unter dem es auffällt, so wandert das Bild, das der Spiegel entwirft, doppelt so rasch als der Spiegel. Dauert nun der ganze Funke nicht eine Sekunde, sondern etwa $\frac{1}{10000}$ Sekunde, so hat das Lichtband auch bloß den zehntausendsten Teil der Länge (in unserem Beispiel ist im ersten Fall die Länge angenähert $6 \times 1000 = 6000$ m, im zweiten Fall angenähert 0,6 m = 60 cm). So kann man umgekehrt aus der Länge des Lichtbandes die Dauer des ganzen Funkens berechnen. Bei der obigen Figur betrug nun die Dauer des ganzen Funkens etwa $\frac{1}{70000}$ Sekunde. Da nun in dem Funken 13 Schwingungen vorhanden sind, wie man durch Abzählen erkennt, so beträgt die Dauer einer Oszillation etwa eine Millionstelsekunde. In so kurzer Zeit bewegt sich bei diesen Entladungen von Leydener Flaschen die Elektrizität hin und her. Kirchhoff hat dann aus theoretischen Betrachtungen gelehrt, die Periode dieser Oszillationen zu berechnen. Sie hängt nämlich in einfacher Weise von der Kapazität des Kondensators und dem Selbstpotential der

angewendeten Leitung ab, und zwar wird die Periode (genauer: ihr Quadrat) um so größer, je größer die Kapazität der Flasche und je größer das Selbstpotential der Leitung ist.

Ebensolche oszillatorische Entladungen treten, wie gesagt — und zwar aus demselben Grunde — auch bei Induktionsapparaten ein, zwischen deren sekundären Polen Funken überspringen. Nur haben dabei, da das Selbstpotential der Induktionsapparate ein außerordentlich großes ist, die Entladungen eine viel größere Periode. Etwa in dem 10000sten Teil einer Sekunde geht bei solchen geöffneten Induktionsapparaten die Entladung einmal hin und her.

Daß bei der Entladung durch einen Funken solche periodische Bewegungen entstehen, konnte man allerdings nicht vorhersehen. Nachdem aber die Tatsache einmal konstatiert ist, läßt sie sich auch mechanisch leicht begreifen.

Eine Luftstrecke setzt elektrischen Spannungen im allgemeinen einen solchen Widerstand entgegen, daß sie ihn nicht überwinden können. Wir müssen annehmen, daß der Äther, welcher sich in der Luft befindet, im allgemeinen nicht nachgiebig ist und daß darauf die isolierende Eigenschaft der Luft oder anderer Isolatoren beruht. Wenn aber die Spannungen so groß werden, daß der Funke zwischen zwei Leitern überspringt, so findet ein Durchbrechen des wenig elastischen Äthers in der Luft statt, der Widerstand, den dieser Äther der elektrischen Bewegung entgegengesetzt, wird gewaltsam überwunden. Jede Überwindung eines elastischen Widerstandes in der Natur findet aber periodisch statt. Wenn wir z. B. bloß Luft aus der gespitzten Mundhöhle hinausblasen, so hören wir einen Ton, und da Töne immer auf periodischen Bewegungen beruhen, so beweist das, daß diese Überwindung des Widerstandes periodisch vor sich gegangen ist. Ebenso hören wir bei jedem Zerreißen, Zerbrechen, Zerdrücken von Körpern, bei jedem Schritt, den wir auf der Straße machen, einen Ton, haben also überall eine periodische Bewegung erzeugt. Ganz so wird auch der Äther der isolierenden Luftschicht, wenn er durchbrochen wird, in periodische Bewegungen versetzt. Er schwankt, bei einem solchen Funken, in sehr kurzer Zeit hin und her. Es entstehen daher durch einen solchen Funken in der Luft und in den Drähten, zwischen denen der Funke übergeht, elektrische Schwingungen.

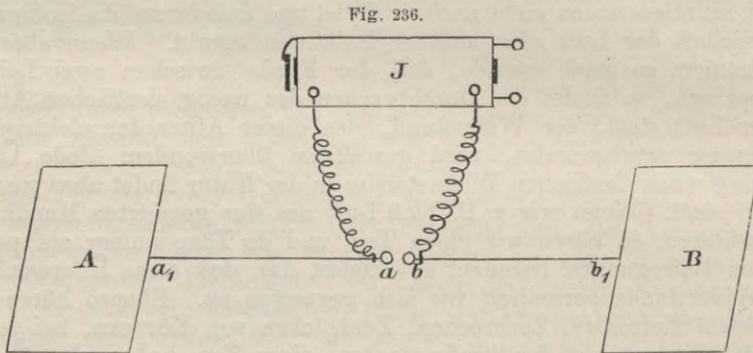
Wir werden also nach dieser Vorstellung die Spannungserscheinungen, die zu einem Funken unter Umständen Veranlassung geben, als Zustände des Äthers anzusehen haben, der in den Isolatoren in der Nähe der Leitungsdrähte vorhanden ist.

Ebenso wie eine Pfeife um so raschere Schwingungen macht, um so höhere Töne gibt, je kürzer sie ist, je geringer also die in Bewegung versetzte Luftmenge ist, ebenso sind auch bei der Funkenentladung die Schwingungen um so rascher, ist die Schwingungsdauer um so kürzer, je geringer die in Bewegung versetzten Äthermengen sind. Große Leydener Flaschen geben daher, wenn sie durch einen Funken entladen werden, langsamere Schwingungen, als kleine, und die raschesten Schwingungen erhält man demnach, wenn man zwischen Körpern von sehr geringer Kapazität Funken übergehen läßt. Daß aber außer der

Kapazität des Kondensators noch das Selbstpotential der Leiter von Einfluß auf die Schwingungsdauer ist, hat ebenfalls ein Analogon bei den Schallschwingungen. Auch dort spielt die Form des Instrumentes eine wesentliche Rolle, gerade wie hier die Form der Drähte. Gerade Trompeten haben bei gleicher Länge einen anderen Ton, als solche mit vielen Windungen.

Elektrische Oszillationen müssen also jedesmal eintreten, wenn zwischen zwei geladenen Leitern eine Entladung stattfindet. Nur wird eben die Periode dieser Oszillationen umso kürzer sein, je geringer die Kapazität dieser Leiter ist.

Außerst rasche derartige Schwingungen hat nun H. Hertz in Karlsruhe zuerst dadurch hervorgebracht, daß er zwischen zwei einander gegenübergestellten Drähten, wie $a a_1$ und $b b_1$ in Fig. 236, deren jeder mit einer Platte A und B oder mit einer Kugel verbunden war, Funken übergehen ließ. Er verband die sekundären Pole eines Induktionsapparates J durch Drähte mit den beiden geradlinigen Leitern $a a_1$



und $b b_1$, wodurch zwischen den beiden Endkugeln a und b die einzelnen Entladungsfunken überspringen. Jeder solche Entladungsfunke ist aber auch hier wieder oszillatorisch. Die Entladung geht auch hierbei wieder in Schwingungen vor sich, und da die Kapazität dieser geradlinigen Leiter mit ihren Platten oder Kugeln und ebenso das Selbstpotential der Leitung sehr klein ist, so ist hierbei die Schwingungsdauer dieser Oszillationen sehr klein. Um nicht eine gar zu kleine Schwingungsdauer zu erhalten, vergrößerte er eben die Kapazität der geraden Drähte $a a_1$ und $b b_1$ dadurch, daß er sie mit den größeren Metallplatten A und B verband. Diese vermehren die Kapazität dieses Entladungsapparates und vergrößern daher auch die Dauer einer Schwingung. In solchen Apparaten zählt die Dauer der Oszillationen etwa nach Hundertmillionsteln von Sekunden. Man hat sich den Vorgang bei den Entladungen in einem solchen Apparat also so zu denken: Bei einer Öffnung des primären Stromes in J entsteht ein Induktionsstoß, welcher den Leiter $a a_1$ z. B. positiv, den Leiter $b b_1$ B negativ ladet. Diese beiden entgegengesetzten Elektrizitäten gleichen sich sofort durch die zwischen a und b vorhandene Luftschicht aus, aber dieser Aus-

gleich geschieht oszillierend, so daß in dem ganzen geradlinigen Leiter a_1 bis b_1 und der Luftschicht dazwischen geradlinige Schwingungen stattfinden. Die Entladung zwischen a und b geht nicht etwa durch den Metalldraht des Induktionsapparates, weil dieser zu großes Selbstpotential hat (also als Drosselspule (S. 231) wirkt), sondern eben durch die Luftschicht. Diese Oszillationen, die, wie gesagt, in etwa dem hundertmillionsten Teil einer Sekunde aufeinander folgen, finden bei jedem einzelnen Öffnungsfunken statt. Sie sind schon vollständig abgelaufen, wenn durch eine neue Öffnung der primären Spule ein zweiter Öffnungsstrom nach a und b gesendet wird. Dieser ladet A und B wieder und die Entladung ist wieder oszillierend u. s. w.

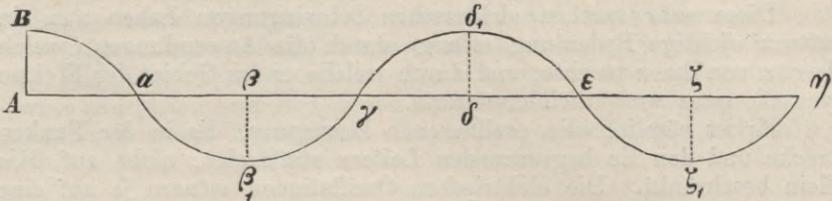
Diese sehr raschen elektrischen Schwingungen haben nun eine äußerst wichtige Bedeutung erlangt durch die Anwendungen, welche Hertz von ihnen machte, und durch welche er das Gebiet der Elektrodynamik ganz wesentlich erweiterte.

Es ist nämlich die oszillierende Bewegung, die in der Funkenstrecke und den sie begrenzenden Leitern stattfindet, nicht auf diese allein beschränkt. Die elektrischen Oszillationen müssen ja auf einer oszillierenden Bewegung des Äthers beruhen, wenn wir auch diese Ätherbewegung nicht direkt sehen, sondern bloß die Oszillationen in dem Funken erkennen können. Findet aber längs der Leiter und in der Luftschicht zwischen ihnen eine oszillierende, periodisch hin und her gehende Ätherbewegung statt, so muß sich diese auch von da aus nach allen Seiten durch den Äther ausbreiten, es müssen von der Funkenstrecke aus Ätherwellen nach allen Richtungen fortlaufen, ganz so wie von einem brennenden Streichholz Lichtwellen, d. h. Ätherwellen nach allen Richtungen ausgehen. Vorausgesetzt ist dabei allerdings, daß diese elektrischen Bewegungen des Äthers eine meßbare Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben, daß nicht momentan, ohne Zeitverlust, sondern in bestimmter, wenn auch sehr kurzer Zeit die Bewegung von einem Äthertheilchen zu einem benachbarten kommt. Auch bei dem Licht kommt nur dadurch der Äther rings um einen leuchtenden Körper in fortschreitende Wellenbewegung, daß eben das Licht Zeit zu seiner Fortpflanzung braucht.

Wenn aber die Induktionswirkungen Zeit zu ihrer Fortpflanzung brauchen, so kann man leicht übersehen, wie sich in der Nähe einer solchen raschen elektrischen Schwingung die Verhältnisse gestalten. Nehmen wir z. B. an, es sei die Geschwindigkeit, mit der die elektrischen Ätherbewegungen sich ausbreiten, 20 Millionen Meter in der Sekunde, so würde folgendes stattfinden. Wir wollen annehmen, daß eine elektrische Oszillation von 1 Millionstelsekunde Schwingungsdauer vertikal auf und nieder geht, etwa zwischen den vertikal gestellten Drähten von Fig. 236. Wenn dann in Fig. 237 diese primäre Schwingung in AB schon eine Zeit lang fortgegangen ist und in einem bestimmten Moment die Bewegung in AB gerade von A nach B geht, so muß in diesem Moment im Punkt β , der 10 m entfernt ist, die Bewegung gerade entgegengesetzt von β nach β_1 gehen, im Punkte δ , der 20 m entfernt ist, wieder, wie in AB , von δ nach δ_1 u. s. f. Mitten zwischen diesen Punkten müssen andere liegen, α , γ , ε , in

welchen in demselben Moment gar keine Bewegung vorhanden ist, die also in diesem Moment in Ruhe sind. Würde man einen Apparat haben, der die elektrischen Bewegungen an jeder dieser Stellen anzeigte, und würde man solche Apparate in diesem Moment an die Stelle α , β , γ , δ , ε , ζ , η u. s. w. bringen, so könnte man dann beobachten, wie in β und ζ die Bewegung von oben nach unten, in δ von unten nach oben geht, während je in der Mitte zwischen diesen, in α , γ , ε , η , in diesem Moment gar keine Bewegung stattfindet. Die Strecke $A\delta$ zwischen den beiden Stellen, an denen die Oszillationen gleich groß und gleich

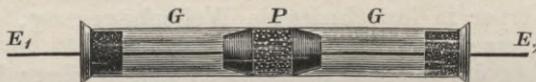
Fig. 237.



gerichtet sind, bezeichnet man als die Wellenlänge der Schwingung. Dieselbe Strecke ist zwischen α und ε oder zwischen β und ζ vorhanden.

Es muß also zunächst, und darauf kommt alles an, ein Instrument gefunden werden, welches das Vorhandensein und die Stärke der elektrischen Bewegung, die sich als Induktion äußert, an irgend einer Stelle des Raumes in der Nähe einer Schwingung erkennen lassen kann. Dieses Mittel fand Hertz darin, daß er an diejenigen Stellen, in denen er die elektrische Bewegung beobachten wollte, einen Leiter brachte, der eine kleine Luftstrecke enthielt, etwa einen zu einem nahezu geschlossenen Kreis gebogenen Draht. Infolge der Induktionswirkungen, die an der Stelle, wo dieser Leiter hingebbracht ist, herrschen, entstehen

Fig. 238.

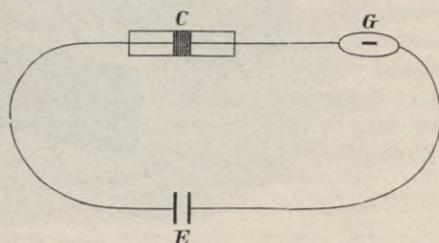


in ihm auch elektrische Spannungen, die sich durch das Überspringen von kleinen Fünkchen anzeigen. Indes ist die Beobachtung dieser winzigen Fünkchen sehr mühsam, und daher waren die Versuche von Hertz lange Zeit nur mit großen Hilfsmitteln auszuführen. Vor einigen Jahren aber beobachtete ein französischer Gelehrter, Branly, eine Erscheinung, die die Untersuchung solcher elektrischen Wellen außerordentlich erleichtert. Branly brachte nämlich in eine Glasröhre G wie in Fig. 238 grob gepulverte Metallspäne P und führte in die Glasröhre zwei Elektroden E_1 und E_2 ein, welche das Metallpulver berührten. Da der Kontakt zwischen den einzelnen lockeren Metallteilchen ein sehr schlechter ist, so hat ein solches System einen außerordentlich großen Leitungswiderstand, der nach Hunderttausenden von Ohm zählt. Ein Strom von einem galvanischen Element geht also nur in mini-

malen Beträgen durch eine solche Röhre hindurch. Sowie aber, und das war die Entdeckung von Branly, eine elektrische Welle auf diese Röhre fällt, treten zwischen den einzelnen lockeren Metallteilchen minimale, unsichtbare Fünkchen auf, welche die Oberfläche zweier benachbarten Metallspäne aneinander schweißen. Dadurch wird der Kontakt zwischen ihnen sofort ein guter und der Widerstand der Röhre sinkt sofort auf einen kleinen Betrag, etwa 5 oder 10 Ohm, herunter. Dasselbe galvanische Element, das vorher kaum einen Strom durch die Röhre hindurchgebracht hatte, liefert daher jetzt einen ganz kräftigen Strom hindurch.

Eine solche Röhre mit Metallpulver — man kann Eisen-, Nickel-Silberpulver oder anderes nehmen — ist also ein sehr feines Reagenzmittel auf elektrische Wellen. Man bezeichnet einen solchen Apparat als Kohärer, nebenbei bemerkt ein abscheulich gebildetes Wort, welches anzeigen soll, daß die lockeren Metallteilchen durch die Wellen kohärent werden. Um den Kohärer anzuwenden, bildet man, wie Fig. 239 zeigt, einen Stromkreis aus einem Element E, dem Kohärer C und einem Galvanoskop G.

Fig. 239.



Solange das Pulver im Kohärer locker ist, macht der Zeiger des Galvanoskops keinen Ausschlag. Sobald aber elektrische Wellen auf C fallen, fließt der Strom von E durch C und G, und das Galvanoskop schlägt aus. Einen Übelstand dieser Anordnung erkennt man aber

sofort. Sobald einmal die Wellen auf den Kohärer gefallen sind, hat dieser einen kleinen Widerstand erlangt und behält diesen natürlich auch bei, wenn die Wellen aufhören. Es ist ja kein Grund dafür vorhanden, daß die zusammengeschweißten Teilchen sich wieder trennen sollten. Man braucht aber dann nur die Röhre etwas durch Anklopfen zu erschüttern, dann lagern sich die Teilchen wieder locker an und der große Widerstand ist wieder da, der Kohärer kann von neuem funktionieren. Da nun aber dieses Anklopfen mit der Hand lästig

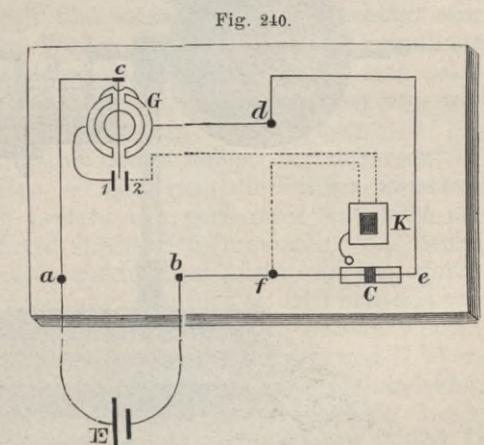
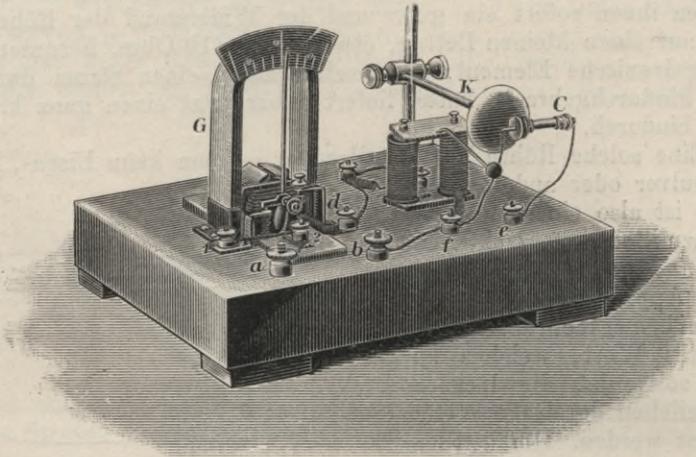


Fig. 240.

ist, so ersetzt man das vorteilhaft durch eine selbsttätige Anordnung. Man läßt nämlich den Strom von dem Element, sobald der Zeiger des Galvanometers ausschlägt, durch eine elektrische Klingel gehen, deren

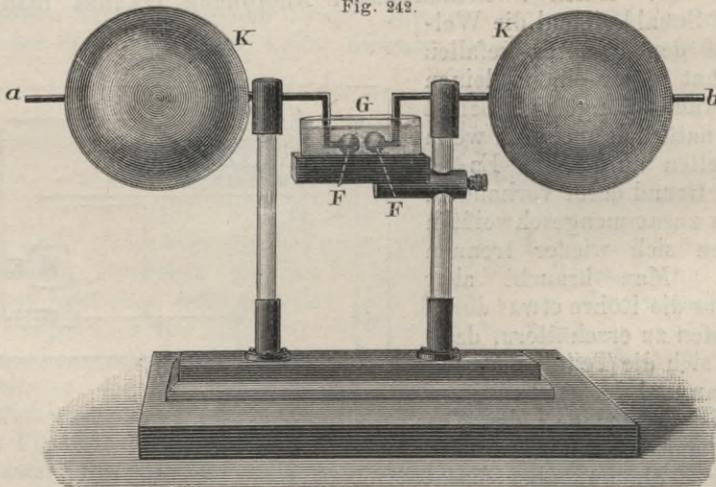
Klöppel den Kohärer anstößt, so daß dieser wieder den großen Widerstand annimmt. Eine solche Schaltung zeigt Fig. 240. Vom Element E geht der Strom vermittle b f durch den Kohärer C, dann durch e, d

Fig. 241.



zum Galvanoskop G und von dem Kontakt 1, an welchem der Zeiger des Galvanoskops in der Ruhe anliegt, durch ca zum Element zurück. Sowie nun der Zeiger des Galvanoskops ausschlägt und an 2 anliegt, geht der Strom von E durch b, f zur Klingel K und durch 2, c, a

Fig. 242.

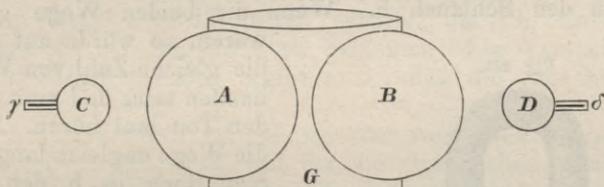


zum Element zurück. Der Kohärer wird dadurch erschüttert und kann wieder funktionieren. Eine Ansicht eines derartig eingerichteten Apparates gibt Fig. 241, in welcher die einzelnen Teile ebenso bezeichnet

sind, wie in Fig. 240; insbesondere ist C der Kohärer, K die Klingel, G das Galvanometer.

Mit einem solchen Kohärer ausgerüstet, ist es nun leicht, elektrische Wellen, auch außerordentlich schwache, zu erkennen. Wir erzeugen z. B. die Oszillationen in einem Apparat, wie Fig. 242. Auf zwei Stäben a, b sitzen, um die Kapazität zu vergrößern, zwei große Kugeln von je 15 cm Durchmesser, K und K. Am Ende jedes Stabes ist je eine kleine Kugel FF angebracht, zwischen denen die Funken übergehen. Diese kleinen Kugeln läßt man am besten nicht in Luft, sondern in Petroleum, das in dem Glasgefäß G sich befindet, einander gegenüber stehen, zu welchem Zweck die Stäbe rechtwinklig umgebogen sind. Die Anwendung des Petroleums hat den Vorteil, daß beim Funkenübergang die Kugeln nicht oxydiert werden, was der Entstehung der Wellen hinderlich ist. Der Strom von einem Induktionsapparat wird dem Leitersystem bei a und b zugeführt. Die Funken, die zwischen F und F entstehen, erzeugen dann Wellen, deren Länge noch einige Meter beträgt, also sehr groß ist. Daher verbreiten sich diese Wellen ganz wie Schallwellen, überall in einem Zimmer, und wo man auch den Kohärer hinstellt, meterweise entfernt von der Funken-

Fig. 243.



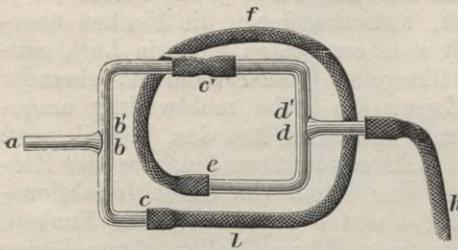
strecke, überall reagiert er, überall tönt seine Klingel und schlägt sein Galvanometer aus. Diese langen Wellen gehen eben nicht geradlinig fort, wie die kurzen Wellen des Lichtes, sondern sie breiten sich nach allen Richtungen aus und biegen sich bei allen Hindernissen um, wie die Schallwellen, die ja auch leicht um Ecken herum gehen.

Will man Wellen von geringerer Länge haben, die sich nicht so leicht nach allen Seiten ausbreiten, so muß man die Funken zwischen viel kleineren Leitern, zwischen Leitern von geringerer Kapazität erzeugen. Man erhält solche äußerst rasche Schwingungen, von denen etwa 2 Milliarden in einer Sekunde aufeinander folgen würden, durch eine von Righi angegebene Anordnung, die in Fig. 243 schematisch gezeichnet ist und die wir den Righischen Radiator nennen wollen. Die wirksamen Funken springen zwischen zwei Kugeln A und B über, welche zur Hälfte in die Wände eines Ebonitkästchens G eingelassen sind und zwischen denen Petroleum sich befindet. Außerhalb dieser Kugeln, aber nahe bei ihnen, stehen zwei kleinere Kugeln C und D mit Ansätzen, an welche bei γ und δ die Leitungen von dem Induktionsapparat oder der Influenzmaschine angelegt werden. Bei dem Spiel des Funkeninduktors springen Funken zwischen C und A und zwischen D und B über und zugleich zwischen A und B, und da diese letzteren

in dem System A, Petroleum, B erzeugt werden, das eine äußerst geringe Kapazität hat, so haben die entstehenden Wellen außerordentlich geringe Schwingungsdauer.

Man kann auf verschiedene Weise die Wellenlänge bestimmen, welche die von diesem Apparat ausgehenden Schwingungen in dem

Fig. 244.

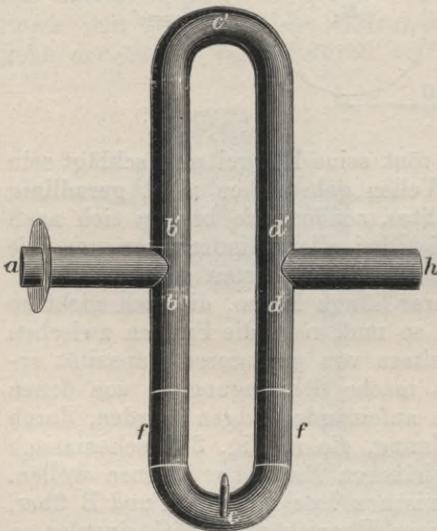


Äther der Luft erzeugen. Am einfachsten geschieht das dadurch, daß man eine Methode, die in der Akustik zur Messung der Wellenlänge von Schallwellen benutzt wird, auch hier anwendet. Wenn man die Schallbewegung, die etwa von einer angeschlagenen Stimmgabel ausgeht, durch ein Rohr von der Form der Fig. 244

gehen läßt, so tritt folgendes ein. Hält man die Stimmgabel an die Öffnung a, so pflanzt sich die Wellenbewegung dort bis b b' fort und teilt sich dann. Einerseits geht sie durch b' c' d' zu dem Schlauch h, den man etwa in das Ohr steckt, andererseits durch b, c, den Schlauch lf und durch e, d

ebenfalls in den Schlauch h. Wenn die beiden Wege gleich lang wären, so würde auf ihnen auch die gleiche Zahl von Wellen vorhanden sein, und man würde in h den Ton laut hören. Auch wenn die Wege ungleich lang sind, wird man doch in h den Ton laut hören, wenn nur der Schlauch lf so lang ist, daß der eine Weg um eine ganze Anzahl Wellen länger ist als der andere. Wenn aber der eine Weg um eine halbe Wellenlänge größer ist als der andere, so trifft im Schlauch h ein Wellenberg mit einem Wellental zusammen und diese Bewegungen heben sich auf, man hört nichts. Verlängert man aber den Schlauch lf von da an successive, so wird der Ton erst wieder entstehen und dann bei weiterer Verlängerung wieder verschwinden u. s. w. Die Verlängerung, die der Schlauch erfahren mußte, zwischen einem Verschwinden des Tones und dem nächsten ist gerade gleich zwei halben Wellenlängen des angewendeten Tones. Man kann also daraus diese Wellenlänge bestimmen und tut das in der Akustik auch. Nun aber können wir ganz dasselbe Experiment auch mit unseren elektrischen

Fig. 245.



Wellenlänge größer ist als der andere, so trifft im Schlauch h ein Wellenberg mit einem Wellental zusammen und diese Bewegungen heben sich auf, man hört nichts. Verlängert man aber den Schlauch lf von da an successive, so wird der Ton erst wieder entstehen und dann bei weiterer Verlängerung wieder verschwinden u. s. w. Die Verlängerung, die der Schlauch erfahren mußte, zwischen einem Verschwinden des Tones und dem nächsten ist gerade gleich zwei halben Wellenlängen des angewendeten Tones. Man kann also daraus diese Wellenlänge bestimmen und tut das in der Akustik auch. Nun aber können wir ganz dasselbe Experiment auch mit unseren elektrischen

Wellen machen. Wir benutzen dazu den Apparat Fig. 245. Aus Metall haben wir eine Doppelröhre geformt, so daß eine elektrische Welle, die von dem Righischen Radiator bei a erzeugt wird, sowohl durch a b f c f d, wie auch durch a b' c' d' nach h kommen kann. Der erstere Weg läßt sich aber variieren, indem bei f zwei gut ineinander passende Röhren ineinander geschoben sind, so daß wir sie nach Belieben, wie bei einer Posaune, ausziehen oder einschieben können. Stellen wir jetzt bei h unseren Kohärer auf, so zeigt er genau dasselbe, was bei dem akustischen Versuch unser Ohr zeigt. Wenn die beiden Wege, auf denen die elektrischen Wellen nach h kommen, gleich lang sind oder um ganze Wellenlängen verschieden sind, so schlägt das Galvanometer des Kohärers kräftig aus. Wenn aber durch Verstellen der Röhre bei ff bewirkt wird, daß die beiden Wege um eine halbe Wellenlänge verschieden sind, so bleibt der Kohärer ganz in Ruhe. Durch diesen Versuch ist erstens bewiesen, daß wir es tatsächlich mit Wellen zu tun haben. Denn das Zusammenwirken zweier solcher elektrischer Bewegungen bringt unter den angegebenen Umständen nicht verstärkte Bewegung, sondern Ruhe hervor, und das ist das Kennzeichen der Wellenbewegung. Zweitens aber können wir auch sofort die Wellenlänge messen, die die Schwingung unseres Righischen Radiators in dem Äther erzeugt. Sie ist nämlich gleich der Verlängerung, die wir dem Wege a b c d h geben müssen, um von einer Ruhelage des Kohärers zu der folgenden zu gelangen. Ein Versuch mit dem oben beschriebenen Radiator ergibt z. B., daß die von ihm erzeugte Wellenlänge gleich 6 cm ist.

Aus diesem Versuch können wir aber auch sofort berechnen, wie groß die Geschwindigkeit ist, mit der die elektrischen Wellen sich in dem Äther der Luft fortpflanzen. Denn da während der Dauer einer Schwingung sich die Bewegung gerade um eine Wellenlänge fortpflanzt, so ist allgemein bei jeder Wellenbewegung die

$$\text{Geschwindigkeit der Fortpflanzung} = \frac{\text{Wellenlänge}}{\text{Schwingungsdauer}}$$

Nun beträgt die Schwingungsdauer in unserem Righischen Radiator — man kann sie aus den Dimensionen der Kugeln berechnen — etwa 2 Zehntausendmillionstel einer Sekunde. Daraus ergibt sich die

$$\text{Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen} = \frac{6 \text{ cm}}{2 \text{ Zehntausendmillionstelsekunde}}$$

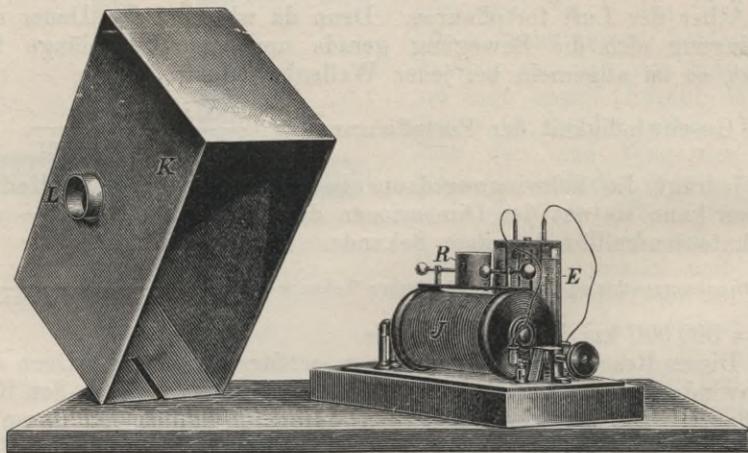
d. i. = 300 000 km in einer Sekunde.

Dieses Resultat ist nun aber von größter Bedeutung. Denn diese Geschwindigkeit ist dieselbe, mit der das Licht sich durch den Raum fortpflanzt. Die elektrischen Wellen durchlaufen also den Raum mit derselben Geschwindigkeit, mit der die Lichtwellen durch den Raum gehen. Da man nun gerade wegen dieser so großen Geschwindigkeit des Lichtes geschlossen hatte, daß die Substanz, in welcher die Lichtwellen verlaufen, ein sehr feiner, elastischer Stoff sein müsse, der Äther, so werden wir jetzt auch schließen müssen, was wir bisher schon antizipiert getan haben, daß diese elektrischen Wellen durch den Äther sich fortpflanzen. Ja, wir können noch weiter gehen. Wir

können sagen: Lichtwellen und elektrische Wellen sind ganz dasselbe, nämlich Schwingungen des Äthers, nur von ungleichen Größenverhältnissen. Lichtwellen, welche auf unser Auge wirken, haben Wellenlängen, die je nach der Farbe zwischen 4 und $7\frac{1}{2}$ Zehntausendsteln eines Millimeters liegen. Längere Wellen, bis zu 40 oder 50 Tausendsteln eines Millimeters, wirken noch erwärmend, thermisch, auf feine Apparate. Unsere elektrischen Wellen sind zwar sehr viel größer, ihre Wellenlängen sind einige Zentimeter oder Meter. Aber der Unterschied ist doch nur ein gradueller. Ebenso messen umgekehrt die Schwingungsdauern unserer elektrischen Wellen nach Hundert- oder Tausendmillionsteln von Sekunden, die der Lichtwellen sind noch viel kürzer, sie gehen in die Billionsteln von Sekunden. Man kann also auf Grund dieser Experimente sagen, elektrische Wellen von sehr kurzer Schwingungsdauer erscheinen uns als Lichtwellen, oder Ätherwellen von verhältnismäßig sehr großer Schwingungsdauer sehen wir nicht mehr als Licht, sondern sie zeigen sich uns durch ihre Induktionswirkungen an, sie sind elektrische Wellen.

Wenn das aber richtig ist — und in den Schlußfolgerungen steckt keine Lücke — so muß es auch möglich sein, mit den elektrischen Wellen ebensolche Erscheinungen hervorzurufen, wie mit Lichtwellen. Auch diese weiteren Folgerungen hat zuerst Hertz experimentell bewiesen, und mittels des Kohärrers und mit den kleinen Wellen, die unser Righischer Radiator liefert, ist es jetzt leicht geworden, derartige Versuche anzustellen. Da jedoch Wellen von mehreren Zentimeter

Fig. 246.

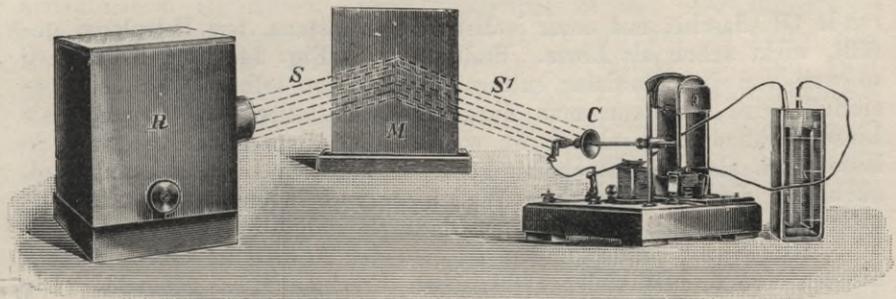


Länge immerhin schon so groß sind, daß sie nicht wie die Lichtwellen eine ganz geradlinige Ausbreitung zeigen, sondern sich leicht um Hindernisse, um Ecken herum beugen, so ist es für solche Versuche nötig, den Radiator samt dem Induktionsapparat und der Batterie in einen metallischen Kasten einzuschließen, der ein offenes, nicht zu

kleines Ansatzrohr hat, so daß nur durch dieses Rohr die Wellen nach außen in die Luft, resp. in den Äther der Luft dringen können. In Fig. 246 ist die Anordnung für diese Versuche gezeichnet. Man sieht rechts bei J den Induktionsapparat, bei E ein Element, das ihn treibt, und bei R den Righischen Radiator. Diese Apparate sind so eng zusammengestellt, daß man über sie den links sichtbaren Metallkasten K schieben kann, so daß die im Radiator erzeugten Funken ihre Wellen durch die Öffnung L des Kastens, und nur durch diese, heraussenden können. Wenn der Radiator in Tätigkeit gesetzt ist, so dringt also aus dem Rohr ein elektrischer Strahl heraus. Stellt man dann den Kohärer in der Richtung des Strahls in einiger Entfernung auf, so reagiert er. Bringt man ihn aus der Strahlrichtung heraus, so funktioniert er nicht.

Stellt man zwischen den Strahl und den Kohärer einen Schirm aus Metall, so hört der Kohärer auf zu funktionieren. Durch Metalle gehen also die elektrischen Wellen nicht hindurch. Dagegen gehen sie durch Isolatoren hindurch, durch Glas, Paraffin, Schwefel, Holz, durch verschlossene Türen dringen sie aus einem Zimmer in das an-

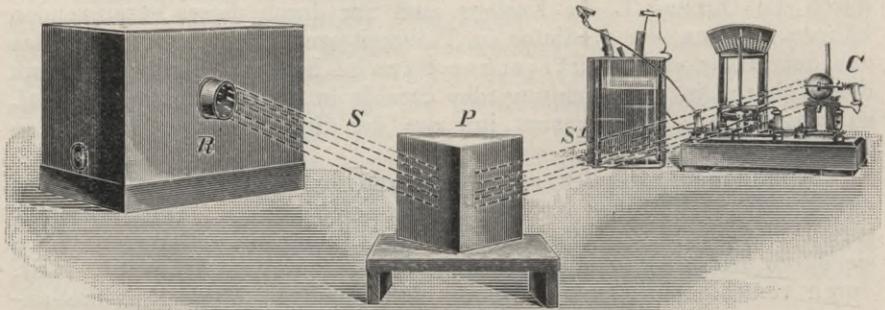
Fig. 247.



dere und man kann in einem ganz verschlossenen Zimmer das Galvanoskop des Kohäriers ausschlagen sehen, seine Klingel tönen hören, während die elektrischen Wellen außerhalb in einem entfernten Zimmer erzeugt wurden. Stellt man den Kohärer nicht in die Richtung des Strahls, sondern seitlich von ihm auf, so bleibt er in Ruhe. Läßt man aber, wie in Fig. 247, die elektrischen Strahlen S auf ein Metallblech M auffallen, so werden sie von diesem reflektiert, und man kann die Stellung des Metallblechs leicht so wählen, daß die reflektierten Strahlen S_1 auf den Kohärer C fallen und diesen anregen. Die elektrischen Strahlen lassen sich also genau so reflektieren, wie Lichtstrahlen. So wie ferner ein Lichtstrahl durch ein Prisma gebrochen, aus seiner geradlinigen Richtung abgelenkt wird, so werden auch die elektrischen Strahlen gebrochen. Bringt man, Fig. 248, ein Prisma P aus Paraffin, etwa von 15 cm Kantenlänge, in den Strahl S hinein, der vom Kasten R kommt, so wird der elektrische Strahl ebenso von der Kante weg gebrochen, wie ein Lichtstrahl, und man kann den seitlich stehenden Kohärer C damit zum Ansprechen bringen. Daraus

folgt, daß man auch durch Linsen die elektrischen Strahlen in einen Brennpunkt vereinigen können muß. Denn die Wirkung der Linsen beruht ja auch auf der Brechung, wie die der Prismen. Hier bei diesen zentimeterlangen Wellen braucht man mit der genauen Konstruktion der Linsenflächen nicht ängstlich zu sein. Eine gewöhnliche,

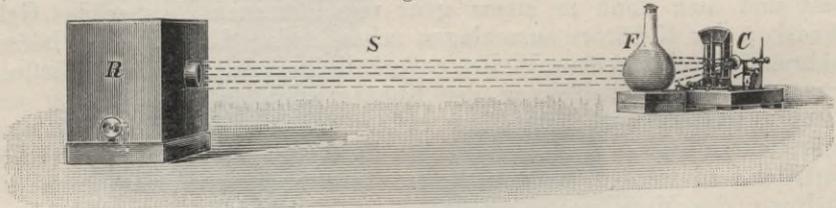
Fig. 248.



runde Glasflasche, mit einer isolierenden Substanz, wie Petroleum gefüllt, wirkt schon als Linse. Stellt man in Fig. 249 den Kohärer C so weit von dem Radiator entfernt, daß er von selbst nicht mehr beeinflußt wird, so kann man durch Zwischenstellen einer solchen als Linse wirkenden Flasche F ihn wieder zum Ansprechen bringen. So lassen sich also alle Erscheinungen, die bei dem Licht bekannt sind, auch mit diesen elektrischen Wellen hervorbringen und die Gleichartigkeit dieser Erscheinungen ist dadurch endgültig bewiesen.

Mit diesen Entdeckungen ist nun der Anfang zu einem mechanischen Verständnis vieler elektrischen Erscheinungen gemacht. Die

Fig. 249.



elektrischen Schwingungen pflanzen sich durch die Luft und überhaupt durch jedes Dielektrikum ebenso fort, wie die Lichtschwingungen, d. h. mit der Geschwindigkeit des Lichtes und als Transversalwellen. Die elektrische Bewegung an jeder Stelle des Dielektrikums ist immer senkrecht auf der Richtung, in der diese Bewegung durch das Dielektrikum weiterschreitet. Das ist der Begriff der Transversalwellen. Derartige Wellen finden z. B. an der Oberfläche eines Teiches statt, wenn man einen Stein hineinwirft. Jedes Wasserteilchen bewegt

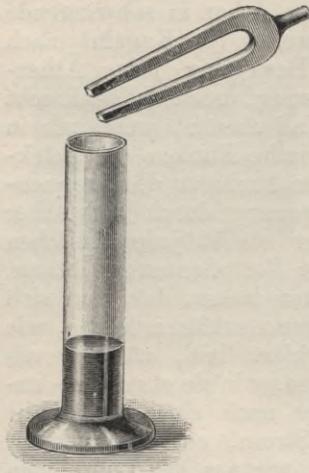
sich, „schwappt“ vertikal auf und nieder, aber die ganze Bewegung an sich schreitet (in Kreisen) an der Oberfläche des Teiches entlang. Die schwingende Bewegung jedes Wasserteilchens ist also senkrecht zu den Richtungen, in denen die Wellenbewegung fortschreitet. Eben-dasselbe findet statt, wenn irgendwo im Raume ein Streichholz angezündet wird. Von der Flamme aus wird der Äther in schwingende Bewegung versetzt und diese Bewegung schreitet (in Kugeln) nach allen Richtungen fort, jedoch so, daß die Bewegung jedes Äther-teilchens nicht in der Richtung der Fortpflanzung, sondern senkrecht dazu stattfindet. Wir haben Lichtwellen. Und ebenso, wenn wir in einem vertikalen geraden Draht durch elektrische Funken eine elek-trische Bewegung auf und nieder erzeugen (das Analogon des brennen-den Streichholzes), so pflanzt sich diese Bewegung durch den Äther senkrecht zu dem Draht fort und im Äther macht jedes Teilchen Bewegungen auf und nieder, senkrecht zu der Fortpflanzungsrichtung. Diese vollständige Analogie würde also vermuten lassen, daß man sich die elektrische Bewegung im Äther ganz ebenso erklären könne, wie man die Lichtbewegungen schon lange erklärt hat, nämlich als elastische Bewegungen, also als Bewegungen, wie sie etwa eine an-gestrichene Violine macht. Indes ist hier noch eine wesentliche Komplikation vorhanden. Jeder elektrische Strom, oder allgemeiner gesagt, jede elektrische Bewegung übt ja, wie wir aus der Lehre vom Elektromagnetismus wissen, magnetische Kräfte aus und zwar sind die magnetischen Kräfte immer senkrecht zu den elektrischen Be-wegungen, durch die sie erzeugt werden. Ebenso erzeugen magne-tische Kräfte, die sich verändern (also besser magnetische Bewegungen), immer elektrische Bewegungen senkrecht zu ihrer eigenen Richtung. Die Fortpflanzung von elektrischen Transversalwellen im Äther kommt nun dadurch zu stande, daß jede elektrische Bewegung rings um sich, aber senkrecht zu sich, eine magnetische Bewegung erzeugt und daß diese magnetische Bewegung wieder senkrecht zu sich eine elektrische Bewegung erzeugt, die dadurch der ersten parallel wird. Das ist ein ganz anderer Mechanismus der Fortpflanzung, als man ihn gewöhnlich bei elastischen Körpern annimmt. Eine Lichttheorie, die das Licht eben als speziellen Fall von elektrisch-magnetischen Schwingungen auffaßt, ist von Maxwell aufgestellt worden und wird die elektro-magnetische Lichttheorie genannt.

Gehen wir aber von dieser kurzen Erörterung über die theo-retische Auffassung der Erscheinungen nun wieder zu Tatsachen selbst über!

Die elektrischen Schwingungen, die durch Entladungen von großen oder kleinen Kondensatoren entstehen, sind mit den Lichtwellen von gleicher Natur, indem sie wie diese sich im Äther fortpflanzen und Schwingungszahlen haben, die in die Millionen oder Milliarden gehen. Die Lichtwellen haben zwar noch größere Schwingungszahlen, in die Billionen gehende, aber jedenfalls sind für unsere Verhältnisse die ersteren sowohl wie die letzteren ganz außerordentlich rasche Schwingungen. In einer anderen Hinsicht aber ähneln die elektrischen Schwingungen viel mehr den Schallwellen als den Lichtwellen, näm-

lich in Bezug auf die Wellenlänge. Die elektrischen Wellen, welche wir bequem erzeugen können, haben, wie erwähnt, Wellenlängen, die nach Zentimetern oder Metern messen, und von derselben Größenordnung

Fig. 250.

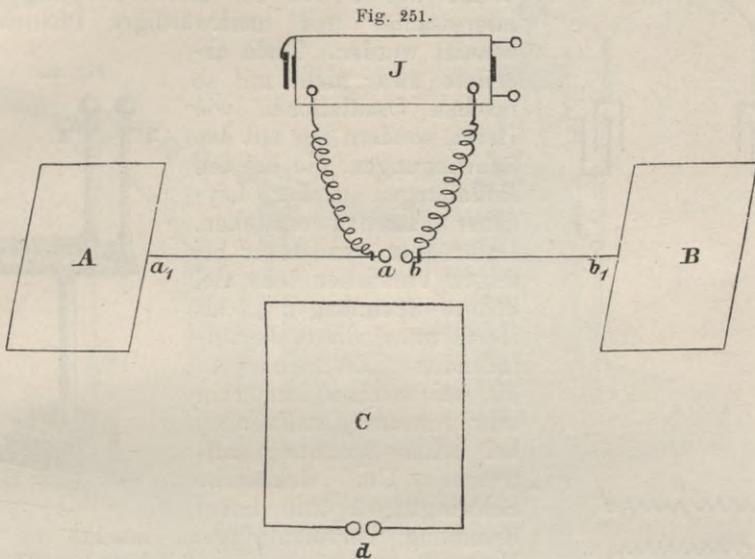


sind auch die Längen der Schallwellen in der Luft. Es hat z. B. der Ton e der eingestrichenen Oktave (e^1) eine Wellenlänge von rund einem Meter in der Luft, das c der viergestrichenen Oktave (c^4) eine solche von 16 Zentimetern u. s. f. Obwohl die angegebenen Töne sehr viel kleinere Schwingungszahlen haben als die entsprechenden elektrischen Schwingungen — nur einige Hundert oder Tausend, gegenüber den Milliarden — sind doch die Wellenlängen von derselben Größe. Das kommt daher, daß die Schall-schwingungen sich in der Luft mit einer verhältnismäßig sehr kleinen Geschwindigkeit (33 000 Zentimeter pro Sekunde) fortpflanzen, während die elektrischen Wellen sich im Äther mit der ungeheuren Geschwindigkeit ausbreiten.

Aus der Vergleichbarkeit aber in den Größenordnungen der Länge der Schallwellen und der elektrischen Wellen ergibt sich, daß man eine Reihe von Schallphänomenen auch leicht durch die elektrischen Wellen nachahmen kann. Das wichtigste und interessanteste Beispiel dafür bietet die Erscheinung der Resonanz. In der Akustik ist es bekannt, daß man durch den Ton eines Instrumentes, einer Pfeife, einer Stimmgabel, einer Glocke oder dergl. ein anderes Instrument zum lauten Tönen anregen kann, wenn der Ton des anregenden Instrumentes mit dem Eigentone des angeregten übereinstimmt. Man sagt dann, das angeregte Instrument tönt durch Resonanz. Man kann diese Erscheinung am leichtesten und deutlichsten zeigen, wenn man Luftsäulen zur Resonanz bringt. Man nimmt zu dem Zweck, wie in Fig 250, ein hohes Glasgefäß, das man zum Teil mit Wasser füllt, so daß über dem Wasser eine Luftsäule von beliebig zu bestimmender Höhe bleibt. Eine solche Luftsäule kommt nun zum kräftigen Tönen, sobald man an die Öffnung des Glases eine angeschlagene Stimmgabel hält, die gerade den passenden Ton hat, nämlich denjenigen, den die Luftsäule durch ihre Eigenschwingungen selbst erzeugt. Bei einer Reihe von Stimmgabeln wird gerade diejenige eine Verstärkung ihres Tones erfahren, auf welche die Länge der Luftsäule abgestimmt ist. Macht man durch Zugießen von Wasser die Luftsäule kürzer, so wird eine Stimmgabel mit höherem Ton die Resonanz anregen, macht man die Luftsäule länger, so wird es eine tiefere Stimmgabel sein, die anregend wirkt. Die Bedingung für das starke Mittönen, für die Resonanz, ist immer die, daß der Eigentone des Resonators übereinstimmt mit dem Ton des anregenden Instrumentes. Diese Eigenschaft der Resonanz ist nun nicht an den Schall gebunden, sondern sie hängt

von der Wellennatur des Schalls ab, sie muß sich also bei anderen Wellenbewegungen auch hervorbringen lassen und in der Tat hat Hertz bereits gezeigt, wie man auch bei den elektrischen Schwingungen leicht Resonanz erzeugen kann.

Zu dem Zweck erzeugen wir wieder (wie auf S. 266) elektrische Schwingungen in einem ausgespannten Draht a_1abb_1 mit angesetzten Platten A B und einer Funkenstrecke ab (Fig. 251), und in die Nähe dieser, wie wir sie nennen wollen, primären Schwingung bringen wir ein Drahtviereck C, das nahezu geschlossen, bloß durch eine kleine Funkenstrecke d, die wir uns regulierbar denken, unterbrochen ist. Die elektrischen Schwingungen in A und B erzeugen durch Induktion natürlich auch elektrische Schwingungen (sekundäre) in dem Drahtviereck C, die sich durch Fünkchen in d anzeigen. Man kann aber diese sekun-

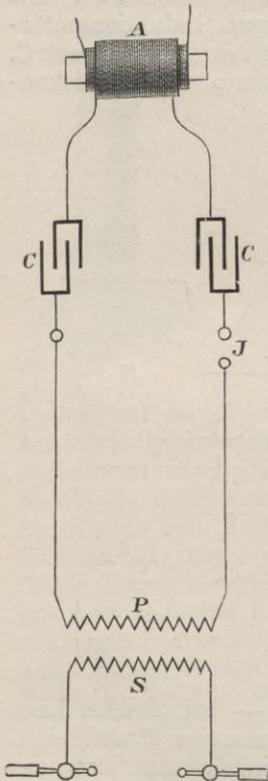


dären Schwingungen bedeutend kräftiger machen — bei gleicher Lage von C gegen den primären Stromkreis — indem man den Drahtkreis C auf die primäre Schwingung abstimmt, also indem man Resonanz zu erzielen sucht.

Da die Schwingungszahl elektrischer Schwingungen in einem Drahtsystem nur abhängt von der Kapazität und der Selbstinduktion des Systems, so erkennt man, daß man eine solche Abstimmung erreichen kann, indem man in dem primären System A a b B oder in dem sekundären System C die Kapazität oder die Selbstinduktion oder beide passend ändert. Man kann also z. B. die Platten A und B größer oder kleiner machen, wodurch die Kapazität des primären Systems vergrößert oder verringert wird, oder man kann statt der geraden Drähte aa_1 und bb_1 spiralförmig gewundene einführen, wodurch die primäre Selbstinduktion vergrößert wird. Oder man kann ferner an die Drähte von C Stanniolstreifen verschiedener Größe anhängen, wodurch

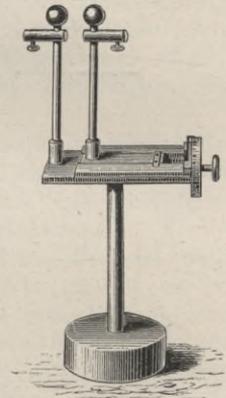
die Kapazität von C verändert wird, oder endlich kann man auch in C statt der geraden Drähte spiralförmige einführen, oder man kann die Länge der Seiten verändern, wodurch immer die Selbstinduktion variiert wird. Durch diese verschiedenen Mittel hat man es in der Hand, den sekundären Drahtkreis C auf die primäre Schwingung abzustimmen, ihn mit ihr in Resonanz zu bringen, was sich immer durch bedeutend stärkere Schwingungen in C, also durch lebhaftere und längere Funken in d anzeigt. Bei den neueren Verbesserungen der Telegraphie ohne Draht haben diese Resonanzerscheinungen eine wichtige Anwendung gefunden.

Fig. 252.



Die elektrischen Schwingungen, die Hertz in so genialer Weise zur Auffindung neuer Erscheinungen benutzt hat, sind in anderer Weise von Tesla zur Hervorbringung sehr interessanter und merkwürdiger Phänomene benutzt worden. Tesla arbeitete zwar nicht mit so raschen Oszillationen wie Hertz, sondern nur mit den Schwingungen, die bei den Entladungen großer Leydener Flaschen entstehen. Dafür aber wendete er bei seinen Versuchen sehr viel höhere Spannungen an als Hertz und studierte die auffallenden Erscheinungen, die bei solchen immerhin sehr raschen Oszillationen bei hoher Spannung auftreten. Um elektrische Schwingungen mit hoher Spannung hervorzubringen, machte er eine Versuchsanordnung, die auf folgendem Prinzip beruht.

Fig. 253.

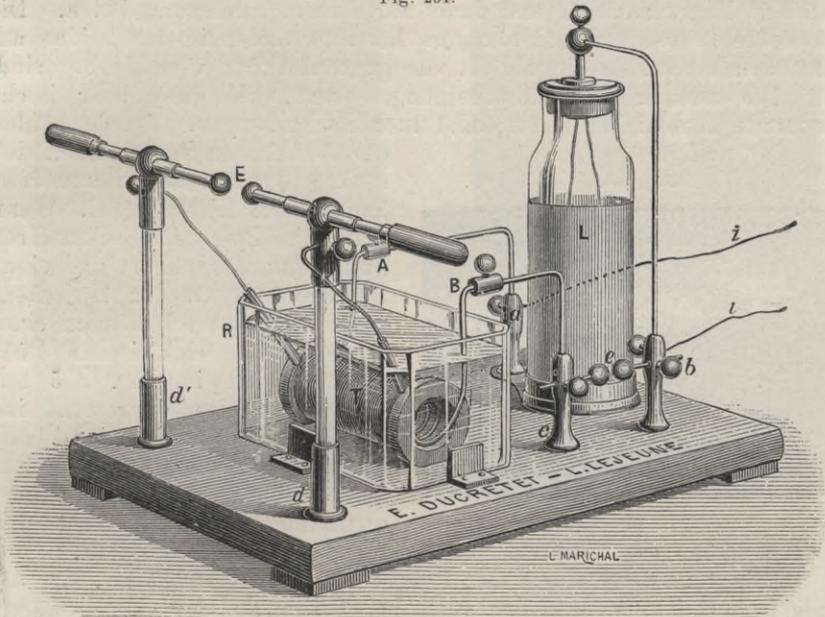


Wenn man große Leydener Flaschen durch eine starke Elektrizitätsquelle ladet und dann durch einen Funken entladet, so erhält man elektrische Oszillationen, deren Zahl in einer Sekunde viele Hunderttausende bis etwa eine Million ist. Diese sehr rasch wechselnden Ströme läßt nun Tesla durch eine primäre Induktionsspule von sehr geringem Widerstand gehen und erhält also in dieser Spule Wechselströme von großer Schwingungszahl (Frequenz) und verhältnismäßig großer Stromstärke. Um die primäre Spule ist nun eine sekundäre Spule mit sehr vielen Windungen eines dünnen, vorzüglich isolierten Drahtes gelegt. In dieser werden also nun Induktionsströme erzeugt, und zwar ist deren Spannung eine außerordentlich hohe, weil eben der primäre Strom in so sehr kurzer Zeit seine Stärke und Richtung ändert. Man erhält daher in der sekundären Spule Ströme von außer-

ordentlich hoher Spannung und sehr großer Frequenz und kann nun die Eigenschaften solcher Ströme studieren.

Diese Anordnung von Tesla ist in Fig. 252 schematisch gezeichnet. Durch einen großen Funkeninduktor A werden die Leydener Flaschen CC geladen, indem die Pole der sekundären Spule des Funkeninduktors mit den beiden inneren Belegungen der Flaschen verbunden werden. Die äußeren Belegungen (die entgegengesetzt geladen sind) sind durch eine Funkenstrecke J und die primäre Induktionsspule P miteinander verbunden. Die sekundäre Spule S ist dann diejenige, an deren Polen DD sehr hohe Spannungen mit sehr großer Frequenz auftreten. Die beiden Spulen P und S in dieser Anordnung bezeichnet man zweck-

Fig. 254.



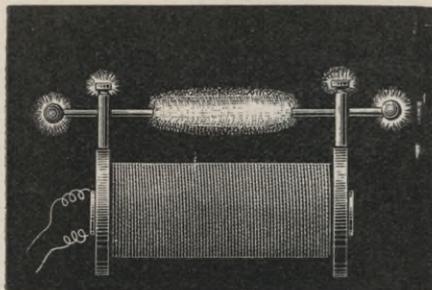
mäßig als Teslaschen Transformator. Die Funkenstrecke J wird am besten aus einem Funkenmikrometer (Fig. 253) gebildet. Zwei Kugeln (mit Klemmschrauben) sind auf Glasfüßen befestigt, von denen der eine feststeht, während der andere mit seiner Kugel auf einem Schlitten vermittels einer Schraube bewegt werden kann. Man nähert die bewegliche Kugel der festen so weit, bis regelmäßig Funken überspringen. Die primäre Induktionsspule P und die sekundäre Spule S müssen, wegen der hohen Spannungen, sehr sorgfältig voneinander isoliert werden und in der letzteren müssen auch die einzelnen Windungen mit großer Sorgfalt voneinander isoliert werden. Das geschieht am besten dadurch, daß man die dünnen Drähte der sekundären Spule mit einem sehr guten Isolator (Kautschuk) umkleidet und die ganze Spule in ein Gefäß voll Öl stellt, das man durch Auspumpen sorgfältig von aller Luft befreit.

Man kann auch eine Leydener Flasche allein anwenden und deren beide Belegungen mit den beiden Polen des Ruhmkorff verbinden und sie dadurch laden lassen. Die Entladung geschieht dann dadurch, daß man die beiden Belegungen wieder durch eine Funkenstrecke und die primäre Spule des Teslaschen Transformators miteinander verbindet.

Eine Ansicht dieser Zusammenstellung für die Teslaschen Versuche zeigt Fig. 254. Man sieht die Leydener Flasche L., die von dem (nicht gezeichneten) Induktionsapparat vermittle der Drähte I und I geladen wird. Die Entladung der Flasche geht von der inneren Belegung durch die Funkenstrecke e, dann durch die inneren (primären) Windungen des Teslatransformators T, welcher in dem ölgefüllten Gefäß R liegt, nach A und dann zur äußeren Belegung bei a. Die sekundäre Rolle des Transformators hat ihre Enden in den beiden auf Glasfüßen stehenden Kugeln E, die gegeneinander verschiebbar sind.

Die auffallendsten Erscheinungen nun, die diese sehr hochgespannte Elektrizität bietet, sind Lichterscheinungen. An den Polen

Fig. 255.



der sekundären Spule bilden sich senkrecht nach außen ausstrahlende blaue Lichtbüschel. Wenn man die Pole der sekundären Spule einander nähert und einen Luftstrom gegen den Zwischenraum bläst, so erhält man eines der schönsten elektrischen Phänomene, das in Fig. 255 nur andeutungsweise dargestellt ist. Es bildet sich nämlich eine Flammenmenge zwischen den Polen, die aus dünnen und dicken silberglänzenden Fäden besteht und

gewissermaßen ein Netzwerk von elektrischen Funken darstellt.

Bringt man an einem der Pole einen langen Draht an, der am Ende isoliert ist, so schießen auch bei diesem auf der ganzen Länge desselben bläuliche Strahlen senkrecht zum Draht hervor. Legt man an beide Pole je einen Draht und führt dieselben parallel zueinander in nicht zu großer Entfernung, so schießen die Strahlen von dem einen Draht zum anderen über und bilden ein langes, schmales, bläulichweißes Lichtband, wie es Fig. 256 darstellt. Man kann diesen Versuch vielfach variieren. Einen sehr hübschen Anblick gewährt er in folgender Form, die in Fig. 257 dargestellt ist. Der eine Pol der sekundären Spule ist mit einem kleinen Drahtkreis, der andere mit einem größeren verbunden und die Strahlen gehen nun fast kontinuierlich zwischen den beiden Kreisen über und bilden einen leuchtenden Kegelstumpf.

Die Entladungen gehen bei diesen Versuchen leichter durch die Luft als durch Drähte. Dies ist gerade eine Folge der hohen Wechselzahl. Denn infolge der raschen Änderungen des Stromes werden auch die Extraströme sehr stark, und wenn das Selbstpotential des Drahtes,

durch welchen die Ströme gehen sollen, einigermaßen groß ist, so schwächen die Extrastrome den Strom so bedeutend, daß er überhaupt nicht durch den Draht gehen kann. Allgemein kommt es für diese raschen Oszillationen nicht auf den Widerstand der Strombahn an,

Fig. 256.

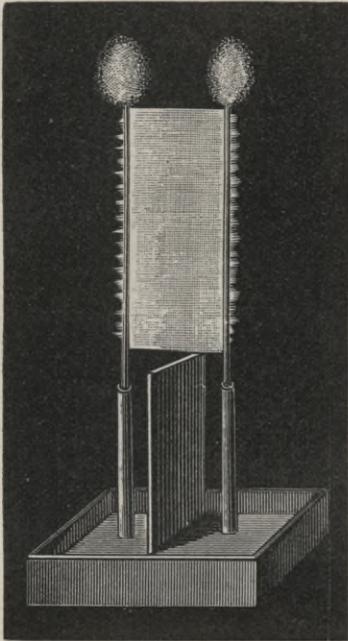
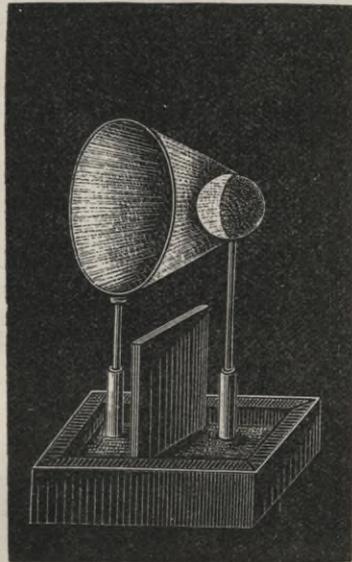


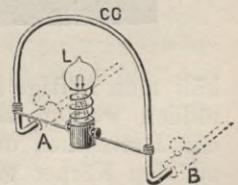
Fig. 257.



sondern auf das Selbstpotential derselben. Die Oszillationen gehen leichter durch eine Luftstrecke von 1 cm Länge, als durch einen Kupferdraht von 2 cm Länge, eben weil das Selbstpotential, das der 2 cm lange Kupferdraht besitzt, größer ist, als das der Luftschicht von 1 cm, während der Widerstand der Luftschicht millionenmal größer ist, als der des Kupferdrahtes.

Auf diesem Grunde beruht folgendes interessante Experiment. Wenn man, wie in Fig. 258, einen dicken Kupferstreifen CO mit den beiden Polen der sekundären Spule des Teslatransformators verbindet (bei A und B) und parallel zu ihm eine kleine Glühlampe L schaltet, so leuchtet die Glühlampe. Ein konstanter Strom oder ein Strom mit geringerer Frequenz würde nur durch den dicken Kupferstreifen und bloß zu einem ganz minimalen Bruchteil durch den Kohlenfaden der Glühlampe gehen, da dieser ja sehr viel größeren Widerstand hat, während unser Teslastrom hauptsächlich durch die Glühlampe geht, weil diese eben (wegen der geringeren Länge des Fadens) geringeres Selbstpotential hat.

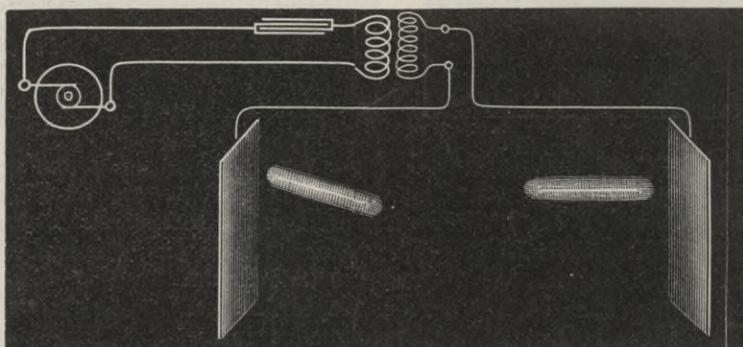
Fig. 258.



Berührt man einen der sekundären Pole des Teslatransformators mit einer Geißlerschen Röhre (einer geschlossenen Röhre, in der die Luft sehr verdünnt ist), so leuchten diese hell auf. Aber auch ohne direkte Berührung leuchten solche Röhren, wenn sie bloß in die Nähe der Pole gebracht werden. Die elektrische Bewegung strahlt eben von den Polen aus, geht durch den Äther hindurch und erregt die verdünnten Gase in Geißleröhren. Wenn man mit den Polen der Teslarolle je eine Metallplatte verbindet, wie in Fig. 259, und die Platten einander gegenüberstellt, so herrschen in dem ganzen Raume zwischen ihnen starke elektrische Kräfte, und Geißleröhren, die frei in diesen Raum gebracht werden, leuchten hell auf. Tesla hat auf diese Erscheinung die Hoffnung gegründet, eine ideale elektrische Beleuchtung einzurichten. Es sollten in dem zu beleuchtenden Raum nur an zwei gegenüberliegenden Wänden derartige große Metallplatten aufgestellt werden und mit den Teslapolen verbunden werden. Dann kann man an beliebiger Stelle des Raumes durch eine Geißlersche Röhre ohne jede Drahtverbindung Beleuchtung hervorbringen. Allerdings ist in diesem Projekt ein gut Teil Zukunftsmusik enthalten.

Sehr auffallend ist es, daß die elektrischen Oszillationen von hoher Frequenz eine außerordentlich geringe physiologische Wirkung auf den menschlichen Körper ausüben. Wenn man einen gewöhnlichen, langsam wechselnden Induktionsstrom, wie er von einem gewöhnlichen Induktionsapparat geliefert wird, durch den Körper gehen läßt, so er-

Fig. 259.



hält man heftige Schläge, die bei großer Intensität des Stromes sogar tödlich werden können. Die raschen Oszillationen dagegen, die bei den Hertzschen und Teslaschen Versuchen angewendet werden, wirken auf den Körper gar nicht oder nur sehr unbedeutend ein. Man kann die Pole der Teslaschen Spirale mit den Händen anfassen und die Oszillationen durch den Körper hindurchgehen lassen, man kann solche Funken von einem halben Meter Länge aus dem einen Pol einfach in die Hand schlagen lassen, ohne einen Schmerz zu fühlen. Es beruht das vermutlich darauf, daß solche rasche Schwingungen gar nicht in das Innere der Leiter, also auch nicht in das Innere des menschlichen

Körpers eindringen, sondern sich wesentlich an der Oberfläche desselben verbreiten.

Wir kommen hier zu einer neuen Auffassung des Vorganges bei elektrischen Strömen, welche sich in den letzten Jahren Bahn gebrochen hat und welche im Einklang ist mit der Faradayschen Auffassung der elektrostatischen Erscheinungen (oben S. 43). Wenn irgendwo im Raume eine elektrische Bewegung aus irgend einem Grunde verursacht wird — z. B. indem Zink und Kupfer in Schwefelsäure gestellt und miteinander verbunden werden, oder indem eine Leydener Flasche entladen wird —, so verbreitet sich diese elektrische Bewegung zunächst durch die Luft, oder besser durch den in der Luft enthaltenen Äther und schreitet in dieser wellenförmig fort. Wenn sie aber an einen Leiter kommt, so schreitet sie längs des Leiters, aber immer noch in dem umgebenden Dielektrikum, mit der Geschwindigkeit des Lichtes fort. Der Leiter hat also die Eigenschaft, wirklich eine Leitung für die elektrische Bewegung zu bilden, aber nur insofern, als er die Bewegung — die tatsächlich nur im Dielektrikum vorhanden ist — zwingt, an seiner Oberfläche zu bleiben und sich nicht zu zerstreuen. In den Leiter selbst aber dringt von der elektrischen Bewegung, wenn sie rasch ist, nichts ein. Die leitenden Körper sind also eigentlich Nichtleiter der elektrischen Bewegung, während die Isolatoren Leiter derselben sind. Gerade darum aber erscheint eben an den Leitern die Elektrizität, während sie im allgemeinen in den Nichtleitern nicht erkennbar ist. Die Begriffe Leiter und Nichtleiter sagen also an sich in dieser Auffassung nichts Bestimmtes aus; man muß hinzufügen, was geleitet oder nicht geleitet wird, ob die elektrische Bewegung — diese geht eben nur durch die Dielektrika hindurch — oder der scheinbare Träger derselben, die Elektrizität, die scheinbar an der Oberfläche von Leitern sich verbreitet.

Aber unabhängig von allen Erklärungen hat sich aus allen Erörterungen dieses Abschnittes ergeben, daß sich die Elektrizität fast unmittelbar, fast ohne besondere Hilfsmittel in alle anderen Erscheinungsformen der Naturkräfte umwandeln läßt, eine Eigenschaft, welche die Elektrizität allen anderen Naturkräften voraus hat. Und zu dieser Eigenschaft kommen noch die beiden großen Vorzüge hinzu, daß sich der elektrische Strom mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortpflanzt, und daß er immer auf vorgeschriebenen Bahnen, auf den Leitungsdrähten, bleibt. So kann man die Elektrizität in einem Moment hinleiten, wohin man will, und kann ihre Wirkungen hervorbringen, wo man will, ganz unabhängig von dem Ort, wo man sie erzeugt hat. Die Elektrizität überwindet gewissermaßen Raum und Zeit. Keine andere Naturkraft hat diese brauchbaren Eigenschaften, und daher ist keine andere Naturkraft, selbst die Wärme nicht, in so eminentem Maße anwendbar, wie die Elektrizität.

12. Kapitel.

Der Durchgang der Elektrizität durch Gase. Die Röntgenstrahlen und Becquerelstrahlen.

In allen bisherigen Kapiteln war von dem Verhalten der Luft oder anderer Gase gegenüber der Elektrizität nur sehr vorübergehend die Rede. Das Verhalten der Metalle, der Flüssigkeiten und der Dielektrika in Bezug auf den Strom wurde ausführlich angegeben, aber nicht das der Gase. Und das mit vollem Grund. Denn die Gase bilden in Bezug auf ihre elektrischen Eigenschaften auch heute noch ein schweres Kreuz für die Erkenntnis. Die Wissenschaft ist auch heute noch nicht viel weiter, als daß sie die verschiedenen Erscheinungen beim Durchgang der Elektrizität durch Gase klassifizieren und die Bedingungen, unter denen sie auftreten, genau angeben kann. Zu einer tieferen Begründung, zu einer Erklärung, zu einer Zurückführung dieser Erscheinungen auf einfache Gesetze ist erst ein Anfang gemacht.

Die bekannteste elektrische Erscheinung in Gasen ist der elektrische Funke. Wenn zwei entgegengesetzt geladene Leiter einander genähert werden, so springt zwischen ihnen, noch ehe sie zur Berührung kommen, solange sie also noch durch einen Luftzwischenraum getrennt sind, ein heller Funke mit einem knatternden oder zischenenden Geräusch über. Durch diesen Funken findet eine Entladung der beiden Leiter statt; denn untersucht man sie nach dem Überspringen des Funkens, so findet man sie unelektrisch. Es ist also während der Dauer dieses Funkens die Elektrizität durch die Luft von dem einen Leiter zum anderen übergegangen. Daß dieser Übergang nicht ein so einfacher ist, wie man zunächst annehmen sollte, sondern ein oszillatorischer ist, haben wir auf S. 263 gesehen. Das kommt aber hier nicht in Betracht.

Wie weit die beiden Leiter voneinander entfernt sein dürfen, damit ein Funke zwischen ihnen auftritt, das hängt hauptsächlich von dem Spannungsunterschied zwischen ihnen ab, ein wenig auch von der Form der Leiter. Man bezeichnet den Abstand zweier geladenen Leiter, bei welchem gerade ein Funke überspringt, als die Schlagweite bei der gegebenen Spannungsdifferenz. Je größer der Spannungsunterschied zweier Leiter ist, um so größer ist die Schlagweite. Man bedient sich zur Messung der Schlagweite am besten des Funkenmikrometers

Fig. 260, das wir schon auf S. 281 beschrieben haben. Der Abstand der beiden Kugeln, bei dem gerade ein Funke überspringt, gibt also auch ein Maß für die Größe des Spannungsunterschieds, der zwischen ihnen herrscht. Sir W. Thomson (Lord Kelvin) hat zuerst die Spannungsdifferenz absolut in Volt gemessen, die zu bestimmten Schlagweiten gehört, und aus seinen Untersuchungen und denen anderer ergibt sich folgende Tabelle:

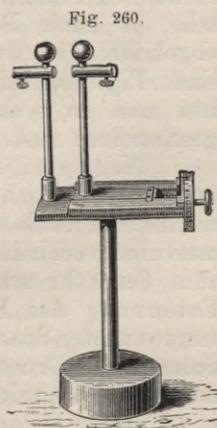
Schlagweite zwischen Kugeln	Spannungsdifferenz in Volt
0,5 mm	2910
1,0 "	4830
3,0 "	11460
6,0 "	20470
10,0 "	25410
15,0 "	29340
20,0 "	31350

Man sieht, daß schon eine Spannung von fast 3000 Volt nötig ist, um einen Funken von einem halben Millimeter Länge zu erzeugen, und daß mit der Größe der Schlagweite die zugehörige Spannungsdifferenz wächst.

Was nun bei diesem Übergang des Funkens durch die Luft geschieht, wie sich die Luftteilchen dabei verhalten, davon hat man noch gar keine Ahnung. Alles, was wir sagen können, ist nur, daß die Luft dem Durchgang der Elektrizität einen sehr großen Widerstand entgegengesetzt, der nur durch sehr hohe Spannungen überwunden werden kann.

Zeigt die Luft nun dieses Verhalten unter allen Umständen? Man kann ja die Luft vermittle der Luftpumpen in einem Raum beliebig verdünnen; wird sich auch verdünnte Luft so verhalten? Diese Frage, die man lange hätte aufwerfen können, ist doch erst 1854 von Gassiot in Frankreich und ausführlicher 1858 von Plücker in Bonn experimentell untersucht worden. Letzterer hatte sich dabei der Hilfe des berühmten Glasbläfers Geißler in Bonn zu erfreuen, welcher durch seine Kunst die Versuche wesentlich erleichterte. Um Experimente mit verdünnter Luft anzustellen, muß man die Luft in Gefäße (Glasgefäße, wenn man etwas sehen will) einschließen und abschließen. Ein solches Gefäß wird mit der Luftpumpe verbunden, evakuiert, soweit man es will, und dann entweder durch einen Hahn abgeschlossen oder abgeschmolzen. Will man ein Gefäß nicht mit Luft, sondern mit einem anderen Gas in verdünntem Zustand füllen, so muß man erst die Luft ganz auspumpen, dann das andere Gas einfüllen und dies durch Pumpen auf den gewollten Grad der Verdünnung bringen.

Bekanntlich wird der Druck eines Gases gemessen durch die Höhe einer Quecksilbersäule in Millimetern, welcher er das Gleichgewicht



hält. Ein Gas unter dem Druck einer Atmosphäre, wie die Luft, die uns umgibt, hat einen Druck von 760 mm (Quecksilber) am Meeresniveau, auf höher gelegenen Orten einen kleineren. Ist also der Druck in einem Gefäß durch Evakuieren auf 1 mm erniedrigt, so ist nur noch der 760. Teil der Luftmenge im Gefäß, die ursprünglich darin war.

Um durch ein verdünntes Gas die Elektrizität hindurchsenden zu können, muß man in das Gefäß, welches das Gas enthält, zwei Drähte

Fig. 261.

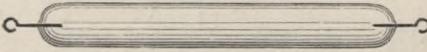
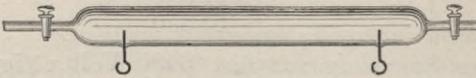


Fig. 262.



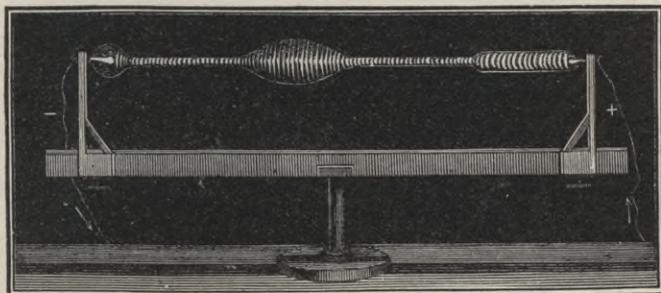
eingeführen (einschmelzen oder einkitten), welche mit der Elektrizitätsquelle verbunden werden können. Diese bezeichnet man hier auch als Elektroden und unterscheidet auch hier die positive Elektrode als Anode, die negative als Kathode. Die Elektroden können bloße Drähte sein, oder

es können Platten oder gekrümmte Flächen an den Drähten befestigt sein, je nach Bedarf. In Fig. 261 ist ein zugeschmolzenes Rohr abgebildet, in dessen beide Enden die Elektroden eingeschmolzen sind; Fig. 262 zeigt ein Rohr, das durch Hähne nach außen abgesperrt ist, und in welchem die Elektroden an der unteren Seite eingeschmolzen sind.

Wenn man nun in einem solchen Rohr die Luft mit der Luftpumpe allmählich verdünnt und die Elektroden des Rohres mit der sekundären Rolle eines Induktionsapparates oder mit einer Elektrisiermaschine verbindet, so findet man eine Reihe von merkwürdigen und zum Teil sehr schönen Erscheinungen. Wir wollen annehmen, daß die Entfernung der Elektroden so groß ist, daß in freier Luft bei der angewendeten Spannungsdifferenz kein Funken zwischen ihnen überspringt. Solange der Druck in der Röhre 760 mm beträgt, zeigt sich überhaupt nichts und es zeigt sich auch nichts, wenn man den Druck allmählich von 760 mm bis auf 6—8 mm verringert. Nur ganz schwache bläuliche, kurze Strahlen sieht man etwa von 50 mm Druck an von den Elektroden ausgehen. Ist aber der geringe Druck von etwa 6—8 mm erreicht, so sieht man zwischen den beiden Elektroden ein helles, violettes Lichtband sich erstrecken, welches nicht die ganze Breite der Röhre ausfüllt, welches auch nicht ganz geradlinig verläuft, welches sich aber direkt von der einen Elektrode bis zur anderen hinzieht. Macht man den Druck noch geringer, 1—3 mm, so bleibt immer ein solches violettes Licht zwischen den Elektroden, welches aber allmählich die ganze Breite der Röhre ausfüllt. Bei näherem Zusehen aber erkennt man, daß dieses Licht geschichtet ist. Es sind auf der ganzen Länge der Röhre abwechselnd helle und dunkle Schichten in nahezu gleichem Abstand voneinander vorhanden. Fig. 263 sucht eine Darstellung der Erscheinung zu geben, wie sie in einer solchen Röhre sich zeigt. Röhren von sehr verschiedener, oft sehr kunstvoller Form, mit Gasen gefüllt, welche bis auf 1—3 mm Druck evakuiert sind, wurden

zuerst von Geißler in Bonn in den Handel gebracht und heißen deshalb Geißlersche Röhren. Durch die leuchtende verdünnte Luft geht die Entladung der Elektrizität vor sich. Ist das Rohr gebogen oder gekrümmt, wie in Fig. 264, so folgt die Entladung allen

Fig. 263.

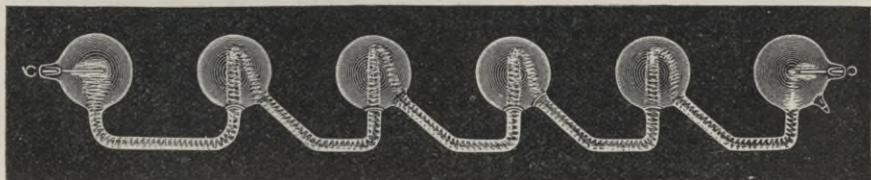


Krümmungen des Rohres und die Elektrizität geht auf ihnen durch die verdünnte Luft von der positiven zur negativen Elektrode über.

Die Farbe, in welcher das Gas leuchtet, ist verschieden, je nach der Natur der Gase. Wasserstoff, Stickstoff, Chlor u. s. w. in solche Röhren gebracht, leuchten anders als Luft, ja es ist sogar umgekehrt die Untersuchung dieser leuchtenden Gase in Geißlerröhren mit dem Spektroskop das sicherste Mittel, die Natur eines Gases zu erkennen.

Bei schärferer Beobachtung findet man, daß doch nicht, wie vorher angegeben, die leuchtende Entladung sich von der positiven bis zur negativen Elektrode erstreckt. Vielmehr sieht man, schon bei den angegebenen Drucken, daß die negative Elektrode mit einem bläulichen Lichtschimmer umgeben ist und daß das violette Licht nur bis nahe an dieses bläuliche Licht herankommt, aber doch von diesem noch durch einen kleinen dunklen Zwischenraum getrennt ist. Die leuchtende Entladung geht also von der positiven Elektrode aus, aber nicht ganz bis zur negativen Elektrode hin. Man nennt dieses helle,

Fig. 264.



im Falle der Luft violette Licht das positive Licht, oder die positive Entladung.

Die brillante Helligkeit und Farbenpracht, die das positive Licht in Geißlerröhren zeigt, ist Veranlassung, daß man diese vielfach benutzt, um schöne glänzende Farbeffekte hervorzubringen. So macht

man für Ballettvorstellungen Diademe aus Glasröhren wie Fig. 265, die mit verschiedenen Gasen gefüllt sind, und die als Geißlerröhren wirken.

Die Geißlerröhren enthalten, wie gesagt, Luft oder andere Gase in einer solchen Verdünnung, daß sie ungefähr 1—3 mm Druck zeigen. Geht man nun mit der Evakuierung solcher Röhren weiter, so verlieren die Erscheinungen zunächst an Brillanz. Die erste Folge des Weiterpumpens ist nämlich, daß der dunkle Raum zwischen der Kathode und dem positiven Licht an Ausdehnung fortwährend zunimmt. Man

Fig. 265.



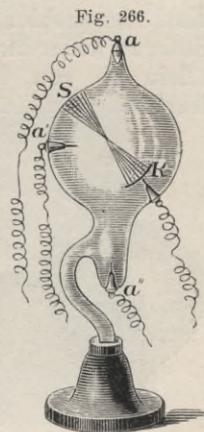
kann beim Pumpen direkt verfolgen, wie dieser dunkle Zwischenraum, der zuerst kaum 1 mm lang war, sich rapid vergrößert, auf 10, 20, 50 mm wächst, wenn man die Evakuierung bis auf Bruchteile eines Millimeters Druck fortsetzt. Die Röhre wird also in der Nähe der Kathode allmählich immer weiter dunkel, während an der Anode das positive Licht noch vorhanden ist, aber sich immer weniger weit von ihr aus in das Rohr hinein erstreckt und auch nicht mehr geschichtet ist. Durch fortgesetztes Evakuieren kann man schließlich erreichen, daß der dunkle Kathodenraum die Röhre ganz ausfüllt, bis nahe

an die Anode, daß also das positive farbige Licht bis auf einen kleinen Rest ganz verschwunden ist. Aber gleichzeitig mit dieser wachsenden Ausdehnung des dunklen Raumes geht eine andere Erscheinung vor sich, die zum ersten Male von Hittorf 1869 beobachtet wurde.

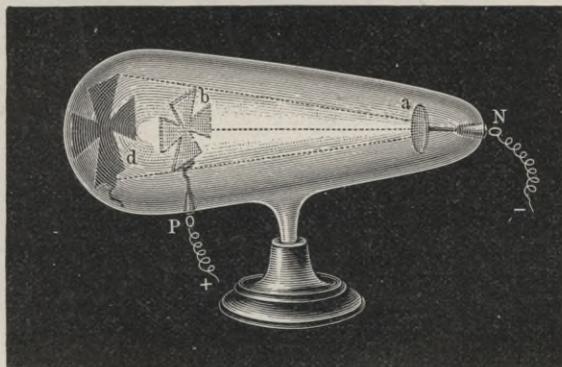
Von der negativen Elektrode, der Kathode aus, fangen nämlich bei diesen großen Verdünnungen an Strahlen auszugehen, welche das Glas der Röhre da, wo sie es treffen, zum hellen Leuchten (Phosphoreszieren) anregen. Die Gläser, welche in Deutschland zu diesen Röhren genommen werden, leuchten immer grün, andere (englische) Gläser leuchten blau. Man bekommt also die merkwürdige Erscheinung, daß zwar das Innere der Röhre bei fortgesetzter Evakuierung allmählich ganz lichtlos wird, daß dagegen das Glas der Röhre selbst, hauptsächlich da, wo es der Kathode direkt gegenüberliegt, hell grün phosphoresziert. Die hellste Phosphoreszenz zeigt sich, wie gesagt, gerade an derjenigen Stelle des Glases, welche der Kathode gegenüberliegt. Macht man durch Umkehrung des Stromes die andere Elektrode zur Kathode, so wird die dieser gegenüberliegende Glasstelle am lebhaftesten zur Phosphoreszenz erregt. Diese Erscheinung läßt sich am leichtesten so auffassen, als ob eben von der Kathode aus Strahlen ausgehen, die, wo sie auf das Glas fallen, dieses zur Phosphoreszenz bringen, die aber selbst im Innern der Röhre nicht sichtbar sind. Diese Strahlen bezeichnet man als Kathodenstrahlen. Nachdem Hittorf sie entdeckt hatte, erregten sie lange keine besondere Beachtung, bis Crookes 1879 die Aufmerksamkeit von neuem auf sie lenkte und durch die Herstellung von zweckmäßig geformten und genügend evakuierten Röhren, die man nach ihm Crookes'sche Röhren nennt, die Versuche mit Kathodenstrahlen wesentlich erleichterte. In den

Crookesschen Röhren ist die Luft sehr weit evakuiert, ungefähr bis auf $\frac{1}{1000}$ mm Druck, während, wie gesagt, die Geißlerröhren einen Druck von ungefähr 1 mm besitzen.

Die Kathodenstrahlen besitzen nun eine Reihe sehr merkwürdiger Eigenschaften. Zunächst nämlich gehen sie immer senkrecht zur Kathode fort, ganz unabhängig davon, wo die Anode sich befindet. Sie kümmern sich um die Anode gar nicht. Man kann die Anode der Kathode gegenüberstellen, oder sie seitlich von ihr lassen, oder sie hinter die Kathode stellen, oder sie als Ring die Kathode umgeben lassen, immer gehen die Kathodenstrahlen unabhängig davon denselben Weg, nämlich senkrecht zur Kathode fort. Da also von jedem Flächenstück auf der Kathode die Strahlen senkrecht fortgehen, so ist es möglich, die Kathodenstrahlen in einem Brennpunkt zu konzentrieren. Wird nämlich als Kathode nicht eine ebene Metallscheibe genommen, sondern ein hohlspiegelförmiges Metallstück wie bei K in Fig. 266, so müssen die Strahlen von ihr aus sich in einem Brennpunkt vereinigen und dann auseinander gehen. Es ist nun ganz gleichgültig, ob der positive Strom bei a, oder bei a', oder bei a'' in die Röhre eintritt, immer sieht man die Glaswand an der der Kathode gegenüberliegenden Stelle S am hellsten phosphoreszieren.



Der schärfste Beweis dafür, daß die Kathodenstrahlen sich ganz geradlinig ausbreiten, ist von Crookes durch einen Apparat, wie Fig. 267, geliefert worden. Dieser Apparat zeigt nämlich, daß wenn man einen undurchsichtigen Körper in den Weg der Kathodenstrahlen stellt, daß dieser dann einen scharfen Schatten wirft. In der Röhre ist bei b ein Metallkreuz befestigt. Bei a ist die Kathode, bei P die Anode. Die Kathodenstrahlen, die von a ausgehen, erregen die gegenüberliegende Wand zu heller Phosphoreszenz, überall wo sie sie treffen.

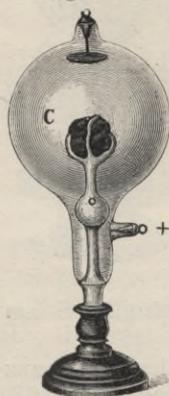


Wo aber die Kathodenstrahlen durch das Kreuz abgefangen sind, bleibt die Glaswand dunkel. Man sieht daher ein dunkles Kreuz d auf grünem Grunde an der Glaswand.

Eine zweite Eigenschaft der Kathodenstrahlen besteht darin, daß

sie nicht bloß das Glas der Röhre, sondern überhaupt jeden (unmetallischen) Körper, auf den sie treffen, zur Phosphoreszenz bringen. Es werden, um dieses zu zeigen, nach dem Vorgang von Crookes vielfach Röhren verfertigt, in deren Innerem verschiedene Mineralien so eingeschlossen sind, daß sie von den Kathodenstrahlen getroffen werden. So zeigt Fig. 268 eine Crookessche Röhre, in welcher in der Mitte bei c ein Mineral, sagen wir ein Stück Tropfstein, befestigt ist. Die Kathodenstrahlen, die von der Kathode oben ausgehen, bringen den Stein zu heller blaurosa Phosphoreszenz. Die Phosphoreszenzfarbe hängt allein ab von der Natur des bestrahlten Körpers; manche Körper leuchten blau, andere rot, violett, grün, und man erhält auf diese

Fig. 268.



Weise prachtvolle glänzende Farbenercheinungen. Photographische Platten, die den Kathodenstrahlen ausgesetzt werden (im Innern der Röhre), werden geschwärzt, und zwar in fast unmeßbar kurzer Zeit. Legt man auf die Platte etwa Metallbuchstaben, durch die die Kathodenstrahlen abgefangen werden, so bekommt man ein Bild dieser Buchstaben auf der Platte (im Negativ helle Buchstaben auf schwarzem Grund, im Positiv umgekehrt).

Die Kathodenstrahlen, das ist eine dritte Eigenschaft derselben, erhitzen die Stellen, auf welche sie auftreffen, im allgemeinen sehr stark. So wird das Glas der Crookesschen Röhren an den Stellen, wo es getroffen wird, rasch warm und kann so heiß werden, daß es erweicht und vom Luftdruck durchbrochen wird. Metallbleche, die im Innern der Röhre den Kathodenstrahlen ausgesetzt werden, fangen an, rot zu glühen, bei stärkerem Strom werden sie sogar weißglühend und schmelzen endlich fort.

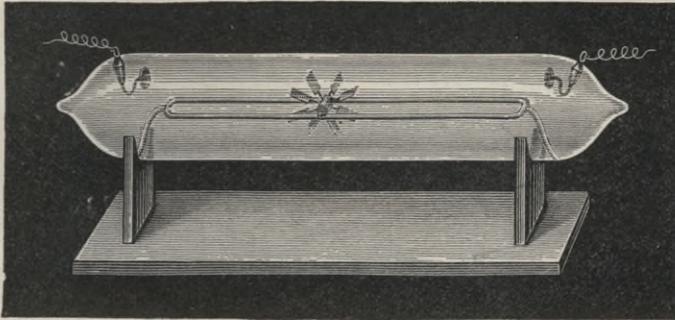
Eine vierte Eigenschaft der Kathodenstrahlen, eine der merkwürdigsten, ist ebenfalls, wie die bisherigen, schon von Hittorf gefunden. Die Kathodenstrahlen werden durch den Magneten sehr leicht abgelenkt. Bringt man in die Nähe einer von Kathodenstrahlen erfüllten Röhre einen Magneten, so kann man die Strahlen ablenken, wohin man will. Man sieht, wenn man den Magneten hin und her bewegt, die Phosphoreszenz des Glases bald an der einen Stelle, bald an einer anderen Stelle aufleuchten und mit der Bewegung des Magneten selbst wandern. Auch durch elektrostatische Einflüsse werden die Kathodenstrahlen abgelenkt. Führt man an der Glaswand der Röhre bloß mit dem Finger hin und her, so sieht man die Phosphoreszenzerscheinung ebenfalls wandern. Der Finger hat dabei offenbar nur die Bedeutung, daß er die statischen Ladungen der Röhre beeinflusst.

Endlich eine fünfte Eigenschaft der Kathodenstrahlen wurde nicht von Hittorf, sondern erst von Crookes entdeckt. Diese Strahlen üben nämlich mechanische Wirkungen auf leicht bewegliche Körper aus. In einer Röhre, wie Fig. 269, ist ein leicht bewegliches Flügelrad auf zwei Glasschienen verschiebbar angebracht. Läßt man die Ent-

ladung durch die Röhre gehen, so treffen die Kathodenstrahlen oben auf die Flügel, drehen diese und treiben das Rädchen auf der Bahn fort. Bei Umkehrung des Stromes kehrt sich auch die Bewegung des Rädchens um, falls beide Elektroden symmetrisch angebracht sind, wie in der Figur.

Gerade die letzterwähnte Eigenschaft der Kathodenstrahlen führte Crookes auf die Idee, daß diese Strahlen darin beständen, daß von der Kathode aus kleine Teilchen fortgeschleudert würden, entweder die Teilchen der noch vorhandenen Gase oder Teilchen der Kathode selbst,

Fig. 269.



oder vielleicht auch elektrolytische Bestandteile der Gasmoleküle. Dieser Ansicht, die der Emissionstheorie des Lichtes entspricht, wurde die andere entgegengestellt, daß die Kathodenstrahlen eine Wellenbewegung sind, von der Art der Lichtwellen. Weder die eine noch die andere Ansicht ist bis jetzt zweifellos begründet worden, die Ansicht von Crookes aber gewinnt mit einer gewissen Modifikation jetzt wieder erheblich an Anerkennung, da sie alle bisher bekannten Erscheinungen, die die Kathodenstrahlen bieten, ungezwungen erklärt.

Wenn man annimmt, daß in den Kathodenstrahlen irgend welche Massenteilchen, deren Natur vorläufig noch unbestimmt bleiben soll, sich rasch in der Richtung der Strahlen fortbewegen und daß diese Massenteilchen, ganz so wie die Ionen bei der Elektrolyse, elektrische Ladungen besitzen und zwar negative, so läßt sich erstens leicht einsehen, was der Versuch gezeigt hat, daß jedes Metallblech, das von den Kathodenstrahlen getroffen wird, negativ elektrisch werden muß. Die Phosphoreszenzerscheinungen ferner lassen sich durch den Anprall der bewegten Teilchen erklären. Durch das Bombardement der Teilchen kommen die getroffenen Moleküle der Glaswand oder der eingeschmolzenen Körper in Erzitterungen und senden dadurch das ihnen eigentümliche Phosphoreszenzlicht aus. Bewegte elektrische Massen müssen ferner durch elektrostatische Kräfte abgelenkt werden. Läßt man Kathodenstrahlen in der Röhre durch den Zwischenraum zwischen zwei Metallplatten gehen, von denen die eine positiv, die andere negativ geladen ist, so müssen die negativen Teilchen sich zur positiven Platte hinbiegen, vermöge der elektrostatischen Anziehungskräfte, was sie

auch tun. Je größer die lebendige Kraft jedes Massenteilchens, d. h. das halbe Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit ist, um so weniger, je größer die Ladung jedes Massenteilchens ist, um so mehr muß es unter sonst gleichen Umständen abgelenkt werden. Die Größe der Ablenkung hängt also ab einerseits von dem Quadrat der Geschwindigkeit der Massenteilchen, andererseits von dem Verhältnis der Elektrizitätsmenge, der Zahl der Coulomb, die jedes Teilchen mit sich führt, zu der Masse desselben, der Anzahl der Gramme.

Endlich aber repräsentieren elektrisch geladene Massenteilchen, die mit einer gewissen Geschwindigkeit sich fortbewegen, auch einen elektrischen Strom. Denn die Stromstärke ist gleich der pro Zeiteinheit durch jeden Querschnitt hindurchgehenden Elektrizitätsmenge, hängt also hier ab von der Elektrizitätsmenge jedes Teilchens und seiner Geschwindigkeit. Und da ein Strom, wie wir wissen, in einem magnetischen Felde von Kräften angegriffen und bewegt wird, so müssen auch die bewegten Teile in den Kathodenstrahlen von magnetischen Kräften angegriffen werden. Je größer die lebendige Kraft, um so geringer, je größer die Stromstärke, d. h. das Produkt aus Ladung und Geschwindigkeit ist, um so größer muß die Ablenkung sein. Man sieht, daß die magnetische Ablenkung einerseits von der Geschwindigkeit (nicht von deren Quadrat), andererseits wieder von dem Verhältnis der Zahl der Coulomb zu der Zahl der Gramme jedes Teilchens abhängt.

Die Annahme rasch bewegter Teilchen, die negativ geladen sind, erklärt also alle Erscheinungen der Kathodenstrahlen. Ja noch mehr. Wenn man die elektrostatische Ablenkung und die magnetische Ablenkung, die durch bekannte elektrostatische resp. magnetische Kräfte hervorgebracht werden, messend verfolgt, so kann man nach dem Gesagten daraus entnehmen, erstens, welche Geschwindigkeit diese Teilchen haben, und zweitens, wie groß die Zahl der Coulomb ist, die ein solches Teilchen pro Gramm mit sich führt. Solche Messungen sind in der Tat ausgeführt worden und haben erstens ergeben, daß die Geschwindigkeit der Teilchen in den Kathodenstrahlen eine sehr große ist, daß sie wächst, wenn die Röhre mehr evakuiert ist, und zwar bis zu einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit, eine ganz enorme Geschwindigkeit, die weitaus alles übertrifft, was sonst in der Natur an Geschwindigkeiten bewegter Massen zu finden ist. Zweitens aber ergab sich, daß jedes Gramm dieser Teilchen eine Ladung von etwa 100 Millionen Coulomb besitzen müsse. Da wir nun aus der Elektrolyse wissen, daß ein Gramm Wasserstoff nur 96 000 Coulomb mit sich führt, so folgt daraus, daß jedes Teilchen hier im Verhältnis zu seiner Masse sehr viel größere Ladung, etwa tausendmal so große, als bei der gewöhnlichen Elektrolyse besitzt. Es ist daraus der Schluß gezogen worden, daß in den Kathodenröhren die Gasmoleküle oder auch die Moleküle der Kathode selbst sich in noch sehr viel kleinere Teile, Elektronen genannt, teilen, als in die uns sonst physikalisch und chemisch bekannten Atome, die durch unsere sonstigen Hilfsmittel bekanntlich nicht weiter geteilt werden können.

Diese Untersuchungen bieten also die Möglichkeit, daß in den Kathodenstrahlen noch ganz neue, unbekannte Zustände der Materie vorhanden seien, deren Erforschung unsere Kenntnisse der Natur noch in ungeahnter Weise erweitern zu können scheint.

Lange Zeit schienen die Kathodenstrahlen, so wunderbare Eigenschaften sie auch besitzen, doch kaum mehr als ein Kuriosum zu sein. Sie schienen in die hoch evakuierte Röhre eingeschlossen sein zu müssen und es schien nichts von ihnen nach außen zu dringen. In der Röhre selbst werden die Strahlen schon durch dünne Schichten von Körpern aufgehalten. Eine dünne Glasplatte, in ihren Weg gestellt, phosphoreszierte auf der getroffenen Seite, ließ aber nichts von den Strahlen hindurch. So ließ auch die Glaswand der Röhre nichts von den Kathodenstrahlen nach außen dringen. Sie phosphoreszierte inwendig, und die ganze Energie der Kathodenstrahlen schien zur Erzeugung dieser Phosphoreszenz und zur Erhitzung der Glaswand verbraucht zu werden. Es wurde nun durch eine Beobachtung von Hertz, der in diesem Gebiet wie in so vielen anderen befruchtend gewirkt hat, gezeigt, daß durch äußerst dünne Schichten von Aluminium die Kathodenstrahlen hindurchgehen, und auf Grund dieser Beobachtung gelang es Lenard, indem er in die Glaswand ein kleines Stück von Aluminiumfolie einsetzte, die Kathodenstrahlen aus der Röhre hinaus in die Atmosphäre treten zu lassen. Es ergab sich die neue Tatsache, daß die Kathodenstrahlen auch in dichter Luft bestehen können, während sie nur in sehr verdünnter Luft entstehen können. Lenard zeigte weiter, daß die Kathodenstrahlen auch außerhalb der Röhre Körper zum Fluoreszieren erregen und photographische Platten belichten können. Er hatte schon bei seinen Kathodenstrahlen die wesentlichsten Eigenschaften beobachtet, die später bei den Röntgenstrahlen großes Aufsehen erregten. Die Versuche von Lenard zeigten auch unter anderem deutlich, was schon vorher von Hertz ausgesprochen war, daß es in einer Röhre Kathodenstrahlen verschiedener Art gibt, die von dem Magneten verschieden stark abgelenkt werden, vergleichbar mit den Lichtstrahlen verschiedener Farbe, die von einem Prisma verschieden stark gebrochen werden.

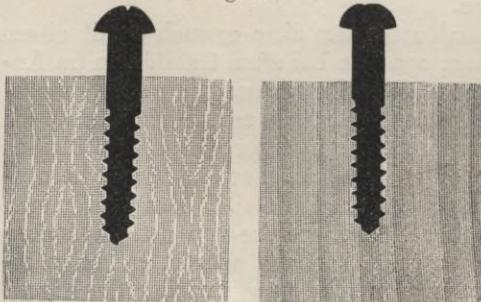
Das Interesse für die Kathodenstrahlen aber erwachte mit einem Male nicht nur bei den Physikern, sondern bei allen Gebildeten im Anfang des Jahres 1896 durch eine zufällige Entdeckung, die sofort merkwürdige praktische Anwendungen zeitigte. Es zeigte sich, daß die Kathodenstrahlen nicht durchans im Innern einer Glasröhre bleiben müssen, sondern daß es auch Strahlen gibt, die aus dem Glase heraustreten und weit in die freie Luft gehen können. Von derjenigen Stelle des Glases einer Crookeschen Röhre, welche von den Kathodenstrahlen getroffen und zur Phosphoreszenz erregt wurde, gehen nämlich, wie Röntgen fand, Strahlen aus, welche genau wieder die Eigenschaften von Kathodenstrahlen haben. Diese Strahlen geben sich dadurch zu erkennen, daß sie auf photographische Platten, die außerhalb der Röhre sich befinden, wirken, und ferner auch dadurch, daß sie fluoreszenzfähige Körper zum Leuchten (Fluoreszieren) erregen. Umhüllt man also eine Crookesche Röhre, um alle Wirkungen des sicht-

baren Lichts auszuschließen, mit einem schwarzen Karton oder mit schwarzem Tuch und bringt man in die Nähe der von den Kathodenstrahlen getroffenen Stelle des Glases einen Papierkarton, der mit Baryumplatincyannür bestrichen ist, so findet man, daß dieser hell grünlich aufleuchtet. Bringt man ebenso in die Nähe eine photographische Platte, so wird diese belichtet. Denn wenn man sie in gewöhnlicher Weise entwickelt, so zeigt sie sich vollkommen geschwärzt.

Diese unsichtbaren Strahlen gehen von derjenigen Stelle der Crookeschen Röhre aus, welche von den Kathodenstrahlen getroffen ist. Man kann das leicht nachweisen, indem man durch einen Magneten die Kathodenstrahlen im Innern der Röhre ablenkt und sie auf eine andere Stelle der Glaswand hinlenkt. Dann ist die neue getroffene Stelle die wirksame.

Das Merkwürdigste ist, daß diese Strahlen, die man jetzt als Röntgenstrahlen bezeichnet, durch die meisten nicht metallischen Körper leicht hindurchgehen, durch die gewöhnliches Licht nicht hindurchdringt. Insbesondere ist das Holz für diese Strahlen sehr leicht durchlässig. Sie gehen durch Holz ebenso leicht hindurch wie die gewöhnlichen Lichtstrahlen durch Glas. Daraus folgt, daß, wenn man eine photographische Platte durch sie belichten lassen will, man diese Platte ruhig in eine Holzkassette eingeschlossen ihnen exponieren darf. Dadurch hat man sofort ein Kriterium dafür, was durch Röntgenstrahlen und was durch gewöhnliches Licht bewirkt wird. Denn nur die ersteren durchdringen das Holz. Ebenso wie das Holz sind aber auch andere undurchsichtige Körper, Ebonit, Kautschuk, Wachs, Kork, Kohle, Graphit leicht durchlässig, ja auch Aluminium läßt diese Strahlen ganz ebenso leicht durchgehen wie Glas. Die schweren Metalle sind viel undurchlässiger, aber auch nicht vollständig. Auch durch Eisen, Silber, Gold, Kupfer in dünnen Schichten gehen die Strahlen. Blei ist am allerwenigsten durchlässig. Überhaupt läßt sich ungefähr sagen, daß ein Körper um so leichter den Röntgenstrahlen den Durchgang gestattet, je leichter er spezifisch ist, um so schwerer also, je dichter er

Fig. 270.



ist. Auf die optische Durchlässigkeit kommt es gar nicht an. Aluminium und Glas, die ziemlich gleich dicht sind, haben die gleiche Durchlässigkeit, Holz, namentlich Tannenholz, das viel leichter ist, ist auch viel durchlässiger. Unterschiede in der Dichtigkeit zwischen verschiedenen Körpern geben auch Unterschiede in der Durchlässigkeit. Darauf beruht nun der

Versuch, der diesen Strahlen so rasch ihre Popularität verschafft hat. Es gelingt dadurch, aus umhüllten oder verschlossenen Körpern den Inhalt zu photographieren, wenn der Inhalt dichter ist als die Umhüllung. So kann man aus einem verschlossenen Portemonnaie das

Geld, aus einem Holzblock etwa darin enthaltene Schrauben, aus der Hand die Knochen photographieren, weil eben die Geldstücke die auftreffenden Strahlen mehr zurückhalten als das Leder, die Schraube mehr als das Holz, die Knochen mehr als das Fleisch.

So zeigt Fig. 270 die Photographie von zwei Metallschrauben, die in zwei verschiedene Holzklötze eingedreht waren. Man sieht mit großer Schärfe die Schrauben, man sieht aber auch die Fasern und die Maserung des Holzes, welche vermöge ihrer verschiedenen Dichtigkeit auch verschiedene Durchlässigkeit haben.

In Fig. 271 sieht man das vollständige Knochengerüst einer Hand und sieht zugleich am Ringfinger einen Ring, der natürlich am meisten opak ist.

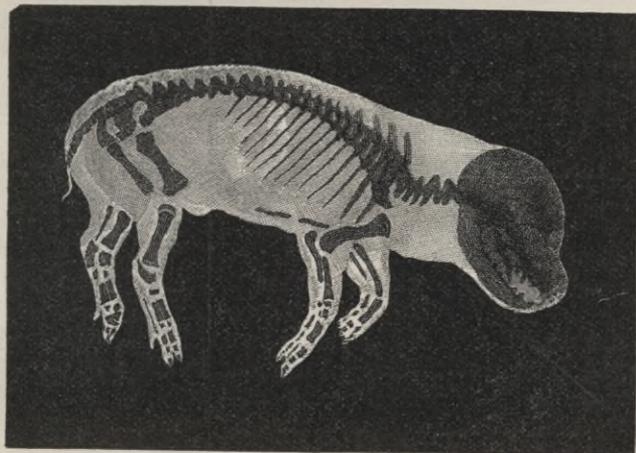
Fig. 272 zeigt, in derselben Weise aufgenommen, ein junges Schwein, von dem man ebenfalls die Knochen alle erkennt; außerdem aber zeigen sich im Innern helle Flecke, welche inneren weichen Organen entsprechen.

Die frappanteste Eigenschaft der Röntgenstrahlen ist eben diese, daß sie so leicht durch alle möglichen undurchsichtigen Stoffe hindurch sich fortpflanzen. Sie zeigen aber

Fig. 271.



Fig. 272.



noch weitere Unterschiede von den Lichtstrahlen. Während diese vom Spiegel bekanntlich regelmäßig reflektiert werden, lassen sich die Röntgenstrahlen nicht regelmäßig reflektieren, sondern nur in geringem

Maße zerstreut zurückwerfen. Ebenso zeigen sie entgegen den gewöhnlichen Lichtstrahlen auch keine Brechung, wenn sie durch ein Prisma hindurchgesendet werden, so daß es sehr zweifelhaft erscheint, ob die Röntgenstrahlen Ähnlichkeit mit den Lichtstrahlen haben, also wirklich neue Strahlen sind, oder ob sie nicht vielmehr eine spezielle, sehr durchdringende und magnetisch nicht ablenkbare Art von Kathodenstrahlen sind, deren Natur, wie oben auseinandergesetzt, eher die einer Massenbewegung als die einer Wellenbewegung zu sein scheint.

Man hat sich natürlich gleich nach der Entdeckung dieser Strahlen wegen ihrer so hervorragenden medizinischen Wichtigkeit bemüht, Konstruktionen für die Röhren und die Elektroden zu finden, welche für die photographische Wirkung am zweckmäßigsten sind. Dabei hat sich nun zunächst gezeigt, daß es durchaus nicht am zweckmäßigsten ist, wie es zuerst geschah, die Röhrenwand selbst zum Phosphoreszieren zu bringen und von ihr aus die Strahlen ausgehen zu lassen. Vielmehr hat sich ergeben: Jeder Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, ob er innerhalb der Röhre oder an der Röhrenwand sich befindet, wird zum Ursprung von Röntgenstrahlen. Der Körper kann sichtbar phosphoreszieren, wie es das Glas der Röhrenwand oder eingeschmolzene Mineralien tun, es kann aber auch ein Metall sein, welches nicht leuchtend phosphoresziert. Auch Metalle senden die Strahlen aus, wenn sie von den Kathodenstrahlen getroffen werden. Allgemein bezeichnet man jetzt diejenige Stelle, welche von den Kathodenstrahlen getroffen wird und daher Röntgenstrahlen aussendet, als die Antikathode der Röhre.

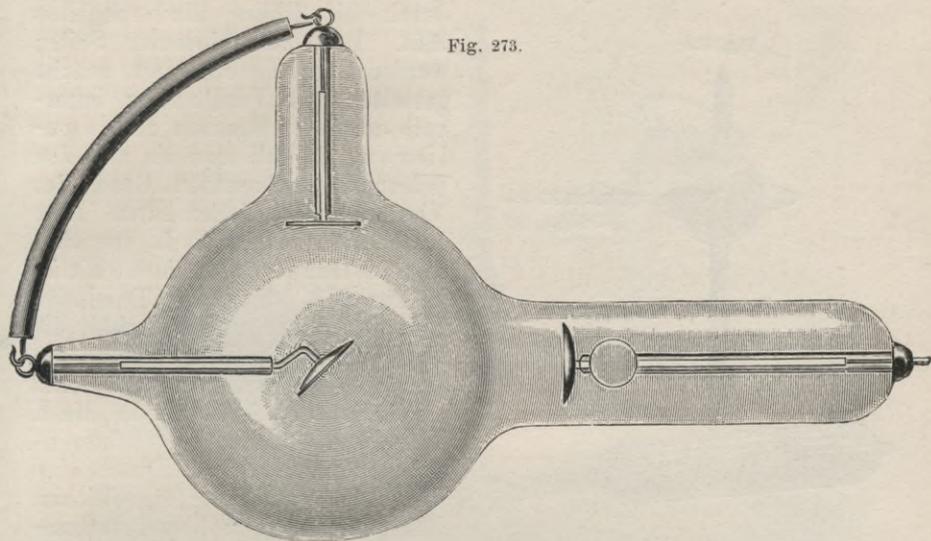
Um möglichst scharfe photographische oder fluoreszierende Bilder zu erhalten, muß man danach trachten, die Röntgenstrahlen möglichst von einem Punkt ausgehen zu lassen, nicht von einer ganzen Fläche. Denn wenn Strahlen von allen Punkten einer ausgedehnten Fläche ausgehen, so erhält man Bilder, welche verschwommene Grenzen und Schlagschatten besitzen. Die obige Forderung kann man nun einfach dadurch erfüllen, daß man die Kathode der Röhre hohlspiegelartig macht. Wir wissen ja (S. 291), daß die Kathodenstrahlen dann in einem Punkt, dem Brennpunkt des Hohlspiegels, zusammentreffen. Bringt man nun ungefähr an die Stelle dieses Brennpunktes ein Metallblech in das Innere der Röhre, so wird dieses die Antikathode und von ihm gehen dann die Strahlen aus. In dieser Weise werden jetzt fast durchweg die Vakuumröhren konstruiert. Man bezeichnet sie als Fokusröhren. Dieselben besitzen drei Metallbleche im Innern. Ein hohlspiegelartig geformtes als Kathode, ein anderes ebenes als Anode und ein drittes Metallblech, welches als Antikathode dient und in den Brennpunkt der Kathodenstrahlen gestellt ist. So zeigt Fig. 273 eine sehr vortreffliche Röhre, die von Reiniger, Gebbert & Schall in Erlangen geliefert wird. Man sieht rechts die hohlspiegelförmige Kathode, oben die Anode und in der Mitte eine Aluminiumplatte, auf welcher ein Platinblech befestigt ist, welches als Antikathode wirkt. Die Antikathode wird zweckmäßig, wie es in der Figur gezeichnet ist, mit der Anode außen durch einen Draht verbunden. Dann ist die Antikathode zugleich Anode und die Röntgenstrahlen gehen von der Anode aus.

Die Platinantikathode sendet von der bestrahlten Seite aus die Röntgenstrahlen durch den vor ihr liegenden Teil der Glaskugel, welche dabei schön grün phosphoresziert.

Ganz ähnlich sehen die Röntgenröhren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A. E.-G.) in Berlin aus.

Die Verdünnung der Luft in den Röhren ist allmählich immer weiter getrieben worden. Genau läßt sich der Grad der Luftverdünnung nicht angeben, er ist vielmehr nur aus der Schlagweite einer parallel zur Röhre geschalteten Funkenstrecke zu schätzen. Während

Fig. 273.



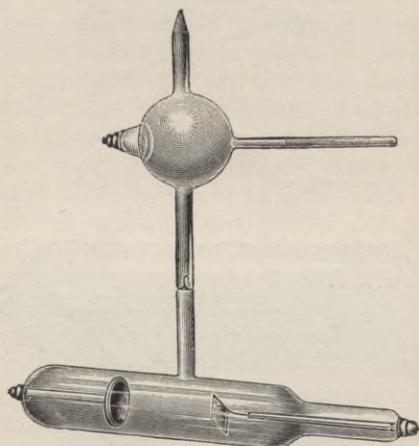
anfangs Schlagweiten von 15—30 mm benutzt wurden, evakuiert man jetzt so stark, daß Schlagweiten von 50—100 mm nötig sind, um die Entladung durch die Röhre gehen zu lassen.

Bei diesen hohen Verdünnungen tritt aber ein Umstand sehr störend auf. Die Röhren werden mit dem Gebrauch allmählich von selbst immer luftleerer, so daß nach einiger Zeit der Strom von der benutzten Stromquelle überhaupt nicht mehr durchgeht und die Röhren unbrauchbar werden. Sie geben keine Kathodenstrahlen, also auch keine Röntgenstrahlen mehr.

Das Vakuum in der Röhre verändert sich also beim Gebrauch selbst in dem Sinne, daß die Röhre von selbst luftleerer wird, vermutlich deshalb, weil die geladenen Gasteilchen im Innern sich an den Glaswänden festsetzen. Daraus ergeben sich aber auch sofort einige Mittel, wie man solchen unbrauchbar gewordenen Röhren wieder aufhelfen kann. Man muß danach trachten, die anhaftenden Gasschichten wieder frei zu machen. Das gelingt dadurch, daß man das Glas der Röhre erwärmt, namentlich in der Nähe der Kathode. Dann funktionieren solche schon unbrauchbar gewordene Röhren wieder eine Zeitlang recht gut. Wirksamer ist das Mittel, das Ansatzrohr, welches

die Kathode enthält, mit angefeuchtetem Papier oder angefeuchteter Leinwand zu umhüllen, und zwar der ganzen Länge nach, von der Einschmelzstelle der Elektrode an bis an die Glaskugel. Dadurch nämlich wird die statische Elektrizität des Glases abgeleitet und die Gasteilchen sind wieder frei beweglich. Der umgekehrte Fehler, daß der Druck des Gases in einem Rohr zu groß ist, bewirkt ebenfalls, daß die Röhren schlechte Wirkung zeigen. Man sagt dann, die Röhren seien zu weich, während Röhren mit zu hoher Verdünnung hart genannt werden. Den Fehler der zu großen Weichheit kann man gewöhnlich dadurch beseitigen, daß man die Entladung eine Zeit lang

Fig. 274.



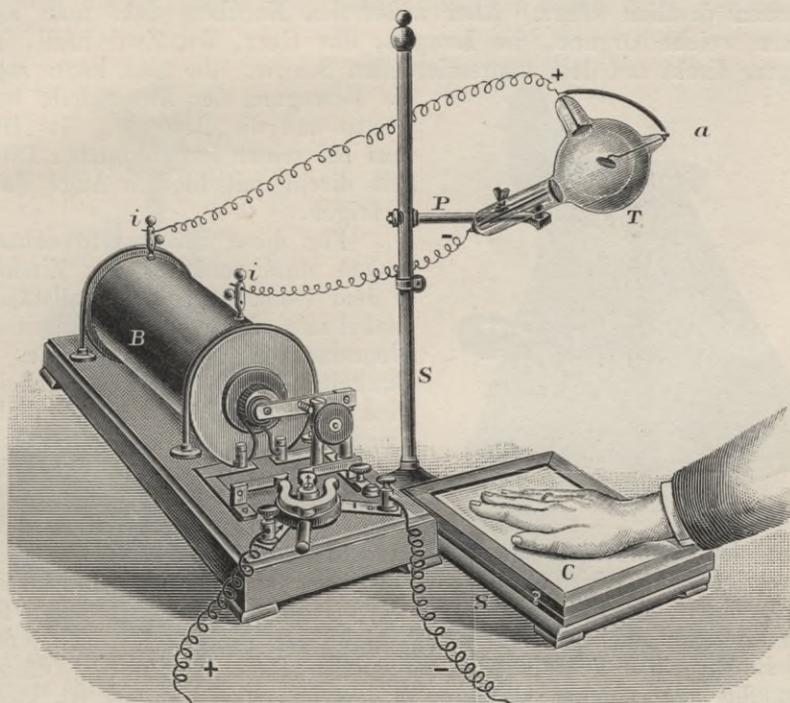
durch die Röhre hindurchgehen läßt. Von verschiedenen Seiten werden Röhren konstruiert, welche gestatten, die Verdünnung innerhalb gewisser Grenzen zu regulieren, so daß man sie auf den jedesmal gewünschten Grad der Verdünnung einstellen kann. Eine solche Röhre wird z. B. von Siemens & Halske konstruiert. Sie ist in Fig. 274 dargestellt. Der lange Teil der Röhre unten enthält die hohlspiegelartige Kathode und ein schräg gestelltes Blech, welches als Anode und Antikathode dient. Von ihm gehen die Röntgenstrahlen nach außen. Durch eine Röhre ist mit dieser eigentlichen Röntgenlampe eine Kugel verbunden,

die eine Anode und einen mit Phosphor innen bedeckten Ansatz trägt. Ist das Vakuum in der Lampe zu hoch, die Röhre zu hart, so wird die Kugel erwärmt und es dringt etwas Luft aus der Kugel in die Lampe. Ist das Vakuum zu gering, also zu viel Luft in dem System, so wird die Anode der Kugel in Gebrauch genommen und es wird dann ein Teil der Luft vom Phosphor absorbiert. So kann man die Luftverdünnung in der Lampe regeln.

Die Anstellung der photographischen Versuche mit einer Röntgenröhre ist nun sehr einfach. Die Röntgenröhre T wird, wie Fig. 275 zeigt, in einem Stativ so befestigt, daß von der Antikathode die Röntgenstrahlen nach unten geworfen werden. Ein Induktionsapparat B wird mit seinen Polen ii mit der Kathode und Anode der Röhre verbunden. Auf den Tisch, unterhalb der Röhre, wird eine Holzkassette C mit einer photographischen Platte gelegt (es genügt auch, die photographische Platte, in schwarzes Papier gehüllt, an die Stelle von C zu bringen), mit der Schichtseite nach oben und direkt auf die Kassette oder das umhüllende Papier wird die zu photographierende Hand gelegt. Setzt man den Induktionsapparat in Tätigkeit, so wird die Platte von den Röntgenstrahlen bestrahlt und zwar an den durchlässigen Teilen der Hand, den Muskeln stärker, als an den weniger durch-

lässigen Knochen und dem Ring. Entwickelt man dann die Platte im gewöhnlichen roten Licht mit gewöhnlichem Entwickler (Amidol, Hydrochinon etc.), so sieht man die Knochen hell auf dunklem Grunde erscheinen. Die Dauer der Exposition richtet sich nach der Güte der Röhre und der Stärke des angewandten Funkeninduktors. Während man im Anfang 5–10 Minuten für eine Knochenphotographie der Hand brauchte, kann man jetzt, mit den verbesserten Röhren und den verbesserten Unterbrechern, schon in Bruchteilen einer Sekunde eine

Fig. 275.



solche erzielen. Wenn man die neueren Unterbrecher, den Turbinenunterbrecher oder den elektrolytischen anwendet, so kann man schon in einer Sekunde eine Photographie des Brustkorbes, in 10 Sekunden eine solche des Beckens hervorbringen.

Die intensiv wirkenden Röntgenstrahlen, die man durch die jetzt konstruierten Röhren erhält, lassen sich aber, außer zur Herstellung von Photographieen, ganz besonders zu direkter Durchleuchtung namentlich des Körpers verwenden. Dies geschieht durch Benutzung der Eigenschaft, daß diese Strahlen Fluoreszenz erregen. Es werden sogenannte Fluoreszenzschirme von den Fabrikanten hergestellt, welche zu diesem Zwecke dienen. Diese bestehen aus einem schwarzen Karton, der mit einer ziemlich dicken Schicht von feingepulvertem Baryumplatincyantür und einem Bindemittel auf der einen Seite bestrichen

ist. Läßt man auf einen solchen Schirm von der Rückseite, also durch den Karton hindurch, Röntgenstrahlen fallen, so leuchtet diese Schicht im Dunkeln sehr hell weiß mit einem Stich ins Grüne. Bringt man nun zwischen die Röhre und den Schirm etwa die Hand, so werden die Strahlen vom Fleisch leicht durchgelassen, von den Knochen aber weniger, und man sieht daher auf dem Schirm ein Schattenbild der Hand mit den Knochen, nämlich die Knochen dunkel auf hellerem Grunde. Und so kann man nicht bloß die Knochen der Hand, des Unter- und Oberarms, sondern auch die des Fußes, des Unterschenkels und Oberschenkels, ferner die Rippen des Brustkastens und die Schädelknochen deutlich sehen. Aber außer den Knochen sieht man auch innere weiche Organe, die Lungen, das Herz, das Zwerchfell, den Magen, direkt auf dem fluoreszierenden Schirm. Ja man kann sogar

Fig. 276.



die Bewegung des Zwerchfells beim Atmen und die Bewegung des Herzens bei seiner fortwährenden Tätigkeit direkt mit bloßem Auge dabei verfolgen.

Für diese Fluoreszenzbeobachtungen muß zunächst das Zimmer, in dem beobachtet wird, vollständig dunkel sein. Denn die Helligkeit des Fluoreszenzlichtes, obwohl sie im Dunkeln sehr bedeutend erscheint, wird doch schon durch gewöhnliches Lampenlicht überstrahlt. Indes kann man natürlich auch eine Verdunkelung des Zimmers vermeiden, wenn man nur dafür sorgt, daß auf das

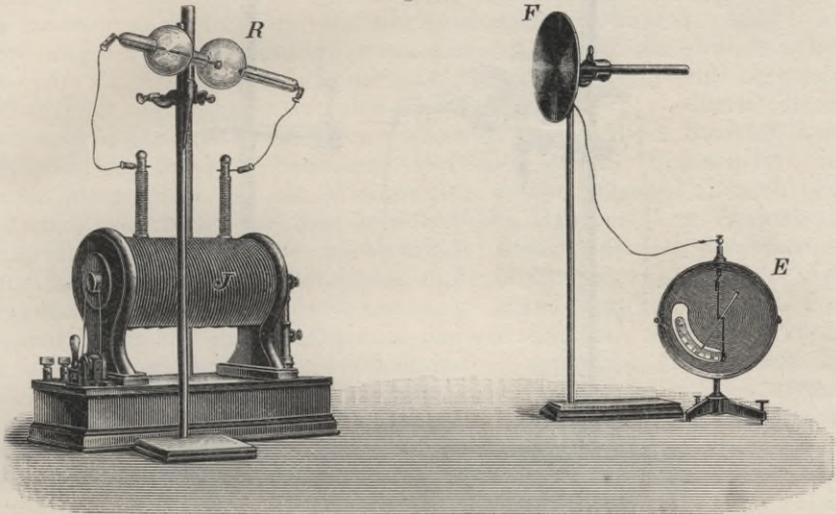
Auge des Beobachters kein anderes Licht fällt, als eben das des fluoreszierenden Schirmes. Zu diesem Zweck benutzt man, wie Fig. 276 zeigt, einen Apparat, den man Kryptoskop genannt hat. Der fluoreszierende Schirm bildet nämlich, mit der Schichtseite nach innen, den Boden eines lichtdicht verschlossenen Kastens. In die Öffnung oben, die aus weichem, sich anschmiegender Stoff gebildet ist, steckt der Beobachter seinen Kopf, und nun kann er, da durch den Boden gewöhnliches Licht nicht hindurchgeht, sondern nur die Röntgenstrahlen, direkt die Bilder auf dem Schirm beobachten.

Die Erfolge, die mit dieser Methode in der Medizin täglich erzielt werden, namentlich zur Auffindung von Fremdkörpern, Nadeln, Metallsplintern im Körper, sind ja bekannt genug. Allerdings sind diese Strahlen für den menschlichen Körper nicht immer ungefährlich, so daß in mancher Beziehung jetzt bereits eine gewisse Ernüchterung der früheren Begeisterung Platz macht.

Eine Eigenschaft der Röntgenstrahlen wurde im obigen noch gar nicht berührt, und gerade diese ist physikalisch von Interesse. Diese Eigenschaft besteht darin, daß die Röntgenstrahlen elektrisch geladene Körper, auf die sie fallen, sehr rasch entladen. Um dieses zu zeigen, bringt man, wie in Fig. 277, eine Zinkplatte F, die an einem Glasstab

befestigt ist, in ein Stativ und verbindet diese durch einen Draht mit einem Elektroskop, etwa dem auf S. 18 beschriebenen. Auch das Elektroskop muß isoliert aufgestellt sein. Wenn man nun mit einer geriebenen Ebonitstange die Zinkplatte berührt, so wird diese negativ elektrisch und die Nadel des Elektroskops schlägt aus und bleibt abgelenkt, weil ja die umgebende Luft ein Isolator ist. Sowie man aber in der gegenübergestellten Röntgenröhre R durch den Stromdurchgang die Röntgenstrahlen erzeugt, geht der Zeiger des Elektroskops sehr rasch zurück, ein Beweis, daß die geladene Zinkplatte dadurch entladen wurde. Macht man denselben Versuch, nur mit dem Unterschiede, daß man die Zinkplatte nicht negativ, sondern durch einen geriebenen

Fig. 277.

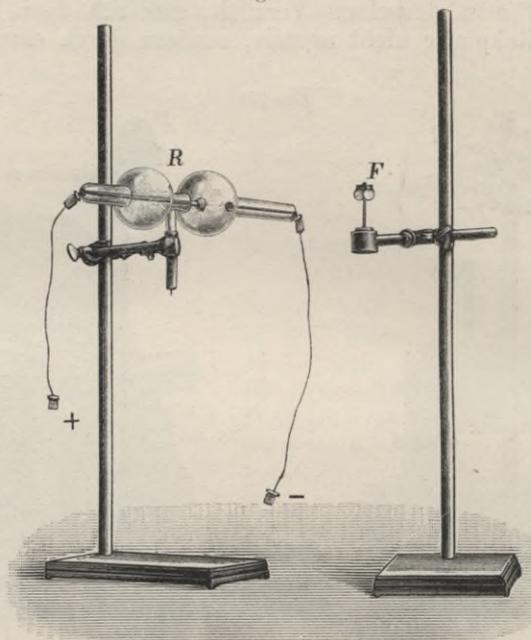


Glasstab positiv lädt, so findet dasselbe statt. Auch die positive Ladung verschwindet durch das Auftreffen der Röntgenstrahlen. Am einfachsten läßt sich dieser Versuch so deuten — und diese Deutung wird durch besondere zu ihrer Prüfung angestellte Versuche bestätigt — daß die Luft, die von den Röntgenstrahlen durchstrahlt ist, ihr Isolationsvermögen verloren hat und selbst leitend geworden ist. Wenn die Luft leitend geworden ist, so kann natürlich eine Ladung auf einem Körper nicht bestehen bleiben, sondern sie muß abgeleitet werden auf die Umgebung und schließlich auf die Erde, so daß dadurch der geladene Körper zur Erde abgeleitet ist. Natürlich wird die durchstrahlte Luft nicht etwa ein so guter Leiter, wie Kupfer oder auch nur wie eine Salzlösung, die Leitungsfähigkeit ist noch außerordentlich gering, aber sie genügt doch, um die geladenen Körper, die Spannungen von einigen hundert oder tausend Volt gegen die Erde haben, sehr rasch zu entladen.

Diese elektrische Wirkung kann unter anderem dazu dienen, auch durch die Röntgenstrahlen solche mechanische Bewegungen hervorzu-

bringen, wie sie oben bei den Kathodenstrahlen beschrieben wurden. Stellt man wie in Fig. 278 in der Nähe einer Röntgenröhre R einen leicht beweglichen Körper auf, etwa zwei Scheiben aus Paraffin F, die durch ein Querstück verbunden sind und mittels eines Achathütchens auf einer Nähnadelspitze aufsitzen, so kommt dieser Körper in lebhaftere Rotation, sobald man die Röntgenstrahlen erzeugt. Es ist nämlich die Glasfläche der Röntgenröhre stets negativ geladen (o. S. 293) und da

Fig. 278.



die Luft in der Nähe der Röhre leitend wird, so geht negative Elektrizität auf die Flügel des beweglichen Körpers über. Diese werden also auf der Seite, die der Röntgenröhre zunächst liegt, negativ geladen und daher von der negativen Röhre abgestoßen. Kommen die geladenen Teile durch die entstehende Rotation auf die entgegengesetzte Seite, so wird ihre Ladung durch die Leitung der Luft weggeführt und sie werden unelektrisch und kommen in diesem Zustand wieder der Röntgenröhre gegenüber, werden wieder elektrisch und abgestoßen und daher geht die Rotation fortwährend weiter. Auch innerhalb der Crookeschen Röhren beruhen die Rotationen von Körpern vermutlich auf demselben Mechanismus.

Die eigentliche Natur der Röntgenstrahlen, sowie ihre Ursache ist bisher noch nicht aufgeklärt. Aber die Bemühungen, diese Ursache aufzufinden, haben seitdem zu einer Reihe weiterer Entdeckungen geführt. Da die Röntgenstrahlen von den durch die Kathodenstrahlen getroffenen Stellen ausgehen, diese Stellen aber durch die Kathoden-

strahlen zu sichtbarer oder unsichtbarer Phosphoreszenz gebracht werden, so lag die Vermutung nahe, daß es die Phosphoreszenz ist, welche die Röntgenstrahlen als Begleiterscheinung hat. Aus diesem Gedanken heraus suchte man, ob nicht auch andere Substanzen, die durch das gewöhnliche Licht zur Phosphoreszenz gebracht werden, Röntgenstrahlen aussenden. Das zeigte sich zwar im allgemeinen nicht erfüllt, aber es gelang einem französischen Forscher Becquerel, einen Körper zu finden, das Uran, welches, sowohl als reines Metall, wie auch in seinen Salzen, ebenfalls eigentümliche Strahlen aussendet, ganz ähnlich wie die Röntgenröhren. Diese Strahlen, die man jetzt Becquerelstrahlen nennt, haben ebenso wie die Röntgenstrahlen die Fähigkeit, durch undurchsichtige Körper, sogar durch Metalle hindurchzugehen, sie erregen auch photographische Platten, sie bringen auch Fluoreszenz hervor und sie machen auch die Luft, die sie durchstrahlen, leitend. Das Uran wird aus der Uranpechblende gewonnen. Als aber ein französischer Forscher Curie in Verbindung mit seiner Frau diese Pechblende chemisch behandelte, entdeckten sie, daß auch andere Körper, die in dieser Substanz in geringen Quantitäten vorhanden waren, diese Strahlen aussendeten und zwar in bedeutend stärkerem Maße. Insbesondere ist es ein Baryumsalz und ein Wismutsalz, welche, obwohl sie sich rein chemisch gar nicht von dem gewöhnlichen Baryum- und Wismutsalz unterscheiden, doch diese merkwürdige Eigenschaft der Strahlensendung besitzen. Man bezeichnet diese Stoffe jetzt als radioaktive Substanzen. Es lag die Vermutung nahe, daß diese Salze ihre Aktivität, ihre Strahlungsfähigkeit, dadurch besitzen, daß sie in sehr geringer Menge andere Körper beigemischt enthalten, die gerade die Eigenschaften der Aktivität in besonders hohem Maße besitzen. Diese hypothetischen Stoffe, neue Elemente, die noch nicht rein dargestellt werden konnten und von welchen vermutlich mindestens zwei verschiedene existieren, bezeichnete Curie das eine als Radium, das andere zu Ehren seiner Frau, die eine Polin ist, als Polonium. Das Polonium wäre das wirksame Element in dem Wismutsalz, das Radium in dem Baryumsalz. Das erstere von beiden ist noch nicht sicher festgestellt, das Radium aber scheint in der Tat ein neues Element zu sein, da das radiumhaltige Baryum bei der Spektralanalyse einige (violette) Linien zeigt, die das gewöhnliche Baryum nicht hat und da ferner die Chlorbromsalze des aktiven Baryums weit löslicher sind als die des gewöhnlichen Baryums. Auch das Thorium ist ein aktiver Körper wie das Uran und ebenso ein Blei, welches aus thorhaltigen Substanzen abgeschieden wurde. In dem Thor und diesem Blei wird vorläufig eine dritte aktive Substanz, das Aktinium, hypothetisch angenommen.

Die radioaktiven Substanzen, insbesondere das radiumhaltige Baryum, senden so wirksame Strahlen aus, daß sie photographische Platten sehr rasch schwärzen und sogar durch dicke Metallplatten hindurchgehen. Die Bilder, die man auf der photographischen Platte durch sie erhält, sind aber nicht wie die der Röntgenstrahlen, fein abgestuft je nach der Durchlässigkeit der ihnen ausgesetzten Substanzen, sondern sie sind nur Umrißbilder ohne Details. Die

Handknochen z. B. kann man durch aktive Substanzen nicht photographieren.

Sehr auffallend ist, daß alle Metalle, die sich in der Nähe solcher aktiver Stoffe befinden, selbst vorübergehend aktiv werden. Man sagt, sie erhalten induzierte Aktivität. Es scheint, als ob von dem Radium und dem Aktinium Teilchen durch die Luft hindurch auf die anderen Körper übergehen und diese aktivieren. Allerdings kann man durch Abwaschen oder auch durch Behandlung mit Säuren nur in einzelnen Fällen diese induzierte Aktivität beseitigen. Ja auch die Luft, die mit aktiven Substanzen in Berührung war, wird für einige Zeit selbst aktiv.

Daß die von den radioaktiven Substanzen ausgehenden Strahlungen ähnliche Eigenschaften wie die Kathodenstrahlen haben, wird dadurch bewiesen, daß diese Strahlen zum Teil durch einen Magneten ablenkbar sind. Läßt man die Strahlen durch ein Loch in einer Metallplatte auf eine photographische Platte fallen, so geben sie zunächst ein direktes Abbild des Loches in der geradlinigen Richtung. Bringt man aber einen Magneten in die Nähe, so werden die Strahlen abgelenkt und man erhält ein photographisches Bild seitlich verschoben von der direkten Richtung. Zugleich aber findet man, daß auch in der ursprünglichen, geraden Richtung ebenfalls ein schwächeres Bild auftritt. Es beweist dies, daß in dieser Stellung zwei verschiedene Strahlenarten zusammenwirken, ablenkbare und nichtablenkbare. Die letzteren ähneln darin den Röntgenstrahlen, die ersteren den Kathodenstrahlen. Und ebenso wie die Kathodenstrahlen nach den oben (S. 293 f.) ausgeführten Betrachtungen auf der Bewegung kleinster geladener Teilchen, Elektronen, beruhen, ebenso nimmt man auch von den aktiven Substanzen an, daß sie fortwährend solche Elektronen aussenden.

Dabei entsteht aber sofort die Frage, woher sie dann fortdauernd die Elektronen nehmen, die sie aussenden. Wenn auch die Teilchen sehr klein sind, so daß die in einem Jahrzehnt ausgesendete Menge vielleicht das Gewicht des aktiven Körpers noch nicht merkbar verändern könnte, so sind doch diese Substanzen seit Jahrtausenden in der Pechblende enthalten und strahlen fortwährend aus, und müßten also fortwährend an Gewicht verlieren, da die Strahlen ja durch die meisten Substanzen hindurchgehen. Daß sie trotzdem noch in der Pechblende vorhanden sind, ist dann kaum zu verstehen. Allerdings ist der Gehalt der Pechblende an aktiver Substanz ein äußerst geringer. Aus 1000 Kilo erhält man etwa ein halbes Gramm aktives Baryum, und in diesem ist das Radium nur in einem ganz minimalen Betrage enthalten, vielleicht noch nicht einmal milligrammweise. Aber auch diese geringe Menge sendet fortwährend Energie aus und es ist eine noch ungelöste Frage der Physik, woher sie die Energie nimmt, die sie aussendet. Denn bisher konnte man noch nicht beobachten, vielleicht wegen der Kürze der Zeit, daß ein aktives Präparat seine Aktivität von selbst verloren hätte. Und die Wirksamkeit dieser Präparate ist nur relativ gering, in Wirklichkeit können sie sehr bedeutende Effekte hervorbringen.

Die ganze Luft in einem Zimmer, in welchem solche Substanzen vorhanden sind, wird leitend, so daß man in solchem Raume keine

Experimente mit elektrischen Ladungen machen kann. Würde das Radium in der Natur häufig von selbst vorkommen, so wären die Eigenschaften der ruhenden Elektrizität gar nicht entdeckt worden, weil man nie einen Körper hätte geladen halten können. Wir können daraus unter anderem ersehen, von welchen Zufällen unsere Einsichten in die Natur doch abhängen, und können daraus die halb betrübliche, halb hoffnungsvolle Vermutung entnehmen, daß das, was wir von der Natur und speziell der Elektrizität nicht wissen, noch viel umfangreicher ist, als dasjenige, was wir bereits kennen.

Die elektrischen Leitungen

Die elektrischen Leitungen sind von großer Wichtigkeit für die Fortschritte der Naturwissenschaften, und es ist daher sehr zu bedauern, daß die Kenntnisse in diesem Fache noch so unvollständig sind. Die elektrischen Leitungen sind von großer Wichtigkeit für die Fortschritte der Naturwissenschaften, und es ist daher sehr zu bedauern, daß die Kenntnisse in diesem Fache noch so unvollständig sind. Die elektrischen Leitungen sind von großer Wichtigkeit für die Fortschritte der Naturwissenschaften, und es ist daher sehr zu bedauern, daß die Kenntnisse in diesem Fache noch so unvollständig sind.

13. Kapitel.

Die elektrischen Maßeinheiten.

In zweifacher Weise dringt die Physik immer weiter in die Geheimnisse der Natur ein. Der erste Schritt besteht in der qualitativen Erforschung neuer Erscheinungen, neuer, bisher verborgener Kräfte und neuer Wirkungen vorhandener Kräfte, der zweite ist die quantitative, messende Feststellung ihrer Gesetze, die zahlen- und formelmäßige Untersuchung der Abhängigkeit der verschiedenen physikalischen Erscheinungen voneinander. Die Entdeckung der Induktionserscheinungen durch Faraday z. B. war der erste Schritt zu der Erweiterung unserer Kenntnisse auf diesem Gebiet; die gesetzmäßige Feststellung der Abhängigkeit des induzierten Stromes von Stärke, Richtung, Form und relativer Geschwindigkeit des induzierenden war der zweite, nicht minder wichtige und folgenreiche Schritt.

Die Messung einer jeden physikalischen Größe kann zuerst nach einem ganz beliebigen Maß geschehen, sobald dieses Maß nur ein sicher definiertes ist. Wir können Stromstärken nach Kubikmillimetern Knallgas messen oder nach Grammen Kupfer, wir können elektromotorische Kräfte nach Daniell messen oder nach Ausschlägen der Elektrometernadel u. s. w. Die neuere Physik aber hat mit immer größerer Schärfe und Deutlichkeit den Zusammenhang eruiert, der zwischen den verschiedenen Gebieten der Physik herrscht, sie hat in immer weiterem Umfang die qualitative und quantitative Umwandlungsfähigkeit der verschiedenen Formen der Energie, die als mechanische Energie, als Wärmeenergie, als elektrische oder als chemische Energie auftritt, ineinander gezeigt. Dieser Zusammenhang der aus verschiedenen physikalischen Gebieten entnommenen Größen wies nun auf die Möglichkeit und Notwendigkeit hin, auch zu ihrer Messung Maße anzuwenden, welche nicht mehr willkürlich sind, sondern miteinander in Beziehung stehen. Es ergab sich die Möglichkeit, alle physikalischen Größen in Einheiten auszudrücken, welche von einigen Grundeinheiten in bestimmter Weise abgeleitet sind. Gauß und Wilhelm Weber waren es, welche zuerst ein solches System von Einheiten aufstellten und durchführten, und dieses System nennt man das absolute Maßsystem.

Die praktische Messung aller physikalischen Größen, zu welchem Erscheinungsgebiet sie auch gehören, führt nämlich stets zurück auf Messung von Längen, Zeiten und Massen. Dies sind die einzigen Operationen, welche in verschiedener Form bei jeder praktischen Mes-

sung allein vorkommen. Es werden sich also auch die Zahlenwerte sämtlicher physikalischen Größen in eindeutiger, unveränderlicher, bestimmter Weise ergeben, falls man nur für diese drei Größen bestimmte Einheiten festsetzt. Diese Erwägung führt dazu, die Einheiten der Länge, Masse und Zeit als Grundeinheiten für das absolute Maßsystem zu verwenden, und zwar wird in wissenschaftlichen Messungen als Einheit der Länge stets das Zentimeter, als Einheit der Zeit die Sekunde, als Einheit der Masse das Gramm angenommen. Das Zentimeter ist definiert als der hundertste Teil der Länge eines in Paris aufbewahrten Meterstabes. Das Gramm ist definiert als der tausendste Teil der Masse eines Stückes Platiniridium, welches in Paris als „*Kilogramme des archives*“ aufbewahrt wird. Die Sekunde als $\frac{1}{86400}$ des

mittleren Sonnentages. Von dem Meterstab sowohl wie von dem Kilogramm sind in den meisten Kulturstaaten genaue Kopieen vorhanden, die amtlich aufbewahrt werden.

Das absolute System, bei welchem Zentimeter, Gramm und Sekunde als Grundeinheiten gewählt sind, nennt und schreibt man das „C.G.S.-System“.

Von den drei Grundeinheiten lassen sich nun für alle physikalischen Größen Einheiten ableiten, die man deswegen abgeleitete Einheiten nennt. Wir beginnen mit einigen räumlichen und mechanischen Größen.

1. Fläche. Als Maß für eine Fläche gilt ein Quadrat von beliebiger Seitenlänge.

Um bei unseren Einheiten zu bleiben, nehmen wir als Seitenlänge 1 cm und haben also als absolute Einheit der Fläche im C.G.S.-System 1 qcm. Diese Flächeneinheit ist daher bereits eine abgeleitete Einheit.

2. Volumen. Als Maß für ein Volumen gilt ein Würfel von beliebiger Seitenlänge. Die absolute Einheit des Volumens ist also der Würfel, dessen Seitenlänge die Längeneinheit ist. Im C.G.S.-System ist daher die Volumeneinheit 1 ccm.

Ein Volumen von 3 cbm ist daher im C.G.S.-System auszudrücken durch die Zahl 3 Millionen (Benennung: Kubikzentimeter).

Je kleiner die Einheit ist, desto größer ist die Zahl, durch welche eine bestimmte Größe in dieser Einheit ausgedrückt wird.

3. Geschwindigkeit. Als Geschwindigkeit eines sich gleichförmig bewegendes Körpers definiert man das Verhältnis des von ihm zurückgelegten Weges zu der Zeit, welche er zur Zurücklegung braucht.

Als absolute Einheit der Geschwindigkeit nehmen wir also diejenige an, bei welcher die Längeneinheit in der Zeiteinheit durchlaufen wird. Die Einheit der Geschwindigkeit ist also im C.G.S.-System diejenige, bei welcher 1 cm in 1 Sekunde durchlaufen wird.

4. Beschleunigung. Unter der Beschleunigung eines Körpers versteht man das Verhältnis seiner Geschwindigkeitszunahme zu der Zeit, in welcher er diese Zunahme erlangt.

Die absolute Einheit der Beschleunigung ist also diejenige, bei der die Geschwindigkeit eines Körpers in der Zeiteinheit (1 Sekunde) sich um die Geschwindigkeitseinheit (1 cm pro Sekunde) erhöht.

5. Kraft. Unter der Kraft, welche auf eine Masse wirkt, versteht man nach der Definition der Mechanik das Produkt aus dieser Masse und der Beschleunigung, welche sie durch die Kraft erhält.

Die Einheit der Kraft ist also diejenige, welche der Einheit der Masse die Beschleunigung 1 erteilt.

Im C.G.S.-System hat daher die Einheit der Kraft eine solche Größe, daß sie der Masse 1 g die Einheit der Beschleunigung (Nr. 4) erteilt. Diese Kräfteinheit bezeichnet man mit einem besonderen Namen, nämlich „1 Dyne“. Es werden also im C.G.S.-System alle Kräfte nach Dynen gemessen.

Unsere Gewichte sind Kräfte; sie geben uns nämlich die Kraft an, mit welcher die Erdschwere auf die ihnen gleichbenannten Massen wirkt. Das Gewicht, die Kraft eines Kilogramms ist gleich der Masse eines Kilogramms multipliziert mit der Beschleunigung, welche die Erdschwere dieser Masse erteilen würde, wenn sie frei beweglich wäre. Da die Masse eines Kilogramms 1000 g enthält und da die angeführte Beschleunigung 981 Beschleunigungseinheiten im C.G.S.-System hat, so ist die Kraft eines Kilogramms gleich 981 000 ($9,81 \cdot 10^5$) Dynen.

6. Arbeit. Wenn ein Körper sich unter der Wirkung einer Kraft bewegt, so leistet die Kraft eine Arbeit, deren Größe gleich ist dem Produkt aus der Kraft und der Wegstrecke, um welche sich der Körper in Richtung der Kraft fortbewegt hat.

Als Einheit der Arbeit nehmen wir also diejenige an, bei welcher die Kräfteinheit ihren Angriffspunkt um die Längeneinheit bewegt. Daher ist im C.G.S.-System die Arbeitseinheit diejenige, welche die Kraft 1 Dyne leistet, wenn sie die angegriffene Masse um 1 cm verschiebt. Diese Arbeitseinheit bezeichnet man mit dem besonderen Namen „1 Erg“.

Wenn z. B. ein Kilogramm um einen Meter gehoben wird, so ist die dazu nötige Arbeit = $981\,000 \times 100 = 98\,100\,000$ Erg.

Die Arbeit „1 Kilogramm-meter“, welche in der Technik gewöhnlich gebraucht wird, enthält also $98\,100\,000$ ($9,81 \times 10^7$) Erg.

Die Arbeit ist nur von dem ganzen zurückgelegten Wege abhängig, durchaus nicht von der größeren oder geringeren Zeit, in welcher dieser Weg zurückgelegt wird.

7. Effekt einer Kraft. Wenn eine Kraft eine Arbeit leistet, so nennt man das Verhältnis der geleisteten Arbeit zu der Zeit, in welcher sie geleistet wird, den Effekt der Kraft.

Es ist also die absolute Einheit des Effekts diejenige, bei welcher die Einheit der Arbeit in der Einheit der Zeit geleistet wird.

Im C.G.S.-System ist also die Einheit des Effekts diejenige, bei welcher 1 Erg in 1 Sekunde geleistet wird. Diese Einheit ist für die gewöhnlich vorkommenden Effekte zu klein und man ist daher übereingekommen, das Zehnmillionenfache (10^7 fache) dieser Einheit mit einem besonderen Namen zu bezeichnen, nämlich 1 Watt.

Ein Watt ist also derjenige Effekt, bei welchem in 1 Sekunde 10 Millionen Erg geleistet werden.

In der Technik ist auch das Watt eine zu kleine Einheit, und die Techniker nehmen daher als Maßeinheit des Effekts das Tausendfache eines Watt unter der Bezeichnung 1 Kilowatt. Eine Maschine hat also einen Effekt von 1 Kilowatt, wenn sie in jeder Sekunde 1000×10 Millionen (10^{10}) Erg leistet. Bisher mißt man in der Technik den Effekt von Maschinen gewöhnlich noch nach Pferdekraften, und dieser Gebrauch kommt erst ganz allmählich ab. Unter einer Pferdekraft versteht man denjenigen Effekt, bei welchem in je 1 Sekunde eine Arbeit von 75 Kilogramm Metern geleistet wird. Da 1 Kilogramm Meter nach Nr. 6 gleich $9,81 \cdot 10^7$ Erg ist, so ist also eine Pferdekraft in Watt ausgedrückt $= 9,81 \times 75$. Das abkürzende Zeichen für die Pferdekraft ist PS, so daß wir haben

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt} = 0,736 \text{ Kilowatt.}$$

Da der Effekt einer Kraft die in jeder Sekunde von der Kraft geleistete Arbeit darstellt, so gibt das Produkt aus diesem Effekt und der ganzen Zeit in Sekunden, in welcher die Kraft wirkt, die ganze Arbeit, welche diese Kraft während dieser Zeit geleistet hat. Man multipliziert nun auch häufig, um diese Arbeit darzustellen, die Benennungen des Effekts und der Zeit und spricht also von Wattstunden, Kilowattstunden, Pferdekraftstunden u. dergl. Es ist also z. B. 1 Kilowattstunde gleich der Arbeit von

$$\begin{aligned} 60 \times 60 \times 10^{10} \text{ Erg} &= 36 \times 10^{12} \text{ Erg} \\ &= \frac{36 \cdot 10^{12}}{9,81 \cdot 10^7} \text{ Kilogramm Meter} = 3,67 \cdot 10^5 \text{ Kilogramm Meter.} \end{aligned}$$

In dieser Weise haben wir für einige der wichtigsten mechanischen Größen aus ihrer bloßen Definition absolute Einheiten entwickelt und wir können nun dazu übergehen, dasselbe für die elektrischen und magnetischen Größen zu tun.

Wir beginnen mit der Einheit des

8. Magnetismus. Einem magnetischen Pol schreiben wir eine gewisse Menge Magnetismus zu. Zwei magnetische Pole ziehen sich dann mit einer Kraft an, die gleich ist dem Produkt ihrer Magnetismen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung.

Da wir die Einheit der Kraft bereits festgestellt haben, nämlich 1 Dyne, und die der Entfernung auch (1 cm), so können wir daraus die Einheit der Magnetismenmenge bestimmen.

Unter der Einheit des Magnetismus verstehen wir diejenige Menge Magnetismus, welche auf eine gleiche, in der Entfernung 1 cm befindliche die Kraft 1 Dyne ausübt.

Ein wirklicher Magnet hat immer zwei Pole, einen nordmagnetischen und einen süd magnetischen. Man bezeichnet als das magnetische Moment eines Magneten das Produkt aus seiner nordmagnetischen Magnetismenmenge und dem Abstand seiner Pole.

Es wird also die Einheit des magnetischen Moments diejenige

sein, welche ein Magnet hat, dessen Pole um 1 cm voneinander ab-
stehen und dessen Magnetismusmenge in jedem Pol die Einheit ist.

9. Magnetische Feldstärke. Ein drehbarer Magnetstab er-
fährt in einem magnetischen Feld eine Drehung, es wird ein Drehungs-
moment auf ihn ausgeübt, welches gleich dem Produkt aus der Feld-
stärke und dem Moment des Stabes ist. Da ein Drehungsmoment
gleich einer Kraft mal dem Hebelarm ist, an dem sie wirkt, so ist die
Einheit des Drehungsmomentes das Produkt aus 1 Dyne mal 1 cm.
Daraus folgt, daß die Einheit der Feldstärke diejenige ist, welche auf
einen Magnetstab vom Moment 1 (Nr. 8) die Einheit des Drehungs-
momentes ausübt.

Statt des Wortes Feldstärke braucht man auch das Wort „Kraft-
linienzahl pro qcm“, indem man sich durch jeden Quadratzentimeter
des Feldes gerade so viel Kraftlinien gelegt denkt, als die Feldstärke
an dieser Stelle beträgt.

So wie wir hier von einem durch die Erfahrung bewiesenen An-
ziehungsgesetz ausgegangen sind, um daraus eine Definition und Ein-
heit der Magnetismusmenge abzuleiten, so können und müssen wir auch
bei den elektrischen Größen von bestimmten Gesetzen ausgehen, um
aus diesen Definitionen und Einheiten für sie zu finden. Dabei hat es
sich infolge der vielen Wechselbeziehungen zwischen galvanischen
Strömen und Magneten als vorteilhaft erwiesen, dasjenige Gesetz zu
Grunde zu legen, welchem diese Wechselbeziehungen unterworfen sind,
nämlich das Biot-Savartsche Gesetz. Man nennt das System von
elektrischen Einheiten, welches auf diesem Gesetz basiert, deshalb auch
das elektromagnetische Maßsystem. Dieses soll hier ent-
wickelt werden.

10. Stromstärke. Wir gehen aus von der Kraft, welche ein
Strom auf einen Magneten ausübt. Wir haben das Gesetz derselben
auf S. 179 angeführt. Danach verhält sich ein Stromkreis genau wie
ein Magnet, dessen magnetisches Moment gleich der Stromstärke, multi-
pliziert mit der vom Strom umflossenen Fläche ist.

Da wir die Einheit für das magnetische Moment schon haben
(Nr. 8), so entnehmen wir hieraus die Definition für die Einheit der
Stromstärke.

Die Einheit der Stärke hat also derjenige Strom, welcher, wenn
er ein Quadratzentimeter umfließt, magnetisch so wirkt, wie ein Magnet,
dessen magnetisches Moment gleich der Einheit ist.

Diese absolute Einheit hat keinen besonderen Namen. Man nimmt
vielmehr praktisch eine Einheit an, welche gleich dem 10. Teil dieser
so definierten Einheit der Stromstärke ist, und nennt diese Einheit

1 Ampère. 1 Ampère ist also = $\frac{1}{10}$ Einheit der Stromstärke im

C.G.S.-System.

11. Elektrizitätsmenge. Unter der Stromstärke verstanden
wir immer diejenige Menge Elektrizität, welche in der Zeiteinheit durch
jeden Querschnitt eines Leiters fließt.

Danach werden wir diejenige Elektrizitätsmenge die Einheit nennen,

welche, wenn sie in einer Sekunde durch einen Querschnitt fließt, die Intensitätseinheit, 1 Ampère, erzeugt.

Man nennt diese Einheit der Elektrizitätsmenge 1 Coulomb.

Es ist also $1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Sekunde}$.

Eine Ampèrestunde ist daher gleich $60 \times 60 = 3600 \text{ Coulomb}$.

12. Elektromotorische Kraft. Ein jeder Strom besitzt einen gewissen Effekt, da er in jeder Sekunde eine gewisse Arbeit leisten kann. Wir wissen, daß dieser Effekt gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke des Stromes ist.

Daraus entnehmen wir eine Definition und eine Einheit für die elektromotorische Kraft.

Unter der Einheit der elektromotorischen Kraft verstehen wir diejenige, welche, wenn sie einen Strom von der Einheit der Stärke durch den Stromkreis treibt, die Einheit des Effekts erzeugt.

Für praktische Zwecke geht man dabei auch auf die praktische Effektseinheit, nämlich 1 Watt, zurück und nimmt daher als Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige an, welche, wenn sie den Strom 1 Ampère durch den Stromkreis treibt, einen Effekt von 1 Watt erzeugt. Diese Einheit der elektromotorischen Kraft nennt man 1 Volt. Es ist daher $1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampère} = 1 \text{ Watt}$. In elektrischen Berechnungen ersetzt man deshalb auch zuweilen das Wort Watt durch Volt-Ampère, welche beiden genau denselben Effekt bezeichnen. Da nun, wie wir oben (Nr. 7) gesehen, $1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt}$ ist, so ist

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampère} = \frac{1}{736} \text{ PS.}$$

13. Spannung. Da die elektromotorische Kraft nichts weiter ist, als die Differenz zweier Spannungen, so ist von vornherein klar, daß die Einheit der Spannung dieselbe ist, wie die Einheit der elektromotorischen Kraft, also für praktische Zwecke 1 Volt.

14. Widerstand. Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Widerstand eines Stromkreises gleich dem Verhältnis seiner elektromotorischen Kraft zu seiner Stromstärke.

Die praktische Einheit des Widerstandes ist also derjenige Widerstand, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft, 1 Volt, die Einheit der Stromstärke, 1 Ampère, erzeugt.

Man nennt diese Widerstandseinheit 1 Ohm. Es gilt daher auch das Ohmsche Gesetz für die Einheiten

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}, \text{ also auch: } 1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm.}$$

15. Kapazität. Unter der Kapazität eines Kondensators verstanden wir das Verhältnis der Elektrizitätsmenge auf seiner Kollektorplatte zu ihrer Spannung, vorausgesetzt daß die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ist.

Die Einheit der Kapazität hat also derjenige Kondensator, welcher, wenn er mit der Einheit der Elektrizitätsmenge, 1 Coulomb, geladen ist, gerade die Spannung 1 Volt besitzt.

Man nennt diese Einheit der Kapazität 1 Farad. Es ist also

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}.$$

Den millionsten Teil dieser Kapazität nennt man 1 Mikrofarad.

16. Selbstpotential. Unter dem Selbstpotential eines Stromkreises verstanden wir (S. 230) diejenige von der Form des Stromkreises herrührende Größe, welche, wenn man sie mit der Änderung der Stromstärke pro Zeiteinheit in diesem Kreis multipliziert, die elektromotorische Kraft des entstehenden Extrastroms angibt.

Wir werden also als Einheit des Selbstpotentials dasjenige nehmen, welches ein Stromkreis besitzt, in welchem gerade die elektromotorische Kraft 1 Volt erzeugt wird, wenn sich in ihm die Stromstärke in 1 Sekunde um 1 Ampère ändert. Diese Einheit nennt man 1 Henry.

Es ist also

$$1 \text{ Henry} = \frac{1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Sekunde}}{1 \text{ Ampère}}.$$

Da $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampère}} = 1 \text{ Ohm}$ ist, so ist auch

$$1 \text{ Henry} = 1 \text{ Ohm} \times 1 \text{ Sekunde}.$$

Deswegen benutzten die Engländer häufig statt des Wortes Henry das geschmacklos gebildete Wort Secohm.

Den tausendsten Teil von 1 Henry nennt man ein Millihenry.

Damit sind die wesentlichsten elektrischen Größen auf bestimmte Einheiten zurückgeführt, die auch mit den mechanischen Einheiten der Länge, Masse, Zeit, Kraft, Arbeit, Effekt in einfachem Zusammenhang stehen.

Die größeren und kleineren Vielfachen der praktischen Einheiten werden häufig, wie es schon in einigen Fällen angegeben wurde, durch Vorsetzen gewisser Silben bezeichnet. Die Vorsilbe Meg bezeichnet nämlich das Millionenfache der Einheit. Es ist also

$$1 \text{ Megohm} = 1 \text{ Million Ohm}.$$

Die Vorsilbe Mikro bedeutet den millionsten Teil der Einheit. Es ist also

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mikroampère} &= 1 \text{ Millionstel Ampère,} \\ 1 \text{ Mikrocoulomb} &= 1 \text{ Millionstel Coulomb,} \\ 1 \text{ Mikrovolt} &= 1 \text{ Millionstel Volt.} \end{aligned}$$

Das Mikrofarad ist schon oben angegeben.

Endlich bedeutet Milli den tausendsten Teil der Einheit. Also ist

$$\begin{aligned} 1 \text{ Millivolt} &= 1 \text{ Tausendstel Volt,} \\ 1 \text{ Milliampère} &= 1 \text{ Tausendstel Ampère.} \end{aligned}$$

Ebenso spricht man von Millihenry.

Es genügt natürlich für praktische Zwecke nicht, bestimmte Einheiten für die einzelnen Größen wissenschaftlich definiert zu haben, es müssen auch zum Gebrauch bestimmte Normaleinheiten vorhanden sein,

die stets leicht reproduzierbar sind und deren Verhältnis zu den absoluten Einheiten ein für allemal genau bestimmt ist.

Da die drei Größen Stromstärke, Widerstand und elektromotorische Kraft nach dem Ohmschen Gesetz miteinander verbunden sind, so genügt es, für zwei von ihnen die Einheit festgestellt zu haben. Dies ist nun geschehen für die Stromstärke und den Widerstand. Es kam also darauf an, die Stromstärke 1 Ampère so zu bestimmen, daß sie immer reproduzierbar ist, und ebenso den Widerstand 1 Ohm.

Für die Stromstärke geschieht das dadurch, daß man ein für allemal untersucht, wieviel Knallgas oder Kupfer oder Silber der Strom 1 Ampère (der in Nr. 10 definiert wurde) in der Sekunde aus einem Voltmeter abscheidet. Diese Bestimmung ist von F. u. W. Kohlrausch exakt durchgeführt worden und lieferte das Resultat, daß 1 Ampère in 1 Sekunde 0,1740 ccm Knallgas von normalem Druck und normaler Temperatur entwickelt, oder 0,3284 mg Kupfer oder 1,118 mg Silber abscheidet.

Aus diesen Messungen ergibt sich folgende wichtige Tabelle:

Der Strom 1 Ampère zersetzt oder scheidet aus					
	mg Silber	mg Kupfer	mg Wasserstoff	mg Wasser	ccm Knallgas von 0° und 760mm Druck
in 1 Sekunde	1,1181	0,3284	0,01039	0,0933	0,1740
in 1 Minute	67,09	19,70	0,623	5,60	10,44
in 1 Stunde	4025	1182	37,41	336	626

Damit kann man nun durch Messung mit einem Voltmeter jede Stromstärke in Ampère ausdrücken.

Ebenso kam es darauf an, den Widerstand 1 Ohm ein für allemal zu fixieren, also etwa die Länge einer Quecksilbersäule von 0° zu bestimmen, welche bei 1 qmm Querschnitt gerade den Widerstand 1 Ohm hat. Die genauesten Messungen liefern nun dafür das Resultat, daß diese Quecksilbersäule 106,3 cm Länge haben muß. Praktisch wird daher 1 Ohm definiert als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt.

Die elektromotorische Kraft eines Stromerzeugers (galvanisches Element, Thermoelement, Induktionsapparat u. dergl.) kann man nun immer in Volt ausdrücken, wenn man sie in einem Stromkreis einen Strom erzeugen läßt. Mißt man den genannten Widerstand des Stromkreises in Ohm und mißt man die Stromstärke in Ampère, so gibt ihr Produkt direkt die gesuchte elektromotorische Kraft in Volt, da

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm}$$

ist. Praktisch benutzt man jedoch häufig die Kadmiumelemente (S. 102) als Vergleichselemente, da deren elektromotorische Kraft unveränderlich gleich 1,019 Volt (zwischen 10 u. 20°) gefunden wurde

oder auch die Clarkelemente, deren elektromotorische Kraft gleich 1,438 Volt (bei 15°) ist.

Auch für Kapazitäten hat man genaue Normalen konstruiert, nämlich die Mikrofarad, von denen S. 19 eine Abbildung gegeben ist. Dieselben bestehen aus Kondensatoren, deren Zwischenschicht gewöhnlich Glimmer ist und deren Größe und Plattenabstand so abgemessen sind, daß sie gerade 1 Mikrofarad Kapazität besitzen. Häufig sind diese noch, wie die Gewichtssätze, in Unterabteilungen geteilt, so daß sie Kapazitäten von 0,1, 0,2, 0,2, 0,5 Mikrofarad enthalten, deren Summe dann gleich 1 Mikrofarad ist.

In dieser Weise sind also die Maßeinheiten in der Elektrizität alle bestimmt und auf sichere Erfahrungen und Grundsätze zurückgeführt.

II. Abschnitt.

Die Anwendungen der Elektrizität.

II. Abschnitt.

Die Anwendungen der Elektrizität.

1. Kapitel.

Die Dynamomaschinen für Gleichstrom.

Die große Leichtigkeit, mit der sich die elektrische Energie in fast alle anderen Formen der Naturerscheinungen umwandeln läßt, in Licht, in Wärme, in Magnetismus, in chemische Energie, in mechanische Bewegung, diese Leichtigkeit macht die Elektrizität ganz außerordentlich zur praktischen Verwendung geeignet. Ein Lichtstrahl bleibt stets ein Lichtstrahl, er leuchtet und erwärmt, aber seine Energie läßt sich nicht (oder nur unvollkommen und schwierig) in andere Formen der Energie umwandeln. Ein elektrischer Strom dagegen braucht nur durch getrennte Kohlenspitzen gesendet zu werden, um Licht zu erzeugen, er braucht nur durch Drähte gesendet zu werden, um Wärme und Licht hervorzubringen; um einen Eisenstab spiralförmig herumgeführt, erzeugt er Magnetismus, in die Nähe eines anderen Stromes oder eines Magneten gebracht, bringt er diesen in Bewegung oder kommt selbst in Bewegung, durch eine zusammengesetzte Flüssigkeit gesendet, erzeugt er chemische Zerlegungen und Verbindungen. Diese leichte Umwandlungsfähigkeit der elektrischen Energie ist eines der Hauptmomente, durch welches die Elektrizität sich einen immer weiteren Raum in der Technik erobert.

Elektrische Ströme zu erzeugen, ist auf verschiedene Weise möglich. Zwei Metalle in eine Flüssigkeit gebracht und zu einem geschlossenen Kreis verbunden, geben einen elektrischen Strom. Es wird der elektrische Strom in solchen Elementen durch Umwandlung von chemischer Energie erzeugt. Zwei verschiedene Metalle, in Berührung miteinander gebracht, erzeugen einen elektrischen Strom, wenn man die eine Berührungsstelle erwärmt oder abkühlt. Es wird der elektrische Strom hierbei, der Thermostrom, durch die Energie der Wärme erzeugt. In einem geschlossenen Drahtkreis, der in der Nähe eines Magneten oder eines elektrischen Stromes in beliebiger Weise bewegt wird, werden elektrische Ströme erzeugt. Es werden diese Ströme, die Induktionsströme, durch Bewegung, also durch Aufwand

von Bewegungsenergie, durch Aufwand von mechanischer Arbeit hervorgebracht. Von diesen verschiedenen Erzeugungsweisen elektrischer Ströme ist die letztere für technische Zwecke, bei denen es sich um billige und einfache Erzeugung von Strömen von großer Intensität und oft hoher elektromotorischer Kraft handelt, die einzig zweckmäßige.

Die Anwendung von galvanischen Elementen ist zur Erzeugung von sehr starken Strömen eine sehr prekäre. Man kann wohl durch galvanische Elemente Ströme von jeder beliebigen Intensität und elektromotorischen Kraft erhalten, indem man nur die Zahl der benutzten Elemente vermehrt. Aber eben diese Vermehrung der Zahl der Elemente ist für praktische Zwecke ziemlich unmöglich.

Ein jedes Element erfordert eine sorgfältige Behandlung, öfteren Wechsel der Flüssigkeiten und Metalle. Eine große Anzahl von Elementen nimmt einen großen Raum ein. Außerdem entwickeln die galvanischen Elemente zum Teil, und gerade die stärkeren, schädliche und unangenehme Dämpfe. Und endlich ist die Anwendung der Elemente eine sehr teure. In fast allen Elementen wird durch chemische Prozesse Zink in Säuren aufgelöst, der elektrische Strom wird also nur erhalten durch Verbrennung (Oxydation) von Zink, einem sehr teuren Brennmaterial. Aus allen diesen Gründen ist die Anwendung von galvanischen Elementen zur Erzeugung von starken elektrischen Strömen für technische Zwecke ziemlich unmöglich und alle Versuche, die mit solchen Batterien für technische Zwecke angestellt wurden, scheiterten aus dem einen oder anderen der angegebenen Gründe.

Die prinzipiell vorteilhafteste Methode, um elektrische Ströme zu erzeugen, wäre die, direkt die Wärme in Elektrizität umzuwandeln. Aber leider ist eine auch tatsächlich vorteilhafte Methode dafür bisher nicht gefunden worden. Die Thermoelektrizität, die bisher allein in dieser Beziehung in Frage kommt, liefert, selbst bei den vorteilhaftesten Konstruktionen, nur eine sehr geringe Ausnutzung der Wärme, so daß die größeren Thermosäulen zwar für geringe Bedürfnisse nach Elektrizität zweckmäßig sind, wo es mehr auf Bequemlichkeit der Anwendung als auf vorteilhafte Erzeugung ankommt, für große technische Betriebe aber nicht in Frage kommen.

Das wirksamste Mittel dagegen zur einfachen Erzeugung von starken elektrischen Strömen bietet die Induktion, und insbesondere die Induktion durch Magnete, die sogenannte Magnetoinduktion.

Von einem Magneten gehen nach allen Richtungen Kräfte aus, welche gewisse Wirkungen ausüben. Wir können uns diese Kräfte bildlich versinnlichen, indem wir sie durch Kraftlinien darstellen, die von dem Nordpol ausgehen, durch die Luft oder andere Körper zum Südpol sich hinbiegen und dann gedrängt durch das Eisen des Magnets, vom Südpol zum Nordpol verlaufen. Diese Kraftlinien machen weiches, unmagnetisches Eisen, in welches sie eintreten, selbst magnetisch, sie induzieren, wie man es nennt, Magnetismus in dem Eisen. Die Kraftlinien verschiedener, einander nahe gebrachter Magnete stauen sich, wenn sie sich entgegen laufen, und verschmelzen, wenn sie nach derselben Richtung gehen, und erzeugen dadurch Bewegung der Magnete selbst.

Aber diese Kraftlinien, die von einem Magneten ausgehen, wirken nicht bloß auf Eisen magnetisierend und bewegend. Sie erzeugen auch in gewissen Fällen elektrische Ströme. Sobald man einen geschlossenen Drahtkreis, am besten eine Drahtspule, in der Nähe eines solchen Magneten irgendwie bewegt, so werden, wie im ersten Abschnitt ausführlich beschrieben wurde, in dem Drahtkreis, in der Drahtspule momentane Induktionsströme erregt. Die Zahl der Kraftlinien, die in einer Sekunde von der bewegten Spule senkrecht geschnitten werden, entspricht der elektromotorischen Kraft des Induktionsstroms. Vorteilhaft ist es, in die Spule noch einen Kern von weichem Eisen zu bringen, da dieser in der Nähe des Magneten selbst magnetisch wird, und zwar bei der Bewegung bald stärker und bald schwächer. Diese Veränderung der Stärke des Magnetismus erzeugt aber selbst ebenfalls in der umgebenden Drahtspule Veränderungen der Kraftlinienzahl und daher kräftige Induktionsströme.

Welche Form man den Drahtspulen mit ihren Eisenkernen gibt, ist zunächst gleichgültig. Man kann flache Kerne mit Draht umwickeln, man kann lange Eisenzylinder entweder der Quere nach oder der Länge nach mit Drahtwindungen umgeben, man kann endlich eiserne Ringe ganz mit Draht umwinden, in jedem Falle werden Induktionsströme entstehen, wenn diese Spulen mit ihren Kernen in der Nähe von Magneten bewegt werden. Nur wird natürlich je nach der Anordnung die Induktion bald stärker, bald schwächer sein. Im allgemeinen wird man selbstverständlich darauf sehen müssen, daß der zu induzierende Draht sich in möglichst starken magnetischen Feldern bewegt.

Sehr bald nach der Entdeckung der Induktionsströme durch Faraday, schon wenige Jahre nachher, konstruierte Pixii bereits die erste Maschine, welche durch Drehung von Drahtspulen mit Eisenkernen vor Magneten fortdauernde Induktionsströme erzeugte. Er ließ dabei, aus Konstruktionsgründen, nicht die Spulen mit ihrem Eisenkern rotieren und den Magneten feststehen, sondern er stellte im Gegenteil den Eisenkern mit den Spulen fest und brachte einen Hufeisenmagneten um seine Achse in Rotation. Der Effekt auf die Spulen war natürlich derselbe.

Solche Maschinen, die durch Bewegung von Drahtspulen gegen Magnete (oder umgekehrt) Ströme erzeugen, nennt man magnet-elektrische Maschinen. Man nennt bei ihnen den Magneten, welcher die Ströme induziert, den induzierenden Magnet oder auch den Feldmagnet, die Drahtspulen mit ihrem Eisenkern bezeichnet man als Induktor oder Anker oder Armatur.

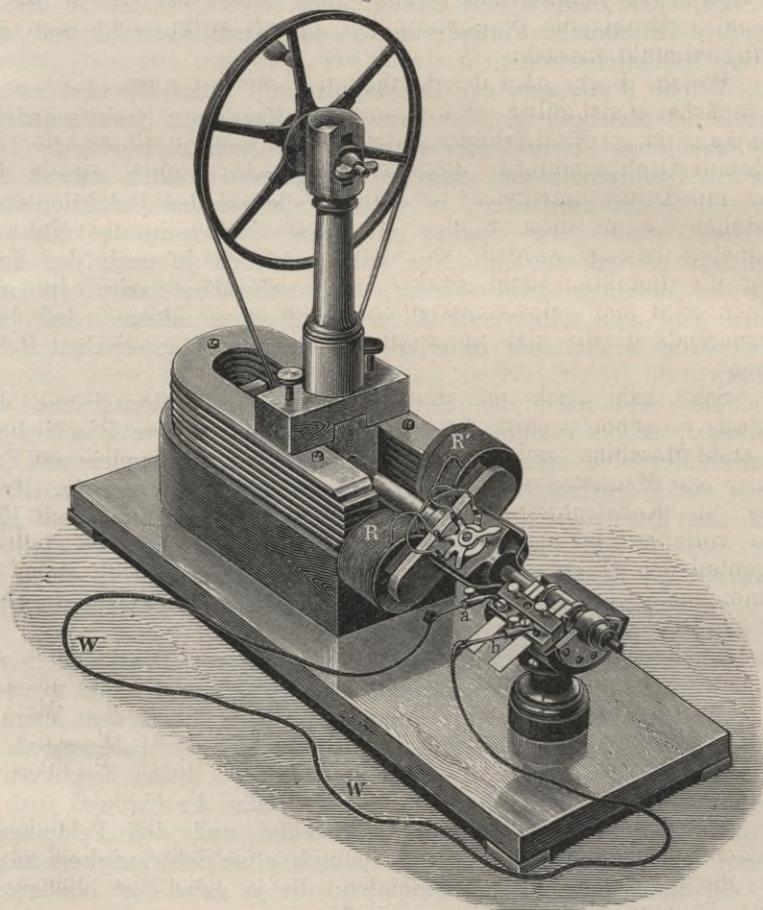
Pixii ließ also den Anker feststehen und den Feldmagneten rotieren aus dem Grunde, weil es dadurch ohne Schwierigkeit möglich war, die Ströme aus den Ankerspulen, die ja dabei fest blieben, mit einem äußeren Stromkreis zu verbinden.

Will man umgekehrt den Magneten feststehen lassen und die Spulen bewegen, so muß man eine Einrichtung treffen, daß der äußere Stromkreis, in welchen man die erzeugten Induktionsströme schicken will, ohne sich mitzubewegen, doch in beständigem Kontakt mit dem

Induktor, auch während seiner Bewegung, bleibt. Dies erreicht man dadurch, daß man die Enden der Spule des Induktors an die Drehungsachse führt und dort jedes Ende an je einen Metallring befestigt, die voneinander und von der Achse isoliert sind. Diese beiden Ringe bilden also die beiden Enden der Spule und an sie wird durch schleifende Kontakte der äußere Schließungskreis angelegt. Man läßt nämlich Bürsten aus Kupferdraht oder auch aus Kohle auf diesen Ringen schleifen und durch diese den Strom von der Maschine in den äußeren Schließungskreis führen.

Ein einfaches Beispiel einer solchen Maschine, wie sie zuerst gebaut wurde (von Stöhrer), zeigt Fig. 279. Wir haben die Wirkungs-

Fig. 279.



weise dieser Maschine schon auf S. 223 f. beschrieben. Man sieht in ihr einen hufeisenförmigen Feldmagneten, vor dessen Polen die Rollen RR' mit ihrem Eisenkern durch Drehung der Achse mittels des Rades rotieren. Die Enden des Drahtes, der auf die Rollen R und R' auf-

gewickelt ist, gehen in zwei Schleifringe auf der Achse, auf denen die in der Figur sichtbaren Bürsten schleifen. Bei a und b sind an diese Bürsten die Drähte des äußeren Stromkreises WW befestigt. Zunächst geben diese Maschinen, wie wir früher gesehen haben, Wechselströme. Man kann aber durch einen passend eingerichteten Kommutator mit Leichtigkeit die einzelnen Induktionsströme für den äußeren Stromkreis alle gleich richten, so daß man in diesem fortwährend Ströme von derselben Richtung erhält.

Bei dieser Maschine und bei allen ähnlichen zuerst konstruierten Maschinen besteht der Induktor aus Drahtspulen, deren Enden frei sind und durch den äußeren Schließungskreis verbunden werden. Die beiden Schleifringe bilden immer die freien Enden des Drahtes. Es ist immer ein offener Draht, der den Eisenkern umgibt, ein Draht mit freien Enden, von denen jedes bei der Drehung abwechselnd positiv und negativ elektrisch wird. Zur Erzeugung von Gleichströmen verbindet ein Kommutator die Enden des äußeren Stromkreises mit diesen freien Enden des Induktordrahtes bald direkt, bald übers Kreuz.

Es war nun zuerst ein Italiener, Pacinotti, der die Induktionsströme in einem ganz anderen Induktor erzeugte und untersuchte. Pacinotti nahm nämlich als Eisenkern einen geschlossenen eisernen Ring und umwickelte diesen vollständig mit Draht. Die Enden dieses Drahtes lötete er aneinander, so daß der Draht vollkommen geschlossen war und keine freien Enden mehr hatte. Ein solcher Induktor, den man oft den Pacinottischen Ring, gewöhnlich aber den Grammeschen Ring nennt, weil er durch Gramme erst allgemein bekannt wurde, ein solcher Induktor zeigt nun merkwürdige, aber leicht zu übersehende Erscheinungen, wenn man ihn vor den Polen eines Magneten rotieren läßt, Eigenschaften, die wir aus einer Betrachtung der Fig. 280 leicht erkennen können.

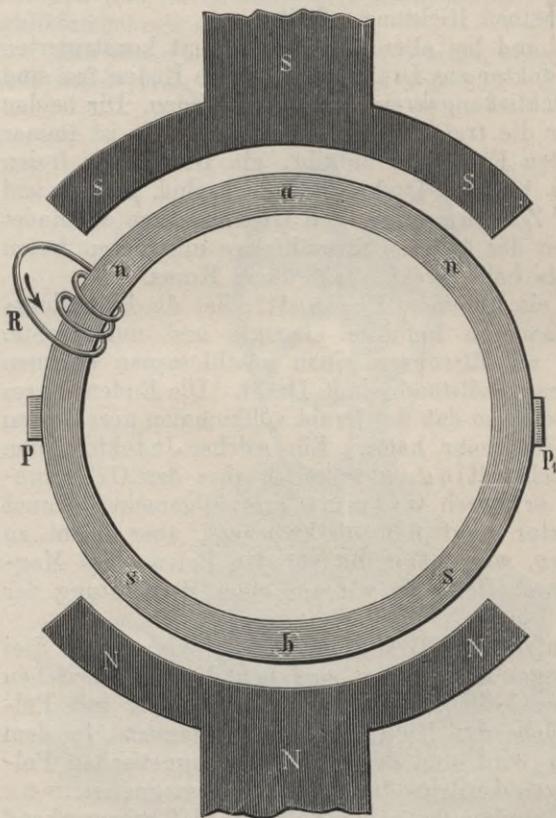
Der Ring ist fortlaufend mit Draht umwickelt, wie es die drei gezeichneten Drahtwindungen R andeuten, und befindet sich zwischen den Polen S und N eines kräftigen Hufeisenmagnets, der mit Polschuhen versehen ist, welche den Ring zum Teil umfassen. In dem Ring von weichem Eisen wird nun durch den süd magnetischen Polschuh SS an den ihm gegenüberliegenden Stellen Nordmagnetismus nn induziert, und durch den nord magnetischen Polschuh NN entsprechend Süd magnetismus ss. Wenn der Ring rotiert, so kommen stets neue und neue Eisenteilchen gegenüber von NN und SS und stets werden an diesen Stellen die Pole s und n erzeugt. Ist der Ring von ganz weichem Eisen, so verliert jedes Teilchen seinen Magnetismus bald, sowie es aus der Nähe des induzierenden Polschuhes sich entfernt hat. Es ist also stets dem Polschuh NN gegenüber der Ring süd magnetisch, dem Polschuh SS gegenüber nord magnetisch. Dadurch, daß der Eisenring rotiert, wird daran nichts geändert. Der Ring ist nun mit Draht fest umwickelt. Wir können daher die Erscheinungen auch vollkommen untersuchen, wenn wir annehmen, daß der eiserne Kern nicht rotiert, sondern ganz fest bleibt, und daß nur die Drahtwindungen um den Eisenkern herumlaufen.

In der beweglichen Rolle R entstehen nun Induktionsströme und

zwar durch die einwirkenden Magnete in Verbindung mit dem magnetisch gewordenen Eisenkern.

In der oberen Hälfte der Figur von p bis p_1 ist ein magnetisches Feld vorhanden, das gebildet wird von dem süd magnetischen Polschuh und dem nord magnetisch gewordenen Eisenkern. Die Kraftlinien haben

Fig. 280.



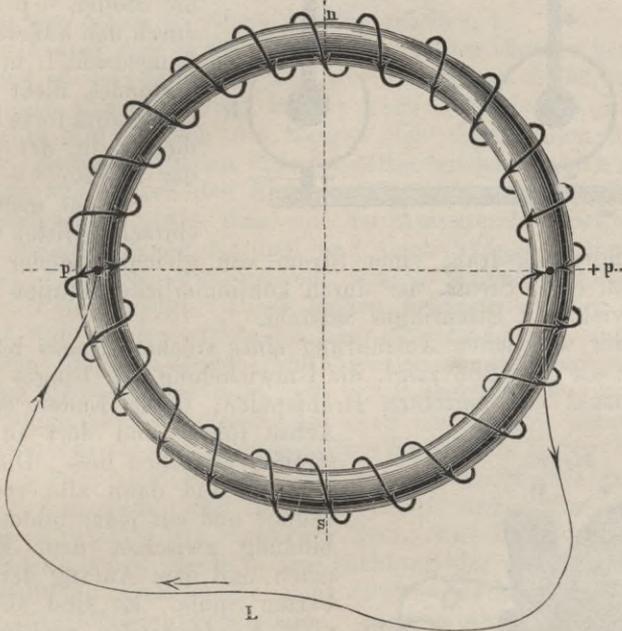
also in der oberen Hälfte der Figur die Richtung von dem Ringe zum Polschuh. In diesem Felde bewegt sich nun die Spule, indem sie bei der Bewegung ihre Fläche dreht von der horizontalen Lage in p bis zur vertikalen Lage in a und in demselben Sinne weiter bis zur horizontalen Lage in p_1 . Auf diesem ganzen Wege, der immer in demselben Sinne durch ein und dasselbe Feld hindurchgeht, behält daher der entstehende Induktionsstrom immer dieselbe Richtung in der Spule, wobei er an Stärke von p bis a zunimmt und dann wieder abnimmt. Bei der weiteren Bewegung von p_1 nach unten kommt die Spule in ein magnetisches Feld von entgegengesetzter Richtung, in welchem der Nordpol außerhalb der Spule,

der Südpol innerhalb derselben ist. Die Richtung des Stromes ist daher auf dieser Hälfte die entgegengesetzte, und bleibt so von p_1 über b bis p , wobei die Stärke des Stromes zunimmt von p_1 bis b und dann abnimmt von b bis p . In der Mitte zwischen den beiden Ringhälften, an den Stellen p und p_1 , muß also der Strom in der Spule seine Richtung ändern, also durch die Stromstärke Null hindurchgehen, d. h. wenn die Spule an den Punkt p oder p_1 gekommen ist, so fließt kein Strom in ihr.

So wird also eine Rolle R bei ihrem Umlauf um den eisernen Ring der Reihe nach an zwei Punkten p und p_1 stromlos, aber sonst in den beiden Hälften des Ringes stets von Strömen durchflossen sein. Diese Stellen bezeichnet man als Indifferenzstellen oder als neutrale Zone

Nehmen wir nun an, daß der ganze Ring mit solchen Rollen umgeben ist, wie es in Fig. 281 durch eine Reihe von Drahtwindungen angedeutet ist, welche einen geschlossenen Kreis um den ganzen Ring bilden. Wenn diese ganze Drahtumwicklung um den Eisenring herumläuft, so haben stets die in der oberen Hälfte des Ringes induzierten Ströme die entgegengesetzte Richtung, wie in der unteren. An den Stellen $+p$ und $-p$ kommen diese entgegengesetzten Ströme zusammen. Da nun der Draht ein in sich vollkommen geschlossener ist, so

Fig. 281.



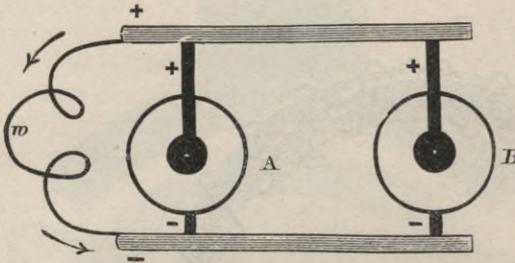
müssen sich diese entgegengesetzt gerichteten Ströme in dem Draht vollkommen aufheben, es fließt dann in der Umwicklung des Ringes gar kein Strom. Von allen oben befindlichen Windungen fließt der positive Strom nach $+p$ hin (also von $-p$ weg) und ebenso von allen unten befindlichen Windungen.

Man kann aber diese Stromkombination noch in anderer Weise ansehen. Man kann die Stellen $+p$ und $-p$ so auffassen, wie aus den Pfeilen in der Figur deutlich wird, als ob von beiden Hälften des Ringes nach $+p$ fortwährend positive Elektrizität hinströmt, von $-p$ dagegen fortwährend positive wegströmt. Dann lassen sich die beiden Drahthälften auffassen als zwei galvanische Elemente, welche je an $-p$ ihren negativen Pol und an $+p$ ihren positiven Pol haben. Verbindet man zwei gleiche galvanische Elemente so mit ihren gleichnamigen Polen, so heben sich die Ströme in ihnen auf. Man kann aber andererseits, wie es bei dem Parallelschalten von zwei Elementen geschieht, die beiden miteinander verbundenen positiven Pole

und ebenso die beiden miteinander verbundenen negativen Pole zusammen durch einen äußeren Verbindungsdraht schließen. Dann fließt in dem äußeren Draht der Strom von dem einen Polpaar zum anderen.

Eine solche Verbindung zeigt Fig. 282. In dieser sind A und B die beiden parallelgeschalteten Elemente und w ist der äußere Schließungskreis, in welchem also die Elektrizität in der Richtung der Pfeile fließt.

Fig. 282.

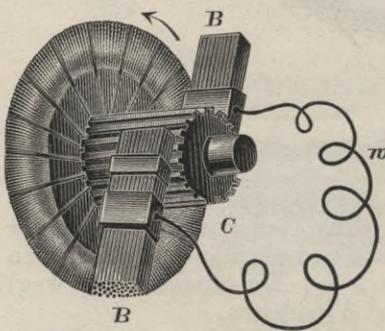


Ganz dasselbe kann man bei dem Grammeschen Ring machen. Sobald man die Stellen $+p$ und $-p$ durch den äußeren Schließungsdraht L in Fig. 281 verbindet, fließt der positive Strom fortwährend in diesem in der Richtung der Pfeile.

So hat man also ein einfaches Mittel, um in dem äußeren Schließungsdraht einen Strom von gleichbleibender Richtung zu erzeugen, einen Strom, der durch kontinuierliche Rotation eines mit Draht umwickelten Eisenringes entsteht.

• Bei der wirklichen Ausführung eines solchen Ringes bildete nun Gramme, wie Fig. 283 zeigt, die Umwicklung des Ringes aus einer großen Anzahl von einzelnen Drahtspulen, deren Enden er an die

Fig. 283.



Achse führte und dort in Kupferstreifen ausgehen ließ. Die Kupferstreifen sind dann alle voneinander isoliert und ein jeder bildet die Verbindung zwischen dem Ende der einen und dem Anfang der benachbarten Spule. Es sind also ebenso viele Kupferstreifen vorhanden, wie einzelne Spulen und die Spulen sind alle hintereinander verbunden, so daß sie eine vollständig gleichlaufende Umwicklung des Eisenringes bilden. An denjenigen beiden Kupferstreifen, welche den Stellen $+p$ und $-p$ entsprechen, welche also zunächst senkrecht zu der Verbindungslinie der Magnetpole stehen, schleifen Bürsten

BB, welche von ihnen den Strom abnehmen und in die äußere Leitung w senden. Den auf der Achse sitzenden Teil C, der aus einer Anzahl Kupferstreifen und dazwischen liegenden isolierenden Glimmerstreifen besteht, nennt man den Kommutator oder Kollektor (Stromsammeler). Daß der Ring aus einer großen Zahl von einzelnen Spulen gebildet wird, die durch die Streifen des Kollektors je miteinander verbunden sind, hat folgenden Zweck. Nehmen wir an, es sei die ganze eine Hälfte des Ringes fortlaufend mit Draht umwickelt

und die ganze andere Hälfte auch, und die zwei Enden jeder dieser Bewickelungen würden zu je einem Streifen auf dem Kollektor geführt, so würden die Bürsten auch, sobald die Streifen bei der Drehung bei ihnen vorbeipassieren, den Strom von ihnen abnehmen und in die äußere Leitung führen. Aber man sieht, daß dann eine sehr lange Unterbrechung des Stromes entstehen würde. Nur nach je einer halben Umdrehung des Ringes würde wieder ein Strom in die äußere Leitung geschickt werden. Je mehr Spulen vorhanden sind, je mehr Abteilungen der Kollektor besitzt, desto rascher folgen also die einzelnen gleichgerichteten Ströme in der äußeren Leitung aufeinander, desto mehr wird also der Strom zu einem kontinuierlichen.

Wenn aber nun in den Umwindungen des Ringes, bei seiner Rotation, und in dem äußeren Stromkreis ein Strom fließt, so tritt dadurch sofort eine Änderung in den eben betrachteten Verhältnissen ein. Die in den Drähten des Ringes, den sogenannten Ankerwindungen, fließenden Ströme üben ja selbst wieder für sich magnetische Kräfte aus und suchen den Eisenring für sich zu magnetisieren. Und zwar erzeugen sie, wie man aus der Ampèreschen Schwimmerregel (S. 167) erkennt, einen Nordpol und einen Südpol an den Stellen p_1 und p der Fig. 280, während der äußere Magnet an den Stellen n und s die Pole erzeugt. Diese beiden magnetisierenden Kräfte, die senkrecht aufeinander wirken, setzen sich zusammen und bewirken, daß in dem Ring die beiden Pole etwas in der Richtung der Drehung verschoben sind. Daraus folgt, daß unter dem Einfluß dieser magnetischen Wirkungen des Ankerstromes auch die neutrale Zone nicht mehr genau senkrecht zu den ursprünglichen Kraftlinien liegen bleibt, bei p und p_1 , sondern ebenfalls um einen bestimmten Winkel in der Richtung der Bewegung des Ringes gedreht sind. Es verschiebt sich also dadurch die neutrale Zone des Ringes, an der der Strom sich umkehrt, etwas in der Richtung der Bewegung, und man darf deshalb die Drahtbürsten nicht direkt senkrecht zur Verbindungslinie der induzierenden Pole stellen, sondern muß sie etwas in Richtung der Drehung verschieben. Wie weit sie zu verschieben sind, das hängt von dem Verhältnis der Stärke der direkten magnetischen Wirkung der induzierenden Magnete und der Stärke der magnetischen Wirkung der Ankerströme ab, ist also bei verschiedenen Stromstärken verschieden.

Durch Anwendung eines solchen Ringes als Induktor ist es also nun möglich, direkt Induktionsströme von konstant bleibender, unveränderlicher Richtung, also Gleichströme, zu erhalten. Man braucht eben nur den Ring drehbar zwischen die Pole eines Hufeisenmagnets zu bringen, um von den Schleifbürsten stets einen Strom von einerlei Richtung abnehmen zu können.

Die Erfindung des Grammeschen Ringes war das eine wesentliche Moment, welches den Aufschwung der Elektrotechnik hervorgerufen hat.

Ein zweites aber, das wesentlichste Moment, bestand in folgendem. Zunächst wurden bei allen magnetelektrischen Maschinen Stahlmagnete angewendet, um die Ströme zu induzieren. Nun ist aber

der Magnetismus von Stahlmagneten ein verhältnismäßig unbedeutender. Er ist außerordentlich viel schwächer, als der Magnetismus, den man durch elektrische Ströme in gleich großen Stücken von weichem Eisen erzeugen kann. Man konnte daher von vornherein sagen, daß die Induktionsströme einer solchen magnetelektrischen Maschine viel stärker werden müßten, wenn man statt der Stahlmagnete Elektromagnete zur Induktion benutzte. Aber hier trat nun sofort folgende wichtige Frage auf: Um diese Elektromagnete zu erzeugen, braucht man einen Strom, der eben um die Eisenkerne der Feldmagnete herumfließt. Muß man nun diesen Strom aus irgend einer äußeren Quelle nehmen, z. B. aus einer Batterie, oder kann man den Strom, der im Induktor entsteht, selbst zur Magnetisierung der Feldmagnete benutzen?

Schon die Stellung dieser Frage war eine bedeutende und prinzipiell höchst wichtige Tat. Und der Fortschritt, der in der Stellung und Lösung dieser Frage liegt, ist eine der bedeutendsten Errungenschaften, die die Technik dem Genie von Werner Siemens zu danken hat, der im Jahre 1867 diese Frage aufwarf und zugleich löste.

Siemens sagte sich, daß es gewiß nicht nötig sei, die Elektromagnete durch einen fremden Strom, etwa von einer Batterie, erregen zu lassen, sondern daß man diese durch den Strom der eigentlichen Maschine selbst erregen lassen könne. Wenn einmal in einem Induktor ein Strom erzeugt sei, so brauche man diesen ja bloß in Spiralwindungen um die Magnete passend herumzuführen, um die Stärke dieser Magnete erheblich zu vergrößern. Oder noch mehr, da jedes Stück Eisen durch den Erdmagnetismus schon ein wenig magnetisch ist, so braucht man als induzierenden Körper nur ein hufeisenartig geformtes Stück weichen Eisens zu nehmen und um dieses den Strom aus dem Induktor herumzuführen, um es zu einem kräftigen Magneten zu machen und dadurch den Strom aus dem Induktor erheblich zu verstärken. Dies ist das berühmte Dynamoprinzip von Siemens und nach diesem Prinzip, entweder in direkter oder in modifizierter Anwendung, werden sämtliche neuen Maschinen gebaut. Es ist also bei diesen Maschinen von vornherein gar kein eigentlicher Magnet vorhanden; der schwache remanente Magnetismus jedes Eisenkerns leitet die Wirkung ein und erst durch den Gang der Maschine werden die Magnete erzeugt und beeinflussen dann in der erheblichsten Weise die Wirksamkeit der Maschine. Aus diesem Grunde, weil der Magnetismus gewissermaßen nur als Zwischenprodukt auftritt, um die Verwandlung der aufgewendeten Arbeit in Elektrizität zu vermitteln, nannte Siemens diese Maschinen Dynamomaschinen, von *δύναμις*, dynamis, Arbeit, oder auch dynamoelektrische Maschinen. Bei einer solchen Maschine wird also zunächst der schwache, remanente Magnetismus, den jedes, auch das weichste Eisen, zurückbehält, benutzt, um bei der Drehung des Ankers zuerst einen schwachen Strom in ihm zu erzeugen. Dieser fließt nun um die Eisenkerne in passender Richtung, macht sie also zu Magneten, wenn auch schwachen, und wird nun dadurch selbst wieder verstärkt. So verstärkt der Strom fortwährend den Magnetismus,

der Magnetismus fortwährend den Strom, bis schließlich die Magnete zum Maximum magnetisiert sind und so die höchste Wirksamkeit der Maschine erreicht ist.

Der erste, der diese beiden wesentlichen Prinzipien, den Grammeschen Ring und das Siemenssche Dynamoprinzip, zur Konstruktion einer Maschine benutzte, war Gramme, und seine Maschinen waren von Anfang an so ausgezeichnet gebaut, daß sie lange Zeit zu den besten und leistungsfähigsten Maschinen gehörten.

Das Schema einer derartigen Dynamomaschine, wie sie von Gramme und anderen gebaut wurde, ist in Fig. 284 gezeichnet. Man sieht dabei einen Elektromagneten M, der hufeisenförmig gestaltet ist und zwischen seinen Polschuhen den Ring R trägt. Dessen Kommutator ist nicht besonders gezeichnet, sondern die Bürsten a und b schleifen in der Figur direkt auf dem Ring. Der äußere Stromkreis, durch den der bei der Drehung des Ringes erzeugte Strom fließt, ist mit w bezeichnet. Man sieht, daß der Anker der Maschine, die Feldmagnete und der äußere Schließungskreis dabei hintereinander geschaltet sind. Der Strom fließt der Reihe nach von den Drähten des Ankers R durch die Bürste a um die Windungen der beiden Elektromagnetschenkel M herum zur einen Polklemme K_2 , von dieser durch den äußeren Schließungskreis w zur anderen Polklemme K_1 und durch die Bürste b in den Anker zurück. Anker, Elektromagnet, äußerer Schließungsdraht bilden also einen einzigen unverzweigten Stromkreis; es kommt bei der Stromstärke ihr Gesamtverstand in Betracht. Dabei sind übrigens stets die beiden Hälften der Ankerwindungen einander parallel geschaltet, so daß in jeder Hälfte nur ein Strom von der halben Stärke des äußeren Stromes fließt. Solche Maschinen nennt man Hauptstrommaschinen.

Man kann aber das Dynamoprinzip auch in anderer Weise anwenden. Man kann nämlich den Strom, der von den Ankerdrähten kommt, direkt in die äußere Leitung führen und um die Magnete herum nur einen Zweigstrom senden. Eine solche Anordnung zeigt das Schema in Fig. 285. Hier teilt sich der Strom, der durch die Bürsten a und b aus dem Anker R kommt, bei m und n und geht zum Teil durch den äußeren Schließungskreis w, zum Teil aber in vielen Windungen um die Magnete M. Man bezeichnet Maschinen mit dieser Anordnung als Nebenschlußmaschinen. Die Stromstärken in den beiden Zweigen w und M verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände. In die Magnetbewicklung wird gewöhnlich noch ein variabler Widerstand S (ein Regulierwiderstand) eingeschaltet, um die Stärke des Magnetstroms passend zu verändern. Seine Einrichtung ist aus der Figur selbst

Fig. 284.

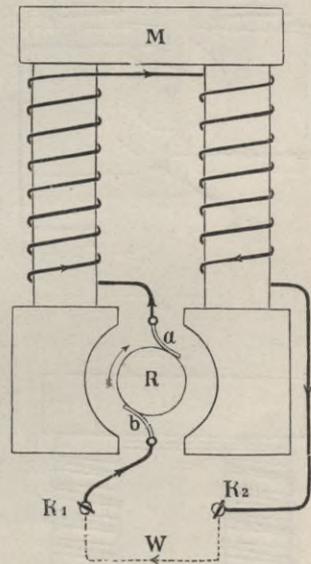


Fig. 285.

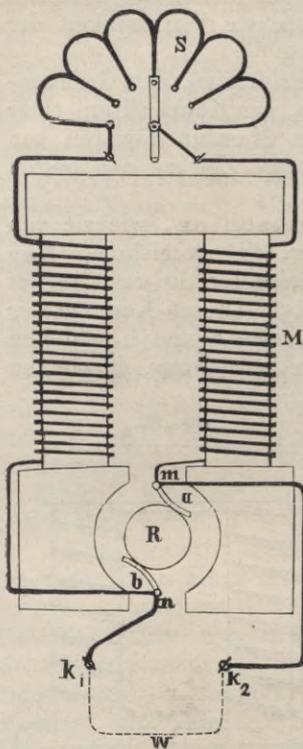
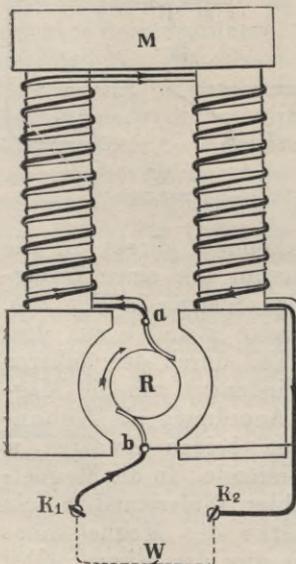


Fig. 286.



klar und ist auch auf S. 92 beschrieben. Die Anwendung dieser Schaltung ist deswegen von Vorteil, weil die Magnete schon bei bestimmten, nicht zu hohen Stromstärken bis zum Maximum magnetisiert und es infolgedessen nutzlos und daher unökonomisch ist, den gesamten starken Strom um die Magnete zu senden. Daher werden Nebenschlußmaschinen hauptsächlich dann angewendet, wenn der äußere Leitungskreis w einen sehr geringen Widerstand hat. Denn dann ist der Hauptstrom, der aus der Maschine kommt, sehr stark, folglich ist auch der Strom, der um die Magnete fließt, ein erheblicher, wenn er auch wegen des großen Widerstandes der Magnetbewicklung viel schwächer ist als der Strom in w .

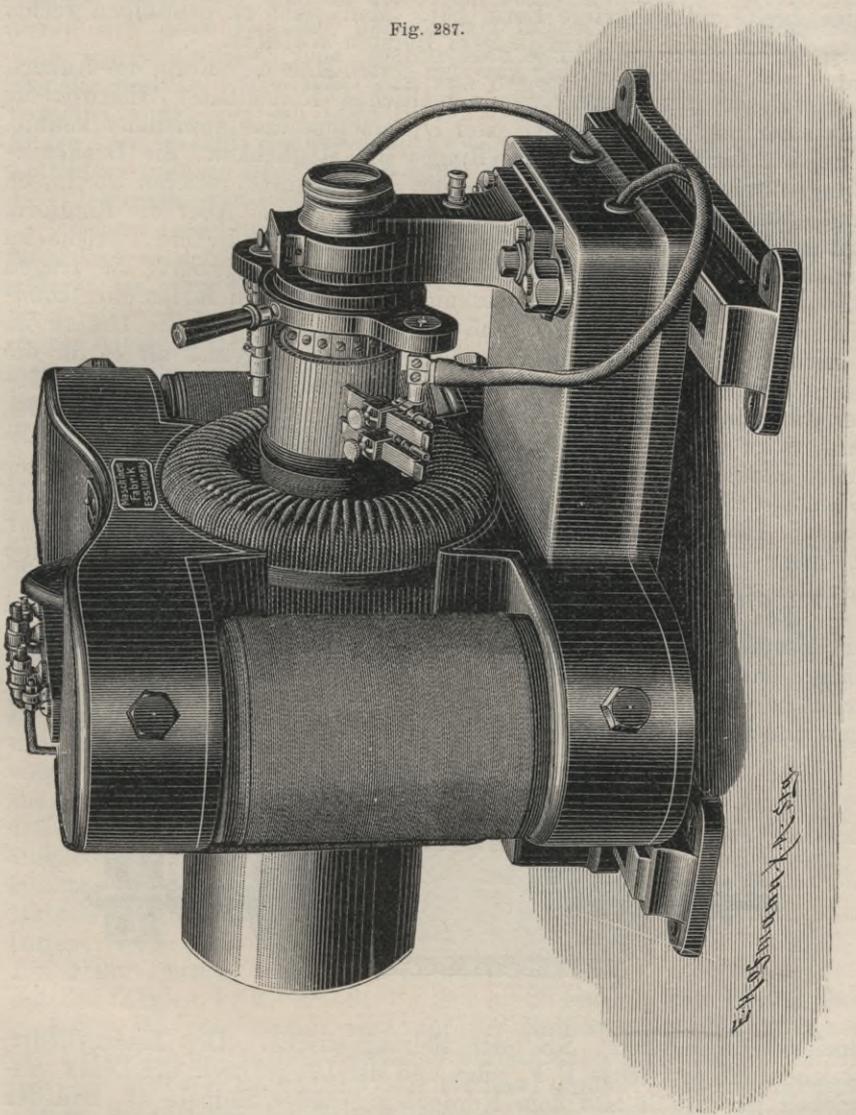
Die Dynamomaschinen werden meistens, mehr als 90 Proz. aller Maschinen, als Nebenschlußmaschinen gebaut.

Eine dritte Schaltung, die in manchen Fällen mit Vorteil angewendet wird, ist die sogenannte Compoundschaltung. Diese besteht darin, daß man die Magnete sowohl durch den Hauptstrom, als durch einen Zweigstrom erregen läßt. So gebaute Maschinen nennt man Compoundmaschinen. Ihr Schema ist in Fig. 286 gezeichnet. Von dem Ring R geht durch die Bürsten der Hauptstrom (stark gezeichnet) um die Magnete M und durch den äußeren Widerstand w ; außerdem aber zweigt sich bei a und b der schwach gezeichnete Nebenstrom ab und fließt in vielen Windungen allein um die Magnete. Welchen Vorteil diese Schaltung gewährt, wird später klar werden.

Selbstverständlich kann man auch die Magnete einer Dynamomaschine nicht durch ihren eigenen Strom, sondern durch den Strom einer anderen Maschine erregen lassen. Dann ist die Maschine aber keine eigentliche dynamoelektrische mehr. Man bezeichnet sie dann als Dynamomaschine mit Fremderregung. Man kann auch, was auf dasselbe herauskommt, den Ankerkern mit zwei ganz voneinander getrennten Drahtwindungen umwickeln und den Strom von dem einen Drahtkreis um die Elektromagnete führen. Dann ist die Maschine auch eine mit Fremd-

erregung, bei der der Erregerstrom (d. h. der Strom, der die Magnete speist) in einer besonderen Maschine erregt wird, die nur auf derselben Achse sitzt wie der eigentliche Anker. Im Gegensatz zu diesen fremd-

Fig. 287.



erregten Maschinen bezeichnet man zuweilen die eigentlichen Dynamomaschinen als Maschinen mit Eigenerregung.

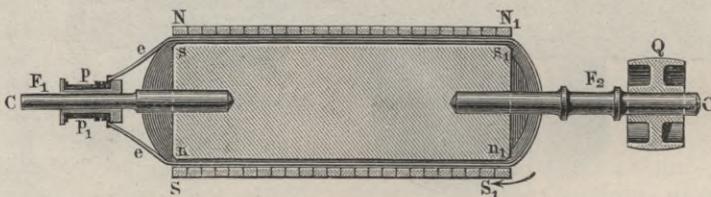
Als ein Beispiel einer solchen Dynamomaschine mit dem Grammeschen Ring möge die in Fig. 287 gezeichnete Maschine der Maschinenfabrik Eßlingen dienen. Dieselbe ist eine Nebenschlußmaschine. Man

sieht in ihr die zwei Magnetschenkel, welche oben und unten durch Eisenmassen verbunden sind und welche so geschaltet sind, daß die obere Eisenmasse etwa nordmagnetisch, die untere süd magnetisch wird. Zwischen diesen Polschuhen befindet sich der Grammesche Ring, der eine breite zylinderartige Form hat. Man sieht an demselben rechts den Kommutator, an dem je zwei Bürsten schleifen.

Der Grammesche Ring gab zum ersten Male eine Form des Ankers, bei welcher man ohne einen eigentlichen Kommutator Gleichströme aus einer magnetelektrischen oder Dynamomaschine entnehmen konnte. Zugleich bietet die Form des Ringes die Möglichkeit, die Drahtwindungen sehr nahe an den Polen der Feldmagnete rotieren zu lassen und dadurch sehr starke Induktionen zu erzielen. Aber die Ringform hat auch einen großen Nachteil. Die Teile der Drähte, welche im Innern des Ringes sich befinden, werden nicht induziert, sie tragen also zur Erzeugung des Stromes nichts bei, sondern bilden nur schädlichen Widerstand. Ferner muß der Ring, gerade um die Drähte im Innern anbringen zu können, größer gemacht werden, als es für die reine Leistung der Maschine notwendig ist, so daß also unnötiger Materialaufwand stattfindet. Deswegen suchte man andere Formen des Ankers zu ersinnen, welche die Vorzüge des Ringes, ohne seine Nachteile, besitzen, welche aber vor allem ebenfalls direkt ohne Kommutator Gleichströme abzunehmen gestatten sollten, und in der Tat fand bald darauf Hefner-Alteneck, daß man die Drähte auch auf einen Zylinder so aufwickeln kann, daß sie sich ebenso in zwei Hälften parallel schalten lassen, wie bei dem Ring.

Der Anker, welchen Hefner-Alteneck konstruierte, ist also ein eiserner Zylinder und wird Trommelanker genannt. Er ist der Länge nach mit Draht umwickelt und rotiert dicht zwischen den Polschuhen eines Magneten. In Fig. 288 ist ein solcher Trommelanker gezeichnet. Es ist darin NN_1 der nordmagnetische Polschuh des in-

Fig. 288.



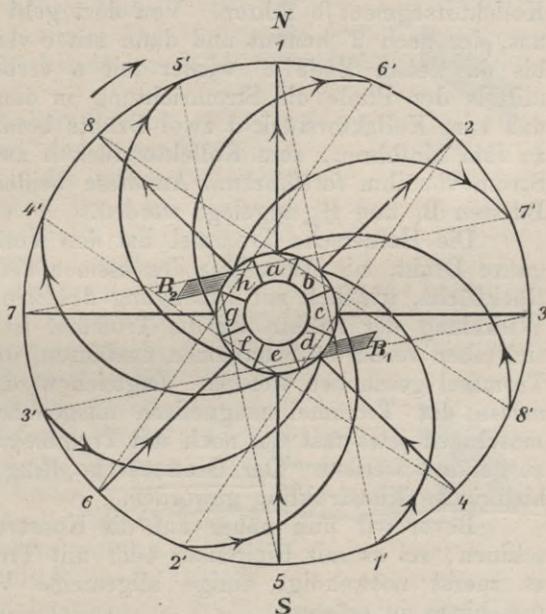
duzierenden Magnets, SS_1 der süd magnetische. Der Eisenzylinder, welcher auf der Achse F_1F_2 sitzt und der Länge nach mit Draht umwickelt ist, erhält also dem Nordpol gegenüber Südpole ss_1 und den Südpolen gegenüber Nordpole nn_1 , so daß bei der Drehung die Drähte sich in sehr engen, daher intensiven magnetischen Feldern bewegen. Die Umwicklung des Zylinders besteht nun ebenfalls wie beim Grammeschen Ringe aus einer Reihe von Drahtspulen, von denen je das eine Ende in ein Kollektorsegment geführt ist und das andere Ende in ein benachbartes Segment. Nehmen wir zunächst einen einzelnen Draht,

welcher um den Zylinder herumgelegt ist, etwa den Draht ee der Fig. 288. Bei der Bewegung entsteht in der oberen Hälfte ein Stromimpuls, der z. B. nach rechts geht, in der unteren Hälfte der entgegengesetzte, nach links, und da der Draht zusammenhängend ist, so addieren sich diese Impulse, und in dem Draht, wenn er geschlossen wäre, würde ein Strom von bestimmter Richtung zirkulieren. Es geht also die positive Elektrizität oben von p fort und unten nach p_1 hin. Dasselbe findet nun bei allen Spulen der Umwicklung statt, deren Enden, wie gesagt, jedesmal zu zwei benachbarten Segmenten eines Kollektors geführt sind. Immer findet dann also oben ein Fortströmen der Elektrizität von dem Kollektor statt, unten ein Zuströmen.

Wenn man nun die Drähte alle in zwei Hälften so zusammenfaßt, daß in der einen Hälfte der Strom zum Kollektor hin-, in der anderen von ihm fortfließt, dann kann man ebenso wie beim Grammeschen Ring an den Indifferenzstellen den Strom aus beiden Hälften nach außen ableiten.

Die Drahtverbindungen kann man dabei noch auf verschiedenfache Weise ausführen. Am übersichtlichsten und einfachsten ist die Verbindung, welche durch Fig. 289 dargestellt ist. In dieser betrachten wir die Trommel von vorn, vom Kollektor aus, und nehmen an, daß 8 Drähte auf ihr aufgewickelt sind. Die Drähte, die längs des Mantels des Zylinders laufen, sind dann in der Figur durch die

Fig. 289.



mit den Zahlen 1, 2, ... 8, 1', 2' ... 8' bezeichneten Punkte dargestellt. Wie die Drähte vorn auf der Kollektorseite der Trommel, der Stirnfläche, laufen, ist dabei durch die ausgezeichneten Linien, wie sie auf der Rückfläche der Trommel laufen, durch punktierte Linien angegeben. Da 8 verschiedene Drähte vorhanden sein sollen, so muß der Kollektor aus 8 Teilen, a, b, c ... bis h bestehen. Wir nehmen an, daß oberhalb der Trommel ein Nordpol, unterhalb ein Südpol sich befindet, und daß die Trommel sich nach rechts, wie ein Uhrzeiger, dreht. Dann fließen in der oberen Hälfte der Figur auf der Trommel die Ströme von der Stirnfläche zur Rückfläche, unten umgekehrt von der Rückfläche zur Stirnfläche.

Nun teilen wir zuerst den Umfang der Stirnfläche in 8 Teile ein und bezeichnen die entsprechenden Punkte der Figur mit 1, 2 . . . bis 8. Da hier, bei einer geraden Zahl der Drähte, der Punkt 5 dem Punkt 1 gerade gegenüberliegt, so können wir das andere Ende des Drahtes 1, welches mit 1' bezeichnet ist, nicht nach 5 legen, können also den Draht nicht genau diametral um die Trommel legen, sondern müssen es nach rechts oder links von 5 verlegen. In der Figur ist es nach rechts verlegt an den Punkt 1'. Von dort aus folgen sich dann in den Mitten der vorher bestimmten Abteilungen die Punkte 2', 3' . . . bis 8'.

Und nun sieht man, daß die Schaltung eine sehr einfache ist. Vom Kollektorstück a ausgehend, gehen wir auf der Stirnseite bis 1, dann oben auf der Trommel entlang, dann auf der Rückseite der Trommel schief nach unten, so daß wir auf der Unterseite der Trommel nach 1' kommen. Dieses Ende 1' muß nun einfach zu dem folgenden Kollektorsegment b führen. Von dort geht dann der zweite Draht 2 aus, der nach 2' kommt und dann mit c verbunden wird und so fort, bis das letzte Ende 8' wieder mit a verbunden ist. Verfolgt man mittels der Pfeile die Stromrichtung in den Drähten, so sieht man, daß zum Kollektorstück d zwei Drähte kommen, die beide den Strom zu ihm hinführen, zum Kollektorstück h zwei Drähte, die beide den Strom von ihm fortführen. An diese beiden Stellen müssen also die Bürsten B_1 und B_2 angelegt werden.

Die Hefnersche Trommel hat den Vorzug, daß bei ihr fast der ganze Draht, mit Ausnahme des kleinen Teils auf der Stirnfläche und Rückfläche, wirklich zur Erzeugung des Stromes ausgenutzt wird. Die Wickelung der Drähte auf die Trommel ist zwar schwierig, sie läßt sich aber vorher in Schablonen ausführen, die nachher einfach auf die Trommel geschoben werden. Zugleich wird bei ihr die ganze Eisenmasse der Trommel magnetisch ausgenutzt, so daß die Dynamomaschinen jetzt fast nur noch mit Trommelanker, nicht mit Ringanker ausgeführt werden. Der Grammesche Ring ist bereits fast eine nur historische Konstruktion geworden.

Bevor wir nun näher auf die Konstruktion der einzelnen Maschinen, sei es mit Ringanker oder mit Trommelanker, eingehen, ist es zuerst notwendig, einige allgemeine Verhältnisse der Dynamomaschinen zu erörtern.

Wenn der Anker (Ring oder Trommel) der Dynamomaschine in dem Feld der Magnetschenkel rotiert, so werden nicht bloß in der Drahtwicklung, sondern auch in dem Eisen des Ankers selbst Induktionsströme, die sogenannten Foucaultschen Ströme oder Wirbelströme (S. 227), erregt. Diese sind nun dem Betrieb der Maschine in jeder Hinsicht schädlich; denn erstens erfordern sie zu ihrer Erzeugung Aufwand von Arbeit und zweitens setzen sie sich, da sie in den metallischen Leitern fließen, in Wärme um und erhitzen daher den Eisenanker sehr beträchtlich. Es ist also Aufgabe der Konstruktion, das Zustandekommen dieser Ströme möglichst zu verhindern.

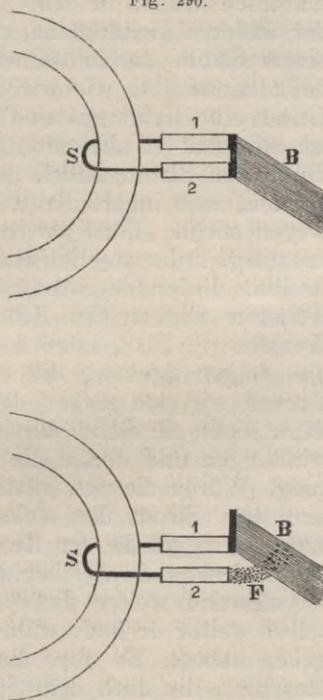
Diese Induktionsströme fließen nun immer in der Richtung der größten Induktion, und da man natürlich in dieselbe Richtung auch

die Drähte legt, die induziert werden sollen, so fließen die Foucault'schen Ströme immer parallel zu den um den Anker gelegten Drähten. Wenn man daher den metallischen Zusammenhang des Eisenankers in der Richtung dieser Foucault'schen Ströme unterbricht, so wird das Zustandekommen derselben gehindert oder beseitigt werden. Aus diesem Grunde wird der Eisenkern der Armatur nie massiv gemacht, sondern immer zerteilt, d. h. aus gefirniften Eisendrähnen oder aus gefirniften Eisenblechen gebildet. Bei dem Ringanker wird also der Eisenkern aus einem Bündel von ringförmig gebogenen Drähnen oder aus einer Reihe von ringförmigen Eisenplatten gebildet, die alle senkrecht zur Drehungsachse liegen, in der Richtung der Induktionsströme also keinen metallischen Zusammenhang miteinander haben. Ebenso wird der Eisenzylinder beim Trommelanker aus lauter Eisenscheiben zusammengesetzt, die in der Richtung der Achse keinen metallischen Zusammenhang besitzen. Damit ist eine Hauptquelle für Arbeitsverluste beseitigt.

Bei der Drehung des Ankers kommt weiter jede Spule abwechselnd einmal aus der oberen Hälfte der Feldes in die untere. Dabei kehrt sich der Strom in ihr um, indem er durch Null hindurchgeht. Bei dieser Umkehrung des Stromes werden aber Extrastrome in der betreffenden Spule selbst und dadurch auch Induktionsströme in den benachbarten Spulen hervorgebracht und zwar um so stärkere, je rascher die Stromumkehrung geschieht und je stärker der in den Ringwindungen fließende Strom selbst ist. Der genauere Vorgang hierbei ist folgender. Die beiden Enden jeder Spule sind ja zu zwei aufeinander folgenden Segmenten des Kommutators geführt, wie in Fig. 290 an einer Spule S gezeigt ist, deren Enden die Kommutatorstücke 1 und 2 bilden. Bei der Rotation des Ankers kommt nun für kurze Zeit eine Bürste B mit den beiden aufeinander folgenden Segmenten in Berührung und die betreffende Spule ist dann kurz geschlossen und aus dem Stromkreis ausgeschaltet, wie in Fig. 290 oben.

Im nächsten Moment wird nun bei der Weiterdrehung der Kurzschluß der Spule aufgehoben und sofort sucht jetzt der ganze Ankerstrom in die Spule einzudringen. Dabei aber tritt ein starker Extrastrom in der Spule auf, so daß der Strom in ihr nicht sofort auf den richtigen Wert ansteigen kann und es geht daher ein Teil des Stromes durch die Luft in einem Funken F über, der zwischen der Bürste B und dem eben von ihr verlassenen Kommutatorsegment 2 überspringt, wie in Fig. 290 unten. Die Maschine „feuert“, wie man sagt. Man kann

Fig. 290.



das Feuern vermeiden, wenn man die Bürste nicht genau an die neutrale Zone legt, sondern noch etwas darüber hinaus in der Richtung der Drehung verschiebt. Denn dann erhält infolge der Einwirkung des Magnetfeldes die kurz geschlossene Spule schon einen Strom, da sie ja nicht mehr in der neutralen Zone ist, und infolgedessen braucht nun beim Öffnen der Spule der Strom in ihr nicht erst von Null an anzuwachsen, der Grund für das Feuern fällt fort. Wenn das Feuern nicht beseitigt wird, so entstehen Stromverluste und es tritt eine rasche Zerstörung des Kommutators ein.

In einer durch einen äußeren Stromkreis geschlossenen Maschine entsteht, wenn man den Anker mit der Hand oder durch eine Dampfmaschine dreht, in dem Anker, in den Drähten der Magnete und in der äußeren Leitung ein kontinuierlicher Strom. Wenn aber ein von einem Strom durchflossener Leiter in der Nähe eines Magneten sich befindet, so übt, wie wir S. 181 gesehen haben, der Magnet auf den Leiter eine Kraft aus und vice versa, und wenn der Leiter beweglich ist, so sucht er sich unter dem Einfluß dieser Kraft zu bewegen. Also durch den Strom selbst, der in dem bewegten Ankerdraht erzeugt ist, entsteht eine innere Kraft in der Maschine, welche den Anker zu bewegen sucht. Und zwar sucht diese innere Kraft den Anker in umgekehrter Richtung zu drehen, als er zur Erzeugung des in ihm fließenden Stromes gedreht wurde. Das wissen wir aus den früheren allgemeinen Erörterungen, nämlich aus dem Lenzschen Gesetz (S. 216), können es aber auch leicht einsehen, wenn wir an die Folgen denken, die eintreten würden, wenn es nicht so wäre. Drehen wir den Anker der Maschine z. B. ein wenig rechts herum, dann fließt ein Strom durch die Ankerdrähte, durch die Elektromagnetwindungen und durch die äußere Leitung in einer bestimmten Richtung. Würde die nun entstehende innere Kraft zwischen dem Magneten und dem Strom den Anker selbst in derselben Richtung zu drehen suchen, so würde der Ring sich von selbst in derselben Richtung weiter drehen, in welcher wir ihn gedreht haben, es würden die Ströme fortwährend weiter fließen und die Maschine sich fortwährend von selbst weiter drehen, während wir ihr nur eine kleine Bewegung gegeben haben. Es wäre damit das Perpetuum mobile konstruiert, eine Maschine, die nach dem einmaligen Anstoß sich von selbst fortwährend weiter bewegen würde. Ein Perpetuum mobile ist aber nach unseren Naturgesetzen unmöglich. Das Grundgesetz der Natur, das Gesetz von der Erhaltung der Energie, sagt, daß man von keiner Maschine mehr Arbeit gewinnen kann, als man in sie hineingegeben hat, es zeigt also direkt die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile. Daraus folgt, daß die innere Kraft, welche die Magnete auf den Strom im Ankerdraht ausüben, den Anker rückwärts zu drehen sucht, entgegengesetzt der Bewegung, welche wir von außen dem Anker erteilen. Diese innere Kraft ist also eine Widerstandskraft; dadurch, daß in der Maschine der Strom fließt, stemmt sich eine Kraft der Bewegung des Ankers entgegen und wir müssen fortwährend von neuem Arbeit aufwenden, um diesen Widerstand zu überwinden. Es wird also direkt mechanische Arbeit mittels der dynamoelektrischen Maschinen in Elektrizität

verwandelt. Daß zur Erzeugung von elektrischen Strömen in solchen Maschinen Arbeit, und zwar erhebliche Arbeit, aufzuwenden notwendig ist, kann man auch durch direkte Versuche an jeder kleinen Maschine, die man mit der Hand drehen kann, sofort erkennen. Solange die Klemmen der Maschine nicht durch einen äußeren Draht geschlossen sind, so daß kein Strom fließen kann, läßt sich die Maschine ziemlich leicht in Bewegung setzen und halten. Sowie aber der Stromkreis geschlossen wird, so daß also die Ströme fließen und dadurch die innere Widerstandskraft entsteht, geht die Maschine sehr schwer und man muß erhebliche Arbeit aufwenden, um sie zu drehen.

Betrachten wir weiter die Stärke der Ströme und ihre elektromotorische Kraft.

Bei jeder magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschine hängt die elektromotorische Kraft, die durch die Drehung in den Ankerwindungen entsteht, direkt ab von der Zahl der magnetischen Kraftlinien, die in einer Sekunde von allen Drahtwindungen geschnitten werden. Sie hängt also zunächst ab von der Stärke des magnetischen Feldes; je stärker dieses ist, desto größer ist auch die elektromotorische Kraft. Sie hängt ferner davon ab, wie der Eisenkern des Ankers gegen die Pole der Magnete liegt. Je näher der Anker an diesen ist, je besser und kräftiger er magnetisch induziert wird, desto stärker sind die entstehenden Induktionsströme. Ferner hängt die elektromotorische Kraft ab von der Drehungsgeschwindigkeit des Ankers. Je rascher der Anker sich dreht, in um so kürzerer Zeit werden die Induktionsströme induziert, um so größer ist ihre elektromotorische Kraft. Bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen ist die elektromotorische Kraft einer solchen Maschine direkt proportional der Tourenzahl des Ankers (in einer Minute z. B.). Endlich hängt die elektromotorische Kraft noch wesentlich ab von der Zahl der Windungen auf dem Eisenkern. Die elektromotorische Kraft wächst direkt mit der Zahl der Windungen auf dem Induktor. Ein Ring, der mit 200 Windungen versehen ist, gibt unter sonst gleichen Umständen eine doppelt so große elektromotorische Kraft wie ein Ring, der nur mit 100 Windungen versehen ist.

Man hat es daher im allgemeinen bei einer Maschine von bestimmter Form (bestimmtem Typus) in der Hand, durch die Zahl der Ankerwindungen und durch die Tourenzahl, die man verändern kann, jede beliebige elektromotorische Kraft zu erzeugen.

In Bezug auf die elektromotorische Kraft und den inneren Widerstand findet aber nun ein wesentlicher Unterschied zwischen den magnetelektrischen und den dynamoelektrischen Maschinen statt.

Betrachten wir zuerst magnetelektrische Maschinen. Bei diesen sind die Magnete Stahlmagnete, deren Stärke unveränderlich gegeben ist. Die elektromotorische Kraft hängt also ab von der Stärke der Stahlmagnete, der Tourenzahl und der Lage und Windungszahl des Induktors, gar nicht vom äußeren Widerstand. Bei gegebener Konstruktion der Maschine und gegebener Tourenzahl ist die elektromotorische Kraft immer dieselbe, wie groß oder wie klein auch der Widerstand des äußeren Stromkreises sei. Die Stromstärke in dem

ganzen Kreise hängt aber natürlich von dem gesamten äußeren und inneren Widerstand ab.

Der innere Widerstand bei der magnetelektrischen Maschine ist nur der Widerstand der Drahtwindungen des Ringes. Je mehr solche Drahtwindungen vorhanden sind, desto größer ist auch der innere Widerstand, desto größer ist aber auch die elektromotorische Kraft. Ist der äußere Widerstand gering, z. B. ein kurzer dicker Draht, oder eine sehr breite und kurze Flüssigkeitszelle, so braucht man keine große elektromotorische Kraft, um diesen Widerstand zu überwinden. Es kann dann der Ring mit wenigen Umwindungen versehen sein und diese sind zweckmäßig aus dickem Draht oder sogar aus Kupferstäben oder Kupferbändern anzufertigen, damit auch der innere Widerstand der Maschine ein kleiner ist. Ist dagegen der äußere Widerstand ein sehr großer, etwa eine Reihe von hintereinander geschalteten elektrischen Lampen, so muß man eine große Menge von Umwindungen auf dem Induktor haben, damit die elektromotorische Kraft groß wird und in dem äußeren Widerstand die richtige Stromstärke erzeugen kann.

Die elektromotorische Kraft treibt die Elektrizität durch den ganzen äußeren und inneren Stromkreis. Ein Teil dieser elektromotorischen Kraft dient dazu, den inneren, der andere, den äußeren Widerstand zu überwinden. An den Klemmen der Maschine, an welche der äußere Widerstand angelegt wird, herrscht also eine Spannung, welche kleiner ist als die gesamte elektromotorische Kraft, weil sie den Strom eben nur noch durch den äußeren Widerstand zu treiben braucht. Diese Spannung nennt man die Klemmenspannung der Maschine. Erinnern wir uns an den Begriff des Spannungsverlustes, den wir früher eingeführt haben (S. 71). Der Spannungsverlust auf einem Drahtstücke von bestimmtem Widerstand ist immer gleich dem Produkt aus der Stromstärke und diesem Widerstand. Da nun die elektromotorische Kraft der Maschine ganz dazu verbraucht wird, den Strom durch den ganzen inneren und den ganzen äußeren Widerstand zu treiben, so ist die elektromotorische Kraft gleich dem Spannungsverlust auf dem ganzen Wege, also gleich dem Spannungsverlust im inneren und dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis zusammen. Die Klemmenspannung dagegen hat den Strom nur durch den äußeren Stromkreis zu treiben. Sie ist also gleich dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis allein. Daraus folgt, daß die Klemmenspannung um so viel kleiner ist als die elektromotorische Kraft, als der Spannungsverlust im Innern der Maschine selbst beträgt.

$$\text{Elektromotorische Kraft} = \text{Klemmenspannung} + \text{innerer Spannungsverlust.}$$

Bei einer magnetelektrischen Maschine ist nun zwar die gesamte elektromotorische Kraft, aber nicht die Klemmenspannung unabhängig vom äußeren Widerstande. Ist die Maschine ungeschlossen, also der äußere Widerstand zwischen den Klemmen unendlich groß, so ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft. Denn da bei ungeschlossener Maschine überhaupt kein Strom fließt, so ist der Spannungsverlust im Innern der Maschine gleich Null. Sind dagegen die

beiden Klemmen durch einen sehr kleinen Widerstand geschlossen, so ist die Klemmenspannung sehr klein. Denn dann ist die Stromstärke sehr groß, also der Spannungsverlust im Innern auch sehr groß. Die Klemmenspannung ist immer gleich dem Produkt aus dem äußeren Widerstande und der Stromstärke.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei den Dynamomaschinen, bei denen der Strom der Maschine selbst erst die Magnete erregt. In diesen ist die Stärke der Magnete nicht unveränderlich, ein für allemal gegeben, sondern sie hängt ab von der Stärke des in der ganzen Leitung fließenden Stromes, also auch von dem äußeren Widerstand. Von der Stärke der Magnete hängt aber wieder die elektromotorische Kraft der Induktionsströme ab. Bei den Dynamomaschinen hängt also die elektromotorische Kraft wesentlich ab von der Größe des äußeren Widerstandes, bei jeder Änderung des äußeren Widerstandes ändert sich auch die elektromotorische Kraft der Maschine. Wird z. B. der äußere Widerstand größer, so wird zuerst die Stromstärke kleiner, dadurch werden die Magnete schwächer und dadurch wird wieder die elektromotorische Kraft kleiner. Und diese bewirkt für sich dann wieder eine Verringerung der Stromstärke in dem ganzen Kreise. Also die Dynamomaschinen sind in Bezug auf die in ihnen erzeugte elektromotorische Kraft sehr empfindlich gegen Änderungen des Widerstandes im äußeren Schließungskreis.

Ist eine Hauptstrommaschine ungeschlossen, so mag sie noch so rasch gedreht werden, es entsteht in ihr überhaupt keine elektromotorische Kraft, abgesehen von der geringen, die von dem remanenten Magnetismus der Elektromagnete herrührt. Denn solange die Maschine ungeschlossen ist, fließt kein Strom, folglich werden die Elektromagnete auch nicht erregt und daher kein Induktionsstrom erzeugt. Es zeigt sich also auch an den Polen keine freie Elektrizität. Ferner erkennt man aus dem Obigen, daß eine solche Dynamomaschine einen sehr viel stärkeren Strom liefern muß, wenn der äußere Widerstand klein, als wenn er groß ist. Die Stärke des Stromes nimmt nicht bloß im umgekehrten Verhältnis des Widerstandes zu, wie er es nach dem Ohmschen Gesetz tun würde, wenn die elektromotorische Kraft ungeändert bliebe, sondern viel rascher, weil auch die elektromotorische Kraft von dem Widerstande abhängt.

Von wesentlicher Bedeutung für die Kenntnis von Maschinen ist es, zu wissen, in welcher Weise sich die Klemmenspannung (der Spannungsunterschied an den beiden Polklemmen) und in welcher Weise sich die Stromstärke mit dem äußeren Widerstand ändert. Die verschiedenen Schaltungsweisen der Dynamomaschinen bringen gerade darin wichtige Verschiedenheiten hervor, die wir aber erst später besprechen wollen.

Man gibt bei jeder Maschine gewöhnlich, um sie zu charakterisieren, an, welches ihre normale Tourenzahl sein soll und wie groß in diesem Falle die höchste zulässige Stromstärke in Ampère (bei der die Erwärmung der Drähte noch einen zulässigen Wert hat, ca. 70° C.) und die zugehörige Klemmenspannung in Volt ist. Das Produkt aus der Klemmenspannung in die Stromstärke gibt den elektrischen Effekt

im äußeren Stromkreis und man drückt diesen gewöhnlich in Watt (Volt-Ampère) aus. Also eine Maschine zum Beispiel, welche bei 60 Volt Klemmenspannung 80 Ampère gibt, erzeugt im äußeren Stromkreis einen Effekt von 4800 Watt. Da ein Watt (nach S. 313) $= \frac{1}{736}$ Pferdekraft ist, so kann man den Effekt auch direkt in Pferdekraften ausdrücken. Obige Maschine würde danach im äußeren Stromkreis $\frac{4800}{736} = 6,5$ PS liefern. Die gesamte Arbeit, die man (durch einen Gasmotor oder eine Dampfmaschine oder eine Turbine) auf die Maschine pro Sekunde übertragen muß, ist natürlich größer. Denn sie muß nicht nur den Effekt im äußeren Stromkreis liefern, sondern sie treibt auch den Strom im Innern der Maschine und sie überwindet die Reibungen der Maschinenachse in ihren Lagern u. s. w. Der Effekt im äußeren Stromkreis aber ist der wichtige Teil dieser Gesamtarbeit. Denn dieser kann eben nutzbar verwendet werden zum Brennen von Lampen, Treiben von Elektromotoren u. s. w. Wenn man den Effekt im äußeren Stromkreis mit dem gesamten Effekt (Arbeit pro Sekunde) vergleicht, welche man zum Drehen der Dynamomaschine verwenden muß, so bekommt man ein direktes Maß für die Güte der Konstruktion der Maschine. Man nennt deshalb auch dieses Verhältnis:

$$\frac{\text{elektrischer Effekt im äußeren Stromkreis}}{\text{gesamter aufgewendeter Effekt}}$$

das absolute Güteverhältnis der Maschine. Dies ist also eine für die Beurteilung der Maschine sehr wesentliche Größe.

Die wesentlichen Konstruktionsgrundsätze, durch welche man das absolute Güteverhältnis von Maschinen allmählich sehr groß zu machen gelernt hat, haben sich aus theoretischen und praktischen Untersuchungen herausgebildet.

Zunächst ist klar, daß die Stärke der erzeugten elektrischen Ströme unter sonst gleich bleibenden Verhältnissen immer abhängt von der Stärke des magnetischen Feldes, innerhalb dessen der Anker, die Armatur, rotiert. Es kommt also darauf an, die Stärke dieses Feldes möglichst groß zu machen. Man gewinnt dabei, wie wir sehen werden, noch andere Vorteile. Deshalb wird bei allen Konstruktionen das Hauptaugenmerk auf die magnetische Disposition der Maschinen gelegt und gerade darin unterscheiden sich die jetzt gebauten Maschinen wesentlich von den ersten Dynamomaschinen aus den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts. Für die Stärke des magnetischen Feldes, das aus den Magnetschenkeln und dem magnetisch induzierten Eisenkern des Ankers gebildet wird, ist die Hauptforderung, daß der magnetische Widerstand (S. 174) möglichst klein sei. Dazu ist zunächst notwendig, daß alle Eisenteile möglichst großen Querschnitt haben. Wir wissen ja aus dem Ohmschen Gesetz für den Magnetismus (S. 175), daß um so mehr Kraftlinien durch das Eisen gehen, je größer der Querschnitt desselben ist. Also ist ein Hauptprinzip der neuen Konstruktionen: große Eisenquerschnitte! Es müssen erstens die

Magnetschenkel selbst möglichst kräftig sein, es müssen aber auch die sie verbindenden Rückplatten genügend großen Querschnitt haben. Ferner wird der Magnetismus solcher Elektromagnete geschwächt, wenn zwischen den Schenkeln und den Rückplatten keine guten Verbindungen, sondern Luftzwischenräume sind (s. S. 175). Man stellt daher häufig das ganze Schenkeleisen aus einem Stücke Gußstahl oder aus Flußeisen her. Wenn man Schmiedeeisen benutzt, so legt man ein Hauptaugenmerk darauf, daß alle Teile der Magnete gut verschraubt und sorgfältig aneinander gefügt sind. Ebenso muß der Anker, um stark magnetisch zu werden, genügende Dicke haben. Darauf ist namentlich bei den Ringmaschinen zu sehen; der Ring muß starken Querschnitt haben. Bei den Trommelmaschinen ist die Dicke des Ankers an sich eine größere. Aber das Ankereisen soll, wie wir bereits

gesehen haben, nicht aus einem Stücke bestehen, wegen der Foucaultschen Ströme. Es soll vielmehr sorgfältig zerteilt sein und wird deshalb gewöhnlich aus Eisendraht oder Eisenband zusammengesetzt. Der Anker wird gewöhnlich aus dem magnetisch vorzüglichen Schmiedeeisen, das Magnetgestell aus Gußstahl oder dem billigeren Gußeisen hergestellt, wobei die Dimensionen des Magnetgestells bei gleicher Leistung im letzteren Fall bedeutend größer sein müssen, wie im ersten Fall. Ferner ist für die Stärke des magnetischen Feldes notwendig, daß der Zwischenraum zwischen dem Eisen der Schenkel und dem Eisen des Ankers so klein wie möglich sei. Wenn die Drahtwindungen auf den Anker aufgewunden werden, wie in Fig. 291, so wird durch den Raum, den sie einnehmen, an sich schon der Abstand des Ankers von den Feldmagneten vergrößert, abgesehen von dem Spielraum, den man für die ungehinderte Rotation immer zwischen Anker und Feldmagneten lassen muß. Man ist infolgedessen davon abgekommen, solche glatte Anker herzustellen. Vielmehr bildet man jetzt den Anker gewöhnlich als Zahnanker oder Nutenanker, d. h. man gibt dem Anker in seiner Längsrichtung Zähne oder Nuten, in welche die Drähte eingelegt werden. Fig. 292 gibt die Ansicht

Fig. 291.

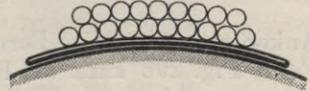


Fig. 292.



Fig. 293.

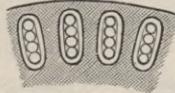


Fig. 294.



eines solchen Zahnankers. Man ist sogar dazu übergegangen, die Drähte in Löcher einzuziehen, die in das Eisen eingebohrt wurden. Einen solchen Lochanker zeigt Fig. 293. Doch ist es vorteilhaft, die Löcher oben zu öffnen, wie in Fig. 294 und derartige Armaturen werden jetzt vielfach angewendet.

Da also die Verstärkung des magnetischen Feldes eine Hauptaufgabe der neueren Konstruktionen wurde, hat man nicht nur durch die Vermehrung des Eisens, sondern auch durch günstige Anordnung

desselben möglichst gute Resultate zu erzielen versucht. Die drei Hauptformen nun, in welchen die Magnete angeordnet werden, sind aus den Fig. 295—297 zu ersehen. Die erste Form (Fig 295) ist die eines offenen Hufeisenmagneten, zwischen dessen Polen NS der

Fig. 295.

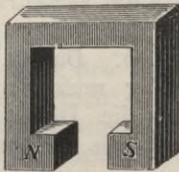


Fig. 296.

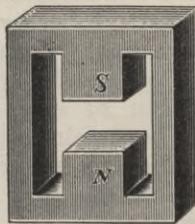
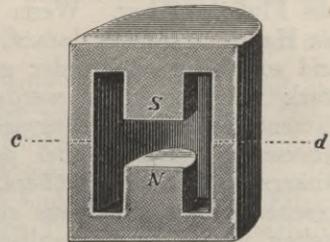
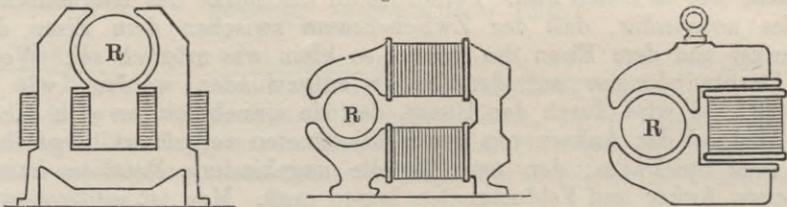


Fig. 297.



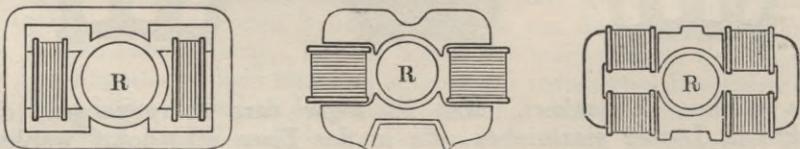
Anker rotiert. Diese Form war anfangs fast allein gebräuchlich. Die Form Fig. 296 kann als Ringmagnet bezeichnet werden, insofern an einem geschlossenen Eisenring, der aber nicht rund zu sein braucht, sondern wie in der Figur viereckig oder auch anders gestaltet sein kann, Kerne angebracht sind, welche durch die um sie gewundenen

Fig. 298.



Spulen magnetisiert werden. Man kann dabei nun auch statt bloß zweier Magnetpole N und S eine beliebige Anzahl auf dem Ring anbringen und man unterscheidet danach vierpolige, sechspolige u. s. w. vielpolige Maschinen. Endlich sind Maschinentypen vorhanden, bei denen man dazu übergegangen ist, den Elektromagneten

Fig. 299.



fast vollständig zu schließen. Fig. 297 gibt einen Durchschnitt durch einen solchen Magneten. Die beiden im Innern desselben aufsitzenden Kerne N und S sind mit Draht umwickelt und bilden die Pole des Magneten. In diesem Falle befindet sich also der Anker in einem fast völlig geschlossenen eisernen Gehäuse. Selbsverständlich kann bei

allen diesen Maschinen die Form der Elektromagnete selbst eine verschiedenartige sein. Die drei angeführten Typen geben nur das Schema für die Anordnung. In Fig. 298 sind z. B. drei verschiedene Maschinen mit Hufeisenmagneten, in Fig. 299 drei solche mit Ringmagneten gezeichnet. Die mittelste Form in Fig. 299 wird als Manchester-type bezeichnet.

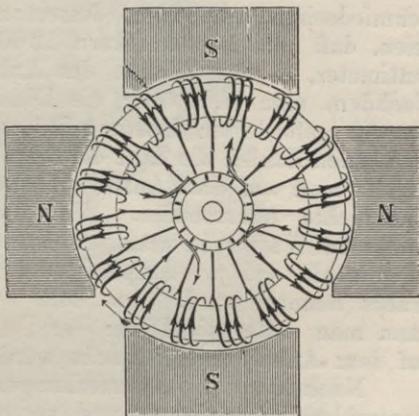
Was die eben erwähnten vielpoligen (multipolaren) Maschinen betrifft, so wurden diese zuerst ebenfalls von Gramme konstruiert. Er wendete also statt zweier induzierenden Magnetpole deren mehrere, 4, 6 oder noch mehr, an, so daß immer entgegengesetzte Pole aufeinander folgen. Mitten zwischen zwei entgegengesetzten Magnetfeldern befindet sich dann immer eine neutrale Zone, oder vielmehr, wie wir wissen, nicht genau in der Mitte, sondern etwas verschoben in Richtung der Rotation des Ankers.

Daher sind in einer vierpoligen Maschine, wie in Fig. 300, vier neutrale Zonen vorhanden, an denen die Bürsten schleifen, an einer sechspoligen sechs u. s. w. Je zwei gegenüberliegende Bürsten kann man durch einen besonderen Stromkreis verbinden, so daß man also aus der in der Figur gezeichneten Maschine zwei besondere Stromkreise abnehmen könnte. Gewöhnlich aber verbindet man die entsprechenden Bürsten entweder hintereinander oder meistens nebeneinander und leitet von den freien Endbürsten den Strom nach außen.

Die vielpoligen Maschinen werden nur für größere Leitungen konstruiert. Man klassifiziert die Maschinen nach der Anzahl der Kilowatt, die sie leisten können, wobei 1 Kilowatt nach S. 117 ungefähr gleich 1,36 Pferdekraften ist. Maschinen bis zu 10 Kilowatt werden immer, bis zu 15 Kilowatt meistens zweipolig gebaut. Von 15 bis etwa 120 Kilowatt baut man vierpolige, von 120 bis 300 Kilowatt sechspolige Maschinen u. s. w. An den Grenzen dieser Bezirke kann man natürlich ebenso vorteilhaft die eine oder die andere Art benutzen.

Während in den ersten zwei Jahrzehnten der Elektrotechnik der Bau guter Dynamomaschinen mehr Sache des konstruktiven Geschicks und des intuitiven Blicks war, ist das jetzt, nachdem eine große Anzahl theoretischer und praktischer Studien über die Verhältnisse der Dynamomaschinen ausgeführt wurden, anders. Heute kann der Ingenieur für jede Maschine, deren Leistung in Bezug auf Spannung und Strom ihm vorgeschrieben ist, durch Rechnung von vornherein die einzelnen Konstruktionsdetails feststellen und er kann mit gleicher Sicherheit eine Maschine vorher berechnen, die 5 Volt Spannung und 50 Ampère Strom geben soll, wie eine solche, die 500 Volt Spannung und 1000 Ampère

Fig. 300.



leisten soll. Dabei ist der Nutzeffekt der Maschinen, oder das absolute Güteverhältnis (S. 340) ein recht hohes, es beträgt zwischen 80 Proz. bei kleinen Maschinen und 90 Proz. bei großen.

Das Magnetgestell der Maschinen wird meistens aus Gußeisen hergestellt, nur die Pole selbst und die Polschuhe werden aus Gußstahl gefertigt. Bei transportablen Maschinen dagegen, bei denen es auf geringes Gewicht ankommt, macht man auch das ganze Magnetgestell aus Stahlguß, welcher bei gleicher starker Magnetisierung nur etwa halb so große Querschnitte braucht, wie Gußeisen, so daß das Gewicht der Maschine dadurch wesentlich verringert wird. Die Kraftlinienzahl (S. 165 ff.), welche pro Quadratcentimeter in dem Eisen- gestell herrscht, die sogenannte Kraftliniendichte wird bei gußeisernen Maschinen gewöhnlich zu 7000—8000, bei Maschinen aus Stahlguß zu 15 000 angenommen. Der Anker wird, wie gesagt, aus dünnen Blechscheiben zusammengesetzt und diese werden stets aus Schmiedeeisen gefertigt, dessen magnetische Eigenschaften so gut seien, daß man im Ankerkern 12 000—14 000 Kraftlinien pro Quadratcentimeter, in den Zacken des Ankers sogar 16 000—18 000 rechnet. Nachdem man sich über die Dimensionen des Ankers der Maschine aus der geforderten Leistung informiert hat, kann man aus den eben gegebenen Zahlen die Zahl der Ampèrewindungen (S. 171 f.) berechnen, welche man auf dem Anker aufbringen muß, um die verlangte Kraftliniendichte herzustellen. Um die Erwärmung der Drähte durch Joulesche Wärme in mäßigen Grenzen zu halten, wird die Drahtdicke so gewählt, daß pro Ampère etwa $\frac{1}{2}$ Quadratmillimeter besten Kupferdrahts benutzt wird. Aus dem von der Maschine verlangten Strom kann man daher die Dicke der Drähte oder Stäbe berechnen, welche auf dem Anker untergebracht werden sollen.

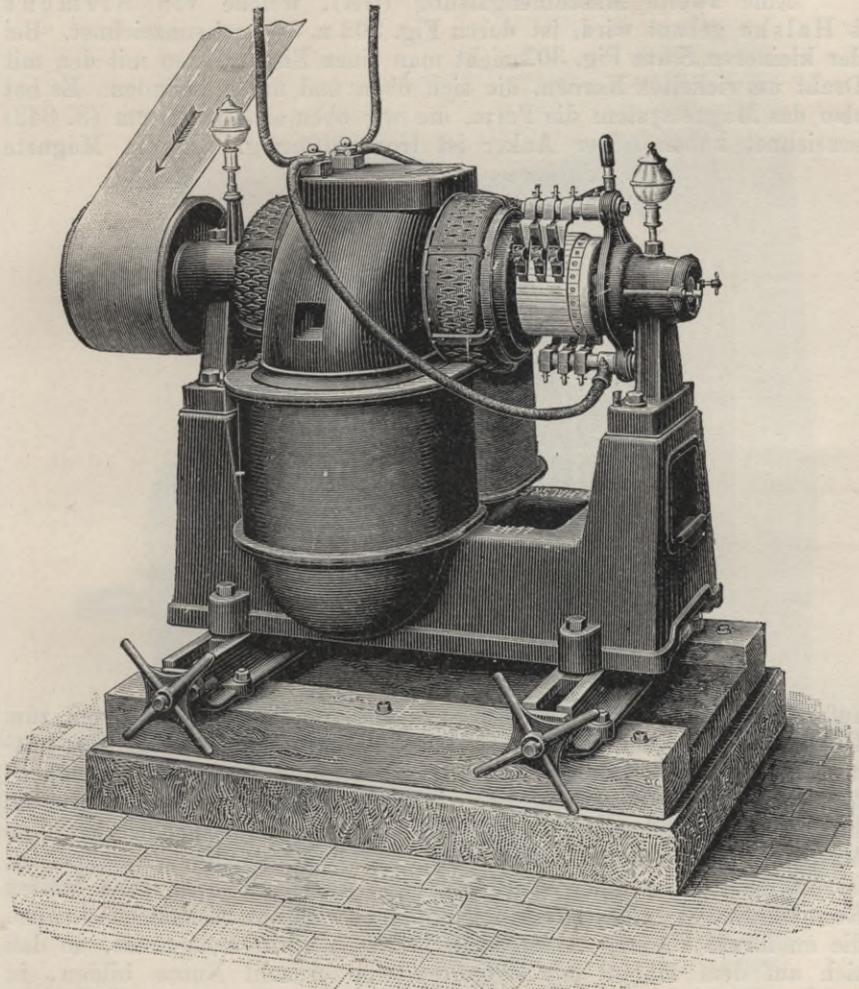
Nach diesen Vorbemerkungen beschreiben wir einige der in Deutschland fabrizierten und verbreiteten Maschinen, wobei wir nur die wesentlichsten Konstruktionseigenschaften angeben.

Alle Maschinen, die ebenso wie die Grammesche, einen Ring als Anker besitzen, nennen wir Ringmaschinen, zum Unterschied von den Trommelmaschinen, die die Hefnersche Trommel als Anker haben.

Von Siemens & Halske in Berlin wird als mittelgroße Dynamomaschine schon seit längerer Zeit eine Trommelmaschine von der in Fig. 301 abgebildeten Form gefertigt (Modell LH). Man sieht zwei sehr kräftige kurze Magnetschenkel, die zwischen ihren ausgerundeten Polschuhen die Trommel enthalten. Die Magnetschenkel sitzen auf einem Eisengestell, welches auch die Achse der Trommel trägt. Dieses ist auf seiner Unterlage durch Schrauben verschiebbar, um den Riemen von der Dampfmaschine bequem zu spannen. Das viereckige Loch auf der Außenseite der Polschuhe dient zum Aufheben der ganzen Maschine. Das ganze Eisengestell besteht aus einem Stück. Der Kommutator ist, wie man sieht, sehr breit. Er besteht aus isolierten Kupferstreifen, auf denen zwei Bürsten schleifen, die beide dreiteilig sind. Die Bürsten bestehen entweder aus Kupfergaze oder aus Kohlenplatten. Letztere nutzen den Kommutator nicht so ab wie die Kupferbürsten und werden

jetzt, außer bei sehr großen Maschinen, allgemein benutzt. Die Kohlenbürsten sind besonders für niedrige Stromstärken, 30 bis 50 Ampère, gut zu brauchen. Die Bürsten können hier wie bei den meisten Maschinen mit Leichtigkeit zusammen gedreht und in jeder Lage fest-

Fig. 301.



gehalten werden. Die Maschinen werden gewöhnlich als Nebenschluß-, selten als Hauptstrom- oder Compoundmaschinen gewickelt. Von den Bürsten aus gehen zwei dicke Drähte zu den zwei Schrauben auf der oberen Eisenplatte der Maschine, in welche dann die Enden der äußeren Leitung eingeschraubt werden.

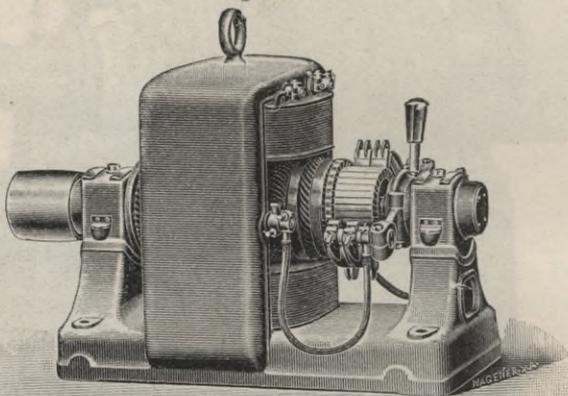
Die Maschine wird in den Größen von 5,5 bis 30 Kilowatt ge-

baut. Die kleinsten Maschinen zeigen ein Güteverhältnis von 78 Proz., die größten ein solches von 88 Proz.

Die Anker dieser Maschinen müssen rasch laufen; die kleineren Maschinen brauchen ca. 1500 Umdrehungen pro Minute, die größten ca. 750 Umdrehungen. Sie sind daher nur durch Riemen von einer Dampfmaschine oder Gasmaschine zu treiben.

Eine zweite Maschinengattung (GA), welche von Siemens & Halske gebaut wird, ist durch Fig. 302 u. 303 gekennzeichnet. Bei der kleineren Sorte Fig. 302 sieht man einen Eisenrahmen mit den mit Draht umwickelten Kernen, die sich oben und unten befinden. Es hat also das Magnetsystem die Form, die wir oben als Ringform (S. 342) bezeichnet haben. Der Anker ist trommelförmig. Da die Magnete

Fig. 302.

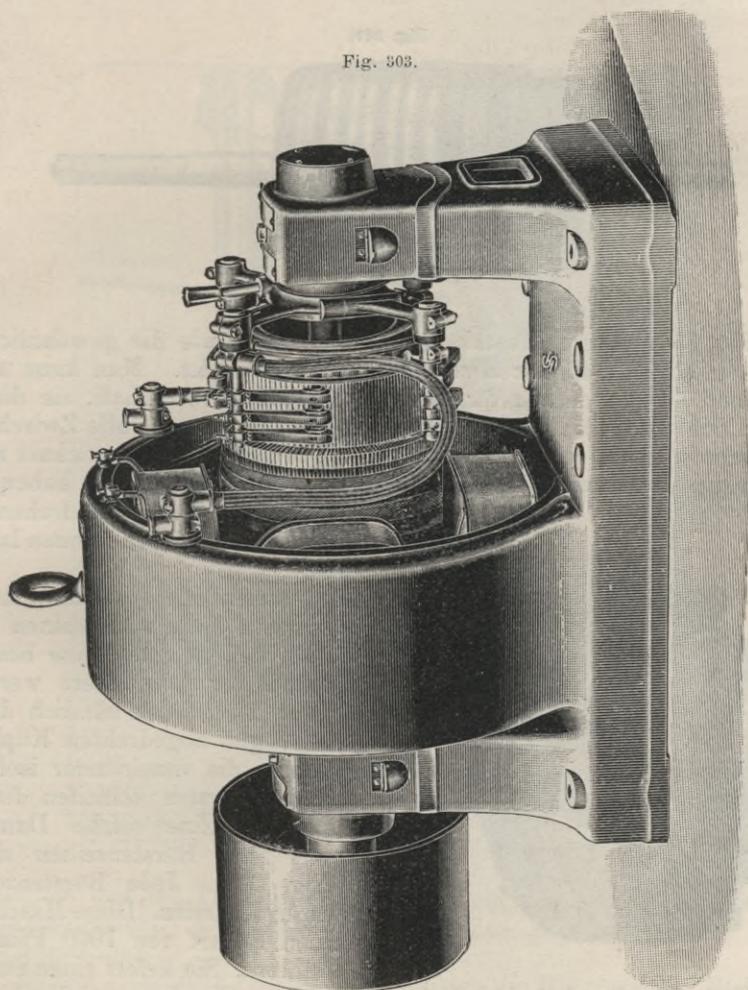


außerhalb des Ankers liegen, so bezeichnet man solche Maschinen zum Unterschied von den nachher zu beschreibenden auch als Außenpolmaschinen. Bei der größeren GA-Maschine Fig. 303, die ebenfalls eine Außenpolmaschine, ist, sieht man vier Elektromagnetkerne im Innern des kreisförmigen Ringes aufsitzen. Sie ist also eine vierpolige Maschine. Der Trommelanker, der in Fig. 304 besonders gezeichnet ist, ist bei diesen Maschinen sehr breit und hat auch einen sehr breiten Kommutator. Der Eisenkern der Trommel wird aus Eisenblechscheiben, die an ihrem Umfang Ausschnitte besitzen, zusammengesetzt, so daß sich auf dem Mantel des Zylinders eine Anzahl Nuten bilden, in welche Drahtwindungen über- und nebeneinander, oder in welche Kupferstäbe von rechteckigem Querschnitt eingelegt werden. Letztere werden als Stabanker bezeichnet. Am Umfang sind diese Anker stets zusammengebunden, um der Zentrifugalkraft beim Drehen Widerstand zu leisten. Die GA-Maschinen werden gewöhnlich nur als Nebenschlußmaschinen gebaut. Sie können für große Umdrehungsgeschwindigkeiten und für kleinere eingerichtet werden. Die zweipoligen Maschinen werden für Leistungen von 3,5 bis 11 Kilowatt

verfertigt, wobei ihr Güteverhältnis von 80 Proz. bis 85 Proz. mit der Größe steigt. Die mehrpoligen Maschinen werden für Leistungen von 14 bis 165 Kilowatt konstruiert, mit Güteverhältnissen, die von 86 Proz. bis 92 Proz. mit der Größe zunehmen.

Endlich bauen Siemens & Halske einen dritten Typus von

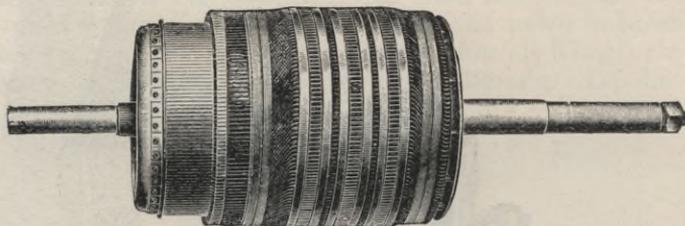
Fig. 303.



Maschinen, nämlich Innenpolmaschinen (Modell J). Für diese Maschinen haben sie für den Anker die Form des Ringes acceptiert und bringen die Magnete im Innern des Ringes an. Derartige Maschinen werden hauptsächlich für sehr große Leistungen angefertigt. Der Ring muß schon eine gehörige Größe haben, um zweckmäßig die Magnete aufnehmen zu können. Bei den kleineren dieser Maschinen sind vier

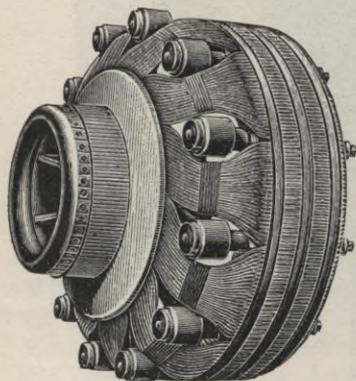
Magnetschenkel in den Innenraum hineingebracht, bei den ganz großen zehn. Dementsprechend werden auch vier bis zehn Bürsten zur Abnahme des Stromes verwendet, wobei die einzelnen Stromkreise parallel geschaltet werden. Der ganze Ringanker ist von einem sternförmigen Gestell getragen, welches auf der Achse aufsitzt. Die Drahtwindungen des Rings sind der Achse parallel. Eine Abbildung des Ringankers

Fig. 304.



zeigt Fig. 305. Diese Maschinen sind zum Teil, wie die gewöhnlichen kleineren Maschinen, für Riemenbetrieb eingerichtet. Man kann aber auch, und das ist gerade für größere Maschinen vorteilhaft, sie direkt auf die Schwungradachse der Dampfmaschine setzen, also alle Zwischenübertragung dabei fortfallen lassen. Solche Maschinen bezeichnet man als Dampfdynamos. Infolge der großen Anzahl der Pole haben die Maschinen keine großen Umdrehungsgeschwindigkeiten, sondern können langsam laufen.

Fig. 305.



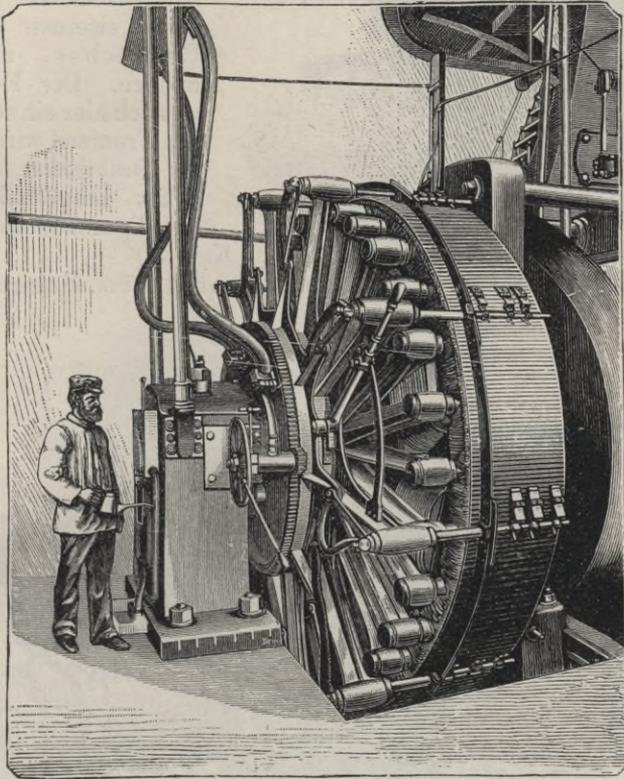
Eine wesentliche Vereinfachung wird bei solchen großen Maschinen dadurch erzielt, daß sie ganz ohne besonderen Kommutator konstruiert werden können. Der Ring wird nämlich dann mit blanken, gut abgedrehten Kupferstreifen belegt, die voneinander isoliert sind, und die Bürsten schleifen direkt auf dem Ring. Eine solche Dampfdynamo mit zehn Bürstenreihen sieht man in Fig. 306. Jede Bürstenreihe besteht aus drei Bürsten. Diese Maschine ist für einen Bedarf von 1000 Pferdekraften bestimmt. Sie liefert einen Strom

von 7000 Ampère bei 110 Volt Spannung. Die Innenpolmaschinen werden insbesondere für elektrische Zentralanlagen gebaut, wo eine Maschine Hunderte von Pferdekraften in elektrische Energie umsetzen muß. Sie werden jetzt für Spannungen bis zu 1000 Volt gebaut, weil man aus guten Gründen immer mehr mit den angewendeten Spannungen in die Höhe geht.

Die größten Innenpolmaschinen haben einen Nutzeffekt von 94 Proz., eine sehr stattliche Leistung.

Nach dieser Besprechung der Maschinen von Siemens & Halske wenden wir uns zur Betrachtung derjenigen Maschinen, welche von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) in Berlin gebaut werden. Diese Dynamomaschinen besitzen alle einen Trommelanker. Die kleineren dieser Maschinen (Modell NS und S) haben die Magnete in Hufeisenform. Fig. 307 zeigt eine solche Maschine, in der man die kurzen, breiten, kräftigen Elektromagnetschenkel mit ihren

Fig. 306.

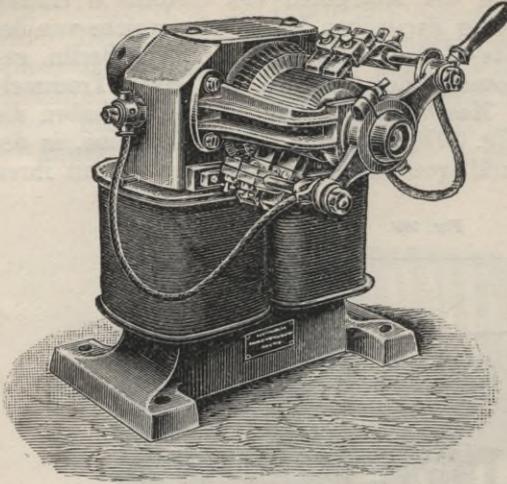


Polschuhen und den Trommelanker mit seinem sehr breiten und großen Kommutator sieht. Die beiden Doppelbürsten sind durch einen Griff leicht verstellbar.

Andere Maschinen (Modell NG) besitzen die Ringform des Elektromagneten und sind zweipolige Außenpolmaschinen wie Fig. 308 zeigt. Sie werden bis zu Leistungen von 13 Kilowatt gebaut und zwar gewöhnlich als Nebenschlußmaschinen. Man sieht die zwei Magnetwickelungen und im Innern den Trommelanker.

Die Maschinen endlich für die größten Leistungen (Modell SG) sind mehrpolige Außenpolmaschinen, die entweder für Riemenbetrieb oder langsam laufend als Dampfdynamos konstruiert werden. Fig. 309

Fig. 307.

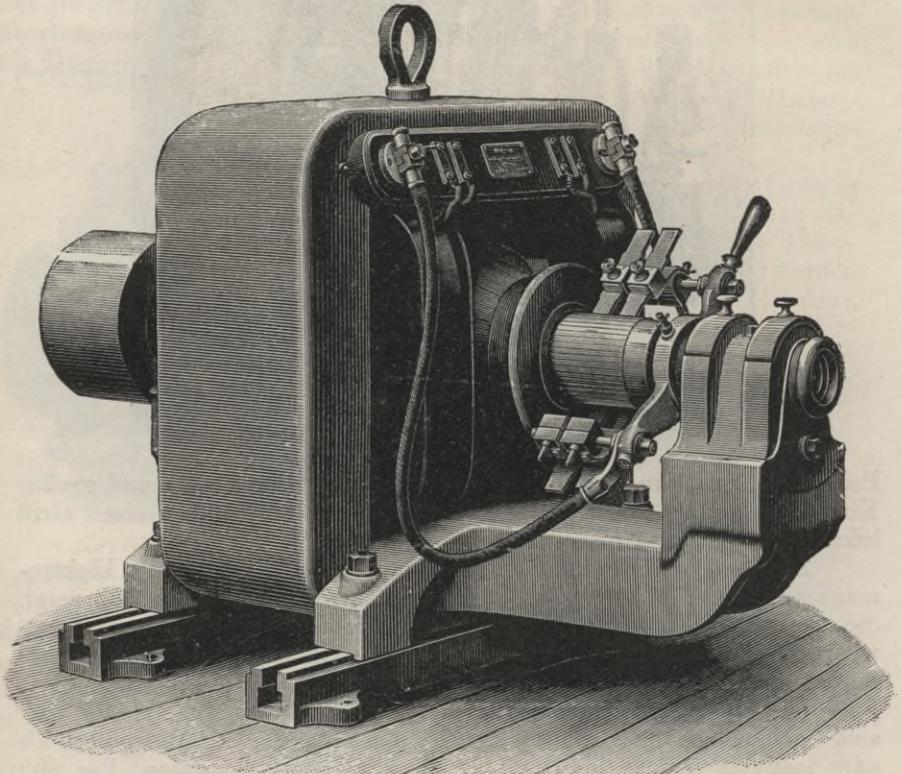


gibt die Ansicht einer solchen Dampfmaschine. Man sieht rechts die Dampfmaschine, deren Einrichtung uns hier nicht beschäftigen kann, vorn links direkt auf der Achse derselben eine SG-Dynamo und zwar eine vierpolige. Die vier kurzen Magnetschenkel sind durch einen eisernen Ring, die Polbüchse, außen verbunden. Der Kommutator ist auch hier ein sehr breiter. Die Trommel wird auch hier als Drahtanker oder Stabanker hergestellt. (Über die Dynamomaschinen für

Dreileitersystem mit Spannungsteiler s. Kap. 9.)

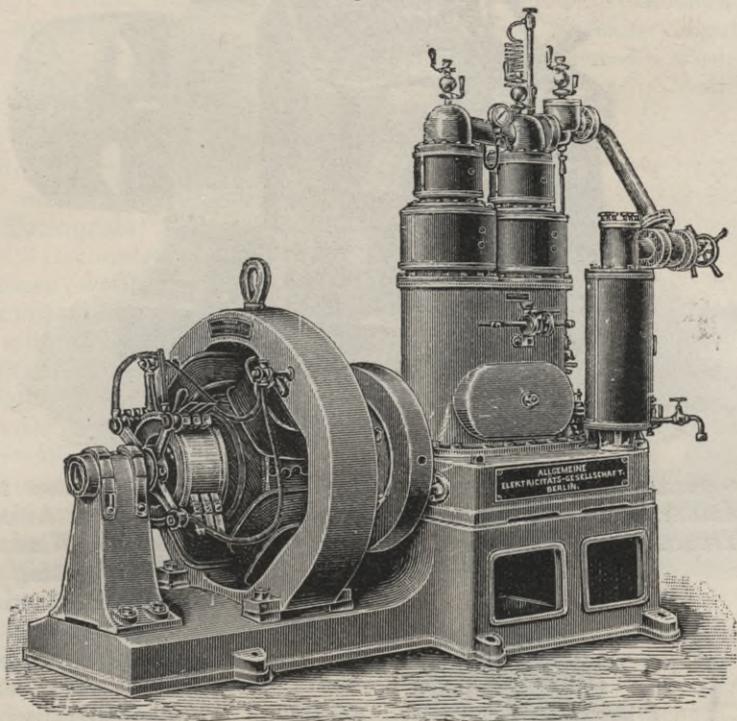
Die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.

Fig. 308.



in Nürnberg baut unter anderen A-Maschinen, von denen Fig. 310 eine mittlere Größe zeigt. Diese besitzen einen Trommelanker und sind Außenpolmaschinen. Die kleineren Typen sind zweipolig, die in der Figur gezeichnete, welche 33 Pferdekräfte zum Betrieb braucht, vierpolig, die ganz großen sechzuehpolig. Der Kommutator ist auch bei ihnen ein sehr breiter und großer, und es schleifen auf ihnen Bürstenreihen, die bei den ganz großen Maschinen aus je 5 Bürsten, bei den kleineren und mittleren aus 2 bis 3 bestehen. Das Magnet-

Fig. 309.

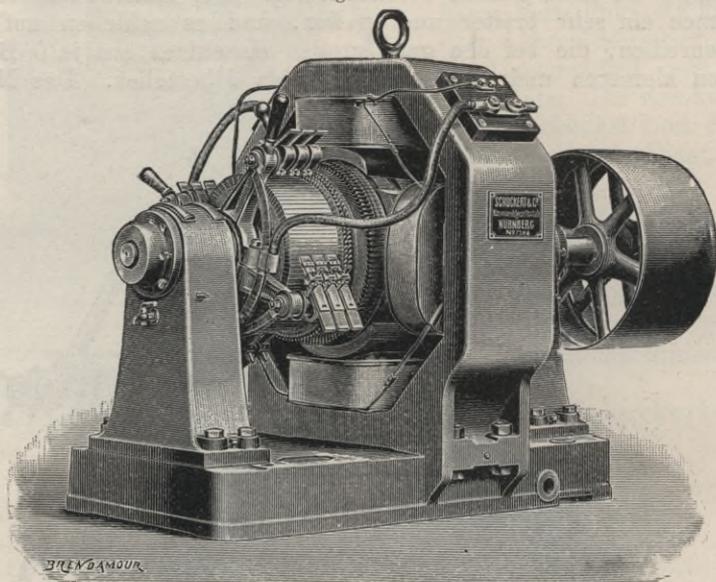


gestell besteht aus Flußeisen, die Pole der Magnete umfassen den größten Teil des Ankers, wodurch dieser zugleich gegen Beschädigungen geschützt wird. Die AF-Maschinen, welche hauptsächlich für Beleuchtung und Arbeitsleistung dienen, werden gewöhnlich für 110 Volt Spannung gebaut. Dazu brauchen die kleinsten Maschinen eine Umdrehungszahl von 1700 pro Minute, während die größten, welche direkt auf der Achse der Dampfmaschine aufsitzen, bloß 110 Touren brauchen. Die kleinsten haben eine Leistung von 0,3, die größten von 500 Kilowatt. Für besondere Zwecke, wie für Schiffsbeleuchtung und für elektrolytische Arbeiten, werden die A-Maschinen etwas anders konstruiert.

Ferner baut die Gesellschaft noch eine besondere Art Maschinen, die ZH-Maschinen, von denen Fig. 311 eine für die Leistung von 20 Kilo-

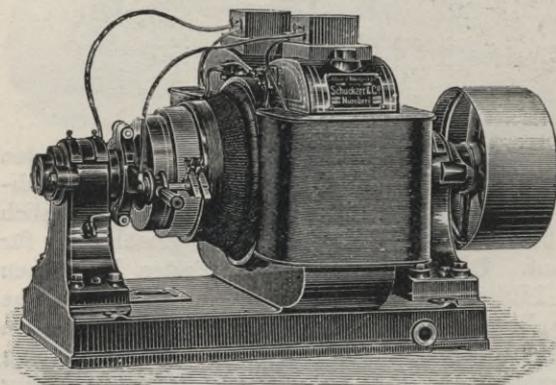
watt bestimmte abbildet. Diese Maschinen sind speziell für sehr hohe Spannungen, bis 3000 Volt, bestimmt, um etwa eine große Zahl von Bogenlampen hintereinander zu betreiben. Ihr Magnetsystem ist nach

Fig. 310.



dem sogenannten Manchestertypus (S. 343) gebaut, welcher zuerst von Mather & Platt in Manchester angewandt wurde. Der Anker ist eine Trommel und der hohen Spannung wegen mit vielen Windungen verhältnismäßig dünnen Drahtes bewickelt.

Fig. 311.



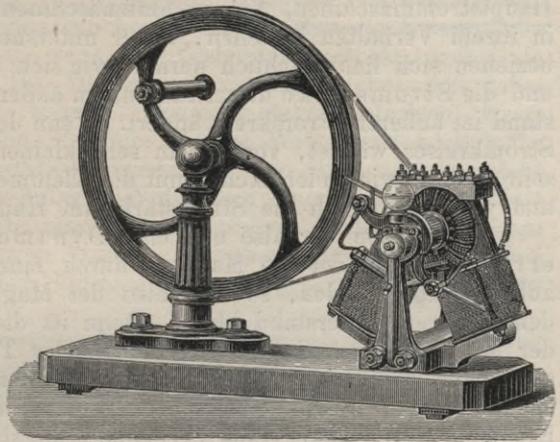
Außer den hier genannten Fabriken liefern noch andere große Gesellschaften (z. B. Union in Berlin, Helios in Köln, Schwarzkopff in Berlin) Gleichstrommaschinen, die wir aber hier, um nicht zu ausführlich zu werden, übergehen müssen. Die Maschinen der verschiedenen Fabriken unterscheiden

sich, äußerlich genommen, jetzt weniger, als die verschiedenen Modelle einer und derselben Fabrik. Und auch die Konstruktion der einzelnen Teile ist bei fast allen Fabriken eine ähnliche, weil die theoretischen

Grundlagen, nach denen sie ausgeführt werden, mit großer Sicherheit bekannt sind.

Es seien daher bloß noch die Maschinen von C. und E. Fein in Stuttgart erwähnt. Diese Firma hat es sich zur Aufgabe gestellt, nicht bloß große Dynamomaschinen für Beleuchtungs- und Arbeitszwecke, sondern auch kleine Dynamomaschinen mit Handbetrieb hauptsächlich für Lehrzwecke herzustellen. Die größeren industriellen Maschinen zu beschreiben, dürfte nach den vielen vorher genannten überflüssig sein. Dagegen sollen die kleinen Handmaschinen speziell erwähnt werden, da diese zu Studienzwecken und für Demonstrationen recht geeignet sind. In Fig. 312 ist eine kleine Maschine abgebildet, deren Anker durch das Rad mittels Schnurlaufs gedreht wird. Die beiden Magnetpolschenkel sind schief gestellt, ihre Polschuhe umfassen den Ringanker, an dem man nach vorn auch den Kommutator sieht. Diese Demonstrationsmaschinen werden entweder mit starkem Draht, oder mit mittlerem oder mit feinerem gewickelt und liefern bei 2400 Touren in der Minute je nach den drei Wickelungsarten Spannungen von 3,2, 7,5, 22 Volt und Stromstärken von 24, 11, 4 Ampère. Die mittlere Wickelung ist am meisten zu

Fig. 312.



Versuchen geeignet. Man kann mit ihr elektrolytische Prozesse ausführen, Drähte schmelzen und Glühlampen zum Leuchten bringen.

Mit dieser speziellen Beschreibung einer Anzahl von Dynamomaschinen für Gleichstrom konnte und wollte natürlich durchaus keine Vollständigkeit erstrebt werden. Die Maschinen der einzelnen Konstrukteure haben, wenn sie sonst sorgfältig und prinzipiell richtig ausgeführt sind (S. 340 f.), keine wesentlichen Vorzüge voreinander. Die Hauptsache bleibt immer die richtige magnetische Disposition, also insbesondere die Aufgabe, den magnetischen Widerstand der Maschine möglichst klein zu machen und Streuungen zu vermeiden, ferner die Gestaltung und Wickelung des Ankers, die zweckmäßige Konstruktion des Kommutators, die leichte Verstellbarkeit der Bürsten, die sorgfältige Lagerung der Achse, die Ausbalancierung aller beweglichen Teile, die leichte Zugänglichkeit und Reparaturfähigkeit. In dieser Hinsicht erreichen die deutschen Dynamomaschinen bewährter Firmen alles Erreichbare.

Alle Maschinen, die schnell rotieren und von starken Strömen durchflossen werden, erhitzen sich erstens durch gewöhnliche Reibung,

zweitens durch die Joulesche Wärme, welche durch den Strom in den Drähten erzeugt wird, ferner aber dadurch, daß in den Magneten durch das fortwährende Ummagnetisieren infolge der Hysteresis (S. 169) Wärme entsteht, und daß die Ströme, welche in den bewegten Teilen entstehen, die Wirbelströme (S. 227), sich in Wärme umsetzen. Alle Konstrukteure nehmen daher darauf Bedacht, daß einerseits die Ursachen dieser Erwärmung möglichst verringert werden, daß also insbesondere das Ankereisen sorgfältig zerteilt ist (S. 335), und daß andererseits durch die Maschine, während sie im Gange ist, stets ein kräftiger Luftstrom hindurchstreicht, welcher sie fortwährend abkühlt, wenn sie sich erwärmt. Die Maximalstromstärke, die eine Maschine leisten darf, ohne sich zu stark zu erhitzen, wird von den Konstrukteuren bei jeder Maschine angegeben.

Es ist nun an der Zeit, daß wir die Unterschiede, welche zwischen Hauptstrommaschinen, Nebenschlußmaschinen und Compoundmaschinen in ihrem Verhalten bestehen, näher untersuchen. Diese Unterschiede beziehen sich hauptsächlich darauf, wie sich die Klemmenspannung und die Stromstärke dieser Maschinen ändern, wenn man den Widerstand im äußeren Stromkreis ändert. Wenn der Widerstand des äußeren Stromkreises wächst, von einem sehr kleinen Werte an bis zu einem sehr großen, wie ändert sich damit die Klemmenspannung der Maschinen und wie ändert sich die Stromstärke im Hauptstromkreis?

1. Nehmen wir also erst eine Dynamomaschine mit Fremd-erregung, bei der die Magnete durch einen besonderen Strom von außen erregt werden, so daß also der Magnetismus unabhängig von dem äußeren Widerstand bleibt. Dann ist die elektromotorische Kraft der Maschine immer (bei gleichbleibender Tourenzahl) dieselbe, wie groß oder wie klein auch der äußere Widerstand sei. Die Klemmenspannung aber ist für verschiedene Widerstände verschieden. Sind die Klemmen durch einen ganz geringen Widerstand verbunden, so ist die Differenz ihrer Spannungen sehr klein. Je größer der äußere Widerstand wird, desto mehr nimmt die Klemmenspannung zu, und bei unendlich großem Widerstand, d. h. bei offenem Stromkreis, ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft der Maschine. Die Klemmenspannung nimmt also bei wachsendem äußeren Widerstand stets zu, erst rasch, dann langsamer und nähert sich dem Grenzwert der konstanten elektromotorischen Kraft.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis erhält man in Ampère durch Division der Klemmenspannung durch den äußeren Widerstand. Sie ist sehr groß, wenn der äußere Widerstand sehr klein ist, und nimmt mit wachsendem Widerstand rasch ab und wird 0, wenn der Widerstand unendlich groß ist. Wenn die Pole einer Stromquelle durch einen sehr geringen äußeren Widerstand verbunden werden, so sagt man, es herrsche ein Kurzschluß. Durch einen solchen wird also die Stromstärke außerordentlich groß.

2. Nehmen wir zweitens eine Dynamomaschine, bei der die Magnete im Nebenschluß liegen, also durch einen Zweigstrom erregt werden. Hier tritt dasselbe Verhalten für die Klemmenspannung ein, wie bei einer fremderregten Maschine, und zwar in verstärktem Maße. Denn

wenn der äußere Widerstand sehr klein ist, so geht der Hauptstrom durch diesen, der Zweigstrom um die Magnete ist sehr schwach und daher sind die Magnete sehr schwach, woraus folgt, daß die elektromotorische Kraft sehr klein und infolgedessen auch die Klemmenspannung sehr klein ist. Wird dagegen der äußere Widerstand immer größer, so nimmt die Stärke der Magnete stets zu, da dann ein immer größerer Teil des Stromes um die Magnete fließt, und infolgedessen wächst auch die elektromotorische Kraft und die Klemmenspannung. Also auch hier nimmt die Klemmenspannung bei wachsendem äußeren Widerstand stets zu, erst rasch, dann langsamer und wird endlich nahezu konstant.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis ist anfangs (bei kleinem Widerstand) gering, weil die Magnete schwach sind. Sie wächst dann, wenn der Widerstand größer wird, weil die Magnete stärker werden. Man hat hier also das eigentümliche Verhalten, daß die Stromstärke in einen Stromkreis wächst, wenn der Widerstand wächst, wobei sie ja eigentlich abnehmen sollte. Das kommt natürlich daher, daß dabei die Magnete stärker erregt werden, also die elektromotorische Kraft der Maschine steigt. Wenn aber der äußere Widerstand noch mehr wächst, so nimmt die Stromstärke wieder ab. Die Stromstärke erreicht also bei einem bestimmten äußeren Widerstand einen maximalen Wert und nimmt dann wieder ab, um bei sehr großem Widerstand nahezu gleich Null zu werden. Man sieht daher, daß eine Nebenschlußmaschine bei einem ganz bestimmten äußeren Widerstand ein Maximum der Stromstärke ergibt.

3. Drittens betrachten wir eine Hauptstrommaschine (Serienmaschine). Hierbei ist bei geringem äußeren Widerstand der ganze Strom sehr stark, also sind die Magnete sehr stark und daher wird die elektromotorische Kraft sehr groß und deshalb auch die Klemmenspannung verhältnismäßig groß. Mit wachsendem Widerstand wächst anfangs auch die Klemmenspannung. Aber dann wird durch den schwächer werdenden Strom auch der wirksame Magnetismus und damit die elektromotorische Kraft kleiner und daher nimmt auch die Klemmenspannung wieder ab, die bei ungeschlossener Maschine schließlich zu Null wird. Die Klemmenspannung nimmt bei wachsendem äußeren Widerstand erst ein wenig zu und dann stetig ab. Die Stromstärke nimmt mit wachsendem äußeren Widerstand rasch und stetig ab.

Das Verhalten der Klemmenspannung ist also in diesem Falle ziemlich das entgegengesetzte von dem bei einer Nebenschlußmaschine. Dort nimmt die Klemmenspannung von Null an bis zu einem größten Wert zu, hier nimmt sie von einem größten Wert bis zu Null ab. Man wird also schon von vornherein sagen können, daß, wenn man die Magnete sowohl durch den Hauptstrom als durch einen Zweigstrom erregt, wie es in der Compoundschaltung geschieht, man erreichen können wird, daß die Klemmenspannung sich fast gar nicht ändert, wenn auch der äußere Widerstand stark variiert. Dies ist in der Tat der Fall und gerade aus diesem Grunde werden die Maschinen für bestimmte Zwecke mit Compoundschaltung konstruiert.

4. Bei den Compoundmaschinen kann man es durch richtige Bemessung der Hauptstromwicklung und der Nebenschlußwicklung für die Magnete oder, wie man es nennt, durch richtige Compounding dahin bringen, daß die Klemmenspannung fast ganz unabhängig von dem äußeren Widerstand wird, daß sie für alle äußeren Widerstände ziemlich dieselbe ist. Man kann es erreichen, daß bei Compoundmaschinen die höchste Änderung der Klemmenspannung 1—2 Proz. ihres Wertes beträgt. Die Stromstärke nimmt daher dann mit wachsendem Widerstand stetig ab, was bei konstanter Klemmenspannung selbstverständlich ist.

Von der Klemmenspannung und der Stromstärke hängt in jedem Falle der elektrische Effekt ab, der im äußeren Stromkreis herrscht. Gerade die Vorgänge im äußeren Stromkreis, z. B. das Brennen von Lampen oder das Treiben von elektrischen Motoren oder galvanoplastische Vorgänge, sind es ja, welche die nützliche Arbeit der Dynamomaschinen ausmachen.

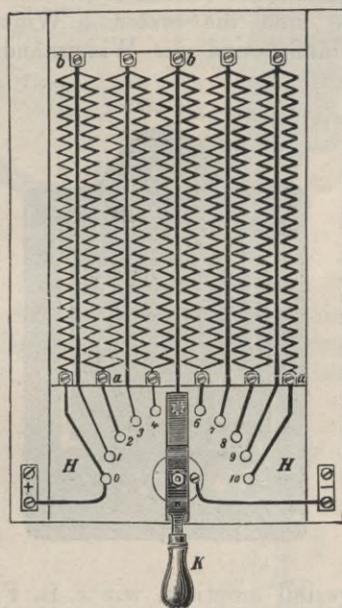
Die Klemmenspannung einer Maschine in Volt ausgedrückt, multipliziert mit der Stromstärke im äußeren Stromkreis in Ampère gibt den äußeren Effekt in Watt, oder wenn man die Zahl der Watt durch 736 dividiert, in Pferdekraften. Außer diesem äußeren, nutzbaren Effekt, der natürlich von einer Kraftquelle (Dampfmaschine, Gasmaschine, Turbine) auf die Dynamomaschine übertragen werden muß (durch Riemen, Zahnräder oder dergl.), verbraucht aber jede Maschine noch einen bestimmten Effekt in ihrem Innern bloß dadurch, daß der Strom im Anker und um die Magnete herum fließt und diese erwärmt. Es ist die Aufgabe einer guten Maschinenkonstruktion, diesen Effekt im Innern möglichst klein zu machen, damit der Hauptteil der übertragenen Arbeit im äußeren Stromkreis wirklich nutzbar verwendet werden kann. Das Verhältnis des äußeren Effekts zum gesamten (im Innern der Maschine und im äußeren Stromkreis zusammen) entwickelten elektrischen Effekt nennt man den elektrischen Wirkungsgrad der Maschine und drückt ihn in Prozenten aus. Dieser beträgt bei den größten Maschinen bis zu 95 Proz., wenn die Maschinen, wie man sagt, voll belastet sind, d. h. wenn die Stromstärke im äußeren Kreis so groß ist, wie sie bei der betreffenden Maschine sein soll.

Selbstverständlich muß die in jeder Sekunde von der Betriebsmaschine (Dampfmaschine, Turbine etc.) geleistete Arbeit noch größer sein als der im Stromkreis enthaltene totale Effekt. Denn die Betriebsmaschine hat erstens noch die mechanische Reibung der Maschinenteile zu überwinden; zweitens aber wird noch ein nicht unerheblicher Bruchteil der Arbeit sofort in Wärme verwandelt, teilweise durch das fortwährende Ummagnetisieren des Ankers, also durch die Hysteresis, teilweise durch die Wirbelströme, welche vollständig selbst bei guter Zerteilung der Metallmassen nicht zu vermeiden sind.

Es werden bei den neueren größeren Gleichstrommaschinen durchschnittlich 80—90 Proz. der aufgewendeten Arbeit als elektrische Energie im äußeren Stromkreis nutzbar zur Verfügung stehen, so daß also das absolute Güteverhältnis der Maschinen (s. S. 340) 80 bis 90 Proz. beträgt.

Durch die Anforderungen der Praxis hat sich allmählich der Bedarf an Nebenschlußmaschinen als weit größer erwiesen, wie der an Hauptstrommaschinen und Compoundmaschinen. Die ersteren nämlich sind für fast alle Zwecke, für die Beleuchtung, die Kraftverteilung und für die Elektrochemie vorzüglich geeignet, weil sie, neben sonstigen Vorteilen, namentlich eine leichte Regulierung der Spannung ermöglichen; sie sind also immer da besonders brauchbar, wo die Maschine nicht immer denselben, sondern, je nach Bedarf, verschiedenen Effekt abzugeben hat. Die Hauptstrommaschinen dagegen eignen sich gut für diejenigen Fälle, in denen immer dieselbe Leistung verlangt wird, z. B. für die Beleuchtung von Straßen mit Bogenlicht, wobei immer derselbe Effekt von der Maschine verlangt wird.

Fig. 313.



Die Nebenschlußdynamos haben deshalb ein Übergewicht über die Hauptstromdynamos gewonnen, weil es bei ihnen in sehr einfacher Weise möglich ist, die Spannung des Stroms und damit die Stromstärke im äußeren Stromkreis zu ändern und zu regulieren, ohne in den äußeren Stromkreis nutzlose Widerstände einzuführen.

Man braucht nämlich nur in den Zweigstrom, welcher um die Magnete fließt, einen regulierbaren Widerstand einzuschalten, um dadurch die Klemmenspannung auf jeden beliebigen Wert bringen zu können. Einen solchen Widerstand nennt man Nebenschlußregulator. Schaltet man in die Magnetbewicklung Widerstände ein, so wird dieser Nebenstrom schwächer und infolgedessen auch die Klemmenspannung der Maschine. Schaltet man Widerstände aus dem Regulator, also aus dem Nebenstrom aus, so wird dieser letztere stärker und daher auch die Klemmenspannung der Maschine. So kann man durch einfaches Ein- und Ausschalten von Widerständen die Klemmenspannung der Maschine verändern, oder man kann sie auch, wenn man will, immer auf dieselbe Größe bringen, wie groß auch der Widerstand im Hauptkreis der Maschine ist. Natürlich muß dann immer, wenn man nicht komplizierte automatische Vorrichtungen anbringen will, ein Mann zur Bedienung des Regulators vorhanden sein. Um die vorhandene Spannung erkennen zu können, ist mit den Klemmen der Maschine dauernd ein Spannungsmesser (Voltmeter) verbunden. Es wird nun aus dem Regulator so viel Widerstand ein- oder ausgeschaltet, bis das Voltmeter die gewünschte Spannung zeigt.

Der Nebenschlußregulator besteht also aus Widerständen,

welche in den Nebenstromkreis ein- und aus ihm ausgeschaltet werden können.

Gewöhnlich wird der Regulator aus einem einfachen Kurbelrheostaten gebildet, von dem Fig. 313 eine schematische Abbildung gibt. Eine Reihe von Spiralen aus Neusilber, Nickel oder Manganin sind in einem Rahmen befestigt. Ihre oberen und unteren Enden gehen in 10 Metallknöpfe, 0 bis 9, aus, auf welchen eine starke Messingkurbel durch den Griff K verschoben werden kann. Das eine Ende der Magnetbewicklung ist, wie man aus der Schaltung einer Nebenschlußmaschine in Fig. 285 auf S. 330 sieht, mit dem Knopf 0, das andere mit der drehbaren Messingkurbel verbunden. Bei jeder Stellung der Kurbel ist nun ein anderer Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet. Steht z. B. die Kurbel, wie in der Figur, auf Knopf 5, so sind die ersten 5 Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet. Häufig sind die Widerstände des Regulators offen auf einem Eisen-

Fig. 314.

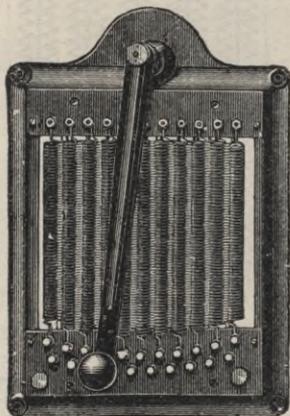
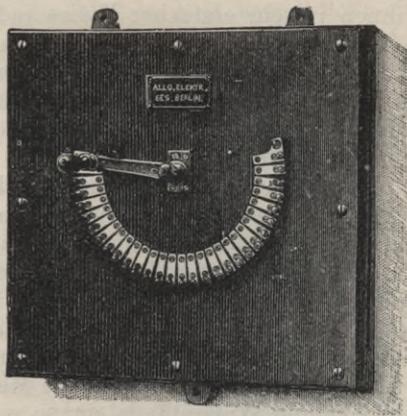


Fig. 315.



gestell montiert, wie z. B. Fig. 314 zeigt, welche einen Regulator von Voigt & Häffner in Frankfurt a. M. darstellt, oft aber sind sie in einen Kasten eingeschlossen, auf dessen Deckel nur die Kontaktstücke und die Kurbel sichtbar sind. So zeigt Fig. 315 einen Nebenschlußregulator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin. Man sieht nur die Kurbel und die Kontaktstücke, die Widerstände selbst sind in dem Kasten angebracht.

Um die Klemmenspannung an den Polen einer Dynamomaschine in jedem Moment sofort ablesen zu können und dadurch etwaige Regulierungen am Nebenschlußregulator vorzunehmen, wird mit jeder Dynamomaschine ein Voltmeter verbunden. Ebenso will man auch die Stromstärke im Hauptstromkreis sofort, ohne Rechnung, ablesen können und bringt zu dem Zweck in den Hauptstromkreis ein Amperemeter hinein. Es kommt bei diesen technischen Instrumenten weniger auf die äußerste Genauigkeit als vielmehr darauf an, daß sie unmittelbar die vorhandene Spannung und die vorhandene Stromstärke abzu-

lesen gestatten, und zwar direkt die Stromstärke in Ampère und die Spannung in Volt. Ferner müssen sie hinreichend genaue Angaben auch bei sehr großen Intensitäten und Spannungen machen und endlich sollen sie unabhängig davon sein, daß in den Maschinenräumen, wo sie ja gewöhnlich aufgestellt werden, sich große Eisenmassen bewegen, wie die Kolben der Dampfmaschine, oder daß starke Magnete in der Nähe sind, wie die Feldmagnete der Dynamomaschine selbst. Solche Apparate werden natürlich nicht im ganzen Intervall von der kleinsten bis zur größten Stromstärke und von der kleinsten zur größten Spannung gleich genaue Angaben machen können. Am genauesten sollen sie dann bei denjenigen Stromstärken und Spannungen sein, welche für die betreffende Anlage die wichtigsten sind. Man hat solche Meßinstrumente für technische Zwecke in verschiedenartiger Weise konstruiert. Die Apparate für Strommessung und diejenigen für Spannungsmessung sind im allgemeinen ganz gleich konstruiert. Nur werden die Ampèremeter direkt in den Hauptstrom eingeschaltet und enthalten deshalb wenig Windungen von dickem Draht, während die Voltmeter, wie wir oben S. 104 erklärt haben, eine Zweigleitung bilden und viele Windungen eines dünnen Drahtes erhalten. Man benutzt die verschiedenen magnetischen Wirkungen des Stromes zur Konstruktion solcher Meßapparate.

So wird bei den Ampèremetern und Voltmetern der allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, von denen Fig. 316 die äußere Ansicht eines Voltmeters zeigt, die anziehende Wirkung benutzt, welche eine von einem Strom durchflossene Drahtspule auf einen Eisenkern ausübt. Man sieht in Fig. 317 die innere Einrichtung dieser Apparate. Die Drahtrolle a besitzt oben ein Lager, auf welchem ein Winkelhebel sich drehen kann. Dieser trägt den Eisenkern e, welcher außerordentlich leicht ist 0,04 g wiegt, und der

Fig. 316.



Fig. 317.

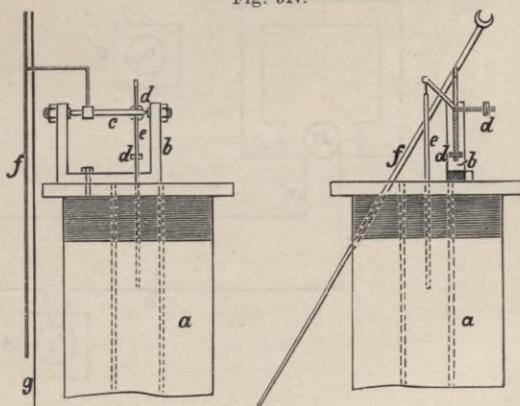


Fig. 316 die äußere Ansicht eines Voltmeters zeigt, die anziehende Wirkung benutzt, welche eine von einem Strom durchflossene Drahtspule auf einen Eisenkern ausübt. Man sieht in Fig. 317 die innere Einrichtung dieser Apparate. Die Drahtrolle a besitzt oben ein Lager, auf welchem ein Winkelhebel sich drehen kann. Dieser trägt den Eisenkern e, welcher außerordentlich leicht ist 0,04 g wiegt, und der

durch den Strom in die Spule mehr oder minder hineingezogen wird. Je nach der Drehung der Achse c , auf der er sitzt, wird dann auch der Zeiger f gedreht, der auf der Skala spielt. Durch eine größere oder geringere Länge des Eisenkerns, sowie durch passende Einstellung von Reguliergewichten d kann man jede Skala herstellen. Das Instrument wird direkt auf Ampère oder auf Volt geeicht, je nachdem es im Hauptstrom oder im Nebenstrom liegt.

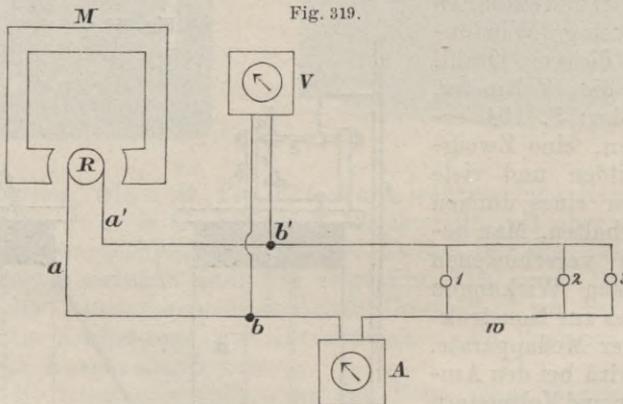
Fig. 318.



In ähnlicher Weise sind die Meßapparate von anderen Fabriken eingerichtet.

In neuester Zeit werden mehr und mehr auch für die technischen Anlagen Präzisionsmeßinstrumente angewendet, welche nach dem Deprezschen Prinzip (S. 195) auf der Ablenkung einer stromdurchflossenen Drahtrolle in einem starken magnetischen Feld beruhen. Sie sind dadurch gegen die Einwirkung von äußeren Eisenmassen im Maschinenraum und gegen die Wirkung von nahe vorbeifließenden starken Strömen geschützt. So stellt Fig. 318 einen Präzisionsstromzeiger von Siemens & Halske dar, der im Innern ebenso konstruiert ist, wie die Ampèremeter, die auf S. 197 beschrieben wurden. Die Präzisionsspannungsmesser sehen genau so aus und sind auch genau so konstruiert.

Fig. 319.



struiert. Die Voltmeter werden, wie immer, im Nebenschluß an die Klemmen der Dynamomaschine geschaltet. Die Ampèremeter aber werden nicht, wie gewöhnlich, direkt in den Hauptstromkreis gelegt. Vielmehr wird jedem Ampèremeter ein genau abgemessener kleiner Widerstand beigegeben, der bei den kleinen Instrumenten direkt im Gehäuse des Instrumentes liegt. Dieser kleine Widerstand ist es, der in den Hauptstromkreis eingeschaltet wird, und zu diesem liegt das

Ampèremeter im Nebenschluß. Die Skala ist in Ampère so geteilt, daß sie direkt die Stromstärke im Hauptstromkreis angibt.

Alle diese Apparate müssen natürlich zunächst geeicht werden, d. h. es muß die Skala in Ampère resp. Volt hergestellt werden, indem man Ströme von gemessener Stärke durch den Apparat direkt oder im Nebenschluß gehen läßt und den Ausschlag auf der Skala beobachtet.

Die Verbindung einer Dynamomaschine mit dem Voltmeter, dem Ampèremeter und dem äußeren Stromkreis ist in Fig. 319 gezeichnet. Von dem Anker R der Maschine M gehen 2 Drähte aus, ab und a'b', welche zu den zwei Klemmschrauben b und b' führen. Von b und b' werden die Drähte w fortgeführt, welche die Hauptleitungen für die dazwischen zu schaltenden Apparate 1, 2, 3 u. s. w. bilden. In den einen dieser Drähte wird das Ampèremeter A eingeschaltet. Das Voltmeter V dagegen wird in den Nebenschluß zu den beiden Drähten gelegt. Bei der wirklichen Benutzung der Dynamomaschinen sind allerdings diese Apparate noch nicht ausreichend. Vielmehr werden dann noch Ausschalter und Sicherungen mit einzuschalten sein, von denen wir aber erst im folgenden sprechen werden.

2. Kapitel.

Die Dynamomaschinen für Wechselstrom und Drehstrom.

Die Gleichstrommaschinen spielten lange Zeit die Hauptrolle in der Elektrotechnik. Man konnte früher mit Wechselströmen nicht viel anfangen. Zwar wußte man, daß sie für Beleuchtungszwecke ebenso brauchbar seien wie Gleichströme, da ja die Joulesche Wärme, auf der die Lichtentwicklung beruht, unabhängig von der Richtung des Stromes ist. Aber man konnte mit ihnen lange Zeit keine Motoren betreiben, also keine Arbeit leisten. Außerdem waren auch die eigentümlichen Verhältnisse der Wechselströme, die ja sehr bedeutend von denen der Gleichströme abweichen, wissenschaftlich nicht näher untersucht. Lange Zeit wurden daher ausschließlich Gleichstrommaschinen in der Elektrotechnik benutzt. Dies hat sich aber jetzt vollständig geändert. Die Wechselströme, und zwar insbesondere die Kombination mehrerer Wechselströme, die man Drehströme nennt, sind wieder zu hohen Ehren gekommen, weil sie es ermöglichen, eine Fortleitung und Verteilung der elektrischen Energie in so einfacher und billiger Weise herzustellen, wie es mit Gleichströmen nicht möglich ist. Dies beruht auf folgendem Umstand. Die Fortleitung von elektrischer Energie auf große Entfernung ist um so teurer, je größer die Stärke der Ströme ist, und um so billiger, je geringer die Stärke, je größer aber dafür die Spannung ist. Denn für starke Ströme braucht man Leitungen von großem Querschnitt, also viel Kupfer, und für schwache Ströme Leitungen von geringem Querschnitt, also wenig Kupfer. Kupfer ist aber teuer. Am vorteilhaftesten für die Fernleitung elektrischer Energie sind also Ströme mit möglichst hoher Spannung und geringer Stromstärke. Nun kann man zwar aus Maschinen aller Art prinzipiell Ströme von hoher Spannung erhalten, indem man nur die Zahl der Umwindungen auf dem Anker und die Geschwindigkeit der Umdrehungen groß zu machen braucht. Aber faktisch kann man bei Maschinen mit beweglichen Drahtwickelungen keine zu hohe Spannung erzeugen, weil ein Überschlagen der Elektrizität namentlich am Kommutator zu leicht eintritt. Hier haben nun die Wechselströme einen großen Vorteil vor den Gleichströmen. Einerseits nämlich haben die Wechselstrommaschinen überhaupt keinen Kommutator, und man kann sie auch sogar so konstruieren, daß sie absolut keine bewegliche Drahtwicklung besitzen.

Andererseits aber kann man Wechselströme, wie wir sehen werden, mit Leichtigkeit und Sicherheit durch die Transformatoren von geringer Spannung auf hohe Spannung bringen oder von hoher Spannung auf geringe Spannung zurückbringen, und damit hat man nun ein vorzügliches Mittel einerseits zur Fortleitung der Elektrizität auf billigste Weise, andererseits zu ihrer gefahrlosen Benutzung an den Verbrauchsstellen. Man erzeugt Wechselströme von hoher Spannung durch eine Wechselstrommaschine, leitet sie in die Ferne und dort transformiert man sie auf beliebige niedrige Spannung zurück. Mit gleichgerichteten Strömen kann man denselben Prozeß nicht so ausführen, weil man erstens Gleichstrommaschinen für hohe Spannungen nicht bauen kann und weil es zweitens keine Gleichstromtransformatoren für hohe Spannungen gibt. Dazu kommt noch, daß auch die Motoren, durch welche man mittels Drehstroms Arbeit leisten kann, jetzt sogar vollkommener sind als die Motoren für Gleichstrom. Aus diesen Gründen werden jetzt Wechselstrommaschinen in großen Mengen gebaut und zum Teil solche von kolossalen Dimensionen. Ja es werden heutzutage die elektrischen Zentralen in den größeren Städten meistens überhaupt nur noch mit Drehstrom ausgeführt, eben wegen der sonst unerreichen Billigkeit dieses Systems.

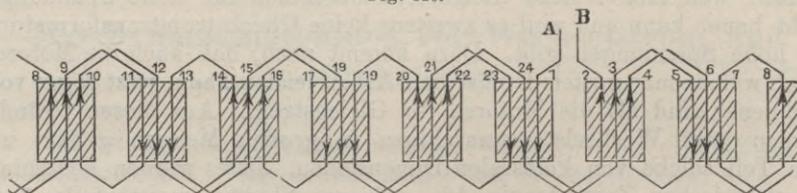
Diejenige Firma, welche lange allen anderen voraus das Wechselstromsystem für elektrotechnische Zwecke zuerst in vorzüglicher Weise ausgebaut hat, ist die Firma Ganz & Co. in Budapest. Ihr System und ihre Maschinen sind in Deutschland durch die Gesellschaft Helios in Köln vielfach eingeführt worden. Die praktische Nutzbarmachung der Drehströme verdankt man der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, speziell ihrem Elektriker Dolivo-Dobrowolsky und der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz. Seit 1891 nun hat sich die Technik des Wechselstromes und Drehstroms, oder besser gesagt, die Technik der Ein- und Mehrphasenströme außerordentlich entwickelt und nimmt heute den breitesten Raum in der Elektrotechnik ein.

Wechselstrommaschinen sind prinzipiell viel einfacher als Gleichstrommaschinen zu bauen. Man braucht nur eine Anzahl von Drahtrollen (mit oder ohne Eisenkern) einer Anzahl von abwechselnden Magnetpolen gegenüberzustellen, dann werden bei der Rotation, sei es der Rollen, sei es der Pole, von selbst in den Rollen abwechselnd entgegengesetzte Stromimpulse erzeugt. Und man braucht nun die Rollen nur passend zu verbinden, um einen oder mehrere Stromkreise mit Wechselströmen zu erhalten. Dabei sieht man auch sofort, daß, wenn man nicht einen, sondern mehrere Stromkreise durch Zusammenschaltung von Rollen bildet, man es leicht so einrichten kann, daß die Wechselströme in diesen verschiedene Phasen haben, so daß man auch leicht Mehrphasenströme aus einer solchen Maschine erhalten kann.

Gerade der letzterwähnte Umstand ist ein besonderer Vorzug der Wechselstrommaschinen vor den Gleichstrommaschinen. Man ist nicht gezwungen, wie bei diesen, eine Anzahl von Drahtspulen, seien sie auf einen Ring oder auf eine Trommel aufgewickelt, gerade in einer einzigen ganz bestimmten Weise zu verbinden, sondern man kann ver-

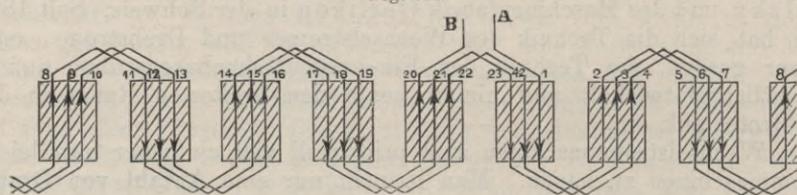
schiedenfache Kombinationen anwenden. Man kann die Spulen alle hintereinander oder alle parallel verbinden, oder man kann mehrere getrennte Stromkreise mit gleicher oder verschiedener Phase bilden und diese auch wieder kombinieren. In Bezug auf die Art der Verbindung zusammengehöriger Drähte kann man verschiedene Methoden benutzen. Da in allen gleichzeitig an demselben Pol, z. B. dem Nordpol, vorübergehenden Drähten Ströme nach der einen Richtung induziert werden, in den gleichzeitig an dem Südpol vorbeigehenden Drähten dagegen solche nach der anderen Richtung, so muß immer das Ende

Fig. 320.



eines Drahtes der ersten Gruppe mit dem Anfang eines Drahtes der folgenden Gruppe verbunden werden, Anfang und Ende hier in der Richtung der induzierten Ströme genommen. Zwei verschiedene Arten dieser Verbindung sind in Fig. 320 und 321 gezeichnet. In beiden sind 8 aufeinanderfolgende, abwechselnde Magnetpole, Nord- und Südpole, gezeichnet. Vor jedem Pol sind drei Drähte gezeichnet, im ganzen also 24. In diesen laufen die Ströme bei dem 1., 3., 5. Pol

Fig. 321.



alle von unten nach oben, bei dem 2., 4., 6. Pol von oben nach unten. Man sieht, daß in Fig. 320, bei der wir von dem mit A bezeichneten Ende, der einen Endklemme des Drahtes, ausgehen, sich an den Draht 1 der Reihe nach alle anderen in passender Richtung anschließen, so daß immer Schleifen nach rechts und links gebildet werden, bis wir zur zweiten Endklemme B kommen. Eine solche Wickelung nennt man Schleifenwicklung. In Fig. 321 gehen wir auch von Klemme A aus zu Draht 1 und durchlaufen nun in anderer, aber auch richtiger Weise alle Drähte, bis wir zu Draht 20 kommen, der an die andere Endklemme B führt. Eine solche Wickelung nennt man eine Wellenwicklung. Beide Arten der Wickelung und noch andere werden angewendet.

Die Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen bestehen also alle aus den induzierten Drahtspulen, die man zusammen als In-

duktor oder Anker oder Armatur bezeichnet, und den induzierenden Magneten. Als Magnete werden nur noch Elektromagnete benutzt. Und zwar werden bei den meisten Maschinen diese Elektromagnete durch einen besonderen Strom gespeist, der von einer Gleichstrommaschine erzeugt wird, die ganz getrennt von der Wechselstrommaschine ist. Manchmal aber sitzen diese Gleichstrommaschinen auf derselben Drehungsachse wie die Hauptmaschine für Wechselstrom. Man kann es aber auch so einrichten, daß man den Gleichstrom für die Elektromagnete nicht von einer besonderen Maschine entnimmt, sondern einen Teil des erzeugten Wechselstromes, den man von einigen besonderen Spulen des Ankers entnimmt, selbst durch einen Kommutator zu Gleichstrom macht und ihn so um die Magnete führt. Maschinen, die diese Einrichtung haben, nennt man selbsterregende Wechselstrommaschinen. Die Drahtspulen des Induktors werden mit Eisenkernen angewendet, wodurch viel kräftigere Induktionsströme erzeugt werden, als wenn man auf bloße Drahtrollen die Induktion wirken läßt. Die Eisenkerne werden aber dabei sehr rasch hintereinander positiv und negativ magnetisch, und diese fortwährende Änderung des Magnetismus ist, wie wir wissen, mit erheblicher Erhitzung der Eisenkerne durch Hysterisis verbunden. Die dadurch verursachten Energieverluste werden um so größer, je mehr Polwechsel die Kerne pro Sekunde erfahren. Man kann daher praktisch bei Wechselströmen nicht jede beliebige Zahl von Polwechseln erreichen, sondern muß sich auf eine verhältnismäßig geringe Zahl (50—100 pro Sekunde) beschränken. Außer den Energieverlusten durch Hysterisis hat man natürlich auch hier in den Kernen des Ankers die Foucaultschen Ströme (Wirbelströme), die man aber durch sorgfältige Zerteilung des Eisens beseitigen kann.

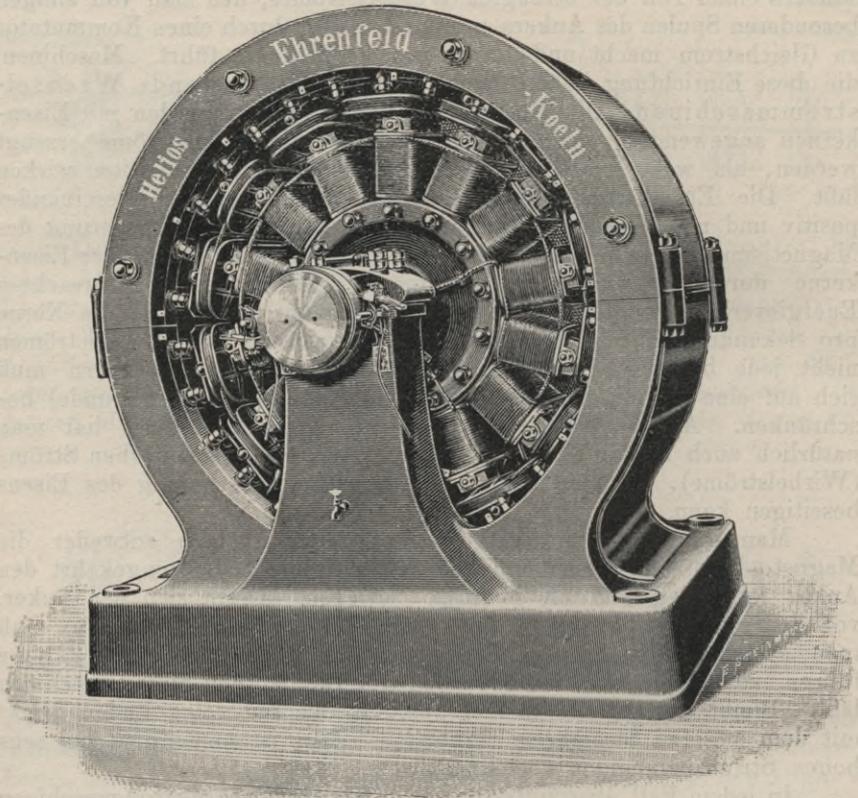
Man kann nun bei den Wechselstrommaschinen entweder die Magnete feststehen lassen und den Anker drehen, oder umgekehrt den Anker feststellen und die Magnete bewegen. Dreht sich der Anker, von dem man den Strom in die äußere Leitung senden will, so muß man seine Drahtenden an Ringe auf der Achse, Schleifringe führen, von denen man durch schleifende Bürsten den Strom abnehmen läßt. Bleibt dagegen der Anker fest, so werden seine Enden direkt mit dem äußeren Stromkreis verbunden. Dies ist namentlich bei sehr hohen Stromspannungen vorteilhaft.

In jedem Fall aber unterscheiden sich die Wechselstrommaschinen von den Gleichstrommaschinen dadurch, daß sie absolut keinen Kommutator (Kollektor) brauchen, und das ist ein wesentlicher ökonomischer und konstruktiver Vorzug der Wechselstrommaschinen. Denn erstens ist der Kommutator ein der Abnutzung am meisten unterliegender Teil der Maschinen, zweitens aber ist gerade die Notwendigkeit des Kommutators bei Gleichstrommaschinen ein Hindernis dafür, daß man sie für hohe Spannungen bauen kann. Am Kommutator würden sich die hohen Spannungen zunächst ausgleichen. Daher kann man Wechselstrommaschinen leicht für hohe Spannungen bauen, bis zu mehreren Tausend Volt, während das bei Gleichstrommaschinen nur durch ganz besondere Vorsichtsmaßregeln möglich ist. Im übrigen gelten für die

Konstruktion der Wechselstrommaschinen ganz dieselben Grundsätze und Regeln wie für Gleichstrommaschinen (S. 340), nämlich starkes Magnetfeld, möglichste Ausnutzung aller Kraftlinien zur Induktion, geringer Zwischenraum zwischen Magneten und Induktorspulen.

In neuerer Zeit werden Wechselstrom- und Drehstromdynamos zur Erzeugung von Strömen hauptsächlich in sehr großen, zum Teil riesigen Dimensionen gebaut. Für kleine Betriebe nämlich bietet der

Fig. 322.



Gleichstrom manche Vorzüge vor dem Wechselstrom, während gerade bei großen Zentralanlagen, die die Ströme oft auf weite Entfernung fortzuleiten haben, die hochgespannten Wechselströme, wie oben ausgeführt, besonders vorteilhaft sind.

Wir beschreiben zuerst die Wechselstrommaschinen der Aktiengesellschaft Helios in Ehrenfeld bei Köln, welche in Deutschland zuerst sich mit der Wechselstromtechnik befaßt hat, in Verbindung mit der Firma Ganz & Co. in Budapest. Bei diesen Wechselstrommaschinen Type A (Patent Zipernowsky) (Fig. 322) rotieren die Magnete, während die Armatur feststeht. Die Magnete sind auf der Achse be-

festigt und gehen sternförmig auseinander. Die Zahl der Pole variiert bei den einzelnen Größen von 6 bis 30. Abwechselnd ist immer ein Nordpol und ein Südpol nach außen gerichtet. Über die Eisenkerne derselben sind die Magnetisierungsspulen geschoben. Die Achse mit den Magneten (das Magnetrad) läßt sich im ganzen aus der Maschine herausnehmen. Die Induktionsspulen befinden sich, wie man aus der Figur sieht, auf dem Umfang einer Trommel und enthalten Eisenkerne, die sorgfältig zerteilt sind. Es sind alles flache Spulen, die von dem Maschinengestell und voneinander sorgfältig isoliert sind und die auf die Eisenkerne aufgeschoben sind. Da die Zahl der Ankerspulen genau ebenso groß ist, wie die Zahl der Magnetpole, so wird in den aufeinanderfolgenden Spulen bei der Bewegung abwechselnd ein Strom nach der einen und nach der anderen Richtung erzeugt. Verbindet man nun die Spulen abwechselnd in entgegengesetzter Richtung und führt die freien Enden zu zwei festen Klemmen, so kann man von diesen gewöhnliche Wechselströme oder, wie man diese jetzt nennt, einphasige Ströme abnehmen. Die Spannung dieses Stromes ist die Summe der Spannungen, welche in den einzelnen Spulen erzeugt werden. Da innerhalb jeder einzelnen Spule nur geringe Spannungsdifferenzen vorkommen, so läßt sich die gesamte Isolation leicht und sorgfältig in solcher Güte herstellen, daß Klemmenspannungen bis zu 5000 Volt mit der Maschine sicher erzeugt werden. Es werden aber auch zuweilen mehrere Rollen parallel geschaltet, wodurch der Widerstand, aber auch die erzeugte Spannung vermindert wird. Die Tourenzahl wird bei allen Maschinen dieses Systems so in Zusammenhang mit der Anzahl der Pole gebracht, daß die Zahl der Stromwechsel in der Minute 5000 beträgt. Beispielsweise läuft eine Maschine von 6 Magnetpolen mit 830 Umdrehungen pro Minute, eine Maschine von 40 Polen mit 125 Umdrehungen pro Minute. Solch geringe oder noch niedrigere Stromwechselzahlen sind wegen der Hysterisverluste bei allen Wechselstrommaschinen üblich, und sie sind besonders für die Ausbildung der Wechselstrommotoren (Kap. 7) wichtig geworden.

Diese Maschinen werden als selbsterregende konstruiert. Zu diesem Zweck ist auf der Achse des Magnetrades ein Kommutator angebracht, der aus so vielen Teilen besteht, als Magnetkerne vorhanden sind (in der Figur sind es 14). Von diesen Teilen (Segmenten) wird der 1., 3., 5. u. s. w. bis 13. metallisch miteinander verbunden, der 2., 4., 6. bis 14. ebenfalls, so daß zwei voneinander isolierte Teile stets nebeneinander liegen. Von einer Ankerspule (manchmal auch von mehreren) gehen nun Drähte aus, deren Enden durch zwei Bürsten auf zwei benachbarten Kommutatorsegmenten schleifen, und zugleich sind die beiden Segmentreihen 1, 3 bis 13 und 2, 4 bis 14 mit den Enden der Magnetbewicklung fest verbunden. Schleifen die Bürsten also z. B. auf 1 und 2, so wird von der Ankerspule ein Strom in die Magnete in bestimmter Richtung gesendet. Bei $\frac{1}{14}$ einer Umdrehung schleifen die Bürsten auf 2 und 3, der Strom in der Spule ist umgekehrt, zugleich ist aber die Verbindung mit den Magnetdrahtenden umgekehrt, so daß der Strom in den Magneten immer dieselbe Richtung behält.

Von Siemens & Halske werden Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen in ganz gleicher Form, nur mit verschiedenartiger Wickelung konstruiert. Bei beiden Dynamomaschinenarten ist der Anker ein feststehender äußerer Ring, und die Feldmagnete, die ebenfalls, wie bei Ganz, sternförmig im Innern des Rings angeordnet sind, rotieren. Die Feldmagnete werden durch einen besonderen Strom erregt, der von einer besonderen Gleichstrommaschine geliefert wird, die gewöhnlich auf derselben Achse sitzt wie der Magnetstern. Die Pole der Feldmagnete sind abwechselnd nord- und süd magnetisch und tragen abgerundete Polschuhe, wo sie dem Ring gegenüberstehen. Der eiserne Ring selbst ist an seinem inneren Umfang mit einer Anzahl von Nuten versehen, und zwar sind dreimal so viel Nuten vorhanden als Magnetpole.

Fig. 323.

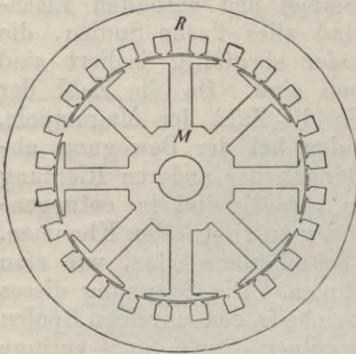


Fig. 323 zeigt den Magnetkranz M und den Eisenring R mit seinen Nuten. Sowohl der Ankerring wie die Feldmagnete sind aus Blechen zusammengesetzt, um die Wirbelströme zu verhindern. Die Drahtwicklung des Ankers wird nun in die Nuten eingelegt, und zwar erhält man gewöhnlichen Wechselstrom (Einphasenstrom) oder dreiphasigen Wechselstrom (Drehstrom), je nach der Art, wie man die Nuten zur Wickelung benutzt.

Um gewöhnlichen Wechselstrom zu erhalten, legt man, wie Fig. 324 zeigt, eine Wickelung zwischen die Nuten 1 und 3, die

Fig. 324.

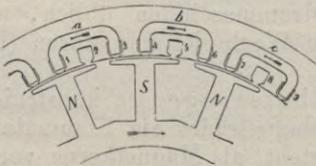
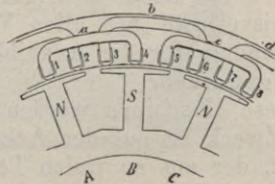


Fig. 325.



folgende zwischen 4 und 6 u. s. w., läßt also die Nuten 2, 5, 8 u. s. w. frei. Da die Wickelungen, deren drei mit a, b, c bezeichnet sind, in jedem Moment dieselbe Lage gegen die verschiedenen Magnetpole haben, so werden in ihnen Ströme von gleicher Phase induziert, wenn die Magnete sich drehen, aber natürlich in a und c Ströme, die, absolut genommen, die entgegengesetzte Richtung haben wie die in b u. s. w. Wenn man daher die Spulen alle hintereinander schalten will, so hat man die Spule b entgegengesetzt zu verbinden, also das Ende von a mit dem Ende von b und den Anfang von b mit dem Anfang von c. Die freien Enden der ersten und letzten Spule werden dann zu feststehenden Klemmen geführt, von denen man den Wechselstrom in den äußeren Stromkreis führen kann.

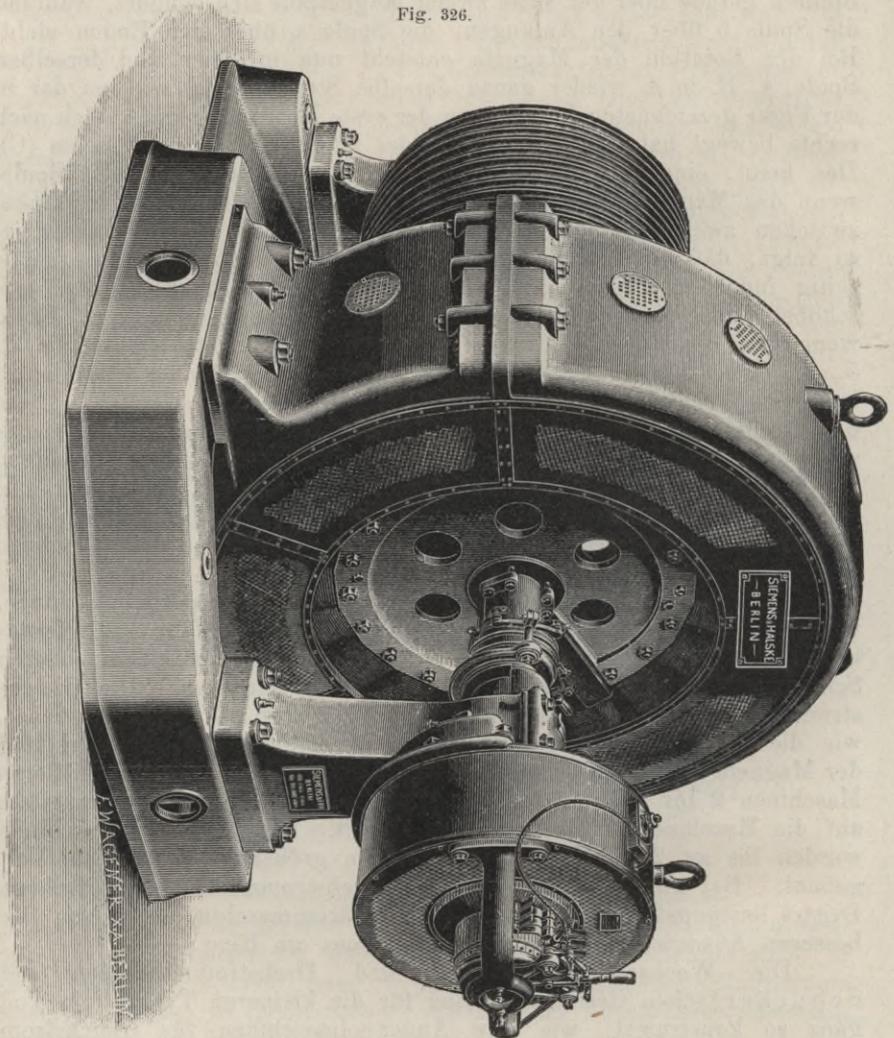
Um dagegen Drehstrom (dreiphasigen Wechselstrom) zu erhalten, macht man die Wickelung so, wie sie in Fig. 325 angedeutet ist. Die erste Wickelung a wird in Nute 1 und 4 gelegt, die zweite b in 3 und 6, die dritte c in 5 und 8 u. s. w.; es wird also keine Nute freigelassen. Man sieht aus der Figur, daß in demselben Moment die Spule a gerade über der Mitte zweier Magnetpole sich befindet, während die Spule b über den Anfängen, die Spule c über den Enden steht. Bei der Rotation der Magnete entsteht nun in einer und derselben Spule, z. B. in a, wieder genau derselbe Stromimpuls, wie bei der in der Figur gezeichneten Lage, wenn der erste Nordpol links (A) sich nach rechts bewegt hat, bis in die Lage des nächsten Nordpols rechts (C). Das heißt, eine volle Periode hat der Wechselstrom in jeder Spule, wenn das Magnetsystem sich von A bis C bewegt. Da nun der Winkel zwischen zwei verbundenen Nuten der dritte Teil dieses Winkels ist, so folgt, daß die Phasen der Wechselströme, die in a, b, c gleichzeitig induziert werden, um $\frac{1}{3} \times 360 = 120^\circ$ gegeneinander verschoben sind. Dieselbe Phase wie a hat nun die Spule d u. s. w. Kurz, wenn man die 1., 4., 7. Spule miteinander verbindet, ebenso die 2., 5., 8., ferner die 3., 6., 9., so erhält man drei getrennte Stromleiter, in denen Wechselströme von je 120° Phasendifferenz auftreten. Diese drei Drehströme kann man nun verketteten (S. 260), sei es in Dreieckschaltung, sei es in Sternschaltung. Bei den Siemensschen Maschinen werden sie in Sternschaltung verbunden, d. h. die drei Enden der drei Spulensysteme werden miteinander verbunden, und die drei Anfänge werden zu je einer festen Klemme geführt. Von diesen drei Klemmen werden dann die Drehströme nach außen geführt.

Bei den Siemensschen Wechselstrom- und Drehstrommaschinen, von denen Fig. 326 eine Drehstromdynamo für ungefähr 400 Pferdekraften Kraftbedarf zeigt, ist der Anker zum Teil von einem äußeren Schutzmantel aus durchlöchertem Eisenblech umgeben. Die Gleichstrommaschine, die die Magnete erregt, sitzt vorn auf derselben Achse, wie die Feldmagnete der eigentlichen Maschine. Die zur Erregung der Magnete notwendige Energie beträgt bei den kleineren und mittleren Maschinen 2 bis 3 Proz., bei den großen 1 bis 2 Proz. der gesamten, auf die Maschine zu übertragenden Arbeit. Die kleineren Maschinen werden bis zu 2000 Volt Spannung, die größeren bis zu 4000 Volt gebaut. Bei gleicher Größe ist eine Drehstrommaschine um fast ein Drittel leistungsfähiger als eine Wechselstrommaschine — wegen der besseren Ausnutzung des Wickelungsraumes am Ring.

Die Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen der Schuckertschen Gesellschaft sind für die kleineren Typen zum Teil ganz so konstruiert, wie ihre Außenpolmaschinen für Gleichstrom (S. 351 f.). Wenn nämlich eine Spule vor abwechselnden Magnetpolen rotiert, so werden in ihr zunächst immer Wechselströme erzeugt, die man direkt abnehmen kann, wenn man die Enden der Spule an Schleifringe auf der Achse führt und auf diesen Bürsten schleifen läßt. So kann man daher auch aus einer Gleichstrommaschine, einer Ring- oder einer Trommelmaschine Wechselströme entnehmen. Denn bei ihr bewegt sich jede Spule einmal vor einem Nordpol, darauf

bei einem Südpol vorbei, und es entstehen also in ihr Wechselströme. Wenn man also den Strom immer von dieser Spule (oder besser von zwei diametral gegenüberliegenden) durch Schleifringe (nicht durch einen Kommutator) abnimmt, so fließt in der Leitung

Fig. 326.



Wechselstrom. Dieses Prinzip benutzt (nach dem Vorgang von Ferraris) die Schuckertsche Gesellschaft zur Konstruktion ihrer kleinen Wechselstrommaschinen. Dabei werden die Maschinen als Außenpolmaschinen gebaut. Bei diesen sind die Feldmagnete fest und der Anker rotiert (bei den Innenpolmaschinen ist es umgekehrt). Die Tourenzahl der Maschinen und die Zahl der verwendeten

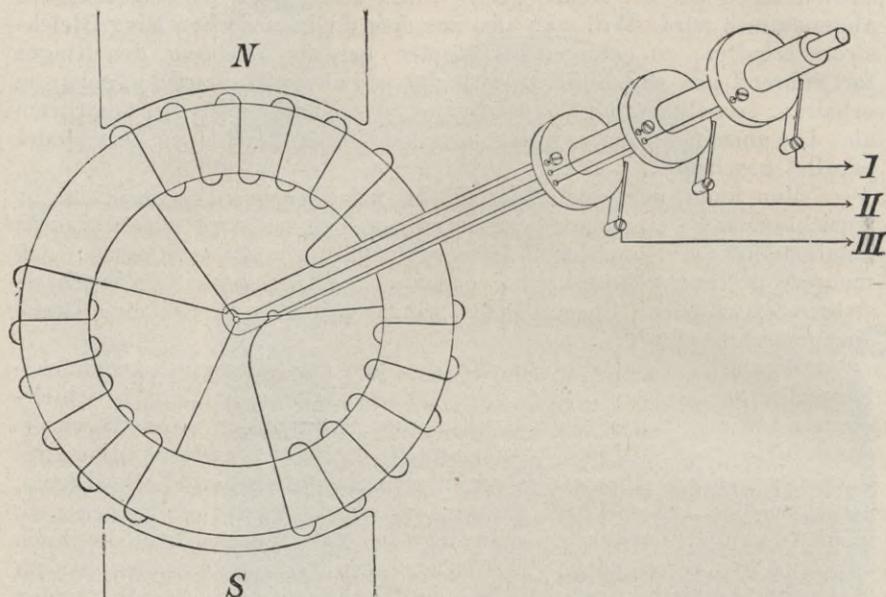
Magnetpole steht so im Zusammenhang, daß die Wechselströme 50 Perioden in der Sekunde haben (daß also in jeder Spule 100 Polwechsel in der Sekunde eintreten). Es werden also von der Wickelung des Ankers alle diejenigen Windungen hintereinander geschaltet, welche in dem einen Sinne, und ebenso alle diejenigen, welche in dem anderen Sinne induziert werden. Die Anfänge dieser beiden entgegengesetzt induzierten Spulenreihen werden verbunden, die Enden werden zu zwei Schleifringen auf der Achse geführt, von denen dann der Wechselstrom abgenommen wird. Will man also aus dem Grammeschen Ring Gleichstrom erhalten, so nehmen die Bürsten bei der Drehung des Ringes fortwährend aus anderen Spulen den Strom ab; will man Wechselstrom erhalten, so nehmen die Bürsten immer aus denselben Spulen den Strom ab. Die einzelnen Spulensysteme werden hintereinander (in Serie) oder parallel geschaltet.

Man kann nun auch hier leicht jede Wechselstrommaschine so einrichten, daß sie zu einer Drehstrommaschine wird. Man braucht nämlich nur die einzelnen Ankerspulen so zusammenzufassen, daß mehrere getrennte Stromkreise vorhanden sind, in denen die Wechselströme verschiedene Phasen haben, dann hat man bereits eine Drehstrommaschine.

Wenn man also die freien Enden von zwei diametral gegenüberliegenden Spulen des Ringes, die man verbunden hat, zu 2 Schleifringen auf der Achse führt, so kann man von diesen einen Wechselstrom abnehmen. Macht man dasselbe mit zwei anderen diametral gegenüberliegenden Spulen, so erhält man ebenfalls einen Wechselstrom, der aber eine andere Phase als der erste hat. Sind diese Spulen z. B. um 90° von den ersten abstehend, so hat der Wechselstrom in ihnen eine um 90° verschiedene Phase. Denn wenn das erste Spulenpaar im Maximum der Induktion sich befindet, ist das zweite gerade an den Indifferenzstellen u. s. w. Man hat dann 4 Schleifringe auf der Achse, für jedes Spulenpaar 2, und man hat so eine Zweiphasenstrommaschine. Ebenso kann man, wenn man ein Spulenpaar, das um 60° von dem ersten entfernt ist, und ein anderes Spulenpaar, das um 120° von dem ersten entfernt ist, je zu festen Schleifringen führt, 3 Wechselströme erhalten, von denen jeder gegen den folgenden eine Phasenverschiebung von 60° hat. Zunächst kann man die 6 freien Enden der 3 Spulenpaare zu je einem Schleifring führen, so daß man also 6 Schleifringe auf der Achse hat. Gewöhnlich aber werden die 3 Stromdrähte auf dem Anker selbst schon miteinander verkettet, und zwar entweder in Sternschaltung oder in Dreieckschaltung (oben S. 260), so daß an die Achse bloß die 3 freien Enden der 3 Drähte zu 3 Schleifringen geführt werden. Von diesen nimmt man durch Bürsten 3 Wechselströme ab, deren Phasen um je 60° voneinander abstehen. Fig. 327 zeigt schematisch, wie man aus dem Grammeschen Ring verkettete Drehströme erhält. Die drei Spulensysteme erzeugen bei der Rotation 3 verschiedenartige Wechselströme. Die Anfänge der Spulen sind am Ring miteinander verbunden, die Enden führen zu 3 Schleifringen auf der Achse, von denen die Bürsten I, II, III die Ströme abnehmen. Es ist also hier Sternschaltung vorhanden.

Man kann natürlich auch alle 6 Enden der 3 Drähte zu 6 Schleifringen führen; dann hat man 3 getrennte Stromkreise mit je 60° Phasendifferenz. Da die Maschinen für Gleichstrom und für Wechselstrom ganz gleich gebaut sind, nur daß die einen den Kommutator, die anderen bloße Schleifringe besitzen, so kann man auch eine und dieselbe Maschine für Gleichstrom und für Wechselstrom einrichten.

Fig. 327.



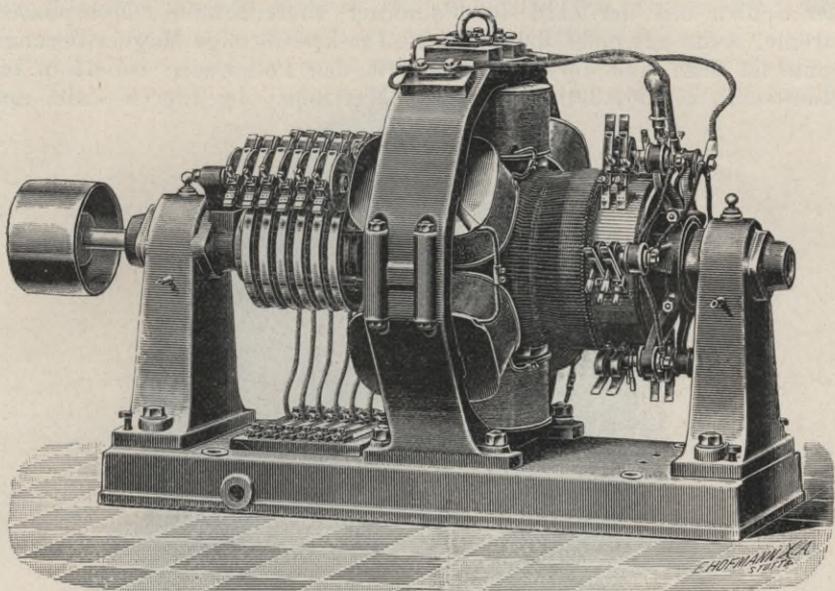
Eine solche Maschine ist in Fig. 328 gezeichnet. Man sieht eine 6polige Außenpolmaschine mit Trommelanker. Rechts ist der Kommutator mit Bürsten für Gleichstrom, links sind 6 Schleifringe mit 6 Bürsten für 3 verschiedenphasige Wechselströme.

Diese WA-Maschinen werden für Wechselströme bis zu 2000 Volt Spannung konstruiert. Außerdem werden von dieser Gesellschaft auch Maschinen gebaut, bei denen der Anker feststeht und die Magnete rotieren. Solche WJ-Maschinen erzeugen bis zu 12 000 Volt mit Leistungen von 10 bis 2000 Pferdekraften. Bei allen Maschinen wird die Polwechselzahl von 100 in der Sekunde beibehalten.

Bei den bisher beschriebenen Maschinen wurden entweder die Feldmagnete oder der Anker gedreht, und in jedem Fall mußten dabei Bürsten angewendet werden, sei es, um den gedrehten Feldmagneten Strom zuzuführen, oder um den Strom vom gedrehten Anker abzunehmen. Man kann aber die Maschinen für Wechselstrom- und Drehstrom auch so konstruieren, daß den bewegten Teilen überhaupt kein Strom zugeführt werden muß, resp. von ihnen abgeführt werden muß, daß also überhaupt keine Bürsten verwendet werden, sondern alle Stromzufuhr oder -entnahme nur von festen Klemmen aus geschieht.

Derartige Maschinen sind zuerst 1883 von Klimenko praktisch eingeführt worden und haben dann namentlich in Amerika durch Mordey wesentliche Verbesserungen erfahren. Man bezeichnet sie deshalb auch

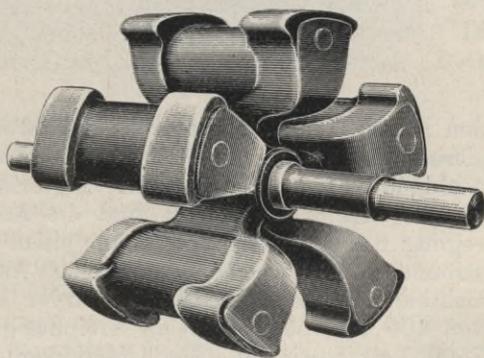
Fig. 328.



als Mordeymaschinen. Ihr Prinzip besteht darin, daß die beweglichen Magnetpole alle gemeinschaftlich von einer einzigen Spule erregt werden, nicht, wie bei den bisher beschriebenen, jede von einer besonderen. Diese Spule kann nun fest bleiben, während der Eisenkern sich dreht.

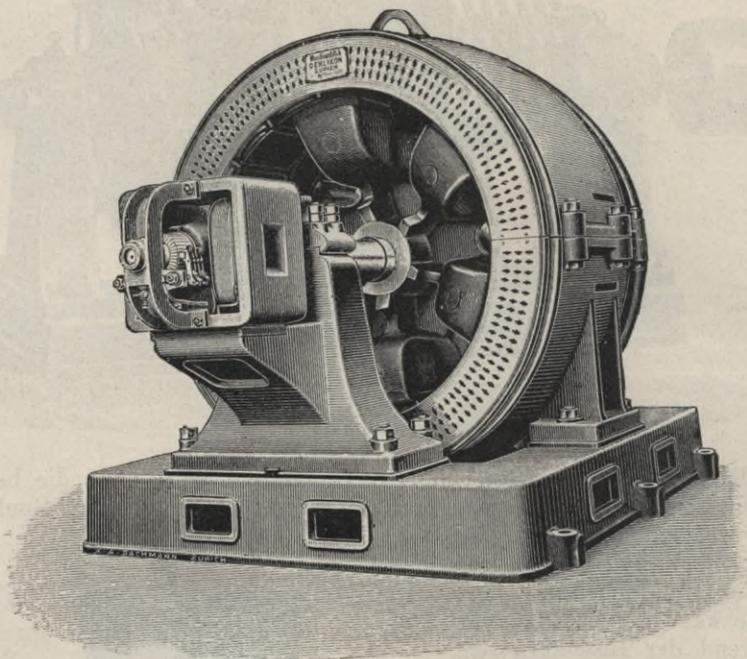
Dieses Prinzip ist bei einer Klasse von Wechsel- und Drehstromdynamos der Maschinenfabrik Oerlikon in folgender Weise benutzt worden. Man sieht in Fig. 329 den rotierenden Teil der Maschine. Derselbe ist aus Stahl (bei größeren Maschinen hat er die Form eines Rades). Um den mittleren Teil dieses Körpers wird die Magnetisierungsspirale gelegt. Diese magnetisiert den Körper so, daß die rechtsliegenden Pole (Polhörner) alle etwa nordmagnetisch, die linksliegenden alle süd magnetisch werden. Die Polhörner rotieren nun

Fig. 329.



bei den Ankerspulen vorbei, die selbst auf Eisenkerne gewickelt sind. Infolge der Annäherung und Entfernung der Pole entstehen in diesen Spulen Wechselströme, und diese werden durch passende Verbindung der Spulen als Ein- oder Mehrphasenströme nach außen zu feststehenden Klemmen geführt. Einphasenströme erzeugt man, wenn die Zahl der Spulen mit der Zahl der Polhörner übereinstimmt, Mehrphasenströme, wenn das nicht der Fall ist. Die kreisförmige Magnetisierungsspule ist fest, und der Eisenkern mit den Polhörnern rotiert in ihr. Man sieht in Fig. 330 eine solche Maschine. Im Innern sieht man

Fig. 330.



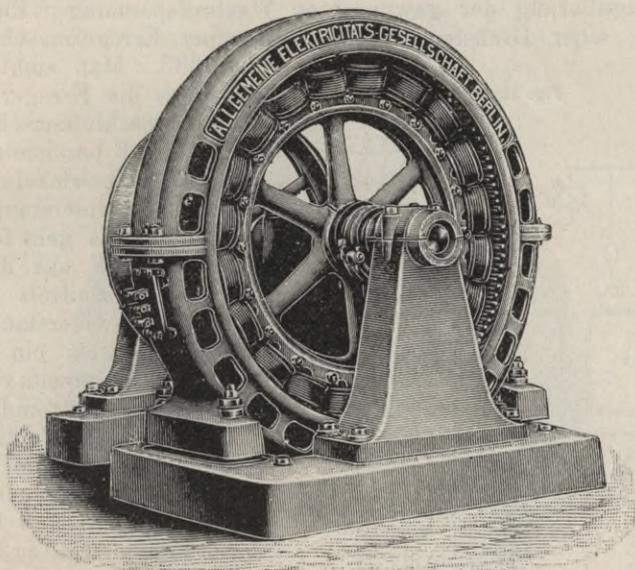
den rotierenden Teil mit seinen Polhörnern. Die kreisförmige Magnetisierungsspule für ihn ist im Innern fest aufgestellt. In den äußeren Stahlmantel sind zwei zerteilte ringförmige Eisenkörper mit Nuten eingepaßt und in die Nuten sind die Ankerdrähte gewickelt. Zur Erregung der Magnetisierungsspule dient der Strom der kleinen Gleichstrommaschine, welche auf derselben Achse sitzt und vorn in der Figur sichtbar ist. Die Maschinen werden als einphasige für Spannungen von 100 bis 7500 Volt, als dreiphasige für Spannungen von 200 bis 7500 Volt gewickelt. Die Isolation aller Drähte wird durch Glimmer erzeugt. Bei allen Maschinen wird die Zahl von 50 Perioden in der Sekunde eingehalten. Die Größe der Maschinen variiert von 8 bis 300 Pferdekraften.

Auch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin baut einen Teil ihrer Drehstrommaschinen nach diesem System. Bei

anderen Maschinen (Modell M) sind die Magnete auf einem ringförmigen Gestell angebracht und wirken induzierend auf einen innen befindlichen Trommelanker, der mit Schleifringen versehen ist. Es sind das also Maschinen, die auch als Außenpolmaschinen zu bezeichnen sind.

Bei einer dritten Art von Maschinen (Modell NDM), von denen Fig. 331 eine Ansicht gibt, ist das Innenpolssystem angewendet. Man

Fig. 331.



sieht an dem radförmigen Teil im Innern eine große Anzahl von Magnetkernen. Diese wirken induzierend auf die Drähte, welche in dem Eisengehäuse, das den Umfang bildet, passend angeordnet sind. Die Spulen des Ankers sind in die Nuten eines Eisenkerns gelegt. Dabei kann man, wie Fig. 332 zeigt, die Spulen, statt sie in je zwei aufeinanderfolgenden Nuten zu wickeln, gegenseitig übergreifen lassen. Häufig bestehen dabei die Spulen aus einem einzigen Kupferstab. Nach diesem Typus ist auch die große Drehstrommaschine gebaut, welche von dieser Gesellschaft in Paris ausgestellt war, und welche für eine Leistung von 4000 Pferdekraften bestimmt war. Bei den großen Maschinen (über 200 Kilowatt) können Spannungen bis 10000 Volt, bei den kleinen Maschinen solche bis 3000 Volt erreicht werden.

Fig. 332.



Die Wechsel- und Drehstrommaschinen werden auch von der A.E.G. für eine Frequenz von 50 Perioden, also 100 Polwechseln, eingerichtet.

Um die Spannung in den Wechselstrommaschinen zu ändern,

reguliert man, wie bei den Nebenschlußmaschinen für Gleichstrom, den Erregerstrom der Magnete. Indem man diesen stärker oder schwächer macht, wird auch die Spannung des Wechselstroms stärker oder schwächer. Wenn man, wie gewöhnlich, zur Erregung der Magnete eine Gleichstromnebenschlußmaschine anwendet, so werden einerseits Regulierwiderstände in deren Magnetkreis eingeschaltet, andererseits Regulierwiderstände in die Feldmagnete der Wechselstrom- oder Drehstromdynamos. Die ersteren dienen zur groben, die letzteren zur feinen Regulierung der gewünschten Wechselspannung. Eine solche Schaltung einer Drehstromdynamo mit einer Erregermaschine zeigt

Fig. 333.

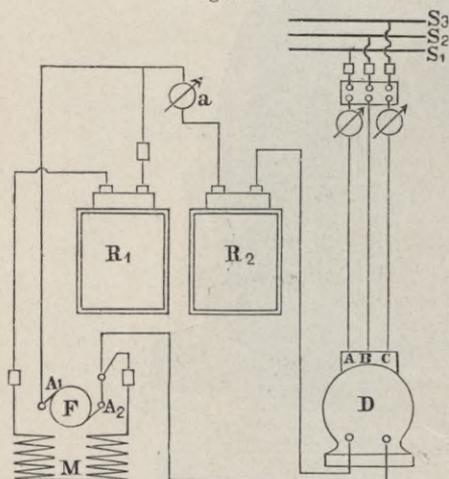


Fig. 333. Man sieht links in der Figur die Erregermaschine, eine Nebenschlußmaschine, deren Anker mit F bezeichnet ist. In ihre Magnetbewicklung M ist der Regulierwiderstand R_1 eingeschaltet. Es geht ferner von dem Anker F aus der Strom einerseits vermittels A_1 durch den Regulierwiderstand R_2 (und zunächst durch ein Ampèremeter a), andererseits vom Pol A_2 direkt zur Drehstromdynamo D, d. h. zu ihren Feldmagneten. Endlich geht von den Klemmen A, B, C der letzteren der Drehstrom aus, dessen 3 Leitungen durch Meßapparate zu 3 Schienen $S_1 S_2 S_3$, den Sammelschienen, auf dem Schaltbrett geführt werden.

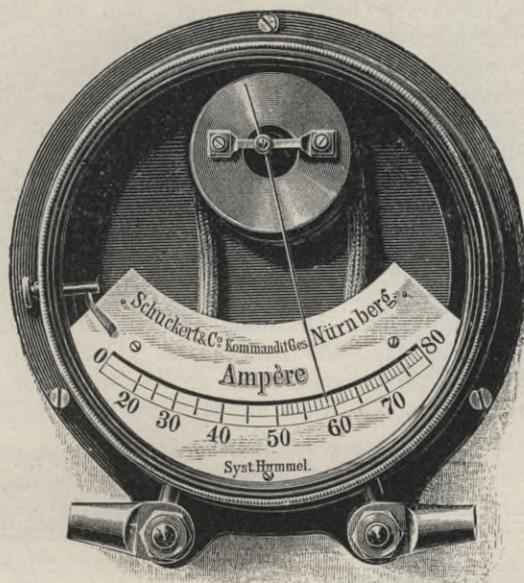
Wir haben so die wesentlichsten Konstruktionen der verschiedenen Arten von Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen besprochen. Alle diese Maschinen sind jetzt durch sachgemäße Konstruktionen auf einen so hohen Grad von Vollkommenheit gebracht, daß ihr elektrischer Wirkungsgrad (S. 356) 85 bis 96 Proz. und mehr beträgt, so daß sie also den Gleichstromdynamos ebenbürtig sind.

Zur Messung der Spannung der Wechsel- und Drehströme, sowie der Stromstärke in den Leitungen werden auch hier Voltmeter und Ampèremeter direkt in der Nähe der Maschine angebracht. Und dabei hat man bei gewöhnlichem (einphasigem) Wechselstrom, ganz ebenso wie bei Gleichstrom, nur je ein Voltmeter und ein Ampèremeter anzuwenden. Das Voltmeter wird an die Klemmen der Maschine, im Nebenschluß zum Hauptstromkreis angelegt, das Ampèremeter kommt direkt in eine Leitung des Hauptstroms. Dagegen bei Drehstrom, wo man drei Leitungen hat, hat man die Spannung zwischen je zweien der drei Leitungen (1 und 2, 1 und 3, 2 und 3) zu messen und die Stromstärke in jedem Zweige. Für den letzteren Zweck hat man also in jede Leitung des Hauptstroms ein Ampèremeter einzuschalten. Für die Spannungsmessung hat man ebenso je ein Voltmeter

in den Nebenschluß zwischen die Klemmen 1 und 2, 1 und 3, 2 und 3 zu legen.

Die technischen Meßapparate für Wechselströme sind zum Teil dieselben wie die für Gleichströme. Wenn ein Meßapparat auf der Bewegung eines Stückes von weichem Eisen unter dem Einfluß eines Stromes beruht, wie z. B. die Apparate der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, die oben S. 359 beschrieben wurden, so läßt er sich für Wechselströme auch verwenden. Denn das Eisenstückchen wird jedenfalls in die Spule hineingezogen, ob diese nun von einem Strom in der einen oder in der anderen Richtung durchflossen wird, also auch, wenn

Fig. 334.



sie von einem Wechselstrom durchflossen wird. Nur muß die Skala des Instrumentes für den Wechselstrom besonders geeicht sein, und eine solche Skala ist im allgemeinen nur richtig für eine bestimmte Periodenzahl des Wechselstroms, nicht für andere, selbstverständlich wegen des Einflusses der Selbstinduktion. Vielfache Verwendung haben für Wechsel- und Drehströme die Ampèremeter und Voltmeter von Hummel erfahren, welche von der Schuckert'schen Gesellschaft bei ihren Anlagen benutzt werden. In diesen Instrumenten, von welchen Fig. 334 die äußere Form eines Ampèremeters zeigt, ist eine Drahtspule enthalten, innerhalb welcher ein leichtes Eisenplättchen drehbar angebracht ist, jedoch so, daß die Drehungsachse nicht mit der Achse der Spule zusammenfällt, sondern exzentrisch liegt. Geht ein Strom durch die Spule, so dreht sich daher das Eisenplättchen um seine Achse so weit, bis das Gewicht des Plättchens der elektromagnetischen Kraft das Gleichgewicht hält, und ein Zeiger, der mit

dem Plättchen fest verbunden ist, zeigt auf einer Skala, die man geeicht hat, die entsprechende Stromstärke, oder wenn das Instrument im Nebenschluß gebraucht wird, die entsprechende Spannung an.

Wie gesagt, sind diese Instrumente, weil die Spulen für den Strom immer Selbstinduktion besitzen, nicht unabhängig von der Periode der Wechselströme. Eine Skala, die für eine Periodenzahl 50 richtig geeicht ist, ist nicht mehr richtig für 40 oder 80 Perioden in der Sekunde. Unabhängig von der Periodenzahl wird man nur durch Instrumente, welche eine verschwindend kleine Selbstinduktion besitzen. Dies ist der Fall bei den sogenannten Hitzdrahtmeßinstrumenten, welche von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. sowohl für wissenschaftliche, als auch für solche technische Messungen konstruiert werden. Diese Apparate beruhen darauf, daß ein Draht, der von einem Strom durchflossen wird — gleichgültig ob von Gleichstrom oder Wechselstrom —, infolge der Jouleschen Wärme erwärmt und dadurch etwas ausgedehnt wird, da ja bei steigender Temperatur alle Körper länger werden. Diese Längenänderung ist nun umgekehrt ein Maß für die Stromstärke, die durch den Draht fließt. Der Hitzdraht besteht bei diesen Instrumenten aus einem kurzen Platinsilberdraht, die kleine Verlängerung, die er erfährt, bewirkt eine Drehung einer Achse, mit der er verbunden ist, und diese Drehung wird durch einen Zeiger, der vor einer Skala spielt, abgelesen. Um die sehr kleinen Längenänderungen des „Hitzdrahtes“ so auf den Zeiger zu übertragen, daß dieser dabei eine große Drehung macht, ist die Einrichtung so getroffen, wie sie aus Fig. 335 hervorgeht. Der dünne Platinsilberdraht d von 0,06 mm Durchmesser ist an beiden Enden s und s_1 festgeklemmt. Ungefähr in der Mitte des Drahtes ist ein dünner Messing-

Fig. 335.

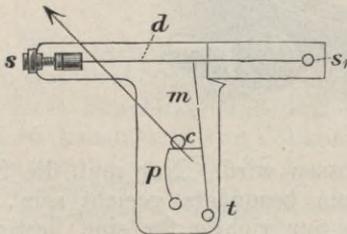
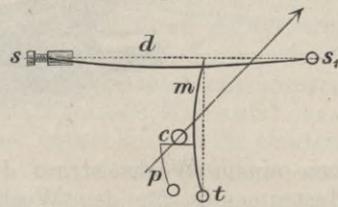


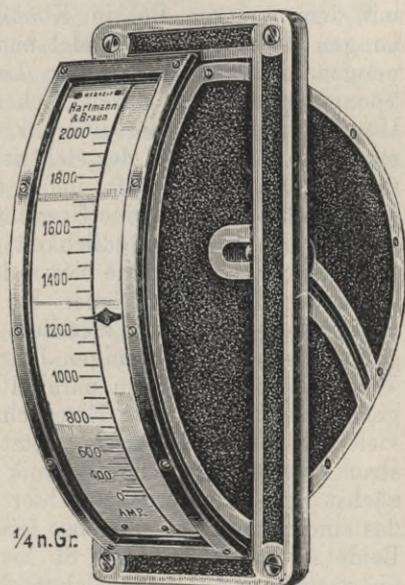
Fig. 336.



draht m von 0,05 mm Durchmesser befestigt, dessen anderes Ende bei t festgeklemmt ist. Von der Mitte dieses Drahtes nun ist ein feiner Kokonfaden um eine drehbare Rolle c geschlungen und zu einer Feder p geführt, welche das ganze System, die beiden Drähte und den Kokonfaden stets gespannt hält. An der Rolle ist der Zeiger befestigt. Wird nun, wie Fig. 336 zeigt, der Draht d von einem Strom durchflossen, also erwärmt und verlängert, so spannt die Feder p ihn und den Draht m , buchtet sie aus, und die Rolle c mit dem Zeiger dreht sich. Wenn man die Stellungen des Zeigers auf der Skala bei bestimmten Stromstärken bestimmt, also das Instrument geeicht hat, so kann man dasselbe zu Messungen benutzen. Diese Instrumente, die

von Magneten oder Starkströmen in der Nähe nicht beeinflusst werden, lassen sich natürlich für Gleichstrom ebenso brauchen, wie für Wechselstrom. Bei letzteren ist die Periodenzahl ohne Einfluß, weil der kurze Hitzdraht keine merkliche Selbstinduktion besitzt. Da man durch den dünnen Hitzdraht nur schwache Ströme senden darf, so wird das Instrument zunächst im Nebenschluß als Voltmeter gebraucht, wobei man, wenn die zu messende Spannung hoch ist, noch Vorschaltwiderstände zu dem Instrument legt. Für Strommessungen läßt man den zu messenden Strom durch einen gemessenen kleinen Widerstand gehen und schaltet den Hitzdraht parallel zu diesem, so daß man in Wirklichkeit die Spannung an den Enden eines bekannten kleinen Widerstandes mißt. Da die Stromstärke in diesem Widerstand gleich dieser Spannung dividiert durch den bekannten Widerstand ist, so kann man bei bekanntem Nebenschluß das Instrument gleich in Ampère eichen.

Fig. 337.



Die äußere Form dieser Instrumente unterscheidet sich nicht wesentlich von der der anderen Schalttafelinstrumente. In neuerer Zeit bringt man die Meßinstrumente häufig als Profilinstrumente, um Platz zu sparen, an den Schalttafeln an, über welche diese herausragen. Für die Hitzdrahtinstrumente zeigt Fig. 337 eine solche Anordnung.

Fig. 338.

Für sehr hohe Spannungen, wie sie jetzt bei Wechselstromanlagen zuweilen benutzt werden, für Spannungen von mehreren Tausend Volt, kann man auch leicht Voltmeter benutzen, welche gar keine Selbstinduktion besitzen, nämlich die gewöhnlichen Elektrometer. Solche Apparate werden in der Technik zuweilen unter dem Namen „elektrostatische Voltmeter“ angewendet, und Fig. 338 zeigt ein solches



elektrostatische Voltmeter“ angewendet, und Fig. 338 zeigt ein solches

von Siemens & Halske. Dasselbe ist ähnlich wie das Quadrantenelektrometer von Lord Kelvin eingerichtet. Es enthält zwei feste metallische Quadrantenplatten, zwischen denen die Nadel sich um eine horizontale Achse dreht. Die Quadranten sind miteinander fest verbunden. Sie werden mit dem einen Pol der Maschine, die Nadel wird mit dem anderen Pol in Kontakt gebracht. Bei den hohen Spannungen dreht sich die Nadel und der Ausschlag hängt von dem Spannungsunterschied der beiden Leitungen ab, mißt also direkt diese Spannung, die man durch Eichen des Instruments in Volt ausdrückt. Um für jede Spannungsdifferenz einen bestimmten Ausschlag zu haben, muß eine Gegenkraft der elektrischen Anziehung entgegenwirken. Dies tut hier die Schwerkraft, indem auf den Hebel, der unten an der Nadel bei s sichtbar ist, kleine Gewichte aufgesetzt werden. Je nach diesem Gewicht ist die Empfindlichkeit des Instrumentes verschieden.

Die Wechselströme bieten dem Verständnis weit mehr Schwierigkeiten als die Gleichströme. Sie boten auch noch bis vor kurzem der praktischen Benutzung ziemlich erhebliche Schwierigkeiten. So z. B. gelang es noch vor wenigen Jahren nicht oder nur ausnahmsweise, zwei Wechselstrommaschinen parallel zu schalten. Es mußte erst ein tiefgehendes Studium der Eigenschaften der Wechselströme Klarheit in viele Verhältnisse bringen. Jetzt aber steht die Technik des Wechselstroms vollkommen der Technik des Gleichstroms ebenbürtig da. Zunächst sind, worauf es uns hier ankommt, die Dynamomaschinen für das eine System genau ebenso leistungsfähig, wie für das andere System. Beide Arten setzen heute 85 bis 93 Proz. der von Maschinen auf sie übertragenen Arbeit in elektrische Energie um.

Daraus kann man nun sofort die Überlegenheit der Elektrizitätserzeugung in Dynamomaschinen, seien es Gleichstrom- oder Wechselstrommaschinen, gegenüber der in galvanischen Elementen ersehen.

In den galvanischen Elementen wird immer die negative Elektrode, Zink, in der Säure aufgelöst. Jedes Quantum von elektrischer Energie, das man in einem geschlossenen galvanischen Element erhält, ist hervorgebracht durch die Verbrennung (Oxydation) einer äquivalenten Menge Zink in Schwefelsäure. Bei den Dynamomaschinen dagegen werden die elektrischen Ströme hervorgebracht durch die Drehung des Ankers oder der Magnete, also durch die Arbeit, welche man auf die Maschine aufwendet. Dreht man sie durch eine Gasmaschine oder Dampfmaschine, so werden die elektrischen Ströme indirekt hervorgebracht durch die Verbrennung der Kohlen oder des Leuchtgases, welche in den Arbeitsmaschinen zur Verwendung kommen. Es läßt sich eine einfache Rechnung anstellen, welche das Verhältnis der Kosten von elektrischen Strömen, einerseits bei der Erzeugung durch galvanische Elemente, andererseits bei der Erzeugung durch Dynamomaschinen vergleichen läßt, wenn diese durch Dampf- oder Gasmaschinen getrieben werden. Man kann nämlich diese Kosten vergleichen, wenn man annimmt, daß alle Elektrizität, welche eine Dynamomaschine liefert, und ebenso alle, welche ein galvanisches Element liefert, durch den Widerstand in Joulesche Wärme verwandelt wird, und dann diese Wärmemenge vergleicht und ihre bezüglichen

Kosten ermittelt. Ein Kilogramm Zink liefert, wenn es vollständig verbrennt, eine Wärmemenge von 550 Kalorien (Wärmeeinheiten). Nehmen wir an, daß diese Wärme vollständig in Elektrizität umgesetzt wird, was auch nahezu der Fall sein wird. Ein Kilogramm Kohle dagegen gibt bei der Verbrennung 8000 Kalorien. Von diesen 8000 Kalorien werden aber nur etwa 8 Proz. in den Dampfmaschinen faktisch nutzbar verwendet, also 640 Kalorien, und von diesen 640 Kalorien, resp. ihrer entsprechenden Arbeit werden etwa 10 Proz. auf die Überwindung der Reibung der Dynamomaschine und auf unproduktive Erwärmung verwendet, während 90 Proz., also etwa 570 Kalorien, in Elektrizität verwandelt werden. Ein Kilogramm Zink liefert also eine Menge elektrische Energie, welche 550 Kalorien, ein Kilogramm Kohle eine solche, welche 570 Kalorien entspricht. Nun ist aber der Preis von Zink ungefähr 15mal so hoch als der von Kohle, so daß dieselbe elektrische Energiemenge durch Kohlenverbrennung für weniger als den 15. Teil der Kosten hergestellt wird, als durch Oxydation von Zink.

Damit ist die Überlegenheit der Dynamomaschinen über die galvanischen Elemente für Anwendungen im großen konstatiert.

$\frac{17}{7}$ 906 Gräfen bez.

3. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

Eine ganze Reihe von Wirkungen des elektrischen Stromes, die lange bekannt waren, hat erst durch die Vervollkommnung der Dynamomaschine, seitdem es auf einfache Weise möglich wurde, beliebig starke Ströme zu erzeugen, eine erhöhte Bedeutung gewonnen, indem man in ihnen die Mittel erkannte, um gewisse technische Aufgaben mit Hilfe der Elektrizität zu lösen, die mit den früheren Mitteln der Technik stets erfolglos angestrebt wurden. Die beiden hauptsächlichsten derartigen Aufgaben sind die Übertragung von Kraft oder richtiger Arbeit auf weite Entfernungen und die Aufspeicherung von gerade unverwendbarer Arbeit zu späterer Benutzung. Die letztere Aufgabe gerade, ein lang berühmtes Problem der Technik, hat durch die Elektrizität eine Lösung erfahren, deren Prinzip vollkommen abweicht von den Prinzipien aller früheren Lösungsversuche dieser wichtigen Frage.

Wenn ein elektrischer Strom, und zwar ein Gleichstrom, durch einen Zersetzungsapparat, ein Voltmeter, geschickt wird, in welchem verdünnte Schwefelsäure sich befindet, so wissen wir, daß die Elektroden, z. B. die Platinelektroden, sich polarisieren. An der negativen Elektrode lagert sich Wasserstoff an, an der positiven Sauerstoff. Diese beiden so veränderten Elektroden sind dadurch gegeneinander elektromotorisch wirksam geworden. Sie haben eine Spannungsdifferenz in der verdünnten Schwefelsäure erhalten, und wenn man sie durch einen äußeren Schließungsdraht miteinander verbindet, so fließt daher durch diesen geschlossenen Kreis ein galvanischer Strom, der Polarisationsstrom. Wir haben also durch den elektrischen Strom, den wir hineingesendet haben, den primären Strom, wie man ihn nennt, die Zersetzungszelle gewissermaßen selbst zu einem galvanischen Element gemacht, zu einem Element, das, wie jedes andere, eine ganz bestimmte, elektromotorische Kraft hat. Man nennt dann die so polarisierte Zersetzungszelle ein sekundäres Element. In diesem sekundären Element ist die mit Wasserstoff beladene Platinplatte für den Strom im Innern des Elements die positive Platte. Verbindet man daher die beiden Platinplatten miteinander durch einen äußeren Schließungsdraht, so durchfließt der sekundäre positive Strom das sekundäre Element in entgegengesetzter Richtung, als es der primäre positive Strom durchflossen hat.

Daraus folgt erstens, daß, solange das primäre Element und die Zersetzungszelle miteinander verbunden sind, die Ströme aus beiden durch den Verbindungsdraht gegeneinander fließen und sich schwächen.

Daraus folgt weiter, daß die elektromotorische Kraft des primären Stroms mindestens ebenso groß sein muß, als die des vollständig polarisierten sekundären Elements, um dieses eben vollständig polarisieren zu können. Solange nämlich die elektromotorische Kraft der primären Batterie unter dieser Grenze liegt, kann die Zersetzungsstelle nicht vollständig polarisiert werden, weil sich eben die Ströme dabei noch gegenseitig vollkommen aufheben. Also um ein sekundäres Element herzustellen, muß der primäre Strom eine elektromotorische Kraft haben, welche mindestens gleich ist der höchsten elektromotorischen Kraft, welche das sekundäre Element annehmen kann.

Denken wir uns nun ein sekundäres Element hergestellt und seine Verbindung mit dem primären Strom unterbrochen, dann haben wir ein Element, dessen positive Elektrode für den Strom im Innern der Flüssigkeit das mit Wasserstoff beladene Platin, dessen negative das mit Sauerstoff beladene ist. Sowie nun die Elektroden durch einen äußeren Draht miteinander verbunden werden, also der Stromkreis geschlossen wird, fließt der Strom hindurch und zwar innen von der wasserstoffbeladenen Platte zur sauerstoffbeladenen, außen umgekehrt. Dieser Strom übt, wie jeder Strom, auf die Schwefelsäure des Elements seine elektrolytische Wirkung aus. Aus der Schwefelsäure scheidet sich (durch sekundäre Prozesse) Wasserstoff und Sauerstoff ab, und zwar scheidet sich innerhalb des Elements der Wasserstoff an derjenigen Elektrode ab, welche mit Sauerstoff beladen war, der Sauerstoff an derjenigen, welche mit Wasserstoff beladen war. Folglich vermindert sich durch den Strom die Polarisation der Elektroden und daher muß der Strom, den das Element liefert, schließlich aufhören, wenn aller Wasserstoff von der einen und aller Sauerstoff von der anderen Elektrode sich wieder zu Wasser verbunden haben. Je mehr Wasserstoff und Sauerstoff also von dem primären Strom auf den Platinplatten abgelagert wurden, je länger also die Ladung gedauert hat, um so länger hält der Polarisationsstrom an, vorausgesetzt natürlich, daß der Wasserstoff und Sauerstoff auch wirklich an den Elektroden haften und nicht etwa in die Luft gehen.

Diese Tatsachen, welche wir schon auf S. 152 ff. angeführt haben, gelten nun nicht nur für den Fall, daß Platinelektroden in Schwefelsäure stehen und durch den Strom polarisiert werden. Vielmehr entsteht in jedem Falle, wenn eine Flüssigkeit zwischen zwei gleichen oder ungleichen Elektroden elektrolysiert wird, ein Polarisationsstrom, falls eben die beiden Elektroden durch die Polarisation elektrisch different gegeneinander geworden sind. Bei der Polarisation einer gewöhnlichen Wasserzersetzungszelle findet scheinbar keine chemische Veränderung der Platinelektroden statt, sie beladen sich nur mit Gasen. Man kann von vornherein vermuten, daß eine Zersetzungszelle, in welcher durch die Elektrolyse die Elektroden wirklich chemisch different werden, noch zweckmäßiger sein werde. Natürlich ist eine notwendige Voraussetzung dabei, daß diejenigen Stoffe, welche durch

Elektrolyse an den Elektroden entstehen, auch gute Leiter der Elektrizität sind, denn sonst würde der innere Widerstand des Elements ein sehr großer, also der Strom stets sehr schwach werden.

Das Verdienst nun, durch sehr viele und sorgfältige Versuche zuerst ein sehr zweckmäßiges sekundäres Element hergestellt zu haben, hat Gaston Planté. Er fand nämlich, daß sich das Blei ganz besonders für sekundäre Elemente eigne. Planté tauchte zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure und sendete durch dieses System den primären Strom. Dabei zerlegt sich, wenn wir vorläufig nur die Hauptprozesse in Betracht ziehen, die Schwefelsäure (SO_4H_2) in Wasserstoff, H_2 , und das nicht frei bestehende SO_4 . Von diesem letzteren wird sofort ein Sauerstoffatom durch das Blei weggenommen. Je zwei solcher Sauerstoffatome verbinden sich nämlich mit einem Atom Blei zu Bleisuperoxyd (PbO_2), während die übrigbleibende wasserfreie Schwefelsäure SO_3 sofort Wasser aus der Lösung aufnimmt und wieder zu SO_4H_2 wird. Das Resultat der Elektrolyse ist also, daß an derjenigen Bleielektrode, welche mit der negativen Elektrode der primären Batterie verbunden ist, sich freier Wasserstoff abscheidet, während an der positiven Elektrode sich Bleisuperoxyd bildet. War die negative Elektrode vorher oxydiert (durch Stehen an der Luft oder auf andere Weise), so nimmt der an ihr sich entwickelnde Wasserstoff diesen Sauerstoff weg, er reduziert sie und macht sie zu reinem metallischem Blei. Wenn also die Polarisation vollständig ist, ist aus dem System ein galvanisches Element geworden, bestehend aus

Bleisuperoxyd | verdünnte Schwefelsäure | Blei.

Ein solches Element hat, wie jedes andere, eine bestimmte elektromotorische Kraft. Diese ist, wie die Versuche zeigen, gleich 2 Volt. Wenn das Element aber eben erst gebildet ist, so ist die negative Bleielektrode noch mit Wasserstoff bedeckt, dann hat man also das Element

Bleisuperoxyd | Schwefelsäure | wasserstoffbeladenes Blei

und dessen elektromotorische Kraft ist größer, nämlich gleich 2,2 bis 2,4 Volt.

Wird ein solches Element durch einen äußeren Stromkreis geschlossen, so fließt also infolge der elektromotorischen Kraft ein Strom durch den äußeren Stromkreis und durch das Element selbst. Dieser zerlegt durch Elektrolyse wieder die Schwefelsäure, und es bildet sich jetzt an dem Bleisuperoxyd Wasserstoff, während an der reinen Bleiplatte sich Sauerstoff bildet. Dadurch wird das Bleisuperoxyd zu Bleioxyd (PbO) reduziert, aber sofort auch durch die Schwefelsäure in Bleisulfat (PbSO_4) umgewandelt, und ebenso wird die reine Bleiplatte zu Bleioxyd oxydiert und gleich in Bleisulfat (schwefelsaures Blei) verwandelt. Der Strom hört auf, wenn beide Platten an der Oberfläche in Bleisulfat verwandelt sind. Die gesamte Menge des zuerst erzeugten Bleisuperoxydes hängt nun ab von der Stärke und Dauer des primären Stromes, also von der gesamten Elektrizitätsmenge, welche während der Ladung des sekundären Elements von dem primären Strom hinein-

gesendet wurde. Die gesamte Elektrizitätsmenge, die das sekundäre Element im ganzen abgeben kann, kann also nicht größer, sondern höchstens gleich sein der gesamten Elektrizitätsmenge, die von dem ladenden Strome hineingegeben wurde.

Um ein solches sekundäres Element herzustellen, genügt es aber nicht, einfach zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure zu tauchen, sie zu laden und dann den Polarisationsstrom zu benutzen. Dieser wäre dann von sehr geringer Dauer und von sehr rasch abnehmender elektromotorischer Kraft. Man muß vielmehr, wie Planté gezeigt hat, das Element erst behandeln, formieren. Es kommt ja darauf an, daß die eine Bleiplatte durch den an sie herantretenden Sauerstoff möglichst vollständig in Bleisuperoxyd verwandelt werde. Der Sauerstoff aber entwickelt sich aus der Schwefelsäure an der Oberfläche des Bleis und greift infolgedessen ganz vorzugsweise zuerst nur die Oberflächenschicht an. Es ist also jedenfalls notwendig, wie es Planté getan hat, den Bleiplatten des sekundären Elements eine große Oberfläche zu geben. Aber man muß auch dafür sorgen, daß der Sauerstoff auch in die Bleiplatte hineindringt und sie auch innen oxydiert. Damit dies nun möglich sei, ist es notwendig, das Blei gewissermaßen aufzulockern, es zu disaggregieren, damit es den Sauerstoff leicht aufnehmen kann. Dies erreichte Planté dadurch, daß er ein Element nicht auf einmal, sondern der Reihe nach an vielen Tagen, sogar monatelang, lud und dann durch Schließung wieder entlud. Dadurch dringt der Sauerstoff von Tag zu Tag etwas tiefer in das Blei ein, und bei jeder neuen Ladung wird dann etwas mehr von der gesamten Masse des Bleis in Superoxyd verwandelt. Ferner erwies sich als vorteilhaft bei der Behandlung, das Element von Tag zu Tag in entgegengesetztem Sinn zu laden. Durch die entgegengesetzte Ladung wird das Bleisuperoxyd wieder zu Blei und zwar in körniger und poröser Form, so daß bei nachheriger Ladung der Sauerstoff nun leicht bis dahin eindringen kann. In dieser angegebenen Weise behandelte Planté seine Elemente viele Monate lang. Erst dann erreichten sie das Maximum ihrer Wirksamkeit. Nach dieser Behandlung, also bei einem fertigen Plantéschen Element, genügt eine einmalige Ladung, um dasselbe in gebrauchsfähigen Zustand zu versetzen.

Ist nun ein solches Plantésches Element geladen, sind also seine Bleielektroden chemisch verändert, so gibt es zu jeder Zeit, wenn man die Elektroden durch einen Schließungskreis verbindet, einen elektrischen Strom, einen Strom, der annähernd im ganzen dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich führt, wie der ladende Strom. Solange die Bleielektroden chemisch verändert sind, so lange enthält das Element die Fähigkeit in sich, einen Strom zu liefern. Die chemische Veränderung bleibt nun, wenn das Element ungeschlossen gehalten wird, lange Zeit mehr oder minder vollständig bestehen. Es ist dann also möglich, eine gewisse Elektrizitätsmenge dadurch, daß man sie zum Laden eines Plantéschen Elements verwendet, gewissermaßen eine Zeitlang aufzuheben. Die Elektrizität ist in Form von chemischer Veränderung in dem Element aufgespeichert und kann nach einiger Zeit wieder aus demselben herausgezogen werden. Ein solches sekundäres Element ist

also gewissermaßen ein Speicher für eine bestimmte Elektrizitätsmenge, es dient zur Aufspeicherung von Elektrizität. Man nennt deshalb auch die sekundären Elemente Akkumulatoren (Sammler). Die höchste Ladung, die ein Akkumulator aufnehmen kann, bezeichnet man als seine Kapazität.

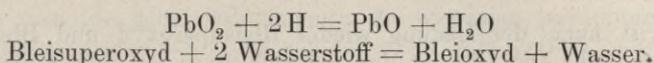
Die Plantéschen Elemente brauchen, wie gesagt, eine umständliche Vorbereitung, Formierung, bevor sie ihre vollständige Kapazität erlangen. Dieses Verfahren suchte Faure auf eine sinnreiche Weise abzukürzen. Er umgab nämlich die beiden Bleielektroden von vornherein mit einer Schicht von Mennige, welche ja an sich schon eine Sauerstoffverbindung des Bleis ist. Die Mennige ist ein lebhaft rotes Pulver, welches gewöhnlich als eine Verbindung von Bleioxyd (PbO) und Bleisuperoxyd (PbO_2) angesehen wird und dem man die Formel gibt Pb_2O_3 . Dieses Pulver wurde nun nach Faure mit Wasser zu einem dicken Brei angerieben und auf jede Elektrode dieser Brei aufgestrichen, welcher dann durch einen Filzüberzug auf der Platte festgehalten wurde. Wird nun das Element geladen, so wird auf der positiven Elektrode durch Sauerstoffaufnahme die schwammige Mennige vollständig in Bleisuperoxyd verwandelt (aus $\text{Pb}_2\text{O}_3 + \text{O}$ wird 2PbO_2), während auf der negativen Elektrode die Mennige durch den Wasserstoff zu reinem Blei reduziert wird. Dadurch, daß die Mennige pulverförmig ist, können die Gase mit Leichtigkeit nicht nur an die Oberfläche derselben, sondern auch in das Innere derselben gelangen, und so geht die chemische Veränderung durch den Ladungsstrom rasch vollständig von statten. Nach zwei- bis dreimaliger Ladung und Entladung hat das Element sein Maximum an Kapazität erreicht. Ist das aber geschehen, ist die Mennige einmal vollständig zu Bleisuperoxyd auf der einen Elektrode oxydiert und zu reinem Blei auf der anderen Elektrode reduziert worden, und ist das Element einmal entladen, so kann jede neue Ladung es wieder zu seiner vollständigen Wirksamkeit bringen.

Durch diesen Kunstgriff gelang es also Faure, die Behandlung eines Elements bis zur vollständigen Wirksamkeit viel einfacher und kürzer zu gestalten, als es Planté getan hatte. Dafür aber zeigte es sich sehr bald, daß die Haltbarkeit der nach dem Faureschen Verfahren hergestellten Akkumulatoren eine viel geringere war, weil die Pulverschichten von den Platten abfielen, so daß die großen Hoffnungen, die man auf Faures Erfindung setzte, nicht in Erfüllung gingen, bevor nicht noch viele weitere Studien zu Hilfe kamen.

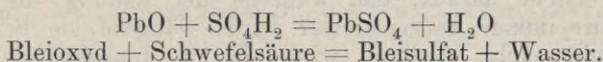
Es bedurfte einer eingehenden Untersuchung der Vorgänge in den Akkumulatoren, sowohl bei der Ladung als bei der Entladung, ehe es gelang, Konstruktionen von Akkumulatoren zu finden, welche eine wirkliche technische Verwendung derselben im großen mit wirklichem Nutzen gestatten.

Zunächst zeigt es sich, daß der chemische Vorgang in einem Akkumulator nicht so einfach ist, wie oben angenommen wurde. Wenn ein Akkumulator formiert ist, so ist seine positive Platte bedeckt mit Bleisuperoxyd, mit der wirksamen Masse, welche schokoladenfarben aussieht, während die negative Platte aus Blei und zwar in aufgelockertem

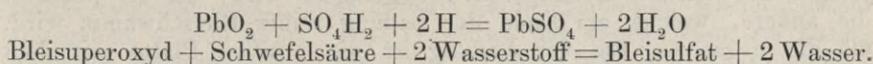
Zustand, Bleischwamm, besteht und grau aussieht. Wird nun das Element geschlossen, geht also der Entladungsstrom durch dasselbe, so wird zunächst durch den an der braunen Elektrode auftretenden Wasserstoff Bleioxyd (PbO) gebildet, nach der Formel



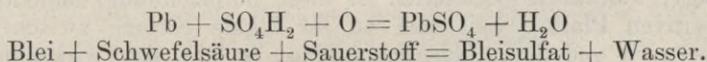
Das Bleioxyd aber verbindet sich sofort mit der Schwefelsäure zu schwefelsaurem Blei (PbSO_4) und Wasser nach der Formel



Im ganzen entstehen also, wenn 2 Atome Wasserstoff (2 H) an die positive Platte herankommen, an dieser Elektrode auch 2 Moleküle Wasser, nämlich zuerst eines bei der Reduktion des Bleisuperoxyds in Bleioxyd und dann noch eines bei der Bildung des Sulfats, also schreibt sich der ganze Vorgang an der positiven Platte

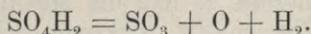


An der negativen Elektrode, dem reinen Blei, entsteht durch den auftretenden Sauerstoff auch zunächst Bleioxyd, und dieses bildet sich mit der Schwefelsäure ebenfalls zu Bleisulfat und Wasser um, nämlich nach der Formel



Der Prozeß bei der Entladung ist also folgender:

1. Ein Molekül Schwefelsäure wird elektrolytisch zerlegt, nach der Formel

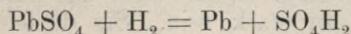


Da SO_3 nicht frei bestehen kann, so nimmt es aus der Lösung 1 Molekül Wasser auf und bildet wieder SO_4H_2 . Im ganzen wird also der Lösung 1 Molekül Wasser entzogen und O und H_2 treten an die Elektroden.

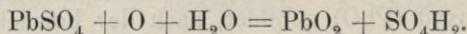
2. An beiden Elektroden bildet sich Bleisulfat und zugleich treten an der positiven Elektrode 2 Moleküle, an der negativen 1 Molekül Wasser in die Lösung ein, die sich also, abzüglich des einen vorher gebrauchten Moleküls, um 2 Moleküle Wasser bereichert.

Bei der Entladung wird also die Lösung verdünnt, indem sich der Wassergehalt vermehrt, der Gehalt an Schwefelsäure vermindert.

Bei der folgenden Ladung nun finden wir zwei mit Bleisulfat bedeckte Elektroden. Die Schwefelsäure in der Lösung wird zerlegt und das Resultat ist jetzt das umgekehrte. Ein Molekül Wasser wird der Lösung entnommen und der auftretende Wasserstoff an der negativen Elektrode bildet mit dem Bleisulfat Blei und 1 Molekül Schwefelsäure nach der Formel



und an der positiven Elektrode verbindet sich der Sauerstoff mit dem Bleisulfat und 1 Molekül Wasser aus der Lösung zu Bleisuperoxyd und Schwefelsäure:



Daher tritt nach der Ladung wieder Bleisuperoxyd und Blei an den Elektroden auf. Die Lösung der Schwefelsäure ist aber konzentrierter geworden, indem ihr 2 Moleküle Wasser entzogen, dafür aber 1 Molekül Schwefelsäure (SO_4H_2) zugeführt wurden.

Man ersieht daraus, daß während der Ladung die verdünnte Schwefelsäure immer konzentrierter wird, während sie bei der Entladung wieder mehr verdünnt wird. Da die konzentrierte Schwefelsäure größeres spezifisches Gewicht hat als die weniger konzentrierte, so kann man durch ein Aräometer, mittels dessen man das spezifische Gewicht bestimmt, immer den Grad der Ladung des Akkumulators fortlaufend kontrollieren.

Von den beiden Platten des Akkumulators bezeichnet man diejenige, auf welcher Bleisuperoxyd abgelagert wird, als die positive, die andere, welche am Ende der Ladung reiner Bleischwamm wird, als die negative. Bei der Ladung ist die positive Platte mit dem positiven Pol der ladenden Batterie zu verbinden. Bei der Entladung geht der positive Strom nach außen von der positiven zur negativen Platte. Beide Platten werden durch die Schwefelsäure schon während des Stehens zum Teil in schwefelsaures Blei umgewandelt oder, wie man sagt, sulfatiert. Schädlich ist diese Sulfatbildung namentlich an der positiven Platte, weil sich an ihr lokale Ströme zwischen dem Bleisuperoxyd und dem Bleisulfat bilden, welche das wirksame Bleisuperoxyd zerstören. Außerdem lockern diese Bleisulfateilchen, die sich beim Stehen bilden, bei dem Faureschen Verfahren leicht, wenn man nicht besondere Vorsichtsmaßregeln trifft, die Verbindung der Mennige mit den Bleiplatten, so daß die Mennige sich allmählich von der Bleiplatte ablöst und so die wirksame Schicht vermindert wird. Dazu kommt noch, daß sich die abgefallenen Stücke auf dem Boden des Gefäßes sammeln und bald eine leitende Verbindung zwischen den beiden Platten, also einen Kurzschluß bilden. Aus diesem Grunde gingen die ersten Akkumulatoren, die nach dem Faureschen Verfahren hergestellt wurden, rasch zu Grunde und man lernte erst allmählich durch besondere Konstruktion und Anbringung der Bleiplatten dieser Übelstände Herr zu werden.

Ferner zeigte es sich, daß es für die Dauerhaftigkeit und den Nutzeffekt der Akkumulatoren durchaus nicht gleichgültig ist, ob sie mit starken oder schwachen Strömen geladen werden. Es wird ja bei der Ladung das Bleisuperoxyd einerseits und das reine Blei andererseits durch die Aufnahme der Gase, Sauerstoff und Wasserstoff, gebildet. Hat nun ein Akkumulator eine bestimmte Oberflächengröße seiner Elektroden, so können diese in jedem Zeitabschnitt nur eine bestimmte Menge Gas zu ihrer Umbildung (Oxydation oder Reduktion) brauchen. Wird mehr Gas entwickelt, so entweicht das nutzlos. Also dürfen die Ladungsströme nicht zu stark sein. Sie dürfen aber auch nicht zu

schwach sein, weil bei der dann stattfindenden langsamen Oxydation die Lokalströme an der positiven Platte zu sehr wirksam werden. Es gibt also für jede Plattengröße eine bestimmte Stromstärke, bei welcher geladen werden soll, und diese wird jetzt von den Fabriken immer angegeben.

Die gesamte Elektrizitätsmenge, die in einem bestimmten Akkumulator aufgespeichert ist, bezeichnet man, wie gesagt, als die Kapazität des Akkumulators. Und zwar versteht man genauer unter der Kapazität eines Akkumulators die gesamte Elektrizitätsmenge, welche der Akkumulator in Form von Strom bei der Entladung abgeben kann. Man drückt diese gewöhnlich in Ampèrestunden aus. Ein Element z. B., welches eine Kapazität von 600 Ampèrestunden hat, kann einen Strom von 120 Ampère 5 Stunden lang geben, oder einen Strom von 60 Ampère 10 Stunden lang u. s. w. Natürlich soll dabei die höchste zulässige Stromstärke nicht überschritten werden.

Wie viel Elektrizität in einem Akkumulator aufgespeichert werden kann, wie groß also seine Kapazität ist, das hängt natürlich von seiner Größe ab. Eine wesentlichere Frage ist aber die, wie viel von der aufgespeicherten elektrischen Energie bei der Entladung wieder nutzbar abgegeben werden kann. Das Verhältnis der abgegebenen zur aufgewendeten Energie nennt man den Nutzeffekt des Akkumulators. Dieser Nutzeffekt wird um so größer, je besser präpariert das Element ist.

Um die Menge der aufgespeicherten Energie zu finden, bestimmt man die Spannung an den Polen des Elements während der Ladung und die Stärke des Stromes, mit dem man ladet. Das Produkt dieser Größen gibt die in jeder Sekunde auf den Akkumulator übertragene elektrische Energie in Watt. Diese, multipliziert mit der gesamten Ladungszeit, gibt die gesamte aufgespeicherte Energie. Man drückt diese gewöhnlich in Wattstunden aus, indem man den Effekt in Watt mit der Ladungszeit in Stunden multipliziert.

Ebenso bestimmt man die bei der Entladung des Akkumulators abgegebene Energie als das Produkt aus der Spannung des Akkumulators bei der Entladung, der Stromstärke bei der Entladung und der Entladungszeit. Auch diese Energie wird in Wattstunden ausgedrückt. Das Verhältnis der Zahl Wattstunden bei der Entladung zu der bei der Ladung ist also der Nutzeffekt des Akkumulators.

Ein Beispiel wird diese Berechnung klar machen. Einer von den unten beschriebenen Tudor-Akkumulatoren wurde 10,16 Stunden lang mit einem Strom von 5 Ampère geladen. Die mittlere Spannung des Akkumulators war dabei 2,15 Volt. Mithin war die aufgespeicherte Energie:

$$10,16 \times 2,15 \times 5 = 109,2 \text{ Wattstunden.}$$

Bei der Entladung hatte der Akkumulator eine Spannung von 1,88 Volt im Mittel und gab einen Strom von 6,5 Ampère. Diese Entladung dauerte so lange, als der Akkumulator noch nutzbare Arbeit liefern konnte, und zwar waren dies 7,35 Stunden. Mithin war die abgegebene Energie:

$$7,35 \times 1,88 \times 6,5 = 89,8 \text{ Wattstunden.}$$

Das Verhältnis beider, nämlich hier

$$\frac{89,8}{109,2} = 0,822,$$

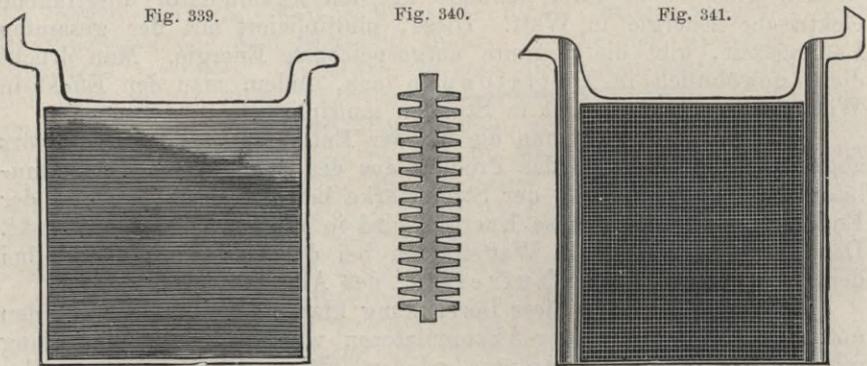
gibt den Nutzeffekt des Akkumulators, der also hier 82,2 Proz. beträgt.

Die vielfachen Anstrengungen, die Akkumulatoren zu verbessern, ihren Nutzeffekt und ihre Haltbarkeit zu erhöhen, haben allmählich zu dem Resultat geführt, daß man leicht und sicher 80 bis 85 Proz. der eingeführten Arbeit von den Akkumulatoren wieder erhält.

Dabei beruhen die verschiedenen Anordnungen, die man dem Akkumulator gegeben hat, im wesentlichen auf dem Verfahren von Planté und auf dem von Faure, die man zweckmäßig kombiniert.

Die Fauresche Präparation mit Mennige zeigte den Übelstand, daß die Mennige leicht von den Bleiplatten abfiel. Dieses lernte man allmählich dadurch vermeiden, daß man die Platten gitterförmig machte.

Am meisten verbreitet sind in Deutschland die sogenannten Tudor-Akkumulatoren, welche von der Akkumulatorenfabrik in Hagen i. W. fabriziert werden und welche sich durch großen Nutzeffekt und sehr große Haltbarkeit auszeichnen. Die Bleiplatten dieser Elemente sind im wesentlichen nach dem Verfahren von Planté formiert. Die positiven Bleiplatten sind aber nicht eben, sondern, wie Fig. 339 zeigt, mit horizontalen, sehr tiefen Nuten versehen. Fig. 340 zeigt den Querschnitt einer solchen Platte, also die Tiefe der Rippen. Diese Bleiplatten, die durch Gießen hergestellt werden, werden nun



2 bis 3 Monate lang durch fortwährende Ladung, Entladung, Ladung im entgegengesetzten Sinne, Entladung u. s. w. formiert, so daß sich die positiven Platten mit einer $\frac{1}{2}$ mm starken Bleisuperoxydschicht bedecken. Diese Schicht haftet ungemein fest an dem Bleikern. Auf diese so formierte Schicht wird nun, in die Rippen der Platten, Mennige eingetragen und diese wird nun noch 14 Tage lang durch den Strom in Bleisuperoxyd verwandelt, welches dann ebenfalls ganz fest an den Platten haftet.

Die negativen Platten, welche Fig. 341 zeigt, sind gitterförmig

ausgearbeitet und in die Maschen wird Bleiglätte gefüllt, welche bei der Ladung vollständig in Bleischwamm umgewandelt wird.

Die Bleiplatten werden gleich in der Form gegossen, daß sie, wie die Figuren zeigen, rechts und links je eine vorspringende Nase haben, mit denen sie dann in die Gefäße eingesetzt werden.

Eine Zahl formierter positiver und eine Zahl negativer Platten, je miteinander verlötet, werden nun in ein Gefäß aus Holz oder Glas gebracht, das mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist. Dabei wird immer von den negativen Platten eine mehr genommen, so daß jede positive Platte zwischen zwei negativen hängt.

Fig. 342 zeigt einen solchen Akkumulator in einem Glasgefäß. Die Platten (hier 3 positive und 4 negative) sitzen alle mit den Nasen auf dem Rand des Gefäßes auf. Je zwei benachbarte Platten sind durch zwischengeschobene Glasröhren an der Berührung gehindert und voneinander isoliert.

Jede Zelle selbst wird auf Glasfüße, die mit einer Kautschukscheibe bedeckt sind, gestellt. Die Bleileiste der negativen Platten der einen Zelle ist so lang, daß sie, wie Fig. 343 zeigt, gleichzeitig die positiven Platten der nächsten

Fig. 342.

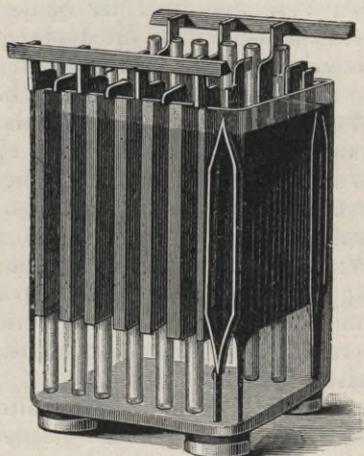
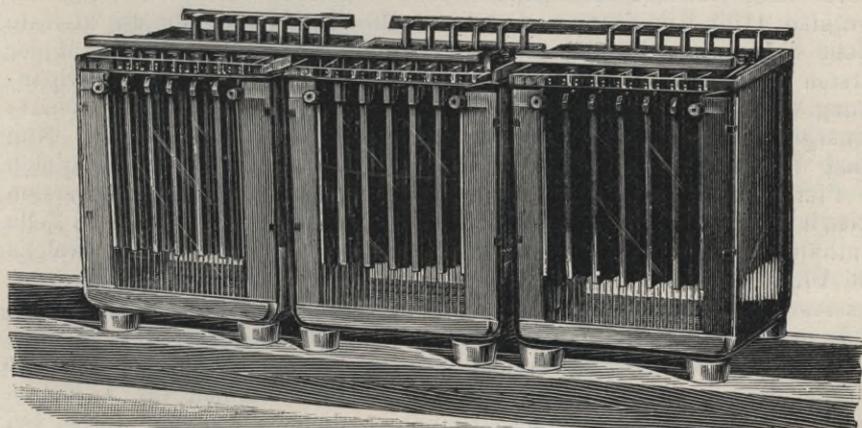


Fig. 343.



Zelle aufnimmt. Die Verbindung der Platten geschieht nur durch Löten. Vielplattige Akkumulatoren werden in Holzgefäßen montiert, die mit Blei ausgeschlagen sind.

Je nach der Größe der Platten ist für jeden Akkumulator eine

bestimmte maximale Stromstärke beim Laden und Entladen vorgeschrieben. Wird ein solcher Akkumulator mit der vorgeschriebenen Stromstärke geladen, so erhält er wenige Minuten nach Beginn der Ladung eine Spannung von 2,09 Volt. Diese Spannung bleibt ungefähr 6 Stunden lang während der Ladung dieselbe, um dann während der nächsten 4 Stunden langsam auf 2,34 Volt zu steigen. (Diese Änderung rührt natürlich von den Veränderungen der Säure her.) Wenn dieser Wert der Spannung erreicht ist, muß die Ladung aufhören, da weitere Ladung nutzlose Gasentwicklung hervorbringt. Wird dann die Entladung vorgenommen, so ist die Anfangsspannung bei der Entladung 1,95 Volt. Daß dieser Wert so viel kleiner ist als der bei der Ladung erreichte, kommt daher, daß die Elektroden sich bei der Ladung mit Schichten von Wasserstoff resp. Sauerstoff beziehen, woher der große Wert der Spannung beim Laden rührt. Im ersten Moment der Entladung werden diese Schichten neutralisiert und es tritt die kleinere Spannung in Wirksamkeit. Bei normalem Entladungsstrom bleibt die Spannung lange Zeit auf 1,95 Volt und sinkt dann allmählich in 6 bis 7 Stunden von 1,95 Volt auf den Wert 1,75 Volt herab. Wenn dieser Wert erreicht ist, muß man die Entladung abbrechen und die Akkumulatoren frisch laden.

Die Akkumulatoren halten am besten, wenn sie mit der vorgeschriebenen Stromstärke geladen und entladen werden. Aber es schadet ihnen auch nicht sehr, wenn man sie mit höherer Stromstärke entladet. Nur darf man darin nicht zu weit gehen. Ein Kurzschluß, d. h. eine Entladung mit sehr großer Stromstärke, ruiniert die Platten. Bei den kleinsten fabrizierten Akkumulatoren beträgt die maximale Stromstärke bei der Ladung und Entladung 6 Ampère. Bei den größten hat der Ladungsstrom 6253 Ampère, der Entladungsstrom sogar 10212 Ampère. Das Gewicht der kleinsten Akkumulatoren beträgt 13, das der größten 4100 Kilogramm. Dabei ist die Entladezeit für die kleinste Zelle 3 Stunden, für die größte 1 Stunde, so daß die Kapazität der ersten 18, der letzten 10212 Ampèrestunden beträgt. Da die Spannung eines Akkumulators 2 Volt beträgt, so ist die aufgespeicherte Energie in der ersten 36, in der zweiten 20424 Wattstunden. Nun sind 736 Watt gleich 1 Pferdekraft, also 736 Wattstunden gleich 1 Pferdestunde und daher ist die aufgespeicherte Arbeit in der ersten gleich 0,05, in der zweiten gleich 28 Pferdestunden. Die letztere Zelle enthält also die Arbeit in sich und kann sie wieder abgeben, welche 28 Pferde während 1 Stunde, oder 14 während 2 Stunden u. s. w. leisten. Pro Kilogramm Gewicht der Zelle sind in der kleinsten Zelle 2,7, in der größten 5 Wattstunden aufgespeichert. Das ist eine verhältnismäßig sehr geringe Arbeitsansammlung pro Kilogramm Gewicht. In der Tat gelten auch die oben angeführten Zahlen für Akkumulatoren, welche fest stehen, sogenannte stationäre Akkumulatoren, bei denen es auf die Größe des Gewichtes nicht sehr ankommt. Da jedoch in den letzten Jahren das Bedürfnis nach fahrbaren und tragbaren Akkumulatoren immer größer wurde, so bemühten sich die verschiedenen Fabriken, das Gewicht derselben bei gleicher Kapazität möglichst zu reduzieren. Die Hagener Akkumulatorenfabrik stellt zu

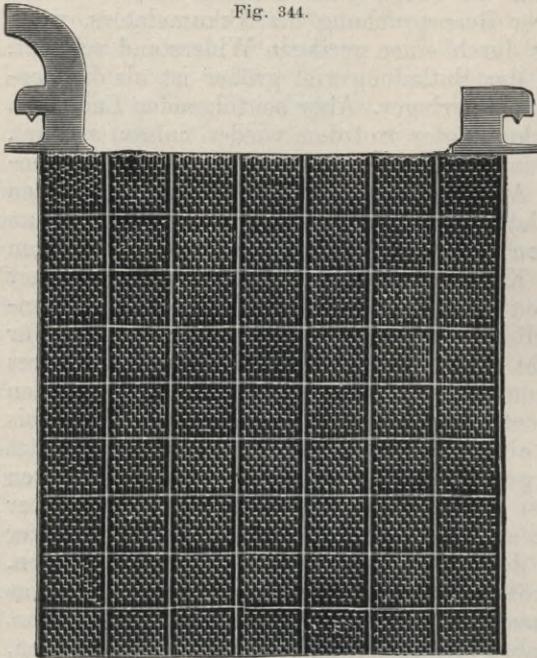
dem Zweck Zellen her, welche 22 bis 130 Ampèrestunden Kapazität und dabei ein Gewicht von 8,1 bis 39 Kilogramm besitzen. Auf jedes Kilogramm der Zelle kommen also dabei 5 bis 7 Wattstunden Arbeit.

Der Nutzeffekt dieser Akkumulatoren, d. h. das Verhältnis der bei der Entladung erhaltenen Wattstunden zu den bei der Ladung hineingegebenen, ist ca. 82 bis 85 Proz., wenn Ladung und Entladung normal waren. Bei stärkerer Beanspruchung des Akkumulators, wenn man etwa den Akkumulator durch einen geringen Widerstand schließt, so daß die Stromstärke bei der Entladung viel größer ist als die normale, ist natürlich der Nutzeffekt geringer. Aber bei folgenden Ladungen und Entladungen ist der Akkumulator trotzdem wieder nahezu normal, falls man nicht die Entladung zu rasch, d. h. mit zu großer Stromstärke vorgenommen hat. Auch in dieser Hinsicht hat man in den letzten Jahren die Akkumulatoren zu verbessern gesucht, indem man die Stromstärken, mit denen ein Akkumulator geladen oder entladen werden soll, bei gleicher Kapazität derselben möglichst vergrößert hat. Da die Akkumulatoren jetzt vielfach zum Betrieb von Trambahnen und Automobilen dienen und ihre weitere Verwendung für diese Zwecke sehr erwünscht ist, so ist neben der Verringerung ihres Gewichtes eine Hauptforderung die, daß sie möglichst schnell geladen werden können, wenn sie entladen sind. Während man früher 3 bis 6 Stunden Ladungszeit für einen Akkumulator rechnete, ist man jetzt auf $\frac{1}{2}$ bis 1 Stunde heruntergegangen, d. h. man darf mit viel stärkeren Strömen laden, als es früher erlaubt war, ohne daß der Akkumulator geschädigt wird. Ebenso ist auch der erlaubte Entladungsstrom stärker als früher, d. h. man kann dem Akkumulator, ohne ihn zu ruinieren, in kurzer Zeit sehr viel größere elektrische Energie entnehmen, was beim Betrieb der Trambahnen und Automobilen von erheblichem Wert ist. Diese Verbesserung haben die Akkumulatoren dadurch erfahren, daß bei gleicher Plattengröße die wirksame Oberfläche, d. h. die gesamte dem Angriff der Gase ausgesetzte Oberfläche des körnigen und schwammigen Superoxyds bedeutend größer gemacht wurde.

Nicht bloß die Akkumulatoren der Hagener Fabrik haben in diesen beiden Richtungen Fortschritte gemacht, sondern auch die aller anderen deutschen Fabriken. Die von diesen hergestellten Akkumulatoren sind alle Bleiakkumulatoren und unterscheiden sich von den angeführten durch die Art der Herstellung der Bleiplatten und durch die Montierung derselben.

Es seien von diesen die Pollak-Akkumulatoren der Akkumulatorenwerke Pollak in Frankfurt a. M. erwähnt. Bei diesen werden die Platten in folgender Weise hergestellt. In Bleiplatten werden, wie Fig. 344 zeigt, durch ein Walzwerk Muster eingewalzt, so daß die gewalzten Platten von Längs- und Querrippen durchzogen sind und eine große Zahl von vorstehenden Zäpfchen auf der Oberfläche besitzen. In die Lücken wird nun besonders präpariertes metallisches, aber sehr poröses Blei eingefüllt, so daß die Oberfläche der Platten nach dieser Einfüllung wieder eben wird. Das poröse Blei wird dadurch hergestellt, daß es aus kohlen-saurem Blei in alkalischer Lösung durch Elektrolyse abgeschieden wird. Die so mit sehr porösem Blei

belegten Platten, bei denen aber dieses Blei an der Bleiunterlage festhaftet, werden dann in verdünnter Schwefelsäure nach dem Plantéschen Verfahren behandelt, wodurch die Bleischicht in Bleisuperoxyd verwandelt wird. An die gewalzten Platten werden Bleiansätze mit Nasen angelötet, zum Einhängen der Platten in die Gefäße und zur Verbindung derselben.



Für stationäre Anlagen wiegt dabei z. B. eine Zelle für 2346 Ampèrestunden Kapazität 810 Kilogramm, eine solche für 66 Ampèrestunden 29 Kilogramm, so daß auf 1 Kilogramm 4,8 bis 5,8 Wattstunden kommen. Für fahrbare Akkumulatoren hat eine Zelle von 96 Ampèrestunden 32 Kilo Gewicht, so daß bei ihr auf 1 Kilo 6 Wattstunden Energie treffen.

Andere Firmen sind in Bezug auf die Reduzierung des Gewichts für fahrbare Akkumulatoren noch weiter gekommen. So geben die Akkumulatorenwerke vormals Boese in Berlin an, daß eine Zelle von 85 Ampèrestunden Kapazität 9,5 Kilo wiege,

was pro Kilo ca. 18 Wattstunden ausmacht. Jedoch dürfte dieses das Außerste sein, was mit Bleiakkumulatoren zu erreichen ist. Im Durchschnitt kann man etwa in einem solchen Akkumulator pro Kilogramm 8,5 bis 12,5 Wattstunden, im Mittel also 10 Wattstunden aufspeichern. Da 1 Watt gleich 1 Volt \times 1 Ampère, und da ferner 1 Ampère gleich 1 Coulomb dividiert durch eine Sekunde ist, so ist 1 Wattsekunde

gleich 1 Volt \times 1 Coulomb, also nach S. 16 gleich $\frac{1}{9,81}$ Kilogramm-meter. Folglich ist eine Wattstunde gleich $\frac{60 \times 60}{9,81} = 367$ Kilogramm-

meter und ein Bleiakkumulator kann also pro Kilogramm seines Gewichtes 3670 Kilogramm-meter Arbeit leisten. Er könnte also sein eigenes Gewicht auf 3670 Meter in die Höhe heben.

Andere brauchbare Akkumulatoren als solche mit Bleiplatten sind bisher nicht erfunden worden, oder wenigstens nicht im Gebrauch. Dagegen verlautet seit geraumer Zeit, daß Edison jetzt einen auf ganz anderen chemischen Vorgängen basierenden Akkumulator konstruiert habe und, obwohl die praktische Brauchbarkeit desselben noch nicht bewährt ist, so hat doch der Name Edisons einen solchen Klang, daß

vielleicht vermutet werden kann, daß ihm auch in dieser Beziehung ein großer Fortschritt zu verdanken sein werde.

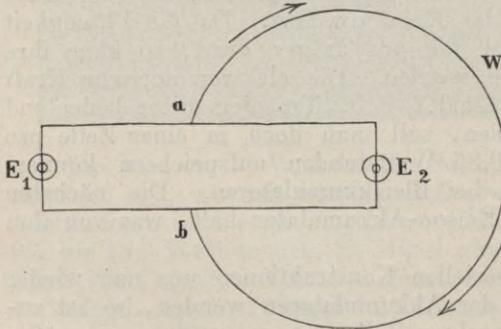
Der Edison-Akkumulator ist eine Nickeleisenzelle, mit Kalilauge als Flüssigkeit. Er besteht aus dünnen Platten aus Stahlblech, welche nur als Träger der wirksamen Massen dienen. In diese Platten sind rechteckige Löcher, Fenster, eingeschnitten, welche von Kästchen aus sehr dünnem Stahl mit den wirksamen Massen ausgefüllt werden, und zwar werden diese Massen in Form von Briketts in die Kästchen gelegt und das Ganze, Blech mit Kästchen und Briketts unter hohem Druck zusammengedrückt. Die Briketts auf der einen Platte bestehen aus einer sehr fein gepulverten Eisenverbindung (es wird nicht mitgeteilt, welche das ist), die der anderen Platte aus einer fein gepulverten Nickelverbindung. Beide Briketts enthalten noch Graphit beigemischt, um die Leitungsfähigkeit des Ganzen zu erhöhen, was allerdings eine ziemlich zweifelhafte Angabe ist. Wenn nun ein Strom durch die Flüssigkeit gesendet wird, so zerlegt dieser zwei Moleküle Kalilauge (KOH) und es tritt an der Nickelelektrode Sauerstoff auf, welcher die Nickelverbindung in Nickelsuperoxyd verwandelt, während an der Eisenelektrode die dortige Eisenverbindung reduziert wird; zugleich bilden sich die zwei Moleküle Kalilauge wieder, indem an der einen Elektrode ein Wassermolekül zersetzt, an der anderen gebildet wird. Das Resultat ist also, daß die Flüssigkeit sich gar nicht ändert, sondern daß nur dem Eisen ein Sauerstoffatom weggenommen und dieses dem Nickel zugeführt ist. Ist die Zelle nun geladen und verbindet man jetzt die Elektroden, so fließt der Entladungsstrom, der umgekehrt das Nickel wieder reduziert, das Eisen oxydiert. Da die Flüssigkeit nicht verändert wird, sondern nur als Träger dient, so kann ihre Menge sehr gering genommen werden. Die elektromotorische Kraft einer Zelle bei der Entladung ist 1,1 Volt. Trotzdem diese bedeutend kleiner ist als bei Bleielektroden, soll man doch in einer Zelle pro Kilogramm Gesamtgewicht 30,85 Wattstunden aufspeichern können, also ca. dreimal so viel wie bei Bleiakkulatoren. Die nächsten Jahre müssen lehren, ob der Edison-Akkumulator hält, was von ihm versprochen wird.

Wenn wir von diesen speziellen Konstruktionen uns nun wieder zu allgemeinen Eigenschaften der Akkulatoren wenden, so ist zunächst die Kapazität einer einzelnen Zelle um so größer, je größer ihre Platten sind und je mehr miteinander verbundene, also nebeneinander geschaltete Platten sie enthält. Sind mehrere gleiche Zellen zu einer Batterie hintereinander geschaltet, wie in der obigen Fig. 343, so ist die Kapazität der Batterie (in Ampèrestunden) doch bloß gleich der Kapazität einer einzigen Zelle. Durch die Hintereinanderschaltung wird nur die Spannung der Batterie, also die Spannung des Stromes vergrößert, aber nicht die Kapazität im ganzen. Fließt nämlich z. B. bei einer Batterie von 10 hintereinander geschalteten Akkulatoren ein Strom von 8 Ampère durch den äußeren Schließungskreis, so fließt derselbe Strom auch in jeder Zelle, und in jeder Zelle wird pro Sekunde die gleiche Menge Bleisuperoxyd durch den auftretenden Wasserstoff reduziert. Hat also jede Zelle z. B. die Kapazität von 40 Am-

pèrestunden, so ist nach 5 Stunden die ganze Batterie erschöpft, da jede einzelne Zelle erschöpft ist. Der Strom von 8 Ampère hat aber hier die Spannung von 20 Volt ungefähr, während er bei einer einzigen Zelle nur die Spannung von 2 Volt hätte. Die Batterie hat also $20 \times 40 = 800$ Wattstunden Effekt, während jede einzelne Zelle 80 Wattstunden aufgespeichert enthält.

Zur Ladung von Akkumulatoren kann man natürlich Gleichstrommaschinen aller Art nehmen. Aber am zweckmäßigsten wendet man dazu Nebenschlußdynamos an. Da nämlich der Akkumulatorenstrom dem Maschinenstrom bei der Ladung entgegenfließt, so wird der Akkumulator nur dadurch geladen, daß die Dynamomaschine eine höhere elektromotorische Kraft hat als der Akkumulator. Wenn aus irgend einem Grunde, z. B. durch Nachlassen der Geschwindigkeit des Gasmotors, durch Gleiten eines Riemens u. s. w. die Geschwindigkeit der Dynamomaschine sich verringert, also auch ihre elektromotorische Kraft abnimmt, so kann es vorkommen, daß momentan der Akkumulatorenstrom überwiegt. Dann werden aber bei Hauptstrommaschinen und bei Compoundmaschinen sofort die Magnete der Maschine ummagnetisiert und diese bleiben dann ummagnetisiert, auch wenn sich die Geschwindigkeit der Dynamomaschine wieder erhöht. Der Strom fließt dann also in umgekehrter Richtung durch den Akkumulator und statt ihn zu laden, entladet er ihn. Bei Nebenschlußmaschinen aber kann

Fig. 345.



das nicht stattfinden, denn dabei bleibt der Strom um die Elektromagnete immer unverändert in seiner Richtung, mag nun der Maschinen- oder der Akkumulatorenstrom zeitweise überwiegen. Betrachten wir, um das einzusehen, das Schema in Fig. 345, in welchem bei E_1 und E_2 zwei verschieden starke elektromotorische Kräfte wirken. Bei a und b zweige sich ein Widerstand w ab.

(E_1 ist der Akkumulator, E_2 der Anker der Dynamomaschine, w die Magnetbewicklung der Maschine.) Ist nun E_2 stärker als E_1 und fließt der positive Strom von E_2 über a nach E_1 , so hat a positive Spannung, b negative. In w fließt also der Strom in Richtung des Pfeiles. Ist umgekehrt E_1 stärker als E_2 , so fließt zwischen E_1 und E_2 der Strom in entgegengesetzter Richtung, von E_1 über a nach E_2 . Folglich hat auch dann wieder a positive Spannung, b negative und folglich fließt der Strom in w wiederum in Richtung des Pfeiles wie früher. Dieses Schema läßt sich ohne weiteres auf die Verbindung einer Nebenschlußdynamomaschine mit einem Akkumulator übertragen. Welche elektromotorische Kraft auch überwiege, die der Maschine oder

die des Akkumulators, stets fließt im Draht w , d. h. hier um die Magnete, der Strom in derselben Richtung. Der Strom der Maschine kehrt sich mithin nicht dauernd um, wenn er auch zuweilen durch Geschwindigkeitsschwankungen sich momentan umkehren kann.

Bei jeder Anlage von Akkumulatoren muß nun zunächst eine Schaltung eingerichtet werden, welche es ermöglicht, einerseits die Akkumulatoren mit einer Dynamomaschine so in Verbindung zu bringen, daß die ersteren geladen werden, und andererseits die Akkumulatorenatterie mit denjenigen Apparaten (Glühlampen, Bogenlampen oder Elektromotoren etc.) zu verbinden, in welche sie den Strom abgeben soll. Und zwar sollen diese Verbindungen einfach durch bloße Umdrehung eines Hebels oder Umschaltung eines Stöpsels ausgeführt werden können. Ferner muß sowohl für die Ladung als für die Entladung ein Ampèremeter vorhanden sein, und ein Spannungsmesser (Voltmeter), welche beiden Apparate stets anzeigen, ob der Akkumulator in Ordnung ist. Zur Regulierung der Stromstärke braucht man ferner noch einen Regulierwiderstand, der für die im allgemeinen starken Ströme eingerichtet sein muß. Und endlich,

wenn es sich bei großen Anlagen darum handelt, die Spannung an den Enden der Akkumulatorenatterie dauernd konstant zu halten, obwohl die Spannung jeder einzelnen Zelle allmählich abnimmt, gehört noch ein sogenannter Zellenschalter dazu, welcher neue Zellen ein- und ausschaltet. Wenn nämlich z. B. 60 Akkumulatoren vorhanden sind und die Spannung, welche für die Lampen etc. gebraucht wird, 110 Volt betragen soll, so werden im Anfang, wo jede Zelle 1,95 Volt Spannung hat, nur 56 Zellen einzuschalten sein, wenn aber dann die Spannung jeder Zelle auf 1,80 Volt abgenommen hat, so werden 60 Zellen einzuschalten sein. Diese Zuschaltung wird durch den Zellenschalter entweder mit der Hand oder automatisch besorgt.

Die Zellenschalter bestehen, äußerlich angesehen, wie Fig. 346 zeigt, aus einer Reihe von Kontaktstücken, welche gewöhnlich im Kreise auf einer Schieferplatte angebracht sind und auf welchen ein Kontakthebel verschoben werden kann. Jede von den abzuschaltenden oder zuzuschaltenden Zellen steht durch einen Draht mit einem der Kontaktstücke in Verbindung. Wie der Zellenschalter wirkt, das geht am besten aus der Fig. 347 hervor, in welcher eine Akkumulatorenatterie AB gezeichnet ist, von der die letzten 10 Zellen durch je einen Draht mit den Kontaktstücken des Zellenschalters verbunden sind. Der eine Hauptleitungsdraht a in die äußere Leitung (Lampen in der Figur) geht vom Anfang A (+ Pol) der Batterie aus, der andere b von dem Kontakthebel H des Zellenschalters. Bei der in der Figur gezeichneten Stellung sieht man nun, daß alle Zellen von A an bis

Fig. 346.

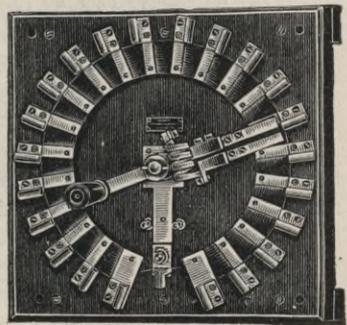
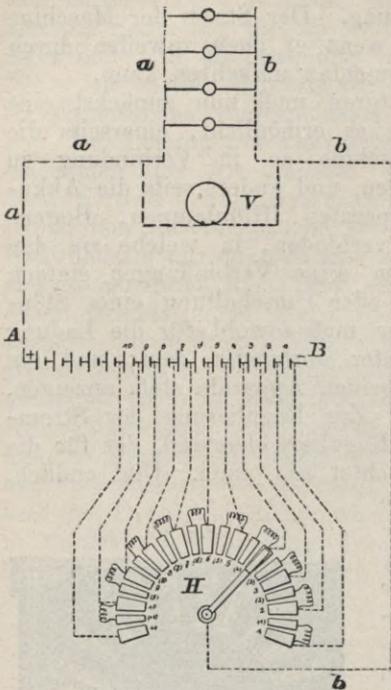


Fig. 347.



zur Zelle 4 den Strom in die Leitung senden, während die Zellen 1, 2, 3 abgeschaltet sind. V ist ein Voltmeter.

Will man eine Akkumulatorenbatterie laden, während man zugleich von ihr Strom (etwa für Glühlampen) abnimmt, so muß man zwei Zellenschalter anwenden, deren erster die eben erörterte Funktion hat, die Spannung für die Lichtleitung konstant zu erhalten, während der andere diejenigen Zellen, welche für die Lichtleitung nicht gebraucht und daher rascher geladen werden, ganz ausschaltet, wenn sie vollkommen geladen sind.

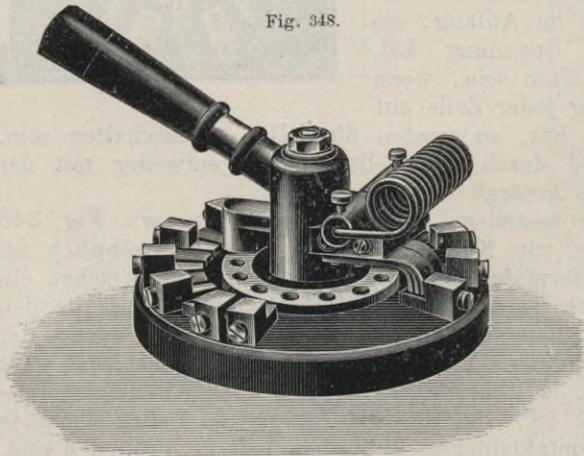
Die Zellenschalter werden zuweilen auch stehend angeordnet. Eine elegante Form zeigt z. B. Fig. 348, welche einen Zellenschalter von Voigt & Häffner in Bockenheim (Frankfurt) darstellt.

Die notwendigen Apparate zur Messung und zur Ein- und Ausschaltung des Stromes werden gewöhnlich

auf einer sogenannten Schalttafel angebracht. Die Vorrichtungen zum Ein- und Ausschalten des Stromes oder zum Umschalten des-

selben von einer Leitung auf eine andere müssen natürlich für die starken Ströme, mit denen man es in der Praxis gewöhnlich zu tun hat, besonders kräftig und sorgfältig konstruiert sein. So zeigt Fig. 349 einen Hebelausschalter der A.E.G. im geöffneten Zustand. Auf dem an der Wand zu befestigenden Brett befinden sich eng aneinander stehend

Fig. 348.



zwei federnde starke Messingbacken, zwischen welche das an dem Handgriff befestigte Messingstück eingeschoben werden kann. Die Leitung, welche nach Belieben geschlossen oder geöffnet werden soll,

führt unten zu der Klemme des Hebels und oben von der Klemme der Backen weiter. Um ferner einen Strom von einer Leitung auf eine andere durch eine Bewegung umzuschalten, benutzt man Umschalter, von denen Fig. 350 einen von Siemens & Halske zeigt. Ein glattes federndes Messingstück mit einem Griff kann entweder auf den rechten oder linken Kontakt, der aus einer breiten Messingfläche besteht, gedreht werden. Der Strom wird zum Hebel geführt und von diesem durch das eine oder andere Messingstück weiter in die mit diesen verbundenen Leitungen.

Die Schaltung einer Dynamomaschine, einer Akkumulatorenbatterie und einer Anzahl von Glühlampen, die sowohl von der Dynamomaschine, wie von dem Akkumulator mit Strom versehen werden sollen und zwar auch während der Ladung des Akkumulators, zeigt danach Fig. 351. Die Akkumulatorenbatterie und die Glühlampen werden parallel geschaltet. Von der Dynamomaschine aus gehen rechts und links je eine Leitung aus. Zwischen diese ist die Akkumulatorenbatterie (gewöhnlich mit einem Stromrichtungszeiger, einem einfachen Galvanoskop) eingeschaltet und oben in der Figur sind zwischen sie die Glühlampen alle parallel geschaltet und auch das Voltmeter liegt parallel zu ihnen. Der Umschalter rechts (bezeichnet mit III, IV) dient dazu, entweder den Akkumulatorenstrom allein direkt in die Lampen zu senden oder, wenn er so steht, wie in der Figur, den Maschinenstrom in den Akkumulator zu senden, diesen also zu laden, und zugleich auch den Maschinenstrom in die Lampen zu senden. Das Amperemeter links kann durch einen Umschalter V, VI entweder die Stärke des Maschinenstroms oder die des Akkumulatorenstroms anzeigen. Wir wollen die einzelnen Schaltungen bei dieser Anordnung der Reihe nach betrachten.

Erster Fall. Der Ausschalter unten steht auf I. Dann ist die Dynamomaschine ganz aus dem Stromkreis ausgeschaltet und es ist nur eine Verbindung zwischen den Akkumulatoren und den Lampen vorhanden. Der Entladezellenschalter steht auf 4, mithin sind die letzten 3 Zellen ausgeschaltet und der Strom geht vom Akkumulator durch die Zelle 4 in die Lampen, von den Lampen (bei Stellung VI des Umschalters links) in den Akkumulator zurück. Stellt man den Umschalter links auf V, so geht der Strom noch durch das Amperemeter, man kann also die Stärke des Entladungsstromes messen. Das Voltmeter, das im Nebenschluß liegt, mißt die Spannung und gibt an, wie viel Zellen man durch den oberen Zellenschalter zuschalten oder abschalten muß, damit die Spannung den vorgeschriebenen Wert (etwa 100 Volt) hat.

Fig. 349.

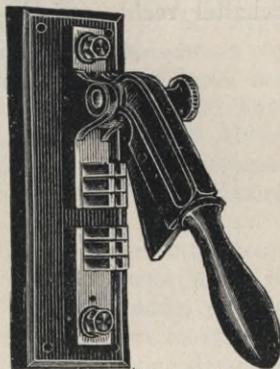
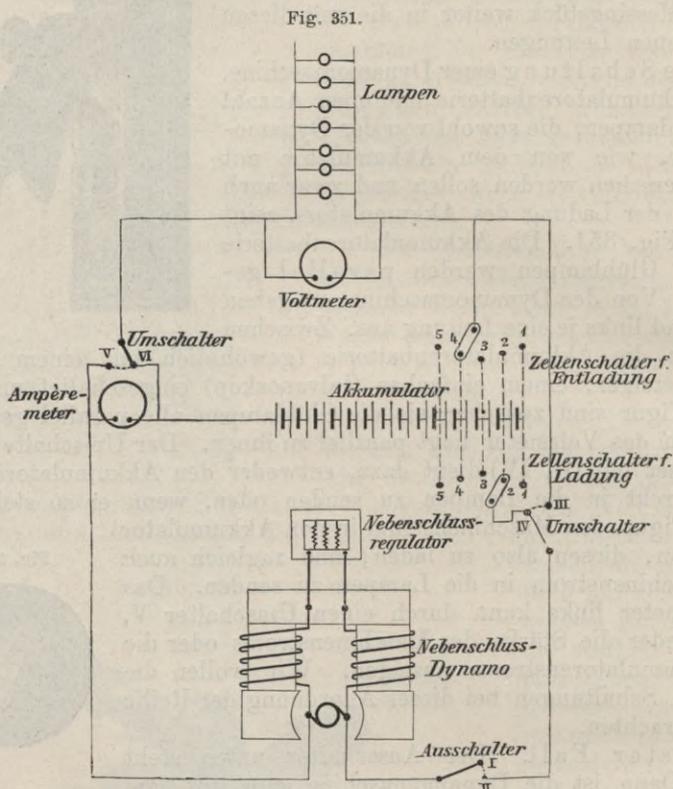


Fig. 350.



Zweiter Fall. Der Ausschalter unten steht auf II, aber der Umschalter rechts steht auf III. Dann ist der Akkumulator ganz ausgeschaltet (falls der Kontakthebel des Entladezellenschalters auf eine Isolierung gestellt ist) und der Maschinenstrom geht direkt in die Lampen. Man kann seine Stärke messen, wenn man den Umschalter links auf V stellt.

Dritter Fall. Der Ausschalter unten steht auf II, der Umschalter rechts auf IV. Dann geht der Maschinenstrom sowohl durch



den Akkumulator, wie auch durch die Lampen, und zugleich geht der Akkumulatorenstrom durch die Lampen. Und zwar ladet der Maschinenstrom alle Zellen mit Ausnahme von 1, welche abgeschaltet ist, und die Lampen werden von allen Akkumulatoren außer 1, 2, 3 gespeist. Das Ampèremeter mißt den Strom, der durch den Akkumulator geht.

Von Vorteil sind die Akkumulatoren immer dann, wenn sie die Aufspeicherung von Arbeit übernehmen können, die sonst nutzlos verloren wäre. In Fabriken z. B., in denen große Dampfmaschinen arbeiten, kann diesen im allgemeinen noch eine Dynamomaschine angehängt werden, ohne daß der eigentliche Betrieb darunter leidet. Mit der Dynamomaschine läßt sich nun eine Akkumulatorenbatterie laden,

und diese kann dann am Abend dazu benutzt werden, um elektrisches Licht zu erzeugen. Es wird dann also die Beleuchtung der Fabrik gewissermaßen durch die Abfälle der Kraft hergestellt, welche den Tag über tätig ist.

Die Akkumulatoren spielen jetzt eine höchst bedeutende Rolle in den elektrischen Zentralstationen. Diese müssen nämlich im Stande sein, täglich den Maximalbedarf an Elektrizität für die Beleuchtung in einer Stadt zu befriedigen. Dieser Maximalbedarf findet aber im wesentlichen nur in der kurzen Zeit vom Dunkelwerden bis gegen 10 Uhr Abends statt, nur in dieser Zeit werden die Maschinen voll ausgenutzt. Durch Einschalten einer Akkumulatorenbatterie kann man daher die Maschinen sehr viel kleiner wählen. Man läßt sie am Tage, wenn wenig Lichtbedarf ist, die Akkumulatoren laden und Abends unterstützen dann die Akkumulatoren die Maschine zur Befriedigung des Maximalbedarfs. Gerade in Zentralstationen sind die Akkumulatoren am meisten angewendet.

Aber auch bei Einzelanlagen ist gewöhnlich die Einrichtung einer Akkumulatorenbatterie deswegen von großem Vorteil, weil diese bei der Entladung, also wenn sie Strom abgibt, unbeaufsichtigt arbeiten kann. Es ist daher auch z. B. bei der Einrichtung von elektrischer Beleuchtung in Privathäusern, wenn diese aus einer eigenen Dynamomaschine sich den Strom erzeugen, ratsam, eine Akkumulatorenbatterie von passender Größe einzuführen. Sonst müßte z. B. die Dynamomaschine auch in der Nacht fortlaufend in Betrieb sein, wenn man auch nur eine einzige Lampe in der Nacht anzünden will, während die Akkumulatorenbatterie ohne Bedienung Tag und Nacht betriebsbereit ist, sobald sie geladen ist.

Die Bleiakkumulatoren leiden trotz ihrer jetzigen Vervollkommnung und ihrer großen Verwendbarkeit an einigen Übelständen. Diese sind ihr, trotz mancher Ermäßigungen gegen früher, immer noch hoher Preis, ihr großes Gewicht und ihre empfindliche Behandlung. Wenn auch der erste Übelstand nicht von großer Bedeutung ist, da eben trotz des hohen Preises die Anschaffung von Akkumulatoren häufig von wirtschaftlichem Vorteil ist, so sind es die beiden letzten Übelstände in manchen Fällen um so mehr. Das hohe Gewicht der Akkumulatoren und der verhältnismäßig große Raum, den sie einnehmen, zwingt dazu, sie namentlich in feststehenden Anlagen zu gebrauchen. Trambahnwagen oder Automobile mit Akkumulatoren zu belasten, hat sich trotz der Vervollkommnung, welche die Akkumulatoren für diese Zwecke erfahren haben, bisher noch nicht als so zweckmäßig bewiesen, daß man anders als in Notfällen oder da, wo es auf Kosten nicht ankommt, dieses System acceptiert. Und die Empfindlichkeit der Akkumulatoren wirkt in derselben Richtung. Man darf von Akkumulatoren, will man sie lange lebensfähig erhalten, nicht einen viel stärkeren Strom entnehmen, als er der Größe ihrer Platten angemessen ist. Zu starke Ströme, auch wenn sie nur kurze Zeit entnommen werden, lösen die wirksame Schicht auf den Platten leicht ab und ruinieren daher die Elektroden. Daher muß man von vornherein die Größe der Akkumulatoren, also auch ihr Gewicht, so wählen,

daß sie den Maximalstrom, auch wenn er nur kurze Zeit aus ihnen entnommen wird, ohne Schädigung liefern. Gerade im Trambahnbetrieb ist aber oft die Notwendigkeit vorhanden, zeitweise einen viel stärkeren Strom zu gebrauchen, als im normalen Zustand. So lange ein Trambahnwagen voll besetzt auf gerader Bahn ohne Steigungen läuft, so lange braucht er, wenn man ihn elektrisch betreibt, seinen normalen Strom, nach dem sich also auch die Größe des mitzuführenden Akkumulators richten muß. Sobald aber der Wagen Kurven zu durchfahren hat, braucht er schon mehr als die normale Arbeit. Hat er Steigungen zu durchlaufen, so wird die nötige Arbeit stark in die Höhe gesetzt und ebenso ist auch die Zugkraft, die der Motor ausüben muß, beim Angehen des Wagens von der Ruhe aus eine bedeutend größere als in der normalen Fahrt. Also ist beim Trambahnbetrieb ein Akkumulator notwendig, der ohne Schädigung gestattet, einen viel stärkeren Strom als den normalen, etwa den 2-, 4-, ja bis 10fachen, zeitweise zu entnehmen. Dies halten nun die Bleiakumulatoren gewöhnlich nicht aus und daher rühren die bisherigen Mißerfolge bei den mit ihnen betriebenen Trambahnen, die aber allmählich, da in den letzten Jahren eifrig an der Verbesserung gearbeitet wird, vielleicht doch in Erfolge übergehen werden.

Man hat die Frage angeregt, ob es nicht möglich sei, mit Hilfe der Akkumulatoren auch unregelmäßig wirkende Naturkräfte nutzbar zu machen. Man dachte daran, die Kraft des Windes, die Kraft des niederfallenden Regens dazu zu benutzen, um stets, wenn die Kraft vorhanden ist, durch Windmühlen und durch eigens dazu gebaute schief abfallende Dächer sie zur Bewegung von Dynamomaschinen anzuwenden. Durch die Dynamomaschine wollte man Akkumulatoren laden lassen und die in ihnen aufgespeicherte Arbeit zu beliebiger Zeit benutzen. Im Prinzip ist diese Idee, die einen großartigen Fortschritt in der Ausnutzung der Naturkräfte bieten würde, sicher richtig. Praktisch ausgeführt ist sie aber bisher nicht, weil bisher noch der in Zukunft zu erwartende Kohlenmangel nicht dazu nötigt.

4. Kapitel.

Die Transformatoren und Umformer.

So wie die Gleichströme in den Akkumulatoren ein äußerst wertvolles und wichtiges Hilfsmittel für ihre praktische Benutzung besitzen, so besitzen die Wechselströme ein ebensolches, aber in anderer Richtung wirkendes, in den Transformatoren. Könnte man für Gleichströme außer den Akkumulatoren auch noch brauchbare Transformatoren, oder könnte man umgekehrt für die Wechselströme außer den Transformatoren auch noch passende Akkumulatoren erfinden, so wäre jede von diesen beiden Stromarten zu idealer Vollkommenheit zu bringen. So aber hat jede dieser beiden Stromarten ihre besonderen Vorzüge, und daß die Wechselströme in vielen Fällen einen wesentlichen Vorsprung vor den Gleichströmen bekommen haben, das verdanken sie den Transformatoren.

Die Transformatoren haben nämlich die Aufgabe, elektrische Ströme von hoher Spannung und geringer Intensität in solche von geringer Spannung und hoher Intensität umzuwandeln und umgekehrt.

Ein jeder elektrische Strom besitzt ja, wie wir wissen, einen gewissen Effekt, er kann in jeder Sekunde eine gewisse Arbeit leisten. Die Arbeitsmenge, welche der Strom in jeder Sekunde abgeben kann, also der Effekt, welchen er enthält, wird gemessen durch das Produkt aus seiner elektromotorischen Kraft und seiner Intensität (s. oben S. 117). Ist die erstere in Volt ausgedrückt, die zweite in Ampère, so ist der Effekt des Stromkreises in Volt-Ampère oder Watt ausgedrückt. Die Arbeit, welche der Strom in einer gewissen Zeit leisten kann, ist also das Produkt aus der Zahl seiner Watt und dieser Zeit.

Es können daher zwei Ströme ganz denselben Effekt besitzen, auch wenn sie ganz verschiedene Spannungen und ganz verschiedene Stromstärken haben, nämlich dann, wenn das Produkt aus Spannung (Volt) und Intensität (Ampère) in beiden Fällen dasselbe ist. Ein Strom, der 1000 Volt Spannung und $\frac{1}{2}$ Ampère Stärke hat, besitzt denselben Effekt wie ein anderer, der 2 Volt Spannung hat, aber 250 Ampère Stärke. Das Produkt ist beidemal 500 Watt.

Da man nun den Effekt eines Stromes durch Aufwendung äußerer Arbeit, etwa von einer Dampfmaschine, erzeugen muß, so sieht man daraus, daß es prinzipiell möglich ist, ohne Aufwendung von besonders zu leistender Arbeit, die Spannung eines Stromes auf Kosten seiner Intensität oder die Intensität eines Stromes auf Kosten seiner

Spannung zu erhöhen. Es fragt sich nur erstens, ob und wie das ausgeführt werden kann, und zweitens, ob diese Umwandlung, diese Transformation, eine praktische Verwendbarkeit besitzt.

Um die zweite Frage, die Frage nach dem Nutzen, zunächst zu beantworten, so besteht dieser hauptsächlich darin, daß die Fortleitung der Elektrizität auf größere Entfernungen bei hochgespannten Strömen von geringer Intensität ganz wesentlich billiger ist als bei niedrig gespannten Strömen von großer Intensität, und daß man daher durch solche Transformationen von Strömen leichter, ja oft allein im stande ist, einen der Hauptvorteile der Elektrizität auszunutzen, nämlich ihre Fortleitungsfähigkeit auf beliebig weite Entfernungen.

Wenn ein elektrischer Strom an einer Stelle A erzeugt wird, etwa durch eine Dynamomaschine, und an einer zweiten Stelle B, die weit von der ersten entfernt sein möge, gebraucht werden soll, etwa um Bogenlampen zu speisen, so müssen A und B je durch eine Leitung, und zwar im allgemeinen durch eine doppelte Leitung — eine für den Hingang und die andere für den Rückgang des Stromes — verbunden sein. Durch diese Leitung fließt der Strom; aber dabei muß er in der ganzen Leitung selbst Wärme entwickeln, und zwar nach dem Jouleschen Gesetz. Für diese gänzlich unbrauchbare, unproduktive Wärmeentwicklung verbraucht er fortdauernd Energie, welche natürlich von der Dampfmaschine, welche die Dynamomaschine treibt, geliefert werden muß. Diese Wärmemenge, die in jeder Sekunde in der Leitung erzeugt wird, ist gleich dem Widerstand der Leitung multipliziert mit dem Quadrat der Stromstärke. Man sieht daraus: je größer bei einer bestimmten Leitung die Stromstärke ist, die man benutzt, um so größer und zwar im quadratischen Verhältnis ist die nutzlos erzeugte Wärmemenge, ist also die nutzlos aufzuwendende Arbeit. Man kann und muß nun aber verlangen, daß diese in der Leitung verlorene Energie einen bestimmten Betrag, einen bestimmten Prozentsatz der ganzen Energie nicht übersteige. Dann hat man zwei Mittel, diese Forderung zu erfüllen. Das erste Mittel besteht darin, daß man den Widerstand der Leitung verringert. Da die Joulesche Wärme um so geringer ist, je geringer der Widerstand ist, so kann man — theoretisch — natürlich diese nutzlos verschwendete Energie auf jeden beliebig geringen Betrag herabdrücken, wenn man den Widerstand der Leitung verringert. Aber praktisch ist da bald eine Grenze vorhanden. Die Verringerung des Widerstandes der Leitung bei gleicher Länge kann nur dadurch geschehen, daß man den Querschnitt der Leitung vergrößert. Man muß also bei einer Kupferleitung je nach der Stromstärke dickere und dickere Kupferdrähte, Kupferstangen, nehmen, um den Verlust an Energie klein zu halten. Dadurch verteuert sich aber die Anlage ganz erheblich und es tritt bald der Punkt ein, wo man an dem für die Kupferleitung aufgewendeten Kapital ebensoviel an Zinsen verliert, als der Preis der Energie ist, welche durch geringeren Querschnitt des Kupfers verloren gehen würde. Dann hat natürlich wirtschaftlich diese Vergrößerung des Leitungsquerschnittes gar keine Bedeutung mehr. Diese Grenze tritt gewöhnlich schon bei einer Entfernung der beiden Stationen von 1000—1500 m ein.

Es bleibt ein zweites Mittel übrig, um den Energieverlust nicht über eine bestimmte Grenze gehen zu lassen, nämlich die Verringerung der Stromstärke. In der Tat, wenn man die Stromstärke kleiner machen kann, so läßt sich dadurch die Joulesche Wärme beliebig verringern.

Aber an der Ankunftsstelle braucht man ja eine bestimmte Stärke des Stromes, etwa zum Speisen von Bogenlampen, kann also, wie es scheint, mit der Stromstärke nicht beliebig heruntergehen. Hier ist nun der Punkt, an dem der Nutzen der Transformatoren eintritt. Man kann wohl die Stromstärke in der Leitung von A nach B beliebig klein machen, aber in der Ankunftsstation doch eine bedeutende Stromstärke erzeugen, wenn man den ankommenden Strom dort transformiert. Natürlicherweise kann man durch den Transformator nichts an Energie gewinnen, vielmehr muß der in B ankommende Strom mindestens so viel Effekt, so viele Watt besitzen, als man in B braucht. Da nun der ankommende Strom geringe Intensität haben soll, so heißt das, daß er große Spannung besitzen muß, denn das Produkt aus Intensität und Spannung gibt den Effekt.

Man erkennt aus diesen Betrachtungen leicht, daß man, um durch einen elektrischen Strom Energie auf weite Entfernungen übertragen zu können, ohne zu großen Verlusten ausgesetzt zu sein und ohne zu starke Leitungen anwenden zu müssen, daß man dem Strom hohe Spannung (hohe elektromotorische Kraft) und geringe Intensität geben muß. An der Verbrauchsstelle aber braucht man gewöhnlich große Intensität und verhältnismäßig geringe Spannung, und deshalb muß man einen so fortgeleiteten Strom transformieren, man muß ihn an der Verbrauchsstelle von hoher Spannung auf niedrige und von geringer Intensität auf hohe bringen.

Aber auch an der Erzeugungsstelle selbst wird der Strom manchmal nicht direkt in solchem Zustand erhalten, daß er sich zur weiten Fortleitung eignet. Er hat manchmal direkt eine zu geringe Spannung, weil man nicht leicht Maschinen mit sehr hohen Spannungen bauen kann. Da muß man ihn erst, bevor er fortgeleitet wird, auf die passende hohe Spannung transformieren und am Ende der Leitung ihn dann wieder zurücktransformieren.

Diese Aufgabe nun, die Transformation der Energie eines elektrischen Stromes, ist für Wechselströme von selbst schon gelöst, wenn auch in unvollkommener Weise, in den Induktionsapparaten, wie sie seit Faraday konstruiert sind und wie wir sie auf S. 233 ff. beschrieben haben. Diese bestehen aus einer primären Drahtrolle und einer sekundären, von denen die eine, gewöhnlich die primäre, in der anderen steckt. Gewöhnlich wird auch noch in die Höhlung der inneren Drahtrolle ein Kern von weichem Eisen gebracht und zwar gebildet aus oxydierten Eisendrähten, um die Wirbelströme in ihm zu verhindern. Läßt man durch die primäre Rolle eines solchen Apparates Wechselströme hindurchgehen, die man außerhalb derselben irgendwie erzeugt, etwa durch eine Wechselstrommaschine, so erregt ja jeder Wechsel, jede Veränderung in der Intensität des primären Stromes Induktionsströme in der sekundären Rolle, und diese mit ihrer äußeren

Leitung wird nun ebenfalls von Wechselströmen durchflossen. Der weiche Eisenkern verstärkt diese Induktionsströme; denn durch die Wechsel im primären Strom wird der Eisenkern selbst abwechselnd nach der einen und nach der anderen Richtung magnetisiert, und diese Veränderungen in seinem Magnetismus erzeugen ebenfalls in der sekundären Rolle die entsprechenden Induktionsstöße und verstärken die von den primären Stromschwankungen erzeugten.

Nun hängt die elektromotorische Kraft des sekundären Stromes, seine Spannung, wie wir auf S. 219 gesehen haben, von folgenden drei Größen ab. Zunächst von der Intensität des primären Stromes, dann von der Zahl der Windungen auf der sekundären Rolle, und drittens von der Geschwindigkeit der primären Stromänderungen, also von der Zahl der Stromwechsel pro Sekunde. Daraus folgt, daß man es bei jedem angegebenen primären Wechselstrom in der Hand hat, einfach durch die Zahl der Windungen in der sekundären Rolle der Spannung des sekundären Stromes einen beliebigen Wert zu geben. Man kann es leicht erreichen, daß der sekundäre Strom höhere Spannung hat als der primäre. Dann muß man die Zahl der sekundären Windungen größer machen als die Zahl der primären Windungen. Man kann es auch umgekehrt leicht erreichen, daß der sekundäre Strom geringere Spannung hat als der primäre. Dann muß man der sekundären Rolle wenig, der primären Rolle viel Windungen geben. Endlich kann man auch bewirken, daß der sekundäre Strom dieselbe Spannung hat wie der primäre; dann muß man, wenn die Windungen sonst symmetrisch angeordnet sind, der primären und der sekundären Rolle die gleiche Zahl von Windungen geben.

Es kommt also wesentlich auf das Verhältnis der Zahl der primären und der sekundären Windungen an. Man bezeichnet das Verhältnis

$$\frac{\text{Zahl der primären Windungen}}{\text{Zahl der sekundären Windungen}}$$

als den Transformationskoeffizienten des Transformators.

Ist dieser Koeffizient größer als 1, so sind mehr primäre als sekundäre Windungen vorhanden, folglich wird ein Strom von höherer Spannung in einen solchen von niederer Spannung heruntertransformiert.

Ist dieser Koeffizient kleiner als 1, so sind weniger primäre als sekundäre Windungen vorhanden, dann wird aus einem Strom von geringerer Spannung ein solcher von höherer Spannung erzeugt, die Spannung wird hinauftransformiert. Das ist der Fall bei den speziell so genannten Induktionsapparaten. Sie sind also Transformatoren mit einem Koeffizienten, der kleiner als 1 ist.

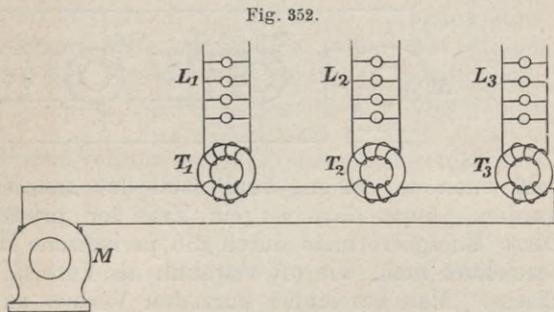
Endlich drittens, wenn dieser Koeffizient gleich 1 ist, dann haben der primäre und der sekundäre Strom gleiche Spannung. In diesem letzteren Fall findet also gar keine eigentliche Verwandlung von elektrischer Energie statt. Der primäre und der sekundäre Strom sind gleich gespannt.

Es scheint daher, daß diese letzteren Apparate eigentlich keine Vorteile bieten. Sie bieten sie aber in folgender Hinsicht. Wenn man

einen Transformator, d. h. seine primäre Wickelung, in einen Stromkreis einschaltet, so kann man seine sekundäre Wickelung benutzen, um irgend welche elektrische Arbeiten leisten zu lassen, also Glühlampen und Bogenlampen zu betreiben, Motoren in Bewegung zu setzen u. s. w. Ist in demselben primären Stromkreis noch ein zweiter und dritter Transformator u. s. f. vorhanden, so sind die sekundären Stromkreise aller dieser Transformatoren voneinander unabhängig. Was in dem sekundären Stromkreise des zweiten Transformators vor sich geht, beeinflusst den sekundären Stromkreis des ersten gar nicht, falls nur der Hauptstromkreis unverändert bleibt. Man hat also in den Transformatoren auch ein Mittel, um aus einem primären Stromkreis eine Reihe voneinander unabhängiger sekundärer Stromkreise abzuzweigen. Jeder Transformator ist dann gewissermaßen eine eigene Dynamomaschine, die den sekundären Kreis speist. Gerade zu diesem Zweck wurden zuerst Transformatoren angewendet und zwar solche mit dem Transformationskoeffizienten 1, welche man auch deshalb Sekundärgeneratoren nennt.

Eine derartige

Anordnung der Transformatoren wird durch Fig. 352 dargestellt. Darin stellen die Ringe T_1 , T_2 , T_3 die Transformatoren dar. Jeder hat unten eine Wickelung, die primäre, und oben eine, die sekundäre. Von der Maschine M gehen die zwei Leitungen aus, und in diese sind die primären Wickelungen der drei Transformatoren hintereinander geschaltet. Von der sekundären Wickelung jedes Transformators gehen dann die eigentlichen Gebrauchsleitungen L_1 , L_2 , L_3 aus, in welche etwa Glühlampen oder Motoren eingeschaltet sind.

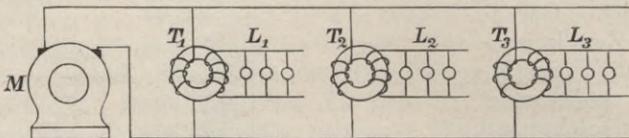


Die Absicht aber, eine billige Fortleitung des Stromes und zugleich eine Verteilung desselben auf verschiedene Verbrauchsstellen zu erzielen, wird bedeutend vorteilhafter erreicht, wenn man die Transformatoren (d. h. ihre primären Wickelungen) nicht hintereinander, sondern parallel schaltet, und wenn man, wie das auch sonst üblich ist, auch die Stromverbrauchsapparate (Lampen etc.) in den sekundären Kreis jedes Transformators ebenfalls alle parallel schaltet. Das Schema für eine solche Schaltung ist in Fig. 353 gegeben, in welcher die Buchstaben dieselbe Bedeutung haben, wie in der vorigen Figur. Die weitere Ausführung und die praktischen Vorzüge dieser Schaltung werden aber erst in dem Kap. 9 dieses Teils auseinandergesetzt werden. Hier soll nur von der Konstruktion der Transformatoren selbst, nicht von ihrer Verbindung untereinander, die Rede sein.

Eine Hauptforderung, die man an jeden Transformator stellen muß, ist die, daß er die Umwandlung der elektrischen Energie ohne

große Verluste bewirkt. Mit anderen Worten, die von den Klemmen der sekundären Wickelung in den äußeren Stromkreis abzugebende elektrische Energie soll nicht viel kleiner sein, wie die in die primäre Wickelung von deren Klemmen aus hineingeleitete Energie. Ganz gleich lassen sich diese Energieen allerdings nicht machen, ein Verlust an Energie muß notwendig eintreten. Zunächst nämlich tritt sowohl in der primären wie in der sekundären Wickelung die Joulesche Wärme auf, welche auf Kosten der zugeführten Energie entsteht und welche für den Betrieb des Transformators nutzlos ist. Ferner entwickeln sich in dem Eisenkern des Transformators die Wirbelströme, welche ebenfalls Energie absorbieren. Und drittens muß ja bei den periodisch sich ändernden magnetisierenden Kräften die Koerzitivkraft des Eisens (S. 169)

Fig. 353.



bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung überwunden werden. Auch dazu ist ein Teil der primären Energie notwendig. Diese Energieverluste durch die periodische Magnetisierung des Eisens bezeichnet man, wie oft erwähnt, als Verluste durch Hysteresis des Eisens. Man bezeichnet kurz den Verlust an Energie durch Wirbelströme und Hysteresis als Eisenverlust, den durch die Joulesche Wärme als Kupferverlust des Transformators.

Durch alle diese Verluste wird also der an den Klemmen der sekundären Wickelung zur Verfügung stehende Effekt notwendig kleiner sein als der in die primäre Wickelung eingeleitete Effekt. Man bezeichnet das Verhältnis dieser Effekte als den Wirkungsgrad des Transformators und drückt ihn in Prozenten aus.

Bei den neuen Transformatoren steigt der Wirkungsgrad bis zu 96 Proz., so daß man durch die Transformation der elektrischen Energie nur 4 Proz. derselben verliert.

Dieses vorzügliche Resultat erreichten zuerst Ganz & Co. durch eine besondere Konstruktion ihrer Transformatoren und durch möglichste Beschränkung der oben erwähnten Verluste.

Sie machten nämlich zunächst die Eisenmasse des Transformators ringförmig, sie wandten nicht, wie man es noch bei den Induktionsapparaten tut, als Eisenkern einen Stab mit zwei Polen an, sondern sie nahmen einen ganz geschlossenen Eisenkern. Diesen umgaben sie vollkommen mit den beiden Wickelungen. Ein solcher Ring hat keine freien Pole, wenn er magnetisch geworden ist, aber er wirkt genau ebenso induzierend, wenn sich sein Magnetismus ändert, wie jeder mit Polen versehene Magnet. Deswegen nennt man die Transformatoren dieser Art, in welchen also das angewendete Eisen in sich geschlossen ist, pollose Transformatoren. Die geschlossene Form des Eisenkerns hat den großen Vorzug vor der offenen Stabform, daß alle mag-

netischen Kraftlinien immer ganz im Eisen selbst verlaufen, daß nicht die Kraftlinien zum Teil in die Luft hinaustreten. Es findet also dabei keine Streuung (S. 164) der magnetischen Kraftlinien statt. Wenn der Magnetismus sich ändert, also die Zahl der Kraftlinien vermehrt oder vermindert wird, so geschieht das durchaus innerhalb des Eisens, und daher gehen alle die neu entstehenden oder die verschwindenden Kraftlinien durch die Windungen der sekundären Wickelung und erzeugen in diesen daher ohne Verluste Induktionsströme.

Zweitens aber werden solche Eisenkerne, um die Wirbelströme zu verhindern, nicht massiv hergestellt, sondern aus Eisendraht oder Eisenband, wie wir das in anderen Fällen schon mehrfach gesehen haben.

Drittens, um die Hysteresisverluste möglichst zu beschränken, ist es angemessen, die Polwechselzahl im Transformator so klein wie möglich zu machen. Das ist natürlich nur dadurch möglich, daß man überhaupt dem Wechselstrom, der durch die primären Transformatorwindungen geht, möglichst kleine Periodenzahlen gibt. Aus diesem Grunde gerade werden heute die Wechselstrommaschinen ziemlich allgemein nur mit 50 Perioden in der Sekunde, also mit 100 Polwechseln konstruiert.

Endlich, um die Joulesche Wärme in den Transformatoren zu verringern, muß man den Widerstand der Drahtwindungen passend klein wählen. Diese Dimensionierung hat noch, wie wir sehen werden, den weiteren Vorteil, daß die Spannung an den sekundären Klemmen sich dabei sehr wenig ändert, ob nun der sekundäre Stromkreis geschlossen oder offen ist.

Die geschlossene, pollose Form der Transformatoren wurde nun von Ganz & Co. in doppelter Weise erzielt. Bei der ersten Art der Transformatoren wurde ein Eisenring, der aus Drähten oder Bändern oder Blechen zusammengesetzt war, zunächst mit der primären Wickelung umgeben und auf diese wurde die sekundäre Wickelung gebracht, oder es wurden besser die beiden Wickelungen getrennt in einzelnen Sektoren um den Ring gelegt. Die Transformatoren dieser Art werden Kerntransformatoren genannt, weil sie einen Eisenkern haben, auf welchen die beiden Windungssysteme eingewickelt sind.

Dasselbe Ziel eines pollosen Transformators kann man aber auch dadurch erreichen, daß man die beiden Windungssysteme außen mit einem Mantel von Eisen umgibt. Auch dadurch wird das Eisen so magnetisiert, daß nirgends ein freier Pol entsteht, auch dadurch wird also ein polloser Transformator erzeugt. Damit im Eisen die Wirbelströme nicht auftreten können, wird es wieder in Form von oxydierten Drähten angewendet, die senkrecht zu den Kupferdrähten aufgewickelt werden. Diese Transformatoren der zweiten Art nennt man Manteltransformatoren. Der ringförmige Kern wird aus isolierten Kupferdrähten gebildet, die passend zur primären und sekundären Windung zusammengefaßt werden, während außen auf diesen Ringen Eisendraht gewickelt ist. Im ganzen werden jedoch jetzt hauptsächlich Kerntransformatoren, nicht Manteltransformatoren benutzt.

Die Transformatoren, wie sie von Ganz & Co. zuerst konstruiert wurden, wurden von der Gesellschaft Helios in Ehrenfeld-Köln in

Deutschland eingeführt, wie überhaupt diese Gesellschaft diejenige war, die das Wechselstromsystem zur Anwendung brachte, als sonst noch alle Firmen allein am Gleichstromsystem festhielten. Indes erwies sich die ursprüngliche Methode der Herstellung der Transformatoren, nämlich in Form eines Ringes aus Eisendrahtbündeln, als ziemlich umständlich und kostspielig, und daher werden jetzt zwar allgemein die Eisenkerne in geschlossener Form, aber nicht in Ringform ausgeführt. Man konstruiert sie häufig derart, daß zwei quadratische oder runde Eisenkerne mit den primären und sekundären Spulen abwechselnd umgeben werden, und daß diese Eisenkerne oben und unten durch Eisen miteinander verbunden und so geschlossen werden. So zeigt Fig. 354 den Eisenkern eines Transformators von Helios, während Fig. 355 den Kern, umgeben

Fig. 354.

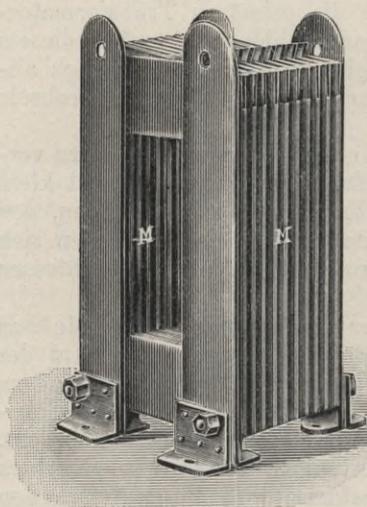
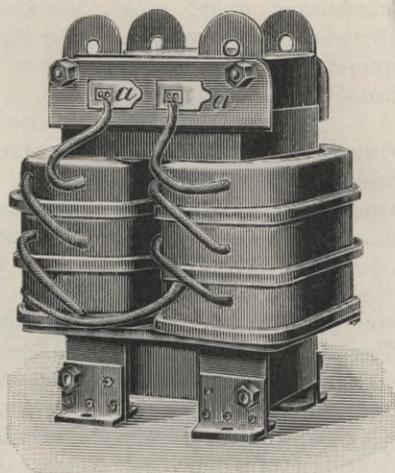


Fig. 355.



von den Rollen, abbildet, auf welche die primären und sekundären Wicklungen aufgewunden sind. Der ganze Apparat wird mit einem runden Eisengehäuse umgeben. Die äußere Ansicht des fertigen Transformators sieht man in Fig. 356. Man unterscheidet bei jedem Transformator die Leitungen von den beiden Wicklungen als Hochspannungs- und Niederspannungsleitungen, letztere wird auch als Verbrauchsleitung bezeichnet. Häufig werden nicht bloß die beiden Enden der Niederspannungswicklung zu festen Klemmen an dem Transformator geführt, sondern es wird auch noch von der Mitte dieser Wicklung eine Leitung zu einer festen Klemme zwischen den beiden anderen geführt. Dann herrscht zwischen den beiden äußeren Klemmen die volle Spannungsdifferenz, die in der sekundären Wicklung des Transformators erzeugt wird, zwischen jeder von ihnen aber und der mittleren herrscht nur die halbe Spannungsdifferenz. Das ist häufig von Vorteil. Wenn z. B. die ganze Spannungsdifferenz der Niederspannungsleitung 100 Volt beträgt, so schaltet man Bogenlampen,

welche nur die halbe Spannung von 50 Volt brauchen, zwischen die Mittelklemme und je eine von den Endklemmen.

Die Heliostromatoren sind für 100 Polwechsel in der Sekunde bestimmt. Die anzuwendende primäre Spannung beträgt bei den einzelnen Nummern entweder 1000 oder 2000 oder 3000 Volt, und diese wird durch den Transformator heruntersetzt auf 72 (2×36) oder 100 Volt (2×50) je nach der Wahl. Diese Transformatoren haben bei der elektrischen Beleuchtung des Nord-Ostseekanals, welche von Helios nach dem Wechselstromsystem ausgeführt wurde, vielfache Verwendung gefunden. Die kleinsten Nummern arbeiten mit einem Wirkungsgrad von 95,3 Proz., die größten mit einem solchen von 96,7 Proz., wenn die sekundäre Spule ihre Maximalstromstärke abgibt, oder, wie man sagt, vollbelastet ist.

Von allen größeren Firmen, welche mit Wechsel- oder Drehströmen arbeiten, werden jetzt Transformatoren, meistens Kerntransformatoren, hergestellt, die sich nicht im Prinzip, sondern nur in dem Aussehen und in der Art der Herstellungsweise unterscheiden und die, gutes Material und

Fig. 356.

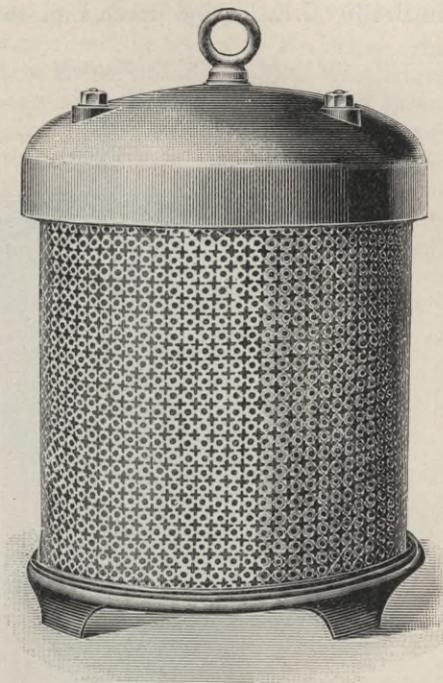


Fig. 357.

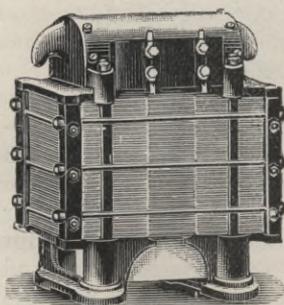


Fig. 358.

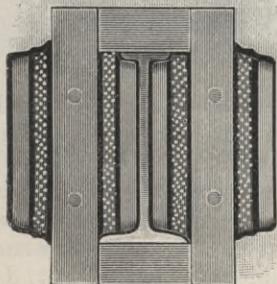


Fig. 359.

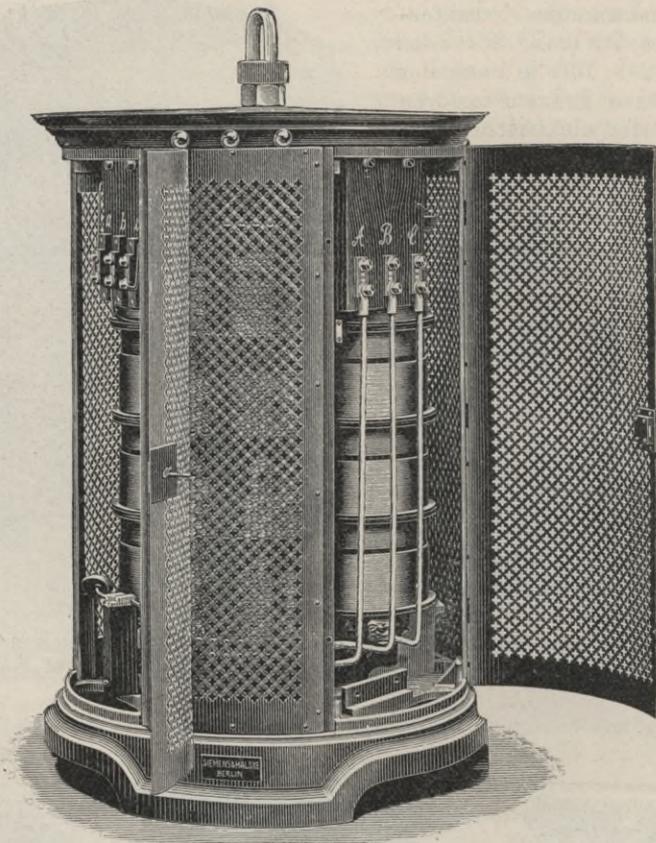


richtige Dimensionierung vorausgesetzt, alle einen sehr hohen Wirkungsgrad ergeben. So zeigt Fig. 357 einen Transformator der Schuckert-

schen Gesellschaft, der einen inneren Eisenkern mit darüber gelegten primären und sekundären Spulen besitzt. Diese Transformatoren werden gewöhnlich für 80 bis 120 Polwechsel (40 bis 60 Perioden) und für primäre Spannungen bis 10000 Volt konstruiert.

Die Kerntransformatoren der Elektrizitätsgesellschaft Union in Berlin (U.E.G.) sind durch Fig. 358 im Schnitt, durch Fig. 359 in der

Fig. 360.



inneren Ansicht dargestellt. In der ersten Figur sieht man den Eisenkern, umgeben innen von der Niederspannungswicklung, außen von der Hochspannungswicklung. Der ganze Transformator ist in einem Gehäuse aus Gußeisen untergebracht, welches zur besseren Kühlung mit Öl gefüllt wird. Der Wirkungsgrad der Transformatoren beträgt bei den großen Nummern 97,75 Proz., wenn sie voll belastet sind, und 95,2 Proz., wenn sie bloß bis zu 25 Proz. belastet sind, wenn also die Niederspannung nur den vierten Teil des Effektes abgibt, den sie maximal abgeben kann.

Ein besonderer Fall dieser Transformatoren sind die Drehstrom-

transformatoren. Unter Drehstrom versteht man ja ein System dreier Wechselströme, welche gegeneinander Phasenunterschiede haben. Man kann daher die drei Wechselströme transformieren, indem man jeden durch einen besonderen Transformator gehen läßt. Die transformierten Ströme haben dann dieselbe Phasendifferenz, wie die eingeleiteten primären Ströme. Man kann jedoch auch die drei Transformatoren in einem Apparat vereinigen, wie bei dem in Fig. 360 abgebildeten Drehstromtransformator von Siemens & Halske. In diesem sind drei Kerne aus zerteiltem Eisen mit den beiden Windungssystemen umwickelt. Unten und oben sind die Eisenkerne durch Eisen miteinander verbunden, so daß jeder Kern durch die beiden anderen geschlossen ist, also pollose Magnete bildet. Man sieht bei a, b, c die Anschlußklemmen für die Hochspannungsleitung (dünner Draht), bei A, B, C diejenige für die Nutzleitung (dicker Draht). Der ganze Apparat ist in ein Gehäuse von perforiertem Eisenblech eingeschlossen.

Ähnlich sind die Drehstromtransformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin konstruiert, welche Fig. 361 darstellt. Man sieht hier vorn die drei Anschlüsse für die Niederspannungsleitung, die für die Hochspannungsleitung befinden sich hinten an dem Apparat. Diese Transformatoren werden für eine primäre Spannung von 3000 bis 6500 Volt und eine sekundäre von 120 Volt gebaut und zwar für 100 bis 150 Polwechsel.

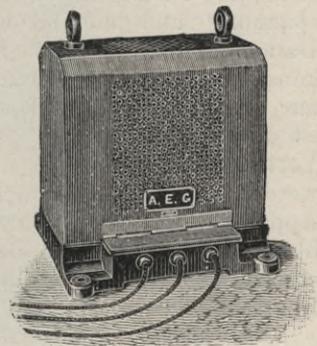
Die Transformatoren werden von allen Firmen in verschiedenen Größen gebaut und es wird, um sie zu charakterisieren, immer die Zahl der Kilowatt angegeben, welche sie leisten können. Diese Zahl ist das Produkt aus der sekundären Spannung (Niederspannung) und der höchsten Stromstärke, welche in dem sekundären Kreis, in welchem der Transformator nutzbare Arbeit leisten soll, herrschen darf.

Ein wesentliches Erfordernis bei allen Transformatoren ist das, daß die Isolation zwischen den primären und den sekundären Wicklungen und zwischen dem Eisenkern eine vorzügliche sei, da sonst bei den hohen Spannungen Funken überspringen und Elektrizitätsverluste und Gefahren entstehen können. Auf die Isolation wird daher besondere Sorgfalt verwendet.

So werden die Heliotransformatoren sorgfältig durch Glimmer, die zuletzt erwähnten A.E.G.-Transformatoren durch Mikanit und Stabilit isoliert.

Es sind aber seit der Frankfurter elektrischen Ausstellung (1891) die Transformatoren auch dazu benutzt worden, um Spannungen bis zu 30 000, ja 40 000 Volt auszuhalten. Die Isolation für solch hohe Spannungen gelang zuerst der Maschinenfabrik Oerlikon und der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin in vorzüglicher Weise dadurch, daß der ganze Transformator in einen Kasten voll Öl ein-

Fig. 361.



gesetzt wurde. Das Öl dringt durch alle Poren und isoliert vorzüglich. Diese Apparate werden deshalb als Öltransformatoren bezeichnet. In vielen Fällen werden jetzt Transformatoren mit bis zu 10 000 Volt Spannung praktisch benutzt. Bei diesen wird die Ölisolierung immer angewendet.

Der Widerstand in der sekundären Spule (Niederspannung) wird immer so klein gemacht, daß die Joulesche Wärme nur 1 Proz. etwa der gesamten Energie bei Vollbelastung (Maximalstrom) beträgt. Damit ist nun zugleich der Vorteil verbunden, daß der Spannungsverlust in einer solchen Spule selbst beim maximalen Strom sehr gering ist. Daher ist die Klemmenspannung dieser Spule immer nahezu gleich der elektromotorischen Kraft des sekundären Stromes. So ist z. B. bei den besseren Transformatoren der verschiedenen Firmen der Unterschied in der Klemmenspannung der sekundären Klemmen, wenn diese einmal vollkommen unverbunden, das andere Mal durch einen so kleinen Widerstand geschlossen sind, daß der Maximalstrom fließt, nur 2 bis 3 Proz. der ganzen Spannung. Daher bleibt bei allen äußeren Widerständen, d. h. bei jeder Arbeit, die der Transformator leistet, die sekundäre Klemmenspannung dieselbe, so lange die primäre Klemmenspannung und die Stromwechsellzahl unverändert gelassen werden. Daraus folgt, daß ein solcher gut gebauter Transformator immer konstante Klemmenspannung an den sekundären Klemmen hat, wenn nur die primäre Klemmenspannung dauernd gleich erhalten wird. Das ist aber ganz besonders wichtig, weil, wie wir sehen werden, die Verteilung der Energie in rationeller Weise nur dadurch ausgeführt werden kann, daß die Klemmenspannung an dem stromliefernden Apparat (hier den sekundären Klemmen des Transformators) dieselbe bleibt, wie groß oder klein auch der äußere Widerstand sei. Daher eignen sich die Transformatoren ausgezeichnet zur Verteilung der Energie.

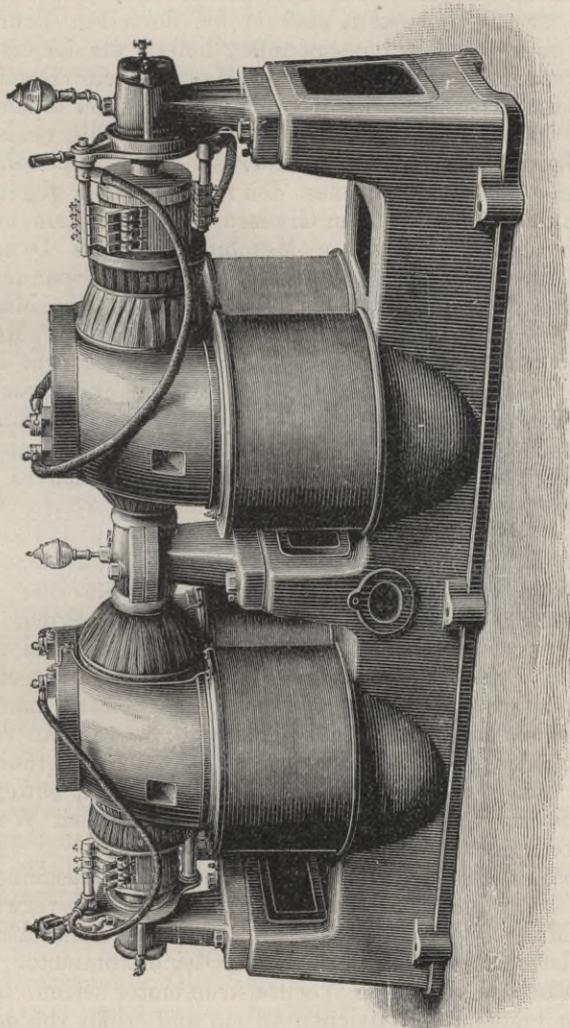
Durch die Transformatoren hat man es also bei Wechselströmen in der Hand, die beiden Faktoren, von denen der Effekt eines Stromes abhängt, nämlich Spannung und Stromstärke, beliebig zu ändern, die eine auf Kosten der anderen zunehmen, oder zu Nutzen der anderen abnehmen zu lassen. Und dabei haben die Wechselstromtransformatoren die großen Vorzüge, daß sie einen sehr hohen Nutzeffekt besitzen und daß sie keine Bedienung gebrauchen. Sie enthalten eben keine beweglichen Teile, sondern nur feste Drahtwindungen. Daher kann man durch solche Apparate leicht Wechselströme von hoher Spannung in geringe transformieren und daher auch alle die Vorteile ausnutzen, welche die hohe Spannung eines Stromes bei geringer Stärke für die ökonomische Fortleitung bietet.

Für Gleichströme ist eine solche Transformation durch feste Apparate, ohne bewegliche Teile, und namentlich eine Transformation für sehr hohe Spannungen noch nicht gelungen.

Dagegen sind für Gleichströme Transformatoren zu anderen Zwecken gebaut worden. Es kommt zuweilen vor, daß in einer elektrischen Anlage, welche mit Gleichströmen von etwa 110 Volt Spannung betrieben wird (wie in den meisten Zentralen), daß in dieser für einige

Zwecke höhere Spannungen gebraucht werden. Wenn z. B. eine Akkumulatorenbatterie vom 100 Zellen von diesem Leitungsnetz geladen werden soll und man nicht die Zellen in mehrere Abteilungen teilen will, so braucht man dazu eine Spannung von etwa 250 Volt.

Fig. 362.



Oder wenn eine Trambahn elektrisch von diesem Netz betrieben werden soll, so braucht man für diese gewöhnlich höhere Spannungen, 300 bis 500 Volt. Es handelt sich also auch hier darum, Gleichströme von niedriger Spannung (110 Volt) auf höhere Spannung (250 oder 500 Volt) zu transformieren, wenn auch nicht darum, sie auf sehr hohe Spannung, Tausende von Volt, wie bei Wechselströmen zu bringen. Zu diesem

Zwecke werden zwei Gleichstrommaschinen zusammengekoppelt, wie Fig. 362 zeigt, welche einen solchen Maschinensatz von Siemens & Halske zeigt. Die eine dieser Maschinen dient als Elektromotor, d. h. sie wird durch einen hineingeführten (den zu transformierenden) Strom getrieben. Dadurch dreht sie zugleich die zweite Maschine und von deren Bürsten lassen sich dann Ströme abnehmen. Der Anker der zweiten Maschine ist nun so gewickelt, daß er bei derselben Tourenzahl eine größere oder geringere Klemmenspannung liefert, als der erste. Folglich erhält man vermittels des in die erste Maschine eintretenden Stromes von der zweiten Maschine einen Strom von anderer Spannung, man hat die eingeführte Energie transformiert. Wenn die beiden Dynamomaschinen Nebenschlußmaschinen sind, so kann man sehr leicht die Spannung des sekundären Stromes, den man aus dem gegebenen transformiert erhalten will, in weiten Grenzen ändern. Indem man nämlich in den Nebenschluß der zweiten Maschine, die als Dynamo wirkt, Widerstände ein- und ausschaltet, kann man deren Spannung, wie bekannt, ändern. Aber indem man auch bei der ersten Maschine, die als Motor wirkt, dasselbe tut, Widerstände aus ihrer Magnetwicklung aus- oder in sie einschaltet, kann man, wie wir bei der Behandlung der elektrischen Motoren sehen werden, ihre Geschwindigkeit verändern. Dadurch ändert sich aber auch die Geschwindigkeit der zweiten Maschine, der Dynamo, in derselben Weise, und man hat dadurch ein zweites, mit dem ersten zusammenwirkendes Mittel, um die Spannung des erzeugten Gleichstromes in weiten Grenzen zu regulieren.

Da man aber, wie oft erwähnt, Gleichstromdynamos nicht für sehr hohe Spannungen bauen kann, so ist der Bereich, in welchem eine Transformation bei Gleichströmen überhaupt möglich ist, ein ungleich geringerer als bei Wechselströmen. Während es bei den letzteren ganz einfach ist, einen Strom von 5000 Volt Spannung in einen solchen von 100 Volt zu transformieren oder umgekehrt, kann man bei Gleichströmen im allgemeinen schon zufrieden sein, wenn man von 500 Volt auf 100 Volt oder umgekehrt umformen kann. Außerdem brauchen natürlich die beiden Maschinen, wie alle Apparate mit bewegten Teilen, dauernde Aufsicht, während diese bei den eigentlichen Wechselstromtransformatoren nicht nötig ist.

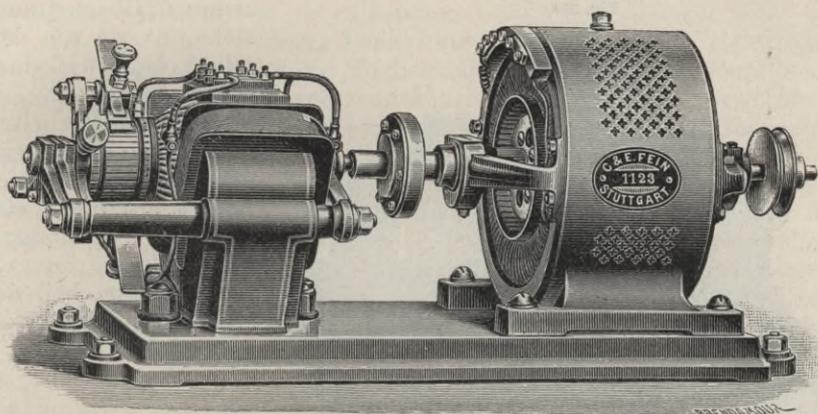
Dasselbe Prinzip der zusammengekoppelten Maschinen ist auch anwendbar, um Gleichströme in Wechselströme zu verwandeln und umgekehrt. Man muß nur zu dem Zweck auf eine und dieselbe Achse eine Wechselstrommaschine und einen Gleichstrommotor, oder eine Gleichstrommaschine und einen Wechselstrommotor setzen. In den Motor leitet man im ersten Falle Gleichstrom ein und erhält von der Dynamomaschine Wechselstrom zurück. Im zweiten Fall leitet man in den Motor Wechselstrom ein und erhält von den Bürsten der Dynamo Gleichstrom zurück. Wenn man z. B. in einem Leitungsnetz, das von Wechselströmen betrieben wird, einen Akkumulator laden will, so muß man einen solchen Wechselstrom-Gleichstromumformer einführen.

Es ist von selbst ersichtlich, daß man auf dieselbe Weise auch

Gleichstrom in Drehstrom umformen kann und umgekehrt, indem man eine Gleichstrom- und eine Drehstrommaschine auf dieselbe Achse setzt. So zeigt Fig. 363 einen kleinen Drehstrom-Gleichstromumformer von C. u. E. Fein in Stuttgart. Man sieht rechts einen Drehstrommotor, welchem also von außen Drehstrom zugeführt wird, und links auf derselben Achse eine Gleichstromdynamo, von deren Bürsten man also Gleichstrom abnehmen kann.

Die Umformer, welche aus Wechselstrom oder Drehstrom Gleichstrom erzeugen, haben eine erhebliche und wichtige Anwendbarkeit. Wie nämlich schon mehrfach erwähnt wurde, macht die Anwendung der Wechselströme und insbesondere der Drehströme in den großen

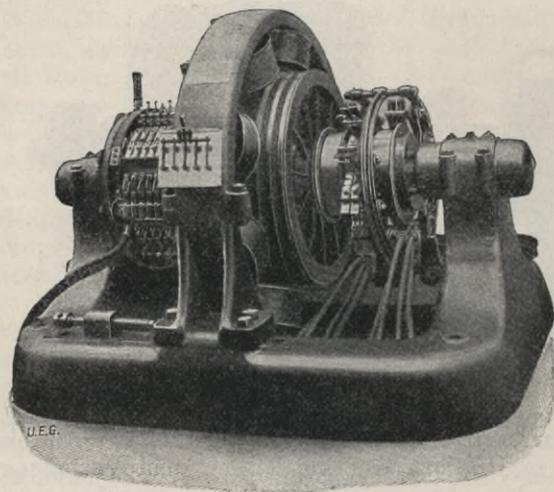
Fig. 363.



elektrischen Anlagen immer größere Fortschritte, weil diese sich als bedeutend ökonomischer in Hinsicht der Fortleitung und Verteilung erweisen. Für manche Zwecke aber sind Wechselströme durchaus unbrauchbar, nämlich für alle elektrochemischen Betriebe und für alle Anlagen, in welchen Akkumulatoren zu laden sind. Diese können nur mit Gleichstrom betrieben werden, und gerade aus diesem Grunde werden zuweilen in städtischen Anlagen zwar primäre Drehströme von hoher Spannung erzeugt und fortgeleitet, aber in den einzelnen Bezirken, in denen sie gebraucht werden, werden sie durch Umformer in Gleichstrom verwandelt. Man kann übrigens diese Umformung von Wechselstrom oder Drehstrom in Gleichstrom auch durch eine einzige Maschine, nicht durch zwei gekoppelte, hervorbringen. Wir hatten schon auf S. 371 u. ff. gesehen, daß man Wechsel- oder Drehstrommaschinen einfach aus einer Gleichstrommaschine mit Grammeschem Ring oder Hefnerscher Trommel konstruieren kann, indem man die einzelnen Spulenenden, die am Gleichstromkommutator verbunden sind, noch besonders an Schleifringe auf der Achse führt. Wenn man in den Anker einer solchen Maschine daher Gleichstrom einleitet, so kann man von den Schleifringen, je nach der Zusammenfassung der Spulen, Wechselstrom oder Drehstrom abnehmen, hat also dadurch auch gewissermaßen den

Gleichstrom in Drehstrom oder Wechselstrom transformiert und umgekehrt. Die nach diesem Prinzip konstruierten Maschinen bezeichnet man als rotierende Umformer. Einen solchen, von der Union (U.E.G.) konstruierten Umformer zeigt Fig. 364. Man sieht eine 10polige Gleichstrommaschine mit Trommelanker, deren breiter Kommutator auf der linken Seite sich befindet und 10 Bürstenreihen trägt, die passend verbunden, den Gleichstrom von ihr abnehmen. Auf der rechten Seite dagegen sitzen auf der Achse die Schleifringe, auf welchen die Bürsten für den Drehstrom laufen. Durch den eingeführten Drehstrom kommt der Anker in Rotation, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die von der Periode des Drehstroms abhängig ist. Von dem Kollektor kann man dann Gleichstrom abnehmen. Aber die

Fig. 364.



Spannung des so erzeugten Gleichstromes steht, da sie von derselben Drahtwicklung abgenommen ist, in ganz festem Verhältnis zu der Spannung des eingeführten Drehstromes. Es ist also nicht eine beliebige Spannungsumwandlung zu erzeugen, wie bei den eigentlichen Transformatoren.

Übrigens ist es noch auf gänzlich abweichende Art und Weise möglich, Wechselströme und Drehströme in Gleichströme zu verwandeln und zwar

ganz ohne rotierende Apparate. Und zwar sind es die elektrolytischen Vorgänge an einer Aluminiumanode, welche dieses ermöglichen. Es wurde auf S. 158 angeführt, daß eine gewöhnliche Zersetzungs- zelle, die etwa Alaunlösung als Flüssigkeit besitzt und bei welcher eine Elektrode aus Aluminium, die andere aus einem beliebigen indifferenten Stoff, etwa Kohle, besteht, daß eine solche Zelle besondere Eigenschaften besitzt. Wird nämlich ein Strom durch sie in solcher Richtung hindurchgesendet, daß sich Sauerstoff an der Aluminium- elektrode abscheidet, so bringt dieser eine so schlecht leitende Schicht an dieser Elektrode hervor, daß Ströme unter 22 Volt Spannung nur in minimalen Beträgen durchgelassen werden, während, wenn der Strom in umgekehrter Richtung hindurchgeht, er kein besonderes Hindernis findet. Schaltet man also mehrere Zellen hintereinander, so werden von einem hindurchgesendeten Strom in der einen Richtung gewissermaßen sovielmal 22 Volt abgedrosselt, als Zellen vorhanden sind. Man kann daher solche Aluminiumzellen zweckmäßig als

Drosselzellen bezeichnen. Schickt man nun einen Wechselstrom z. B. von 110 Volt Spannung durch 5 solche Zellen hintereinander, so werden offenbar diejenigen Teile des Wechselstroms, in welchen das Aluminium Anode ist, nicht hindurchgelassen, während die anderen Hälften hindurchgehen. Man bekommt also in der Leitung unterbrochenen Gleichstrom. Schaltet man parallel dazu noch eine zweite Batterie mit verkehrten Polen, so gehen dann durch diese diejenigen Teile hindurch, welche von der anderen zurückgehalten werden, und man kann so in einer äußeren Leitung die beiden Teile eines Wechselstroms als pulsierenden Gleichstrom erhalten. Obwohl dieses Verfahren für die Anwendung im großen noch nicht durchgebildet ist, ist es sehr bequem und ohne große Kosten da zu benutzen, wo es sich nur darum handelt, für kleine Apparate, also für geringe Stromstärken aus einer Wechselstromanlage Gleichstrom zu entnehmen.

In dem sehr wichtigen Punkte der weiten Fortleitung elektrischer Energie ist gerade durch die Möglichkeit der Transformation von hohen Spannungen auf niedere und umgekehrt der Wechselstrom resp. Drehstrom dem Gleichstrom noch wesentlich überlegen, während für andere Zwecke der Gleichstrom vorteilhafter ist.

Es hat sich daher allmählich eine Scheidung der Kompetenzen zwischen Wechselstrom (resp. Drehstrom) und Gleichstrom in der Art ausgebildet, daß für weite Entfernungen der Stromverbrauchsplätze untereinander und von der Maschine der Drehstrom mit Transformatoren eintritt, während für enge, kleine Betriebe der Gleichstrom das Übergewicht hat. In der Tat sind jetzt eine große Reihe von elektrischen Anlagen mit hochgespannten Drehströmen und Transformatoren bereits ausgeführt an Orten, wo ohne eine ökonomische Fernleitung hochgespannter Ströme eine zweckmäßige elektrische Einrichtung nicht möglich gewesen wäre.

5. Kapitel.

Das elektrische Bogenlicht.

Den Hauptstoß zu der großen Entwicklung der Elektrotechnik im Anfang der achtziger Jahre gab das Bedürfnis nach allgemeiner Einführung der elektrischen Beleuchtung. Elektrisches Licht hatte man zwar lange schon im Laboratorium für Vorlesungsversuche und zuweilen auch öffentlich für besondere Zwecke gemacht. Man scheute für solche Zwecke auch nicht die umständliche und teure Verwendung von kräftigen galvanischen Batterien. Sollte das elektrische Licht aber praktisch verwendet werden, sollte es möglich sein, dasselbe zur Beleuchtung von Straßen, Plätzen und großen Räumen zu benutzen, so kam es vor allen Dingen darauf an, die Erzeugung des nötigen elektrischen Stromes bequemer und viel billiger zu machen, als man es durch Anwendung von galvanischen Batterien erreichen konnte. Dies war eine der wesentlichsten Ursachen, daß sich die Technik mit besonderer Wucht auf die Erzeugung von elektrischen Strömen durch direkte Aufwendung von Arbeit warf, und die Dynamomaschinen, welche dies mit Hilfe der Induktion erreichen ließen, waren das Hauptresultat dieser Anstrengungen.

Das elektrische Licht entsteht, wie auf S. 119 ff. auseinandergesetzt ist, wenn ein starker elektrischer Strom zwischen zwei Kohlen spitzen übergeht, die durch eine kleine Strecke erhitzter Luft voneinander getrennt sind. In dem ziemlich großen Widerstand, welchen eine solche Luftstrecke dem Strom bietet, wird nach dem Jouleschen Gesetz eine große Wärmemenge erzeugt und diese bleibt, da die Luftstrecke zwischen den Kohlen nur klein ist, konzentriert an dieser Stelle und erhitzt sowohl die Luft, wie die Enden der Kohlen selbst.

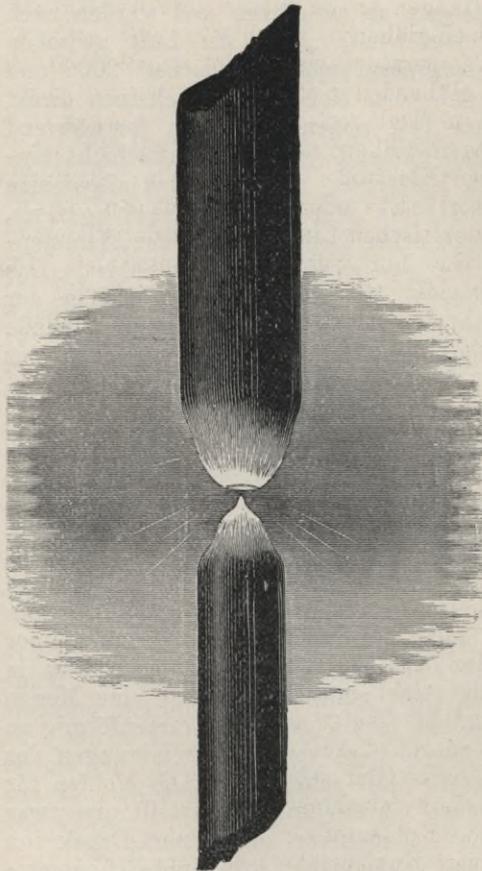
Die Erfahrung lehrt nun, daß bei einem mit Gleichströmen betriebenen Lichtbogen eine Spannung zwischen den Kohlen von ca. 40 Volt herrschen muß, damit der Lichtbogen entstehe, bei einem mit Wechselströmen betriebenen dagegen eine viel kleinere, etwa 28 Volt. Es ist noch nicht vollständig aufgeklärt, warum ein Lichtbogen nur mit einer so hohen Spannung betrieben werden kann. Der Widerstand der warmen Luftschicht ist nicht so groß, daß er diesen großen Spannungsverlust hervorbringen könnte. Es kann sein, daß in dem Lichtbogen, d. h. in der Luftschicht, eine Art Polarisation entsteht, wie in einer Flüssigkeit, und daß diese eine hohe Gegenkraft entwickelt. Es kann aber auch sein, daß bei dem Übergang des Stromes aus den Kohlen

in die Luft ein hoher Übergangswiderstand erzeugt wird, wie bei den Aluminiumzellen (S. 158). Wie gesagt, ist diese Frage noch nicht definitiv aufgeklärt. Tatsache ist jedenfalls, daß man, um Bogenlicht zu erzeugen, an den Enden der Kohlen eine Klemmenspannung anwenden muß, die immer größer als 40 Volt ist, wenn man Gleichströme benutzt. Bei Wechselstrom muß sie größer sein als 28 bis 30 Volt, je nach der Periode und Form der Wechselströme. Kommt ein Strom in die Kohlen, zwischen welchen eine Unterbrechungsstelle gebildet wird, dann werden die Enden der Kohlen und die zwischen ihnen liegende Luftschicht heiß, sie fangen an zu glühen und werden nach ganz kurzer Zeit ganz hell weißglühend. Auch die Luft zwischen ihnen wird durch die hohe Temperatur, welche zwischen 2000 und 4000° C. liegt, glühend. Die glühenden Kohlenenden scheinen direkt in Dampfform überzugehen, zum Teil reißen sich auch fortwährend von ihnen Teilchen ab und fliegen glühend durch die Luftschicht hindurch zu der gegenüberliegenden Elektrode. Dies ist das allgemeine Bild des elektrischen Bogenlichts oder des Flammenbogens. Das eigentlich Leuchtende im elektrischen Licht ist nicht der Flammenbogen, welcher als glühendes Gas nur wenig Licht aussendet. Das eigentlich Leuchtende sind vielmehr die weißglühenden Enden der Kohlenelektroden selbst. Von beiden Elektroden aus fliegen glühende Kohleteilchen fort, sowohl durch die Luftschicht hindurch zu der anderen Elektrode, als seitlich in den freien Raum. Aber diese Zerstäubung der Elektroden ist nicht bei beiden die gleiche. Von der positiven Kohle reißen sich die Teilchen in weit größerer Zahl ab als von der negativen, und so kommt es, daß, wenn das Bogenlicht eine Zeit lang besteht, und wenn immer dieselbe Kohle mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden ist, also wenn Gleichströme angewendet werden, daß dann die positive Kohlenelektrode sehr bald sich aushöhlt und einen weißglühenden Krater bildet. Zugleich hat die positive Kohle eine viel höhere Temperatur als die negative, 3500 gegen 2500°. Die negative Kohle bleibt während des Vorgangs immer erhaben und spitzt sich zu. Man sieht das Bild der beiden Kohlen in Fig. 365. Auf den Kohlenenden sieht man fortwährend eine Menge von runden Partikelchen hin und her laufen und sich warzenförmig an beliebige Stellen ansetzen. Es rühren diese von Verunreinigungen der Kohlen her, welche durch die große Glut schmelzen. Die Kohlen für elektrisches Licht werden besonders fabrikmäßig hergestellt und zwar verwendet man entweder nur aus Kohlenpulver unter einem Druck von 200 bis 400 Atmosphären gepreßte Kohlenstäbe (sogenannte Homogenkohlen) oder aber man macht die Kohlenstäbe hohl und versieht sie mit einem Kern einer leicht flüchtigen, helleuchtenden Substanz (sogenannte Dochtkohlen). Fig. 365 zeigt oben als positive Kohle eine Dochtkohle, unten als negative eine Homogenkohle.

Die Kohlen brennen in der Glühhitze durch das Hinzutreten des Sauerstoffs der Luft allmählich ab, und zwar, wie erwähnt, bei Gleichströmen die positive Kohle rascher als die negative. Deswegen nimmt man bei den elektrischen Lampen für Gleichstrom die positive (obere) Kohle gewöhnlich doppelt so dick als die untere (wie auch Fig. 365

zeigt), damit beide Kohlenstäbe nahezu gleich lange brennen können. Es läßt sich aber leicht einsehen, daß elektrisches Licht sich auch durch schnell wechselnde Wechselströme erzeugen lassen muß. Denn die Erwärmung der Elektroden hängt ja nach dem Jouleschen Gesetz ab von dem Quadrat der Stromstärke, nicht von der Richtung des Stromes. Ob also der positive Strom in der einen Richtung oder in der anderen Richtung durch die Kohlen fließt, die Erwärmung bleibt immer dieselbe, wenn die äußeren Verhältnisse dieselben bleiben. Von der Erwärmung hängt aber direkt die Lichtmenge ab, welche die Kohlen ausstrahlen können, und daher sind Wechselströme ebenso geeignet zur Erzeugung des elektrischen Bogenlichtes wie Gleichströme, wenn nur die Wechselströme rasch aufeinander folgen. Bei den Wechselstrommaschinen, wie sie jetzt konstruiert werden, finden in jeder Sekunde etwa 100 Stromwechsel statt, eine Zahl, welche vollkommen ausreicht, um das durch die Ströme erzeugte Licht als ganz kontinuierlich erscheinen zu lassen.

Fig. 365.



In einer anderen Beziehung dagegen findet ein Unterschied im elektrischen Licht statt, je nachdem es von Wechselströmen oder von gleichgerichteten Strömen erzeugt wird. Wenn durch die Kohlen ein stets gleichgerichteter Strom fließt, so bildet sich an der positiven Elektrode eine leuchtende Vertiefung, ein leuchtender Krater. Bei den elektrischen

Lampen für Gleichstrom, deren Beschreibung im folgenden gegeben wird, wird nun stets die obere Kohle zur positiven gemacht, d. h. mit dem positiven Pol der Dynamomaschine verbunden. Es bildet dann gewissermaßen die positive Kohle einen Reflektor, durch welchen die Lichtstrahlen nach unten geworfen werden. Das Licht breitet sich nicht gleichmäßig nach allen Seiten aus, sondern es wird mehr Licht nach unten geworfen, als nach den Seiten geht. Und da man gewöhnlich unten das Licht braucht, so ist das sehr vorteilhaft. Bei An-

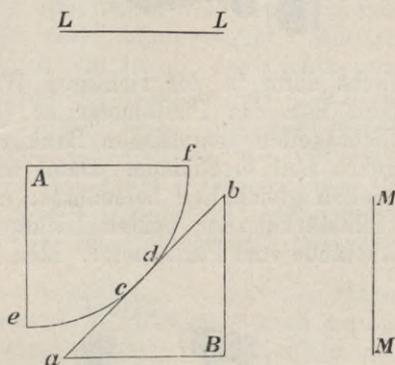
wendung von Wechselströmen dagegen wird abwechselnd jede Kohle bald positive, bald negative Elektrode. Infolgedessen brennen beide Kohlen gleich rasch ab; es bildet sich kein Krater in ihnen, sondern sie bleiben beide zugespitzt, wie sie es von vornherein waren. Um daher in diesem Falle die Hauptmenge des Lichts nach unten zu werfen, muß man künstlich Reflektoren anwenden, was man bei Gleichströmen nicht nötig hat.

Läßt man elektrisches Licht frei, d. h. ohne Glocke brennen, so ist die Lichtstärke, welche man durch ein Photometer messen kann, bei Gleichströmen ganz erheblich verschieden, je nach der Richtung, in welcher das Licht auf das Auge oder das Photometer fällt. Es ist z. B. bei einer Lampe, die durch Gleichströme gespeist wird, die Stärke des Lichtes, wenn es in horizontaler Richtung beobachtet wird, nur etwa der fünfte Teil von der, welche es zeigt, wenn unter 60° gegen die Horizontale beobachtet wird. Man muß deshalb elektrisches Licht, welches von Gleichströmen erregt wird, stets so hoch anbringen, daß die Strahlen unter bestimmtem Winkel auf die zu beleuchtende Fläche fallen. Bei Anwendung von Glocken werden die Unterschiede der Helligkeit in verschiedenen Richtungen vermindert.

Um ein Urteil über die Helligkeit des elektrischen Lichtes zu haben, muß man dasselbe mit anderen leuchtenden Körpern vergleichen. Diese Vergleichung vorzunehmen, ist die Aufgabe der Photometrie.

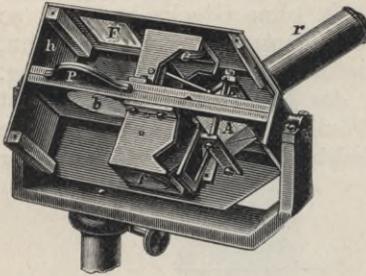
Es wird jetzt zur genauen Vergleichung von Lichtstärken gewöhnlich das Lummer-Brodhunsche Photometer benutzt. Es besteht dasselbe, wie die schematische Fig. 366 zeigt, aus zwei Glasprismen A und B, die in einem Flächenstück cd dicht aufeinander gepreßt sind. Wenn dieses System von einer Lichtquelle LL beleuchtet wird, so gehen die Strahlen durch cd ohne weiteres hindurch und treffen in ein bei O befindliches Auge, während die Strahlen, die auf fd und ce fallen, dort reflektiert werden, also nicht nach O gelangen. Das Auge sieht also einen hellen Kreis cd in dunklem Felde. Wird das System der Prismen dagegen von der Lichtquelle MM beleuchtet, so gehen die Strahlen durch cd direkt hindurch nach links, während sie von ac und db nach unten reflektiert werden und in das Auge O fallen. Das Auge sieht also einen dunklen Kreis cd in hellem Felde. Wirken nun beide Lichtquellen zu gleicher Zeit, so wird der Kreis hell auf dunkel oder dunkel auf hell sein, je nachdem von LL oder MM mehr Licht auf das Prismensystem kam, und der Kreis wird sich von seiner Umgebung nicht abheben, sondern ebenso hell sein wie diese, wenn

Fig. 366.



das Prismensystem von beiden Quellen gleich stark beleuchtet ist. Damit die beiden Lichtquellen nicht, wie aus der eben gegebenen Darstellung hervorgeht, unter rechtem Winkel zu dem Photometer zu stehen brauchen, sondern, was viel bequemer ist, in einer geraden Linie mit dem Photometer liegen, wird das Prismensystem in einem

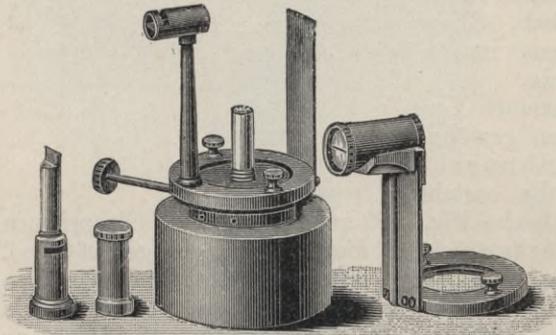
Fig. 367.



Apparat angebracht, den Fig. 367 geöffnet zeigt. Bei AB sieht man in diesem das Prismensystem, welches durch ein kleines Fernrohr r beobachtet wird. Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werfen ihr Licht, jede durch ein Fenster F (das andere, vordere ist in der Figur fortgelassen) auf die beiden Seiten eines Porzellanschirmes P, von welchem nur die eine Seite b sichtbar ist. Das von diesem zurückgeworfene Licht fällt auf je einen Spiegel e und f, und diese werfen das

Licht dann in der richtigen Weise durch das Prismensystem. Man muß nun das Photometer so lange auf einer zwischen den beiden Lichtquellen befindlichen Bank verschieben, bis Kreis und Umgebung gleich hell erscheinen. Dann wird das Photometer von beiden Lichtquellen gleich hell beleuchtet, und in diesem Falle verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen direkt wie die Quadrate ihrer Abstände vom Photometer. Man kann auf diese Weise Lichtstärken miteinander vergleichen.

Fig. 368.



Das Photometer wird verschiebbar auf einer Bank angebracht, die mit einer Längsteilung versehen ist. Das Zimmer, in dem die photometrischen Messungen vorgenommen werden, muß natürlich ganz verdunkelt sein, so daß außer von den zu vergleichenden Lichtquellen kein Licht auf das Photometer fällt.

Als Lichteinheit, mit der man alle Lichtstärken vergleichen kann, wird jetzt in Deutschland das Licht einer Lampe benutzt, welche von v. Hefner-Alteneck konstruiert wurde, der Amylacetatlampe. In dieser verbrennt reines Amylacetat durch einen Docht, der etwa 8 mm inneren und 8,1 mm äußeren Durchmesser besitzt. Die Lampe, welche in Fig. 368 abgebildet ist, und die als Hefnersche Normallampe bezeichnet wird, hat, wenn man der Flamme eine Höhe von 40 mm gibt, eine Lichtstärke, welche jetzt unter dem Namen „Hefner-einheit“ oder Hefnerkerze (HK) als Einheit benutzt wird. Um die

Höhe der Flamme zu messen, befindet sich rechts auf der Lampe ein sogenanntes Flammenmaß. Die Lampe hat den Vorzug der sicheren, stets gleichmäßigen Herstellbarkeit. Eine deutlichere Vorstellung von der Lichtstärke dieser Einheit wird man erhalten, wenn man sich merkt, daß eine gewöhnliche Straßengasflamme oder elektrische Glühlampe eine Helligkeit von ungefähr 15 HK hat.

Die Helligkeit des elektrischen Lichtes hängt natürlich ab von der Stärke des Stromes, welcher durch die Kohlen hindurchgeht, und man kann durch Veränderung der Stromstärke die Helligkeit des Lichtes in sehr weiten Grenzen verändern, von einigen Hundert Kerzen bis zu vielen Zehntausenden Kerzen Stärke.

Aber auch von der Länge des Lichtbogens, d. h. von der Größe der Zwischenschicht zwischen den beiden Kohlen, hängt bei gleicher Stromstärke die Lichtstärke einer elektrischen Lampe wesentlich ab. Ist die Entfernung zwischen den Kohlenspitzen zu groß, so wird das Licht unruhig, es geht häufig aus; es ist die Grenze beinahe erreicht, bei welcher der Strom nicht mehr hindurchgeht. Infolgedessen ist für den praktischen Gebrauch die Länge des Lichtbogens in Übereinstimmung zu bringen mit der Stromstärke, der Zahl der Ampère, die man durch die Lampe gehen läßt. Im allgemeinen sieht man darauf, daß der Lichtbogen für Lampen, die mit 5 bis 6 Ampère Stromstärke gespeist werden, nur 1 bis 2 mm beträgt, für Lampen von 8 bis 10 Ampère auf höchstens 3 mm steigt und bei den starken Lampen (mit 20 und mehr Ampère Stromstärke) auf etwa 4 bis 5 mm wächst.

Wenn die beiden Kohlen einander berühren, so geht der Strom direkt zwischen ihnen durch, der Widerstand ist nicht mehr groß genug, um eine bedeutende Erwärmung hervorzubringen. Die Kohlenenden kommen nicht ins Weißglühen, es bildet sich gar kein elektrisches Licht. Man muß daher nach der ersten Berührung die Kohlen etwas trennen, damit sich der elektrische Flammenbogen bildet. Hat man aber nun den Kohlen zuerst einen passenden Abstand gegeben, so daß der Lichtbogen eine passende und brauchbare Länge hat, so vergrößert sich, wenn die Kohlen feststehen, dieser Abstand während des Brennens von selbst fortwährend, weil eben die Kohlen durch das Abbrennen (Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft) kleiner werden, und es muß bald der Fall eintreten, daß der Strom den Widerstand der Luftschicht nicht mehr überwinden kann. Der Strom hört dann auf und mit ihm das elektrische Licht.

Es war mithin die erste Forderung für die praktische Benutzung des elektrischen Lichtes, die Kohlenstäbe beweglich zu machen, eine Regulierung zu ersinnen, durch welche die Kohlen stets auf gleichen Abstand voneinander gebracht werden. Diese Regulierung muß eine Reihe von Forderungen erfüllen. Erstens muß sie die Kohlenenden, die von selbst beim Brennen in immer größeren Abstand voneinander kommen, immer wieder einander entgegenbringen, so daß das Licht immer wieder in gleicher Stärke sich entwickelt. Zweitens aber müssen die Kohlen zuerst aneinandergeschoben werden, um dem Strom erst den Durchgang zu gestatten und dann gleich getrennt werden, um den

Lichtbogen entstehen zu lassen. Auch dies muß die Regulierung besorgen. Drittens muß die Regulierung etwaige Schwankungen in der Stärke des Stromes ausgleichen, d. h. sie muß den Abstand der Kohlen, also den Widerstand der Lampe vergrößern, wenn der Strom zu stark, ihn verkleinern, wenn er zu schwach wird.

Es wurden deshalb schon seit Beginn der Verwendung des elektrischen Lichtes für Vorlesungszwecke derartige Regulatoren konstruiert, welche man kurz als elektrische Lampen bezeichnet. Es ist selbstverständlich, daß eine so feine Regulierung, welche jeder Schwankung des Stromes folgen muß, nicht möglich ist, ohne daß man den Strom selbst zu dieser Regulierung benutzt. Es muß der Strom, wenn er schwächer wird, von selbst die beiden Kohlen einander nähern, und wenn er stärker wird, sie von selbst voneinander entfernen, so daß sie stets in entsprechendem Abstand voneinander sind. Die Kohlen während des Abbrennens einander zu nähern, das ist eine mechanisch leicht zu lösende Aufgabe. Man braucht ja nur die untere Kohle festzustellen und die obere langsam beweglich zu machen, so daß sie durch ihr eigenes Gewicht beständig sinkt. Es handelt sich dann bloß bei der Regulierung darum, zu verhindern, daß die obere Kohle zu weit sinkt, und vielmehr zu bewirken, daß sie immer gerade bis zur passenden Entfernung an die untere Kohle heranrückt.

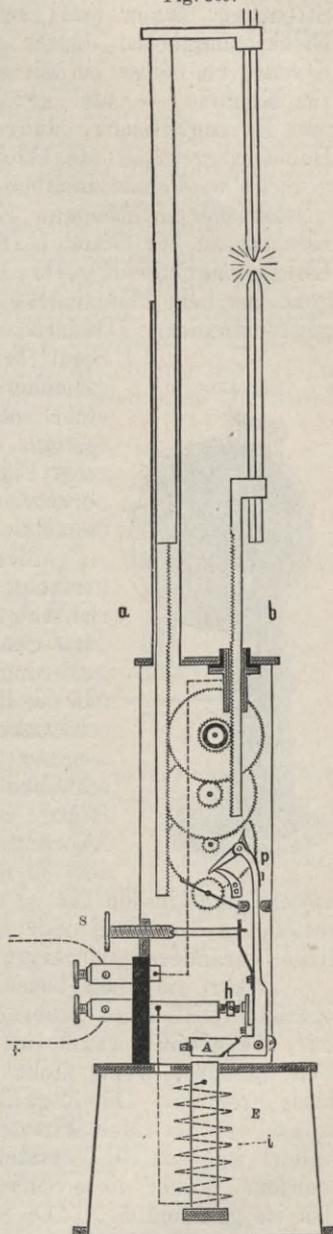
Für die Regulierung des Lichtbogens nun ergab sich als einfachstes Mittel die Anwendung eines Elektromagneten. Wenn man den Strom, der das Licht erzeugen soll, um einen Kern von weichem Eisen herumführt, und diesem einen beweglichen Anker gegenüberstellt, so hat man ja darin einen Mechanismus, welcher je nach der Stärke des Stromes starke oder schwache Bewegungen hervorbringen kann. Die Stärke der Anziehung eines Elektromagneten auf einen Anker ist ja bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen direkt abhängig von der Stärke des Stromes, der durch seine Windungen fließt. Man braucht also nur den Polen des Elektromagneten einen Eisenanker gegenüberzustellen, welcher drehbar befestigt ist, um je nach der Stärke des Stromes eine größere oder geringere Bewegung dieses Ankers zu erhalten. Diese Bewegung des Ankers kann man dann durch gewöhnliche mechanische Mittel, mittels Rädern und Zahnstangen oder sonst irgendwie, auf die eine Kohle übertragen. Wenn also der Abstand der Kohlen zu klein, also die Stromstärke zu groß ist, so wird der Anker vom Magneten angezogen und man kann eben durch Räder oder Zahnstangen bewirken, daß dann die Kohlen voneinander entfernt werden, bis der Widerstand, also auch die Stromstärke wieder normal geworden sind. Wenn aber der Anziehung des Elektromagneten auf seinen Anker keine Kraft entgegenwirken würde, so würde der drehbare Anker stets ganz an den Magneten herangezogen werden. Um dies zu verhindern, muß man der Anziehung des Magneten eine Kraft entgegenwirken lassen, welche den Anker wieder von demselben abzuziehen sucht. Eine solche Kraft hat man z. B. in einer Feder, welche, wenn der Magnet den Anker nach unten zieht, ihn nach oben zu ziehen sucht. Bei einer bestimmten Stellung des Ankers herrscht dann Gleichgewicht zwischen der Anziehung des Magneten und der Feder. Jede Vergrößerung

der Stromstärke macht den Magneten stärker, zieht also den Anker herab und spannt dadurch die Feder. Durch diese Herabbewegung des Ankers bringt man nun eine Entfernung der Kohlen voneinander hervor, dadurch wird der Strom schwächer, der Elektromagnet ebenfalls, die Anziehung der Feder überwiegt und bringt dadurch den Anker und die Kohle wieder auf die normale Entfernung.

Nach diesen Prinzipien im allgemeinen wurden schon die ersten elektrischen Lampen konstruiert, die aber noch recht kompliziert gebaut waren. Bei den neueren Lampen strebt man im allgemeinen danach, eine möglichst einfache und sichere Konstruktion anzuwenden. Dabei läßt man vielfach den Anker des Elektromagneten nicht direkt die eine Kohle bewegen, sondern man richtet es vielmehr so ein, daß der Anker bei seiner Bewegung ein Räderwerk entweder arretiert oder in Bewegung setzt und erst durch dieses Räderwerk läßt man die Kohle bewegen. Als ein erstes Beispiel dieser Art Lampen kann die in Fig. 369 schematisch gezeichnete Lampe von Hefner-Alteneck dienen, die vielfach, insbesondere in Laboratorien im Gebrauch ist. Bei jeder elektrischen Lampe hat man nach dem Gesagten zwischen der elektrischen und der mechanischen Regulierung zu unterscheiden. Die elektrische Regulierung besteht hier, wie erwähnt, in einem Elektromagneten E, der einen Anker A anziehen kann. Mit diesem Anker ist ein Hebel fest verbunden, dessen entferntes Ende in ein Zahnrad eingreift. Durch die Schraube s wird eine Feder gespannt, die mit dem Anker fest verbunden ist, und welche der Anziehung des Elektromagneten entgegenwirkt.

Die mechanische Regulierung wird durch drei Räder und zwei Zahnstangen bewirkt. Die beiden Kohlen sind an den Zahnstangen befestigt, welche in die Zähne des obersten Rades eingreifen, und zwar der obere Kohlenhalter am Umfang des großen Rades, der untere am Umfang eines halb so großen, auf derselben Achse befindlichen. Durch das zweite und dritte Rad wird die Bewegung auf das kleine unterste Rad über-

Fig. 369.



tragen, in welches der Hebel *p* eingreifen kann. Das Räderwerk wird durch eine Uhrfeder in Gang gesetzt. Dadurch laufen zunächst die beiden Kohlen zusammen, bis zur Berührung. Nun beginnt der Strom zu fließen und zwar geht er von der Klemme + durch den Elektromagneten, durch das Gehäuse des Apparates, in die obere Kohle, von dieser in die untere und von dort (in der punktierten Linie) zur Klemme — und zur Maschine zurück. Der starke Strom macht nun *E* magnetisch, dadurch wird der Anker *A* angezogen und der Hebel *p* greift in das kleine Rad ein, welches dadurch etwas zurückgedreht wird und damit die Kohlen auseinander bringt. In dem Moment entsteht der Lichtbogen. Zu gleicher Zeit findet aber jetzt ein direkter Kontakt an der Stelle *h* statt, so daß der Strom nicht mehr um den Elektromagneten *E* geht. Der Anker wird also losgelassen, der Hebel *p* geht aus dem kleinen Rad heraus und die Kohlen bewegen sich wieder gegeneinander. Dadurch wird *A* wieder angezogen und so geht das Spiel fort, durch welches der Lichtbogen stets auf gleicher Länge erhalten wird. Die äußere Ansicht einer solchen Lampe mit einem versilberten Hohlspiegel, welcher das Licht konzentriert zurückwirft, zeigt Fig. 370. Diese Lampen werden viel in Laboratorien und zu Zwecken der Projektion von Bildern benutzt.

Fig. 370.



Man erkennt aus dieser Beschreibung der Hefnerschen Lampe, daß außer der elektrischen Einrichtung noch eine feine, rein mechanische Einrichtung dazu gehört, um eine Lampe zu vollkommener Regulierung zu bringen. Das Haupterfordernis ist eben, daß die Bewegung der Kohlen jeder kleinsten Stromschwankung unmittelbar folgt und daß diese Bewegung keine ruckweise, sondern eine ganz allmähliche ist. Natürlicherweise läßt sich sowohl in Bezug auf die rein mechanische Ausführung und Anordnung der einzelnen Teile, als auch in Bezug auf die elektrische Einrichtung des Regulators vieles ändern, und in der Tat ist eine Unzahl von Lampen konstruiert worden, welche in der einen oder anderen Hinsicht wesentliche oder unwesentliche Veränderungen zeigen.

Aber die eben beschriebene elektrische Regulierung ist nur in speziellen Fällen zu gebrauchen. Eine jede solche Lampe funktioniert nur brauchbar, wenn sie allein im Schließungskreis einer Maschine sich befindet, wenn nicht noch andere Lampen in demselben Stromkreis brennen. Die Regulierung dieser Lampen wird ja dadurch besorgt, daß bei einer Schwächung des Stromes die Kohlen einander genähert werden, bei Verstärkung des Stromes sie voneinander getrennt werden. Woher diese Schwächung oder Verstärkung des Stromes rührt, das ist gleichgültig. Die Schwächung kann herrühren von den Vorgängen in der Lampe selbst, vom Abbrennen der Kohlen u. s. w., sie kann aber auch von außen kommen, wenn der Strom, der in die Lampe gesendet wird, nicht ganz konstant ist. Wenn nun zwei oder mehrere

Lampen hintereinander in einem Stromkreis sich befinden, so kann man sofort einsehen, daß diese Regulierung dann illusorisch wird. Nehmen wir an, es brennen bloß zwei Lampen hintereinander in demselben Stromkreis. Die erste brenne gerade normal, bei der zweiten seien die Kohlen zu weit auseinander. Dann wird die Regulierung die Kohlen der zweiten Lampe einander nähern, also den gesamten Strom verstärken. Infolge dieser Verstärkung muß nun aber auch die Regulierung der ersten Lampe in Tätigkeit kommen und deren Kohlen auseinander bringen. Jetzt brennt also die zweite Lampe vielleicht normal, während die erste schlecht brennt. Noch schlimmer ist es, wenn mehr als zwei Lampen in einen Stromkreis eingeschaltet werden sollen. Was der einen Lampe nutzt, das schadet der anderen. Es findet ein ewiger Kampf ums Dasein zwischen allen Lampen statt.

Man kann diese Schwierigkeiten aber durch eine einfache Schaltungsänderung vermindern. Bei der oben beschriebenen elektrischen Lampe nämlich war die elektrische Regulierungsvorrichtung direkt in den Hauptstromkreis eingeschaltet. Dadurch übernahm sie wohl

Fig. 371.

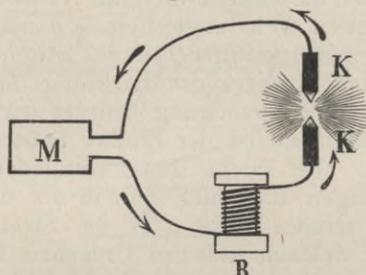
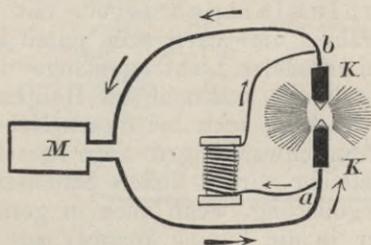


Fig. 372.



die Regulierung des Kohlenabstandes, wenn dieser sich änderte, aber sie würde auch beeinflusst durch alle anderen Vorgänge im Stromkreis außerhalb der eigenen Lampe und deswegen war sie für mehrere Lampen in demselben Stromkreis direkt schädlich und unbrauchbar.

Eine solche Regulierung ist also bloß für eine Lampe zu brauchen, die allein in einem Stromkreis brennt, also für eine Lampe für Einzellicht. Das einfache Schema des Stromes, wie er in einer solchen Lampe für Einzellicht fließt, ist in Fig. 371 gezeichnet.

Es geht darin der Strom von der Maschine M durch die Regulierungsvorrichtung R und durch die Kohlen KK zur Maschine zurück. Kohlen und Regulierungsapparat sind hintereinander geschaltet. Jede Veränderung im Widerstand des Lichtbogens und jede sonstige Stromschwankung setzt die Regulierungsvorrichtung in gleichmäßige Tätigkeit.

Wenn man dagegen, und dies ist das neue Prinzip, den Strom, wenn er in eine Lampe eintritt, teilt, so daß die Regulierungsvorrichtung im Nebenschluß, nicht im Hauptstromkreis liegt, dann ergeben sich nach den Gesetzen der Stromverteilung weit günstigere Verhältnisse. Das Schema für eine solche Stromverteilung ist in Fig. 372 angegeben.

Hier geht auch wieder der Strom von der Maschine M aus bis

zu den Punkten a und b; dort aber teilt er sich und geht einerseits durch die Kohlen KK, andererseits durch die Regulierungsvorrichtung. Die Stromstärken in beiden Zweigen verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände, wie wir aus S. 72 wissen. Je größer daher der Widerstand in dem Lichtbogen wird, desto größer wird die Stromstärke in dem Regulierungsweig, desto kräftiger kann die Regulierung wirken und die Kohlen aneinander bringen. Wie groß dagegen der Strom in Wirklichkeit ist, der in die beiden Zweige eintritt, darauf kommt es viel weniger an. Die Regulierung kommt hauptsächlich in Tätigkeit durch die Vorgänge in der eigenen Lampe. Stromschwankungen von außen ändern die Stromstärken in den beiden Zweigen in gleichem Verhältnis, beeinflussen daher die Regulierung in viel geringerem Maße als bei der früheren Schaltung. Allerdings ist das nur bei ganz geringen äußeren Stromschwankungen der Fall, wie man ja sofort durch die Betrachtung des Grenzfalles sehen kann, daß, wenn der Strom außerhalb sehr schwach wird, natürlich auch die Regulierung sehr schwach werden muß. Die Praxis hat es aber hauptsächlich mit kleinen Stromschwankungen zu tun.

Der Elektromagnet muß bei Lampen dieser Art, die man Nebenschlußlampen nennt, mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes umwickelt sein, damit nur ein ganz geringer Teil des Stromes bei normaler Lichtbogenlänge durch die Regulierungsvorrichtung hindurchgehe, während der Hauptstrom zur Lichterzeugung benutzt wird.

Aber auch bei diesen Nebenschlußlampen ist der Einfluß äußerer Stromschwankungen zwar geschwächt, aber nicht ganz vermieden; vielmehr wirken äußere Stromschwankungen auch hier störend auf die Regulierung, wenn auch in geringerem Grade. Wird z. B. der Strom, der in die Lampe kommt, aus irgend welchen äußeren Ursachen zu stark, so werden auch die beiden Zweigströme stark, das Licht brennt also stärker als normal, aber auch der Regulierungsmagnet ist stärker als im normalen Zustand. Je stärker der Magnet ist, desto mehr zieht er die Kohlen aneinander (da ja Verstärkung des Stromes im Regulierungsweig die Kohlen aneinander bringen muß). Es wird also dann das zu starke Licht noch stärker, und umgekehrt ist es bei zu schwachem Licht. Es werden also äußere Stromschwankungen durch die Regulierung nicht ausgeglichen. Auch hierbei schädigen die Stromschwankungen im äußeren Stromkreis noch jede einzelne Lampe, wenn auch in viel geringerem Maße als bei den Lampen, welche die Regulierung nicht im Nebenschluß haben.

Eine vollkommene gegenseitige Unabhängigkeit aber vieler Lampen, die in einen Stromkreis hintereinander eingeschaltet sind, wurde erst erreicht durch eine Einrichtung, die von Hefner-Alteneck angegeben wurde, die das aufgestellte Problem wirklich löste und die zum ersten Male in der Tat ein vorzügliches Brennen mehrerer Lampen in einem Stromkreise gestattete. Dies wurde erreicht durch eine besondere Schaltung und Regulierung. Die Lampen, welche diese Einrichtung besitzen, nennt man Differentiallampen. Sie wurden zuerst von Siemens & Halske bei ihren vielen Beleuchtungsanlagen eingeführt.

Auch bei der Differentiallampe wird der Strom, der von der Maschine kommt, verzweigt. In dem einen Zweig befinden sich die Kohlen, in dem anderen eine Regulierungsvorrichtung. Die wesentliche Veränderung ist aber die, daß auch in dem ersten Zweig, in welchem sich die Kohlen befinden, eine Regulierungsvorrichtung angebracht ist und zwar so, daß sie der anderen entgegenwirkt. Durch das Schema in Fig. 373 wird die Wirkung der Differentiallampe deutlich werden.

Von der Maschine M geht der Strom nach den beiden Verzweigungspunkten a und b und durchfließt den Zweig aR_1b mit der Regulierungsvorrichtung R_1 und den Zweig aRb mit der Regulierungsvorrichtung R und den Kohlen KK mit gleicher Zeit. Die Stromstärken in den beiden Zweigen verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände. Die Regulierungen sind nun so eingerichtet, daß eine Verstärkung des Stromes in R_1 die Kohlen näher aneinander bringt, die Verstärkung des Stromes R dagegen die Kohlen auseinander

Fig. 373.

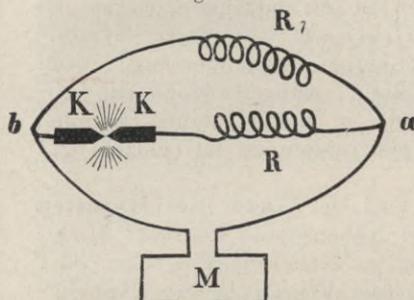
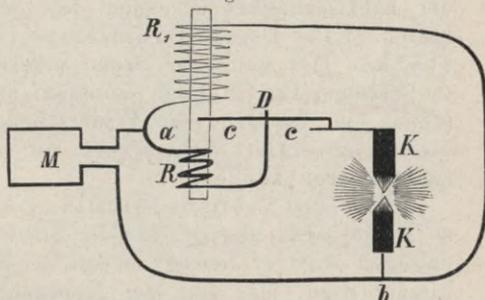


Fig. 374.



zieht. Wird also der Lichtbogen zu groß, also sein Widerstand zu groß, so wird in R_1 die Stromstärke größer und dadurch werden die Kohlen näher aneinander gebracht. Wird dagegen der Lichtbogen zu klein, also die Stromstärke in R größer, so werden die Kohlen auseinander gezogen, so daß der Lichtbogen wieder die normale Länge bekommt.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis wird bei dieser Regulierung nicht beeinflusst. Denn die Kohlen stellen sich immer auf normalen Widerstand ein. Durch die Vorgänge in einer Lampe werden also die anderen nicht in Mitleidenschaft gezogen. Der äußere Stromkreis ist daher unabhängig von den Vorgängen in der Lampe und umgekehrt.

Die Art und Weise nun, wie Hefner-Alteneck die beiden Regulierungen anwendete, ist am einfachsten aus Fig. 374 zu ersehen. Die Regulierungsvorrichtung besteht aus zwei Solenoiden R und R_1 , in welche ein Eisenzylinder eintaucht. Das obere Solenoid R_1 , welches im Nebenschluß zu den Kohlen liegt, besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes, das untere, welches im Hauptstrom liegt, aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes. Die untere Kohle steht fest, während die obere durch einen Hebelarm cc , der sich um D drehen kann, an dem Eisenzylinder befestigt ist. Wird der Strom im Solenoid R_1

stärker, so wird der Eisenstab in dieses hineingezogen und dadurch die obere Kohle gesenkt. Wird der Strom in R stärker, so wird der Eisenzylinder in dieses hineingezogen und die Kohle K hebt sich. Auf diese Weise ist die Differentialwirkung der beiden Spulen sehr einfach hergestellt.

So kann man also mit Hilfe des Differentialprinzips eine Reihe von Lampen hintereinander in den Stromkreis einschalten, ohne daß sie ihre Regulierung gegenseitig schädigen.

Wir können die Unterschiede der drei Lampengattungen, der Hauptstrom-, Nebenschluß- und Differentillampen leicht in folgender Weise uns klar machen.

Wenn der Anker des Elektromagneten einer Hauptstromlampe durch die Feder einmal in bestimmten Abstand eingestellt ist, so bewegt er sich so lange nicht, als die Stromstärke, die in den Windungen des Magneten, also auch durch die Kohlen fließt, konstant bleibt. Wird dagegen diese Stromstärke stärker oder schwächer, so reguliert der Elektromagnet, er sucht also immer die Stromstärke konstant zu halten. Eine Hauptstromlampe reguliert auf konstante Stromstärke. Da nun aber, wenn mehrere Lampen vorhanden sind, wohl die Stromstärke in allen konstant sein kann, während doch die Abstände der Kohlen, die Widerstände, sich in den einzelnen Lampen ändern, so erklärt sich, warum die Hauptstromlampen nur einzeln gut funktionieren können.

Bei den Nebenschlußlampen wird der Anker des Magneten so lange nicht bewegt, als der Strom im Nebenschluß konstant bleibt, dagegen wird er bewegt, wenn der Strom im Nebenschluß größer oder kleiner wird. Da nun der Nebenschluß (die Wickelung des Regulierungsmagneten) unveränderlichen Widerstand hat, so hängt die Stromstärke im Nebenschluß nur davon ab, wie groß die Spannungsdifferenz an den Anlegepunkten des Nebenschlusses ist. Da er nun immer zu den Kohlen parallel geschaltet wird, so erkennt man, daß die Lampe nicht reguliert, wenn die Spannung an den Kohlen denselben Wert behält, und daß sie reguliert, wenn diese Spannung sich ändert. Eine Nebenschlußlampe reguliert also auf konstante Spannung. Da nun die Spannungsdifferenz zwischen den Kohlen gleich dem Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand ist, so sieht man, daß auch dabei mehrere Lampen hintereinander sich noch stören müssen. Wird der Widerstand in einer Lampe zu groß, also ihr Strom zu klein, so wird der Strom auch in den anderen Lampen zu klein, und daher wird deren Widerstand durch Auseinanderschieben der Kohlen zu groß. Zwei solche Lampen, hintereinander geschaltet, brennen also dann beide zu dunkel oder zu hell. Wenn dagegen die Lampen einzeln parallel geschaltet werden und man die Spannung an den Endpunkten der Parallelleitungen, wie es jetzt immer geschieht, konstant hält, so brennen die Lampen vortrefflich, und auch zwei solche Lampen hintereinander regulieren sich noch gut ein, wenn ihre Federn richtig für die Stromstärke eingestellt sind.

Endlich bei den Differentillampen wird durch die Regulierung bewirkt, daß das Verhältnis zwischen der Spannung (in der Neben-

spule) und der Stromstärke (in der Hauptspule) dasselbe bleibt. Dieses Verhältnis ist aber der Widerstand der Lampe. Eine solche Lampe bewirkt also, daß der Widerstand zwischen den Kohlen immer derselbe ist. Die Differentiallampe reguliert auf konstanten Widerstand. Daher behalten eine Reihe von Differentiallampen, die hintereinander geschaltet sind, immer denselben Widerstand, also auch dieselbe Stromstärke, wenn nicht die Maschine, die die Ströme erzeugt, schwankt. Daher eignen sie sich besonders vor allen Lampen zur Serienschaltung.

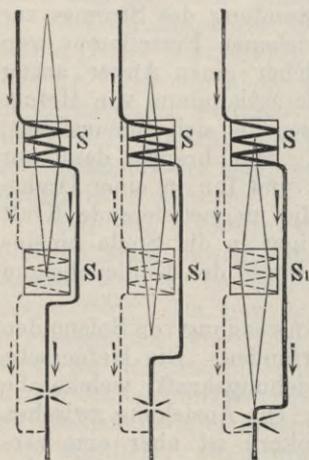
Alle bisher konstruierten Lampen sind nun entweder Hauptstromlampen oder Nebenschlußlampen oder endlich Differentiallampen. Am häufigsten werden die Differentiallampen benutzt, die die beste Regulierung besitzen. Die Konstruktionen der einzelnen Fabriken unterscheiden sich in Bezug auf den elektrischen Teil der Regulierung nur wenig, dagegen erheblich in Bezug auf den mechanischen Teil.

Was zunächst den elektrischen Teil betrifft, so haben wir schon die zwei hauptsächlichsten Methoden der Anwendung des Stromes zur Regulierung gesehen. Bei der oben beschriebenen Einzellampe von Siemens war es ein Elektromagnet, welcher einen Anker anzog und so die Regulierung besorgte, bei der Differentiallampe von Hefner waren es Solenoide, welche weiches Eisen in sich hineinziehen, wenn sie von einem Strome durchflossen sind. Man braucht dann nur den einen Kohlenhalter aus Eisen zu machen und ihn in einer Drahtspule schweben zu lassen, dann wird durch die magnetisierende Kraft der Spule dieses Eisen bald mehr, bald weniger in die Spule hineingezogen, je nach der Stromstärke, und dadurch der Kohlenabstand selbsttätig reguliert.

Eine zweckmäßige Verbesserung bei der Anwendung von Solenoiden zur elektrischen Regulierung hat Krizik erfunden. Die Hefnersche Differentialregulierung beruht ja auf der Anziehungskraft, welche die beiden Solenoide auf den Eisenzylinder äußern. Die Anziehung zwischen einem Solenoid und einem zylindrischen Eisenkern ist aber eine verschieden starke, je nachdem der Kern weiter oder weniger weit in das Solenoid eintaucht. Die Kraft ist am größten, wenn der Stab so weit in die Spirale hineingezogen ist, daß sein Ende mit der Mitte des Solenoids zusammenfällt. Sie ist geringer, wenn der Stab die Mitte noch nicht erreicht hat oder über sie hinaus ist. Darnach ist auch bei den beiden Solenoidspulen der Hefnerschen Lampe die Anziehung derselben auf den Eisenkern eine verschiedene, je nach der Lage des Kerns in denselben; folglich muß auch die Stärke der Regulierung sich ändern, je nachdem der Stab ziemlich weit in die eine der beiden Spulen eintaucht oder wenig. Um eine gleichmäßige Regulierung zu erlangen, muß man noch mechanische Hilfsmittel, Zahnstangen, Räder, Pendel, anwenden. Dagegen erreicht Krizik ohne komplizierten Mechanismus eine gleichmäßige Regulierung dadurch, daß er dem Eisenkern nicht eine zylindrische Form gibt, sondern eine nach beiden Seiten spitz zulaufende. Dadurch wird erzielt, daß die Bewegung des Kerns immer eine gleichmäßige bleibt. Denn an den Stellen, an denen die Kraft der Solenoide auf den Eisenkern am stärksten sein würde,

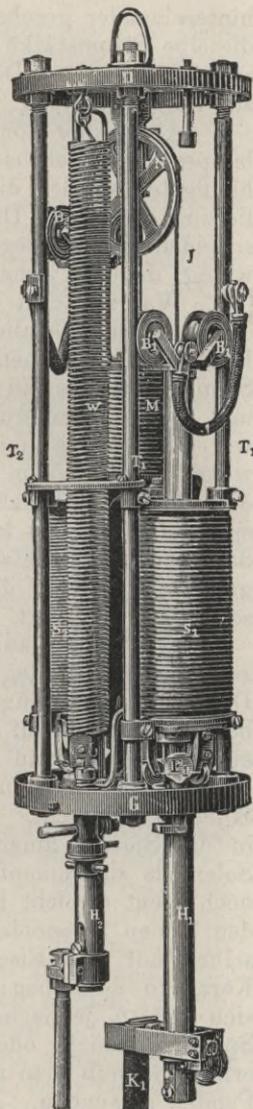
befinden sich jetzt geringere Eisenmassen, so daß das Produkt aus der magnetisierenden Wirkung der Spirale und der Menge des Eisens im Kern immer dasselbe bleibt, und gerade von diesem Produkt hängt die Wirkung des Solenoids auf den Kern ab. In den extremen Lagen wirkt daher bei der Kzikischen Anordnung das Solenoid nur auf die spitzen Enden, während, wenn der Stab in der Mitte einer Spule sich befindet, die Wirkung auf die größte Breite ausgeübt wird. Dadurch ist erreicht, daß die Anziehungskraft fast in der ganzen Länge des Stabes dieselbe bleibt. In Fig. 375 ist ein solcher Eisenstab in drei verschiedenen Lagen innerhalb der beiden Spulen gezeichnet. In jeder Lage des Stabes ist die Kraft der Spulen auf ihn dieselbe.

Fig. 375.



In der ursprünglichen Form war die Kzikische Lampe (welche von der Gesellschaft Schuckert konstruiert wird) tatsächlich mit zwei übereinander liegenden Differentialspulen versehen, in welchen der doppelt konische Eisenkern schwebte. Jetzt werden die Lampen, von denen Fig. 376 eine Abbildung gibt, so konstruiert, daß die beiden Differentialspulen S_1 und S_2 nebeneinander stehen und in jeder sich nur ein einfach konischer Eisenkern befindet, dessen spitzes Ende nach oben gerichtet ist. Links in der Figur ist die Spule S_2 aus dünnem Draht, rechts die Spule S_1 mit dickem Draht. Der Eisenkern von S_1 trägt den oberen Kohlenhalter H_1 , während der Eisenkern von S_2 mit dem unteren Kohlenhalter H_2 fest verbunden ist. Der untere Kohlenhalter ist unten rechtwinklig umgebogen, so daß die untere Kohle nach oben gerichtet ist und der oberen gerade gegenübersteht. Die beiden Kohlenhalter sind nun durch eine Schnur J , die über die oben sichtbare Rolle läuft, miteinander verbunden. Dadurch wird bewirkt, daß beide Kohlen sich immer um gleich viel verschieben. Die Kohlenhalter, die sich über die Spulen hinaus verlängern, werden durch Rollen an den Stangen T_1

Fig. 376.



und T_2 geführt, damit sie sich nicht verdrehen können. Bei zu geringem Abstand der Kohlen ist der Strom in S_1 stark und dadurch wird die obere Kohle gehoben, die untere also gesenkt, der Kohlenabstand also vergrößert. Bei zu großem Kohlenabstand ist der Strom in S_2 stark, die obere Kohle wird gesenkt, die untere dadurch gehoben, der Kohlenabstand also verringert.

Wenn mehrere Bogenlampen hintereinander geschaltet werden sollen, so muß noch eine Vorrichtung angebracht sein, um eine Lampe vollkommen aus dem Stromkreis auszuschalten, wenn sie aus irgend einem Grunde, z. B. wenn eine Kohle abbricht, ganz erlischt. Sonst würde nämlich der gesamte Strom durch den anderen Zweig der Zweigleitung gehen, nämlich durch das Solenoid mit den vielen dünnen Drahtwindungen, und diese stark erhitzen und andererseits selbst so geschwächt werden, daß die übrigen Lampen erlöschen. Deswegen wird dem Strom für den Fall des Erlöschens noch ein anderer Weg geboten, als durch die dünne Spirale. Bei der Lampe von Schuckert fließt dieser Zweigstrom, der um S_2 geht, noch um ein Stück weichen Eisens M herum. Dieses wird zwar magnetisch, aber da der Zweigstrom sehr schwach ist, so wird es nicht magnetisch genug, um einen Anker anzuziehen. Erst wenn die Lampe erloschen ist und der ganze Strom durch diesen Zweig geht, wird der Elektromagnet stark genug, den Anker anzuziehen, und der Anker bringt nun einen dicken Draht W in Kontakt mit der Hauptstromklemme, so daß der Strom nun hauptsächlich durch diesen dicken Draht geht. Dieser ist zugleich auch noch um den Elektromagneten M gewunden, damit dieser dann stets stark genug bleibt, den Anker angezogen zu erhalten.

Ganz ähnlich sind die selbsttätigen Kontaktvorrichtungen bei anderen Differentiallampen, wenn sie hintereinander geschaltet werden. Durch einen solchen Kontakt wird eine große Sicherheit einer solchen Beleuchtungsanlage bei unzeitigem Erlöschen einer Lampe erzielt.

Die eben beschriebene Lampe von Schuckert zeichnet sich dadurch aus, daß sie außer den Führungen gar keine mechanische Regulierung hat. Bei anderen Lampen ist außer der elektrischen Regulierung noch immer eine rein mechanische Regulierung vorhanden, die natürlich bei den einzelnen Systemen vielfache Verschiedenheiten aufweist. Es handelt sich bei der mechanischen Regulierung immer darum, die durch die elektrische Regulierung hervorgebrachten Bewegungen eines Ankers oder eines Eisenkerns zunächst auf ein Räderwerk hemmend oder lösend wirken zu lassen, und erst durch dieses von selbst ablaufende Räderwerk die Bewegung der Kohlen hervorzubringen, die dann recht ruhig und stetig vor sich geht.

Die Seillampe von Siemens & Halske, von der Fig. 377 den Mechanismus im Durchschnitt und Fig. 378 in perspektivischer Ansicht zeigt, ist eine Differentiallampe. Der elektrische Teil besteht aus vier Spulen (AA in Fig. 377), von denen die oberen zwei, wie man aus Fig. 378 sieht, im Hauptstrom, die unteren zwei im Nebenschluß liegen. Ein Eisenkörper B , der wie ein römisches H gebildet ist, hat vier Schenkel, die in die vier Spulenöffnungen hineinreichen. Der ganze Eisenkörper ist in einer Gabel D gelagert, welche bei ihrer

Bewegung das Laufwerk arretiert oder losläßt. Über eine mit dem Räderwerk verbundene Scheibe E ist ein Seil F gelegt, das an seinen beiden Enden die beiden Kohlenhalter trägt. Durch das Übergewicht des oberen Kohlenhalters wird das Laufwerk in Bewegung gesetzt, bis die Kohlen zusammentreffen. In diesem Moment geht ein starker Strom durch die Hauptspulen oben, diese ziehen den Eisenkörper in sich hinein und ziehen dadurch die Kohlen auseinander, die nun durch die Differentialregulierung zum langsamen Nachrücken von beiden Seiten gebracht werden. Die Lampen werden, wie Fig. 377 bei L zeigt, mit einem soge-

Fig. 377.

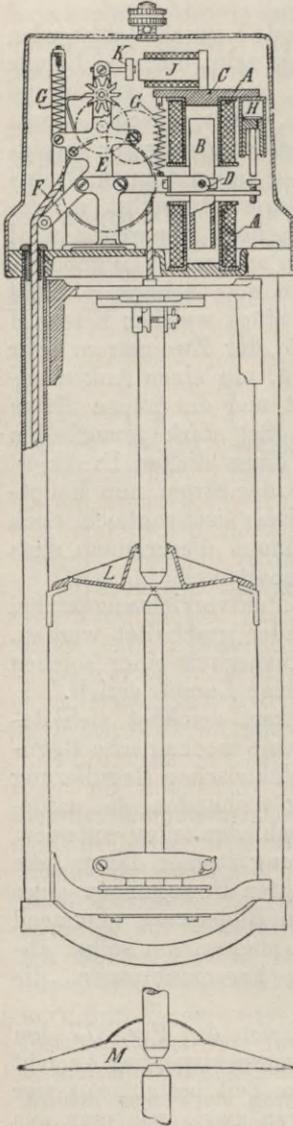
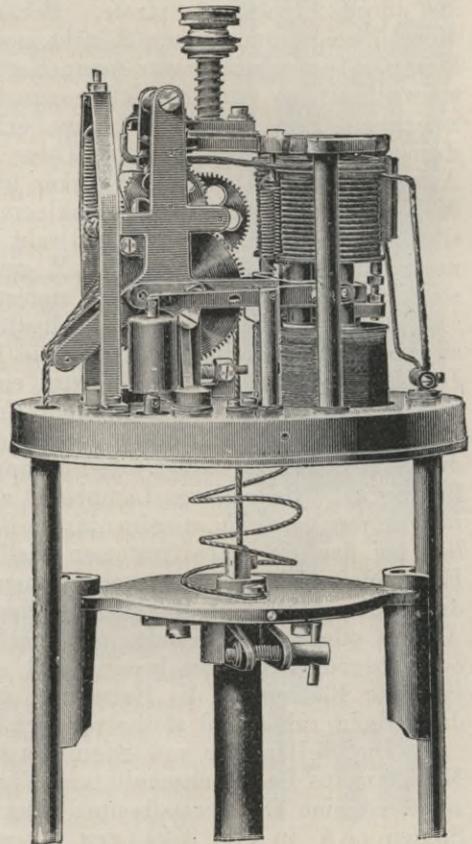


Fig. 378.

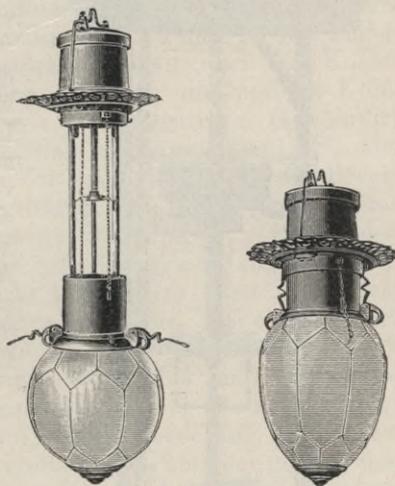


nannten Sparer versehen. Ein hohlkegelförmiger, emaillierter Eisenkörper befindet sich dicht über dem Lichtbogen, wodurch der Zutritt der Luft zum Lichtbogen verhindert wird. Infolgedessen brennen die

Kohlen langsamer ab und man hat, ohne Nachteil an der Lichtstärke zu merken, einen Minderaufwand von 40 Proz. an Kohlen, gegenüber einem frei brennenden Lichtbogen. Die Lampen werden mit Laternen versehen, von denen Fig. 379 einige Formen geschlossen und geöffnet zeigt.

Die Fixpunktnebenschlußlampe der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin ist in Fig. 380 abgebildet. Die elektrische Regulierung wird durch einen Elektromagneten hervorgerufen, der seinen Anker anzieht. Man sieht den Elektromagneten, mit dünnem Draht versehen, links in der Figur. Solange die Kohlen sich nicht berühren, fließt der Strom um den Elektromagneten, der Anker wird heruntergezogen. Dadurch wird bewirkt, daß das Räderwerk, das bis dahin festgehalten war, sich löst, daß die Räder sich drehen und daß daher die Kohlenhalter sich zu bewegen anfangen. Diese sind nämlich an einer Kette befestigt, welche über eines der Räder gelegt ist. Infolge der Kettenverbindung bleibt bei der Bewegung der Kohlenhalter der Brennpunkt immer an derselben Stelle, also fix, woher der Name der Lampe genommen ist. Die Kohlen laufen also zusammen. Im Moment, wo sie sich berühren, wird der Elektromagnet stromlos und nun wird durch eine Feder der Anker wieder gehoben, so daß die Kohlen sich trennen und der Lichtbogen sich bildet. Bei weiterem Abbrennen der Kohlen wird die Kraft des Elektromagneten wieder stärker und zieht den Anker wieder tiefer, bis wieder das Räderwerk losgelöst ist und die Kohlen sich wieder nähern. In dieser Weise geht das Spiel fort. Auch eine Differentiallampe wird von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in ähnlicher Weise gebaut.

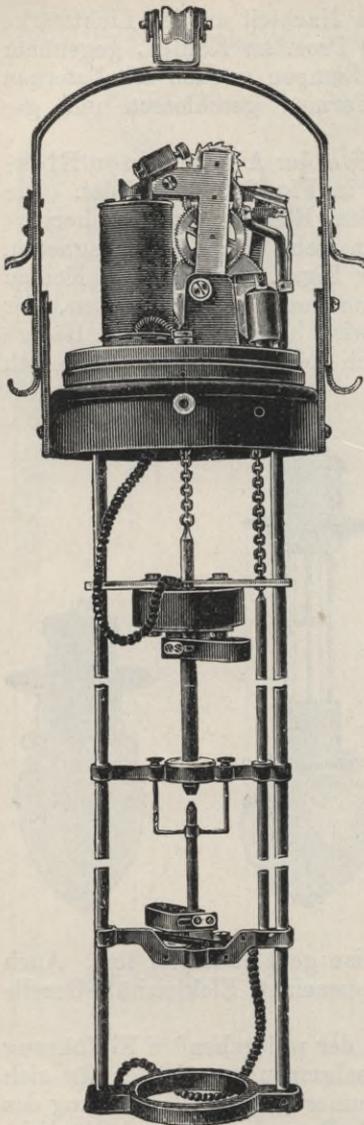
Fig. 379.]



Während man in den ersten Jahren der weitgehenden Einführung des elektrischen Lichtes eine Anzahl Bogenlampen gewöhnlich für sich allein betrieb, ist allmählich durch die immer größere Verbreitung des Glühlichts das Bedürfnis entstanden, auch Bogenlampen und Glühlicht mit derselben Maschine zu betreiben. Da nun, wie wir sehen werden, Glühlampen immer parallel geschaltet werden und die Einrichtung der Dynamomaschinen für Glühlichtbeleuchtung derartig ist, daß sie in den Hauptleitungen, von denen die Glühlampen abgezweigt werden, dauernd dieselbe Spannungsdifferenz hervorbringen (die in der Praxis gewöhnlich 65 oder 110 oder 220 Volt beträgt), so konnte man nun auch leicht in eine solche Glühlichtanlage Bogenlampen einführen, indem man diese ebenfalls parallel schaltete.

Wo es sich bei den Beleuchtungsanlagen nur um Bogenlicht allein

Fig. 380.

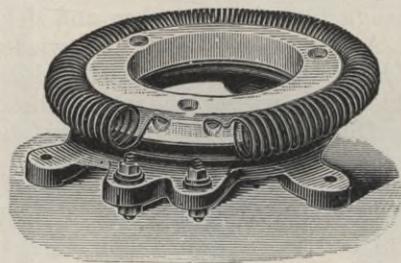


handelt, da werden zweckmäßig alle Bogenlampen hintereinander geschaltet und in diesem Falle ist die Differentiallampe die allein anwendbare.

Bei der Parallelschaltung von Bogenlampen dagegen benutzt man auch Nebenschlußlampen, jetzt jedoch ebenfalls meistens Differentiallampen, und zwar werden, wenn in den Hauptleitungen eine Spannung von 110 Volt herrscht, wie es gewöhnlich bei großen Stadtbeleuchtungen der Fall ist, zwei solche Bogenlampen hintereinander in eine Leitung geschaltet, so daß lauter parallele Gruppen von je zwei Lampen vorhanden sind.

Die Spannungsdifferenz, die an den Enden der Kohlen herrscht, ist je nach der Stromstärke, mit der die Lampen betrieben werden, und je nach der Länge des Lichtbogens etwas verschieden. Folgende Tabelle gibt für einen bestimmten Fall zusammengehörige Werte von Stromstärke (in Ampère) und Spannung an den Klemmen der Lampe (in Volt), wenn man der Lampe die jedesmal passende Länge des Lichtbogens gibt.

Fig. 381.



Stromstärke	. . . 3,	6,	9,	12,	15,	20,	30,	40 Ampère.
Klemmenspannung	41,	43,5	44,8	46,	47,	48,	50,	52 Volt.
Lichtbogenlänge	. . . 1,	1,9	2,8	3,5	3,9	4,7	5,4	6 mm.

Wenn daher eine Bogenlampe in einem Zweig brennen soll, der 65 Volt Spannungsdifferenz hat (wie es zuweilen bei Anlagen vorkommt), oder wenn zwei Bogenlampen hintereinander in einem Zweig von 110 Volt Spannung brennen sollen, so muß man immer noch einen Zusatzwiderstand in denselben Kreis einschalten, der die übrige Spannung

aufnimmt. Sollen z. B. zwei Lampen hintereinander mit je 12 Ampère brennen und ist die Spannung des Netzes gleich 100 Volt, so verbrauchen die Lampen davon bloß 92 Volt. Man muß daher einen Widerstand so wählen, daß der Spannungsverlust in ihm bei 12 Ampère Stromstärke gleich 8 Volt ist, d. h. er muß 0,75 Ohm groß sein. Man gibt diesen Zusatzwiderständen eine gefällige Form. So zeigt Fig. 381 eine Konstruktion von Voigt & Häffner. Der kreisförmige Widerstand wird durch seine Unterlage an der Wand befestigt. In neuester Zeit beginnt man in einem Netz von 110 Volt Spannung drei Lampen hintereinander ohne Zusatzwiderstand zu brennen, wobei wegen der geringeren Spannung, die auf jede kommt, die Länge des Lichtbogens und dadurch auch die Lichtstärke jeder Lampe reduziert werden muß.

Die Brenndauer einer Bogenlampe hängt natürlich ab von der Länge der Kohlenstäbe, die man in die Lampe einsetzt. Denn infolge der hohen Temperatur des Lichtbogens verbinden sich die Kohlen mit dem Sauerstoff der Luft und brennen allmählich ab. Man kann durchschnittlich rechnen, daß von jeder Kohle zirka 20 mm in der Stunde abbrennen. Für verschiedene Stromstärken nimmt man die Kohlen verschieden dick, und zwar, wie oben erwähnt, die positive Kohle mit doppelt so großem Querschnitt wie die negative. Gewöhnlich werden die Kohlen so lang genommen, daß die Lampe 6—10 Stunden brennt. Man hat aber in der letzten Zeit auch versucht, die Brenndauer der Lampen wesentlich zu vergrößern, und man erreicht das, indem man den Luftzutritt zum Lichtbogen beschränkt, sei es, indem man den Lichtbogen in eine besondere enge Glasglocke einschließt, zu der der Sauerstoff der Atmosphäre nicht hinzu kann, oder indem man einen Sparer anbringt, wie er oben beschrieben wurde. Bei einer solchen Dauerbogenlampe der A.E.G. brennt die obere Kohle pro Stunde nur um 2 mm, die untere nur um 1 mm ab, so daß man mit Kohlen von 300 resp. 150 mm Länge eine Brenndauer von 150 Stunden erreicht.

In dem letzten Jahre ist man auf eine Verbesserung der Bogenlampenkohlen zurückgekommen, die bereits im Beginne der elektrischen Periode (Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts) versucht wurde, die aber damals, da das korrekte Funktionieren der Lampen und die Gleichmäßigkeit des Kohlenmaterials noch nicht so durchstudiert waren, keinen weiteren Erfolg hatte. Man stellt nämlich nach dem Vorgang von Bremer jetzt Bogenlampen mit farbigem Licht her, indem man statt der gewöhnlichen Kohlenstäbe in ihnen sogenannte Effektkohlen brennen läßt. Das sind gewöhnliche Kohlenstäbe, welche aber mit bestimmten Substanzen, Baryumoxyd, Strontiumoxyd imprägniert sind. In dem Lichtbogen einer solchen Lampe strahlt nicht bloß die weißglühende Kohle, sondern es strahlen auch die Dämpfe der imprägnierten Substanzen und zwar leuchten diese Metaldämpfe je nach ihrer Natur in verschiedenen Farben. Man kann dadurch gelbes, rotes oder milchweißes Licht erhalten. Und diese Färbung hat nicht bloß den Vorteil, daß sie das Licht der Bogenlampe, das an sich wegen seines Reichtums an blauen Strahlen kalt erscheint, bedeutend wärmer macht, sondern sie hat auch noch den weiteren Vorteil, daß sie die Helligkeit des Lichtes bei gleicher Stromstärke bedeutend steigert. Gelb

brennende Lampen haben etwa doppelt, rot und milchweiß brennende Lampen etwa $1\frac{1}{2}$ mal so große Helligkeit, bei gleichem Energieaufwand, wie die gewöhnlichen Bogenlampen. Diese Erhöhung der Ökonomie kommt daher, daß diese Salze wesentlich nur sichtbare Strahlen aussenden, während in dem Lichtbogen der weißglühenden Kohlen auch sehr viele Strahlen enthalten sind, die unser Auge nicht affizieren, also nicht sichtbar sind und daher in Bezug auf die Helligkeit nicht zählen.

Wir haben bisher wesentlich von dem Betrieb der Bogenlampen mit Gleichstrom gesprochen. Wie schon erwähnt, läßt sich das Bogenlicht aber ebensogut durch Wechselströme erzeugen. Auch kann man dabei die Regulierung im wesentlichen ebenso gestalten, wie bei Gleichströmen. Denn die elektrische Regulierung wird ja immer durch die Anziehung eines Elektromagneten auf seinen Anker, oder durch die Einziehung eines Eisenkerns in eine Spule bewirkt. Ein Elektromagnet zieht aber weiches Eisen sowohl mit seinem Nordpol, wie mit seinem Südpol an, weil in dem Eisen immer der entgegengesetzte Pol induziert

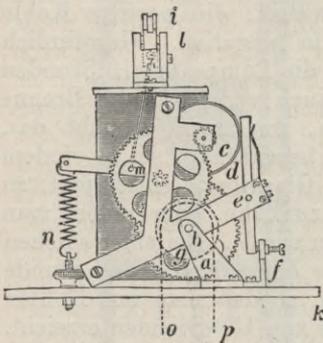
wird, und eine Spule zieht den Eisenkern immer hinein, ob sie nun von dem Strom in der einen oder in der anderen Richtung durchflossen wird. Daher wirken beide Arten der Regulierung auch bei Wechselströmen. Nur muß man dann das Eisen des Elektromagneten wegen der Wirbelströme zerteilen.

In einigen Beziehungen aber findet ein Unterschied im Bogenlicht statt, wenn es von Wechselströmen und wenn es von Gleichströmen erzeugt wird. Zunächst darin, daß beim Gleichstrom die Hauptmenge des Lichts von selbst nach unten geworfen wird, weil die obere positive Kohle einen

Krater bildet. Bei Wechselströmen muß man dies künstlich erreichen, indem man über dem Lichtbogen eine spiegelnde Fläche, einen Reflektor, anbringt, der das nach oben gestrahlte Licht nach unten wirft.

Von der Aktiengesellschaft Helios in Ehrenfeld-Köln werden die Wechselstromlampen gewöhnlich als Hauptstromlampen eingerichtet. Das Werk derselben ist in Fig. 382 gezeichnet. Die Regulierung wird durch einen Eisenkern bewirkt, der in die in der Figur sichtbare Drahtrolle hineingezogen wird, wenn Strom durch die Windungen der Rolle geht. Der Eisenkern ist oben auf der Drahtrolle an einem Hebel 1 befestigt. Senkt sich der Eisenkern, so wird durch den Hebel 1m das Uhrwerk ausgelöst, dessen unterstes Rad eine Kette trägt, an welcher bei o der obere, bei p der untere Kohlenhalter befestigt ist. Die Kohlen, die erst zusammen waren, werden getrennt und der Lichtbogen entsteht. Beim weiteren Abbrennen läuft das Uhrwerk, das durch den Hebel d gebremst ist, langsam und schiebt die Kohlen immer wieder in die passende Entfernung. Der Lichtbogen bleibt, weil die Bewegung der beiden Kohlenhalter durch die Schnüre immer eine gleichzeitige ist, dauernd an derselben Stelle. Oberhalb des Lichtbogens ist nun, wie

Fig. 382.



man aus Fig. 383 sieht, welche die Lampenglocke heruntergezogen zeigt, bei a eine glänzende Metallscheibe angebracht, welche als Reflektor dient. Diese Scheibe setzt sich fort, um den Reflektor zu vergrößern, in der Glasglocke Fig. 384, so daß dadurch der Reflektor die nötige Größe bekommt.

Die oben beschriebene Seillampe von Siemens & Halske wird auch ohne wesentliche Änderungen für Wechselströme eingerichtet.

Die Spannung an den Kohlen bei Wechselstrom ist, wie schon oben S. 421 angeführt wurde, eine kleinere als bei Gleichstrom. Sie ändert sich auch hier mit der Stromstärke und der Lichtbogenlänge, und es sind im folgenden zusammengehörige Werte von Stromstärke, Spannung und Lichtbogenlänge angegeben, die aber für die verschiedenen Arten des Wechselstromes erhebliche Veränderungen zeigen.

Stromstärke . .	6,	10,	16,	20,	30	Ampère.
Spannung . .	27,	28,	29,	30,	32	Volt.
Lichtbogenlänge	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	mm.

Selbstverständlich muß daher eine Wechselstromlampe bei gleicher Stromstärke weniger Licht aussenden als eine Gleichstromlampe. Denn die von der Lampe verbrauchte Energie bei Gleichstrom ist ungefähr 45 Volt mal der Stromstärke, bei Wechselstrom aber bloß zirka 30 Volt mal der Stromstärke. Daher kann auch die erzeugte Lichtmenge bei Wechselstrom nur ungefähr $\frac{2}{3}$, also zirka 66 Proz. derjenigen sein, die bei gleicher Stromstärke vom Gleichstrom erzeugt wird.

Um mehrere Wechselstromlampen von zirka 30 Volt Spannung hintereinander in einen Stromkreis zu legen, der, wie häufig, 110 Volt Spannung hat, kann man die übrig bleibende Spannung auch wie bei Gleichstrom durch einen Zusatzwiderstand aufnehmen lassen. Aber man hat bei Wechselstromlampen einfache Mittel, um ohne große Verluste sogar auch bloß eine Lampe oder deren zwei in eine Leitung von 110 Volt einzuschalten. Es kommt ja darauf an, der Spannung an den Kohlen den richtigen Wert von etwa 30 Volt zu geben, während die

Leiter, an welche die Lampe angelegt ist, etwa 110 Volt Spannung haben. Das kann man bei Wechselströmen dadurch erreichen, daß man

Fig. 383.

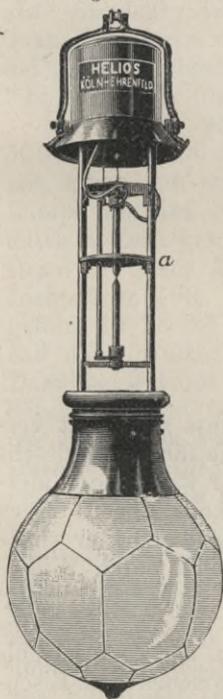
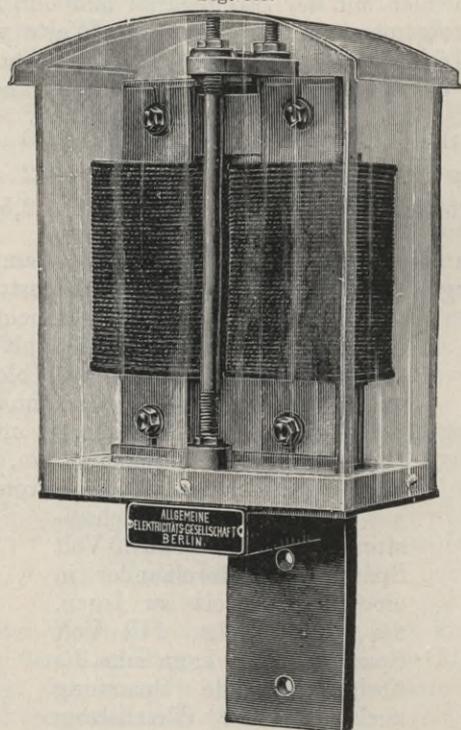


Fig. 384.



in die Leitung der Lampe eine Drosselspule (S. 251) einschaltet. Eine solche ist ja nichts weiter als ein Elektromagnet mit kleinem Widerstand der Bewickelung. Durch den Eisenkern wird die Selbstinduktion der Rolle sehr groß gemacht. Daher entstehen in dieser starke Induktionsströme, welche den vorhandenen Wechselströmen entgegenwirken und diese schwächen. Das Resultat ist dasselbe, als wenn die Spannung an den Enden der Lampe verringert wäre. Diese Verringerung der Spannung ist aber hierbei nicht, wie bei der Benutzung

Fig. 385.



eines Vorschaltwiderstandes, mit einem großen Verlust an Effekt verbunden. Denn verloren geht nur diejenige Arbeit, die für die Joulesche Wärme verbraucht wird, und diese ist gering, da der wirkliche Widerstand der Drosselspule klein ist. Außerdem wird noch Arbeit wegen der Hysteresis des Eisenkernes verbraucht. Aber diese Arbeitsverluste sind viel geringer, als wenn die ganze Spannung bloß durch Widerstand verringert würde. Eine solche Drosselspule der A.E.G. zeigt Fig. 385. Um die Stromstärke für die Lampen auf die richtige Größe zu bringen, muß man hierbei die Selbstinduktion der Drosselspule ändern können, was dadurch geschieht, daß man zwischen den Eisenflächen des Elektromagneten (oben oder unten) Luftzwischenräume von größerer oder geringerer Dicke durch Einlegen von Preßspanscheiben erzeugt.

Ein zweites Mittel, um Wechselstrombogenlampen in ein Leitungsnetz von beliebiger Spannung einzuschalten, besteht darin, daß man einen kleinen Transformator anwendet, dessen primäre Spule die große Spannung (110 Volt) aufnimmt und dessen sekundäre Spule die kleine Spannung (30 oder bei 2 Lampen 60 Volt) liefert. Entsprechendes gilt natürlich für andere Leitungsspannungen. Der Vorteil, den man durch solche Transformatoren erzielt, wird aus folgender Berechnung klar werden. Es soll eine einzelne Bogenlampe für 12 Ampère an ein Leitungsnetz für Wechselstrom von 110 Volt angeschlossen werden. Die Bogenlampe braucht für sich einen Effekt von zirka $30 \times 12 = 360$ Watt. In der ganzen Leitung würden aber bei 12 Ampère Stromstärke $110 \times 12 = 1320$ Watt vorhanden sein, folglich müßte man einen Zusatzwiderstand anwenden, der 960 Watt konsumiert, und diese würden dauernd nutzlos verloren gehen. Wendet man aber einen Transformator an, so würde an dessen sekundären Klemmen eine Spannung prinzipiell von 30 Volt, in Wirklichkeit aber von etwa 40 Volt herrschen müssen. Da die Spannung von 110 Volt auf 40 Volt heruntertransformiert wird, so braucht in der primären Wickelung des Transformators nur die Stromstärke $12 \times \frac{40}{110} = 4,4$ Ampère zu herrschen. Folglich ist der

Effekt in der primären Wickelung bloß $4,4 \times 110 = 484$ Watt, es ist also ein sehr viel kleinerer Effektverlust vorhanden. Solche kleine Transformatoren werden von Helios, von Siemens & Halske und anderen bei ihren Wechselstromanlagen benutzt. Eine ganz ähnliche Rechnung läßt sich auch für die Drosselspulen ausführen.

Während man elektrisches Einzellicht bis zu einer Stärke von 50000 bis 70000 Normalkerzen und noch mehr erzeugt und angewendet hat, kann man durch Teilung des Lichts die Lichtstärke jeder einzelnen Lampe bis auf 300 Normalkerzen und weniger herabmindern. Als mittlere Zahl kann man annehmen, daß eine Bogenlampe bei Gleichstrom für jedes Ampère, das sie verbraucht, etwa 100 Normalkerzen Lichtstärke gibt. Da nun eine solche Lampe an ihren Klemmen ungefähr 40 bis 50 Volt Spannung braucht, im Mittel 45 Volt, so folgt, daß man in einer Lampe für etwa 45 Watt 100 Kerzen Stärke erhält. Dasselbe gilt für Wechselstrom. Abzüglich der Verluste in den Zuleitungen kann man also durchschnittlich pro Pferdekraft (736 Watt) ein Licht von etwa 1200 Normalkerzen Stärke erhalten. Die sehr starken Einzellichter sind selbstverständlich nur für besondere Zwecke anwendbar. Auf Leuchttürmen insbesondere werden sie seit langer Zeit angewendet. Die meisten großen Schiffe sind mit starkem elektrischen Bogenlicht versehen worden und mit Einrichtungen, durch welche dieses Licht nach beliebigen Richtungen hin reflektiert werden kann. Solche Marinereflektoren sind besonders von der Firma Schuckert mit vorzüglichen Leistungen ausgeführt worden. Für praktische Bedürfnisse, zur Beleuchtung von Straßen, Plätzen, großen Räumlichkeiten, wie Bahnhöfen, großen Fabriken, Gärten u. s. w., ist jedoch eine Verteilung des Lichtes auf mehrere Punkte erforderlich.

Die großen Vorzüge, die das elektrische Licht vor dem Gaslicht hat, brauchen in der heutigen Zeit nur noch kurz erwähnt zu werden.

21/ Vor allen Dingen ist die Gefahrlosigkeit des elektrischen Lichts hervorzuheben, welche zwar keine ganz absolute, aber jedenfalls eine viel größere als die des Gaslichts ist. Dann ist die große Leichtigkeit zu erwähnen, mit welcher man Helligkeiten durch das elektrische Licht erzeugen kann, die man auf andere Weise gar nicht erreichen kann. Dazu kommt die Bequemlichkeit, mit der man jede Lampe sofort durch Öffnen des Stromes von irgend einer Stelle aus verlöschen und wieder durch Schließen entzünden kann. In Bezug auf Glanz und Weiße ähnelt das elektrische Bogenlicht am meisten dem Tageslicht, und die Effektkohlen erlauben ihm nach Wunsch dem Auge angenehme Färbungen zu geben. Endlich besitzt das elektrische Licht den großen Vorzug, namentlich für große Räume, in denen sich viele Menschen aufhalten, daß es die Luft absolut nicht verdirbt, während das Gaslicht bekanntlich die Luft mit schädlichen Gasen erfüllt und außerdem nicht nur Licht, sondern auch in hohem Grade Wärme erzeugt, was oft für große Räumlichkeiten als ein Nachteil bezeichnet werden muß, zuweilen allerdings auch von Vorteil ist, da es Heizkosten erspart. Zur Erzeugung glänzender Beleuchtungen ist das elektrische Bogenlicht jetzt unbedingt als das vorzüglichste Mittel anerkannt.

6. Kapitel.

Das elektrische Glühlicht und die elektrischen Koch- und Heizapparate.

Während das elektrische Bogenlicht seine unleugbaren Vorzüge bei der glänzenden Beleuchtung von Straßen, Plätzen, großen Sälen und ausgedehnten Räumen besitzt, ist es nicht anwendbar für die Beleuchtung von Häusern und Zimmern, in denen nicht sehr starke Lichtquellen verlangt werden, sondern im Gegenteil Lichtquellen von mäßiger Stärke, aber in sehr weitgehender Verteilung und mit allen den Bequemlichkeiten im Privatgebrauch, wie sie das Gaslicht längst besitzt.

Das Bogenlicht so schwach zu machen, daß es zur Zimmerbeleuchtung dienen könnte, geht nicht gut an. Es müßte die Länge des Lichtbogens so außerordentlich klein gemacht werden, daß eine sichere Regulierung des Lichts nicht möglich ist.

Hier war es notwendig, ein anderes Prinzip technisch anzuwenden, und dieses angewendet und mit Energie praktisch durchgearbeitet zu haben, ist das ungeschmälerte Verdienst von Edison. Wenn die Idee des elektrischen Glühlichts auch schon von anderen vor Edison erfaßt und teilweise ausgeführt war, so waren doch diese Versuche ohne praktischen Erfolg im großen geblieben. Erst die unermüdlichen Bemühungen Edisons hatten den durchschlagenden und bleibenden Erfolg, auf elektrischem Wege ein Licht zu schaffen, welches eine Teilung fast bis ins Unendliche gestattet, welches beliebig kleine Lichtstärken an beliebig vielen Punkten hervorzubringen erlaubt.

Das elektrische Glühlicht beruht darauf, daß ein von einem Strom durchflossener Körper nach dem Jouleschen Gesetz erhitzt und zum Leuchten gebracht wird. Auf derselben Grundlage, der Jouleschen Wärme, beruhte auch das Bogenlicht. Während aber bei dem Bogenlicht es die trennende Luftschicht zwischen den beiden Kohlen ist, welche vom Strom durchflossen wird, wodurch die Kohlen sowohl, wie die mit Kohlenteilchen versetzte Luftschicht ins Leuchten kommen, wird das elektrische Glühlicht erzeugt durch die Erwärmung eines vollständigen Leiters durch den elektrischen Strom.

Ein jeder Leiter wird, wenn ein elektrischer Strom durch ihn fließt, nach dem Jouleschen Gesetz erwärmt und die in ihm erzeugte Wärmemenge wächst mit dem Quadrat der Stärke des durchgehenden

Stromes und mit dem Widerstand des Leiters. Bei gleicher Stromstärke ist also die Erwärmung eines Leiters um so größer, je größer der Widerstand desselben ist. Ist die entwickelte Wärmemenge groß genug, so kommt der Leiter in helles Glühen, und wenn er schmelzbar ist, so wird er durch den elektrischen Strom geschmolzen. Diese Tatsachen waren lange bekannt und schon lange hatte man versucht, dünne Metalldrähte, insbesondere Platindrähte, die zum Glühen gebracht waren, zur Beleuchtung zu verwenden. Indes war bei Metallen eben die Gefahr des Schmelzens eine sehr große. Wurde der Strom zu stark, so wurde der glühende Platindraht weggeschmolzen und die Beleuchtung hörte auf. Es bot sich daher als bestes Material für solche Glühlichter die Kohle dar, welche bekanntlich noch auf keine Weise, durch keine noch so hoch gesteigerte Temperatur zum Schmelzen gebracht werden konnte. Bei elektrisch glühender Kohle war also die Gefahr des Schmelzens ausgeschlossen. Und in der Tat wendete sich Edison, nachdem er eine Reihe der am schwersten schmelzbaren Metalle erfolglos probiert hatte, der Kohle zu, um sie elektrisch glühend zu machen und dadurch zur Beleuchtung zu verwenden.

Aber glühende Kohle verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft, sie verbrennt rasch, und es ist deshalb eine notwendige Forderung, wenn man glühende Kohle zur Beleuchtung benutzen will, sorgfältig den Sauerstoff der Luft von ihr abzuhalten. Man muß also die Kohle in einen luftleeren Raum einschließen, und das erreicht man, indem man sie in Glasgefäße bringt, aus denen alle Luft sorgfältig ausgepumpt ist. Eine möglichst vollkommene Evakuierung der Luft aus Glasgefäßen ist aber nur dann zu erreichen, wenn das Glasgefäß ganz ohne Kitt verschlossen ist, wenn also der Verschluss nur durch Zuschmelzen des Glases hergestellt ist. Es muß also die Kohle auf irgend eine Weise durch Einschmelzen in dem Glasgefäß befestigt sein. Das läßt sich nun zum Glück leicht machen, wenn man die Enden des Kohlendrahtes an Platindrähten befestigt. Platin läßt sich nämlich leicht und dauerhaft in Glas einschmelzen, weil beide denselben Ausdehnungskoeffizienten haben. Bei der Vorzüglichkeit der neuen Quecksilberluftpumpen ist es dann nicht schwer, Glasgefäße fast vollkommen luftleer zu machen. Übrigens werden die Glasgefäße der Glühlampen jetzt zum Teil nicht mehr durch Quecksilberluftpumpen, sondern durch gewöhnliche Ventilluftpumpen mit Maschinenbetrieb evakuiert.

Die Anwendung der Kohle zur Erzeugung von Glühlicht empfahl sich zwar von vornherein durch die erwähnten Vorteile. Aber es war sehr schwer, Kohle in so dünne Streifchen zu bringen, wie sie für das Glühen nötig sind, ohne dabei ihre Haltbarkeit zu beeinträchtigen. Auch dieses ist ein Verdienst von Edison, zum ersten Male außerordentlich dünne Kohlenfäden von großer Haltbarkeit hergestellt zu haben. Edison verfertigte anfangs die Kohlenstreifchen dadurch, daß er sehr dünne Fasern von Bambusrohr verkohlte. Eine solche Faser brachte er dann in die Form eines länglichen Hufeisens und setzte sie in das Glasgefäß ein. Die Enden des Kohlenstreifchens wurden etwas verdickt und durch einen galvanoplastischen Kupferniederschlag mit den

ebenfalls etwas verdickten Enden von dünnen Platindrähten verbunden, welche eingeschmolzen durch den Glaskörper hindurchgingen und die Zuleitung des Stromes in die Kohle vermittelten.

Die Herstellung der Kohlenfäden ist aber seit der Einführung des elektrischen Glühlichts immer mehr vervollkommenet worden. Man hat sich bemüht, eine möglichst amorphe, strukturlose Kohle aus Pflanzenstoffen zu gewinnen. Dies geschieht jetzt allgemein in der Weise, daß man reine, künstlich hergestellte Zellulose benutzt. Diese ist vollständig strukturlos. Die Zellulose wird durch eine Düse hindurchgepreßt und liefert dadurch einen endlosen, dünnen Faden, der in kleine Fäden zerschnitten und in die Form von Hufeisen oder Schleifen gebracht wird. Diese Fäden werden darauf „karbonisiert“, verkohlt, indem man sie in einen passend eingerichteten Ofen bringt. Diese Herstellungsweise von Kohlenfäden aus Zellulose liefert ein sehr festes und doch dehnbare Material. Außerdem werden die so hergestellten Kohlenfäden gewöhnlich noch präpariert. Man umgibt nämlich einen solchen Kohlenfaden noch mit einer Schicht von strukturloser Kohle. Dieses letztere erreicht man dadurch, daß man den dünnen Kohlenfaden, die Seele, in Leuchtgas oder einen anderen Kohlenwasserstoff bringt und durch einen elektrischen Strom glühend macht. Dann scheidet sich aus dem Leuchtgas die Kohle in sehr dichtem Zustand auf der Seele ab und der Kohlenfaden erhält überall gleichmäßige Stärke. Man kann nun den Kohlenniederschlag so regulieren, daß der Faden einen gewünschten Widerstand bekommt, und dadurch eine beliebige Menge von Lampen mit gleichem Widerstand herstellen. Die Kohlenfäden werden bei den Lampen entweder einfach hufeisenförmig gebogen, oder sie enthalten mehrfache Windungen oder Schlingen.

Die Enden des Kohlenfadens werden, wie gesagt, an Platindrähten befestigt, welche in Glas eingeschmolzen sind und aus dem evakuierten luftleeren Gefäß herausführen. Diese Verbindung der Kohle mit dem Platin wird gewöhnlich durch Verkupferung oder auch durch einen Kohlenniederschlag bewirkt. Die Platindrähte führen dann zu zwei voneinander isolierten Metallstücken außen am Lampenkörper, die man speziell Kontakte nennt. Jede Lampe wird nun beim Gebrauch in eine Fassung eingesetzt, die an Wandarmen, Kronleuchtern, Lampenständern u. dergl. befestigt ist und zu welcher die beiden Leitungsdrähte, die den Strom in die Lampe schicken sollen, hingeführt sind. Die Fassung enthält also ebenfalls zwei isolierte metallische Teile, mit welchen die äußeren Leitungsdrähte verbunden sind. Sobald die Lampe in ihre Fassung fest eingesetzt ist, geht der Strom durch den Kohlenfaden. In Bezug auf die Fassung der Lampen und die Kontakte des Lampenkörpers bestehen verschiedene Einrichtungen. Bei allen kommt es darauf an, daß der Kontakt ein durchaus sicherer sei. Selbstverständlich muß die Fassung immer zu den Kontakten passen. Die jetzt gebräuchlichsten Fassungen sind die folgenden zwei. Bei der Siemensfassung (Fig. 386) werden die Enden der Platindrähte des Kohlenfadens in zwei am Boden der Lampe befindliche, voneinander isolierte Messingplatten geführt und die ganze Lampe in die Fassung eingesetzt,

so daß durch sogenannten Bajonettverschluß Kontakt hervorgebracht ist. Bei der Edisonfassung (Fig. 387) ist an den Lampenkörper unten ein metallisches Schraubengewinde (das Edisongewinde) angekittet, mit welchem der eine Platindraht verbunden ist. Der andere geht an ein isoliertes Metallstück am Boden. Die Lampe wird in ihre Fassung eingeschraubt. In die Fassung wird nämlich die zugehörige Schraubenmutter eingeschnitten, und in diese führt der eine Draht der Zuleitung von der Maschine. Am Boden der Fassung befindet sich isoliert eine Metallfeder, mit welcher der zweite Draht von der Maschine verbunden ist. Beim Einschrauben der Lampe in den Träger

Fig. 386.

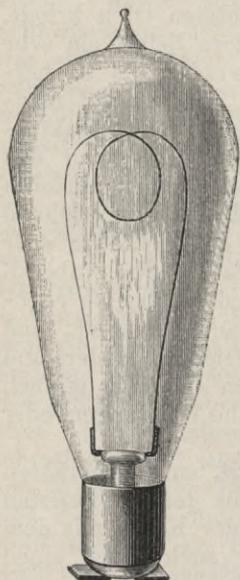
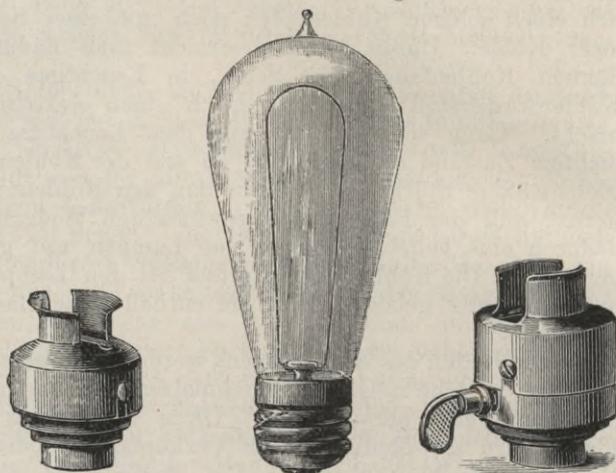


Fig. 387.



drückt sich ihr Metallplättchen am Boden auf die Feder auf und bewirkt so einen vorzüglichen Kontakt, so daß der Strom sicher hindurchgehen kann. Indem man den Kontakt am Boden durch einen Griff (Hahn) beweglich macht, kann man durch Bewegung des Hahns den Strom einführen oder aufheben, also die Lampe anzünden oder auslösen.

Die Leuchtkraft der Glühlampen hängt außer von der Stärke des Stromes allein ab von der Größe des Widerstandes des Kohlenfadens. Übrigens nimmt der Widerstand der Kohlen bei der Erwärmung, wie wir wissen (S. 87), ab und zwar sehr erheblich, so daß der Widerstand einer Lampe, wenn sie in Weißglut ist, nur etwa halb so groß ist, wie im kalten Zustande.

Man kann jede Lampe natürlich beliebig stark leuchten lassen, wenn man Ströme von verschiedener Stärke durch sie hindurchsendet. Aber der elektrische Strom übt eine zerstörende Wirkung auf die

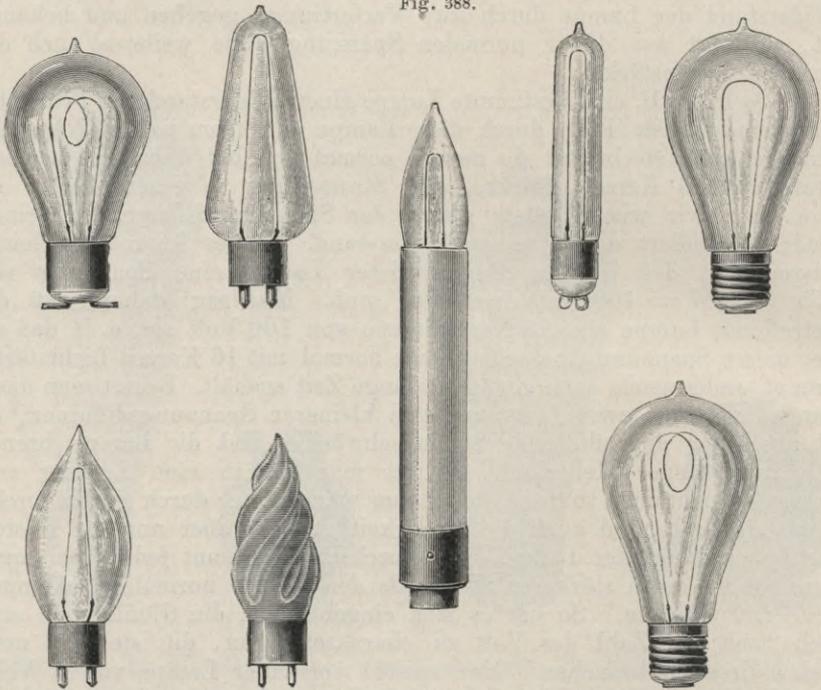
Kohlenfäden aus, indem er sie nämlich allmählich zerstäubt, wenn er durch sie hindurchfließt. Je stärker der Strom ist, um so stärker ist diese Zerstäubung und um so leichter wird die Lampe ruiniert, indem schließlich an einer Stelle, an welcher der Kohlenfaden am dünnsten geworden ist, ein Bruch stattfindet. Daher schadet ein zu starker Strom jeder Lampe, und es gibt für jede Lampe eine bestimmte Stromstärke, bei welcher sie einerseits nicht zu sehr in Anspruch genommen wird, andererseits eine passende Helligkeit hat. Man gibt aber gewöhnlich nicht an, mit welcher Stromstärke eine Lampe normal brennt, sondern man gibt an, wie groß die Spannungsdifferenz an ihren Enden sein soll, damit sie normal brenne. Da nämlich der Widerstand der Lampe durch ihre Verfertigung gegeben und bekannt ist, so folgt aus dieser normalen Spannung ohne weiteres auch die normale Stromstärke.

So hat z. B. eine bestimmte Lampe einen Widerstand von 175 Ohm, wenn sie heiß ist. Falls durch diese Lampe ein Strom von 0,57 Ampère hindurchgeht, so brennt sie gerade normal und hat dann eine Leuchtkraft von 16 Kerzen Stärke. Die Stromstärke in einem Leiter ist nun, wie wir wissen, stets gleich der Spannungsdifferenz an seinen Enden, dividiert durch seinen Widerstand. Daher kann man leicht ausrechnen, daß an den Enden dieser Lampe eine Spannung von $175 \times 0,57 = 100$ Volt herrschen muß. Man sagt daher, daß die betreffende Lampe eine 16 Kerzenlampe von 100 Volt sei, d. h. daß sie bei dieser Spannung einerseits gerade normal mit 16 Kerzen Lichtstärke brennt, andererseits auch genügend lange Zeit aushält. Bringt man diese Lampe zwischen zwei Leitungen von kleinerer Spannungsdifferenz, so ist auch der durchfließende Strom schwächer und die Lampe brennt mit zu geringer Helligkeit. Bringt man sie in eine Leitung von größerer Spannung, so wird der Strom stärker, der durch sie hindurchfließt, dadurch wird auch die Helligkeit größer, aber nur auf Kosten der Lebensdauer der Lampe. Im Durchschnitt brennt jede Glühlampe, wenn sie nie einen stärkeren Strom als den für sie normalen bekommt, 600—800 Stunden. So hat es sich eingebürgert, die Glühlampen einfach nach der Zahl der Volt zu charakterisieren, die sie zum normalen Brennen brauchen. Man spricht von einer Lampe von 4 Volt, 10, 25, 100 etc. Volt. Eine jede solche Lampe hat nun eine bestimmte normale Helligkeit, und zwar gibt es Glühlampen in allen Größen, deren Lichtstärke von einer einzigen Normalkerze bis zu mehreren Hunderten variiert. Für die Beleuchtung in Zimmern ist die passendste Helligkeit die von etwa 16 Normalkerzen und daher haben auch die am meisten gebrauchten Glühlampen diese Lichtstärke. Lampen von geringerer Helligkeit, bis zu einer Normalkerze, werden nur für spezielle Zwecke, etwa als Nachtlampen, für Dekorationszwecke oder dergleichen benutzt, während Lampen von größerer Helligkeit, bis zu 100 oder 200 Normalkerzen hauptsächlich zur Beleuchtung in Straßenlaternen dienen.

Da an den Enden einer jeden Lampe eine bestimmte Spannung in Volt herrscht und da die Lampe von einem Strom mit einer bestimmten Zahl Ampère durchflossen wird, so enthält jede brennende

Lampe einen gewissen Effekt, d. h. es wird in jeder Sekunde eine gewisse Arbeitsmenge verbraucht, um eben die Lampe zum Leuchten zu bringen. Der Effekt in der Lampe (in Watt ausgedrückt) ist gleich dem Produkt der Volt und der Ampère (s. S. 313). Also z. B. unsere eben erwähnte Lampe, die bei 100 Volt Spannung 0,57 Ampère Stromstärke braucht, um normal zu brennen, hat dabei einen Effekt von 57 Watt. Da nun 736 Watt = 1 Pferdekraft sind, so verbraucht die Lampe beim normalen Brennen $\frac{57}{736} = \text{etwa } \frac{1}{13}$ PS. Es können

Fig. 388.



also durch eine Pferdekraft etwa 13 solcher Lampen betrieben werden. Da die Lampe bei 57 Watt Verbrauch eine Lichtstärke von 16 Normalkerzen gibt, so kommt auf jede Kerze ein Verbrauch von $\frac{57}{16} = 3,5$ Watt.

Im allgemeinen brauchen alle Glühlampen stets etwa 2,5 bis 3,5 Watt für eine Normalkerze Helligkeit. Dieser geringe Verbrauch an Arbeit ist die Folge der rationellen Herstellungsweise der Kohlenfäden. In den ersten Zeiten des Glühlichts war der Verbrauch der Arbeit ein weit höherer. Eine Lampe von 16 Kerzen verbrauchte nicht 57 Watt, wie jetzt, sondern 80 und mehr Watt.

Solche Glühlampen werden von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin (sogenannte A.E.G.-Glühlampen), von Siemens

& Halske und von anderen im großen fabriziert und zwar für Lichtstärken von $\frac{1}{4}$ Normalkerze bis zu 400 und für alle gebräuchlichen Spannungen. Die gebräuchlichsten Lampen sind diejenigen für 100 oder 110 Volt Spannung und für 16 oder 25 Kerzen Stärke. Diese Lichtstärken sind für normale und für besonders gute Zimmerbeleuchtung gerade die richtigen und die angegebene Spannung kommt bei der Stromlieferung durch Zentralstationen am meisten vor.

Fig. 389.



Fig. 391.

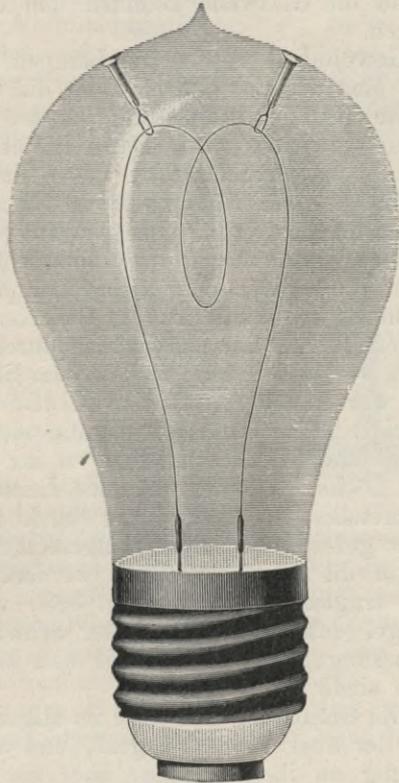
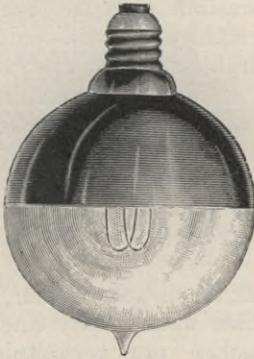


Fig. 390.



Die großen Lichtstärken von 200 bis 400 Kerzen sind nur in wenigen Fällen vorteilhaft anwendbar. Bei Helligkeiten von 300 Kerzen an wird man im allgemeinen besser eine Bogenlampe anwenden.

Die Form der Kohlenfäden ist beliebig. Sie bilden bald ein einfaches Hufeisen, bald bilden sie eine oder mehrere Schleifen.

Die Glasgefäße der Glühlampen werden durchsichtig, oder matt, farblos oder farbig hergestellt. Fig. 388 stellt einige gebräuchliche Formen von Glühlampen zu gewöhnlichen und zu dekorativen Zwecken dar. Die Kontakte derselben bestehen zum Teil aus den beschriebenen Platten oder Gewinden, zum Teil aber auch aus Stäben oder Ösen. Manchmal werden die Glühlampen, wie Fig. 389 zeigt, mit zwei Kohlen-

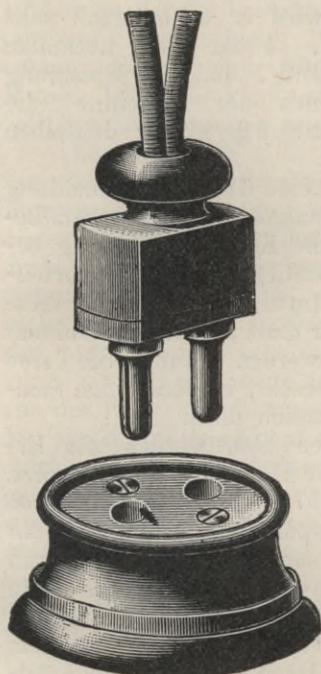
fäden versehen, wodurch sie natürlich die doppelte Leuchtkraft haben. Auch werden die Glasgefäße zuweilen mit einem metallisch spiegelnden Belag versehen, wie in Fig. 390, wodurch sie als Reflektorlampen dienen. In neuerer Zeit werden in gewissen Fällen die Kohlenfäden der Lampen, wie Fig. 391 darstellt, durch zwei Ringe gefaßt und mit der Glaswand verankert. Dies geschieht namentlich für Lampen, die viel bewegt werden, z. B. in Straßenbahnwagen, oder für Lampen, die zum Ausleuchten von Fässern u. dergl. dienen. Da nämlich die Kohlenfäden sehr leicht schwingen, so können sie sonst zu nahe an die Glaswand kommen und diese durch einseitige Erhitzung sprengen.

Gewöhnlich werden die Lampen in Glocken eingesetzt, welchen irgend eine passende Form, z. B. die eines Kelches, gegeben wird, so daß die Glühlichtbeleuchtung auch vorteilhaft für Dekoration von Räumen verwendet wird. Darin ist sie sogar der Gasbeleuchtung überlegen, da man Glühlampen, wegen ihrer Ungefährlichkeit, auch nahe an Wänden oder Tafelungen, in Nischen, in Blumenbouquets u. s. w. leicht anbringen kann. Im übrigen werden die Glühlampen in allen möglichen Anordnungen verwendet, entweder als Einzellampen oder in Lüstern von einigen oder vielen Lampen, so daß sich die Glühlichtbeleuchtung in nichts von der Gasbeleuchtung unterscheidet. Tragbare oder verstellbare Lampen müssen durch Leitungsschnüre mit derjenigen Leitung verbunden sein, von der der Strom entnommen wird. Zu dem Zweck werden sogenannte Anschlußdosen benutzt, von denen Fig. 392 eine zeigt. Eine Dose aus Ebonit oder Porzellan wird an der Wand befestigt und die Leitung wird zu ihr so geführt, daß in jedem der beiden Löcher je einer von den Leitungsdrähten endet und zwar in einer metallischen Auskleidung der Löcher. In die Dose kann nun der darüber gezeichnete Stöpsel eingesetzt werden, so daß dessen federnde Füße in die Löcher gesteckt werden. Der Stöpsel selbst wird z. B. an der tragbaren Lampe, Fig. 393, mittels der Leitungsschnur so befestigt, daß die Enden dieser Schnur einerseits mit den Kontakten der Fassung, andererseits mit den beiden Füßen des Stöpsels verbunden sind.

Die Glühlampen besitzen im allgemeinen einen sehr hohen Widerstand, der über 100 Ohm geht, und brauchen daher auch eine große Spannung an ihren Enden, aber sie brauchen nur verhältnismäßig schwache Ströme. Für eine 16kerzige Glühlampe von 100 Volt Spannung braucht man einen Strom von etwa nur $\frac{1}{2}$ Ampère. Um nun eine ganze Anzahl Glühlampen von einer und derselben Quelle (Dynamomaschine oder Akkumulatoren) betreiben zu lassen, so daß sie unabhängig voneinander sind, hat Edison zuerst die einfachste Schaltung angegeben. Er schaltete nämlich nicht etwa die Lampen alle hintereinander in denselben Stromkreis, sondern er brachte die Glühlampen in sogenannte Parallelschaltung. Dadurch machte er das Glühlicht für alle Zwecke der praktischen Anwendung geeignet und zur Beleuchtung von Stadtteilen im großen brauchbar, und diese Anordnung hat sich außerordentlich bewährt. Sie ist jetzt ganz allgemein als die zweckmäßigste Art der Schaltung von elektrischen Apparaten anerkannt und benutzt.

Edison schaltete also die Lampen alle nebeneinander, d. h. so, wie es in Fig. 394 gezeichnet ist, in welcher M die Stromquelle (Maschine) und 1, 2, 3 bis 10 die Lampen sind. Es gehen also von der Stromquelle dabei zwei Leitungen HH und GG aus und zwischen diese werden die einzelnen Lampen geschaltet.

Fig. 392.



Durch die Nebeneinanderschaltung der Lampen wird der gesamte Widerstand des äußeren Stromkreises kleiner als der jeder einzelnen Lampe. Haben die Verbindungsdrähte (welche man ja beliebig stark nehmen kann) einen sehr kleinen Widerstand, so ist der äußere Widerstand z. B. bei 10 Lampen, von denen jede 200 Ohm Widerstand hat, bloß $\frac{200}{10} = 20$ Ohm, bei 40 Lampen bloß $\frac{200}{40} = 5$ Ohm, bei 1000 Lampen bloß $\frac{200}{1000} = 0,2$

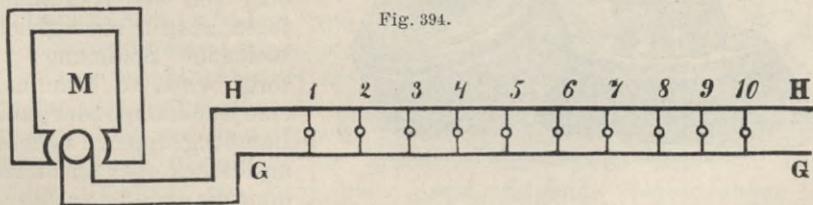
Fig. 393.



Ohm. Durch jede von den Lampen fließt aber bloß ein Zweigstrom, und zwar muß dieser Zweigstrom so groß sein, daß er die Lampe zur normalen Lichtstärke bringt, oder mit anderen Worten, es muß an den Enden einer jeden Lampe eine solche Spannung herrschen, daß sie in dem Widerstand der Lampe gerade den normalen Strom hervorbringt.

Wenn nun die Hauptleitungen HH und GG so dick gemacht werden, daß ihr Widerstand vernachlässigt werden kann, dann herrscht

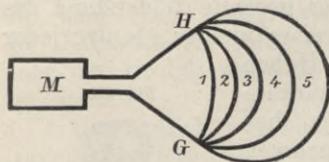
Fig. 394.



an den Enden jeder Lampe dieselbe Spannung. Denn man kann das Schema sich einfach so denken, wie es in Fig. 395 gezeichnet ist. Von den Enden H und G gehen dann alle Lampen (in der Figur sind 5 gezeichnet) aus und jede hat an ihren Enden dieselbe Spannung, nämlich die Spannung zwischen den Punkten H und G. Damit nun

alle Lampen immer mit gleicher Helligkeit brennen, ist nur nötig, daß die Spannung zwischen H und G immer konstant gehalten wird, daß diese immer dieselbe bleibt. Wenn also der Widerstand der Leitungen H und G (Fig. 394), die von den Klemmen der Maschine

Fig. 395.



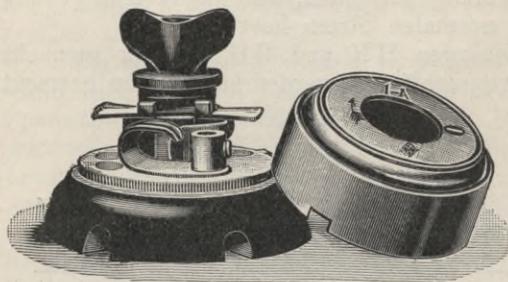
ausgehen und zwischen denen die Lampen parallel geschaltet sind, sehr klein ist (und in der Praxis wird er auch immer sehr klein gemacht), so ist zum normalen Brennen nur nötig, daß die Spannung an den Klemmen der Maschine (die Klemmenspannung) immer denselben Wert hat.

Um daher eine Glühlichtbeleuchtung brauchbar herzustellen, kann man alle diejenigen Stromerzeuger benutzen, welche entweder von selbst konstante Klemmenspannung besitzen, oder bei denen sie sich leicht herstellen läßt. Die vorteilhaftesten Stromerzeuger sind daher die Akkumulatoren. Denn diese liefern immer konstante Spannung, welche nur ganz allmählich abnimmt und durch Zellschalter noch reguliert werden kann. Sie sind namentlich für Privathäuser am meisten angebracht, in denen eine fachmännische Bedienung für die Anlage gewöhnlich fehlt.

Für große ausgedehnte Zentralstationen aber werden zur Erzielung konstanter Spannung immer Nebenschlußdynamos benutzt.

Bei diesen kann man ja, wie wir S. 357 gesehen haben, durch Regulierung des Nebenschlusses die Klemmenspannung absolut konstant erhalten. Es ist dazu notwendig, daß eine Person ein Voltmeter dauernd beobachtet und die Widerstände passend ein- oder ausschaltet. Man hat zwar mehrfache Mittel ersonnen, um diese Regulierung auf konstante Spannung selbsttätig, automatisch, durch den Strom selbst zu machen.

Fig. 396.



Doch wird bei großen Anlagen die Regulierung fast durchweg von dem Maschinisten vorgenommen.

Wenn also in solcher Weise von der Maschine oder von den Akkumulatoren aus für stets gleichbleibende Spannung gesorgt wird, so kann man eine jede Lampe oder ganze Lampengruppen beliebig auslöschten oder anzünden, ohne die anderen zu stören.

Lampen, die zugänglich sind, und einzeln entzündet oder ausgelöscht werden sollen, werden in ihren Fassungen mit einem Hahn versehen, der beim Drehen einen Kontakt hervorbringt oder schließt. Man kann jedoch einzelne Lampen oder viele zusammen auch bequem von der Ferne entzünden oder auslöschten, indem man nur in die Leitung zu den Lampen einen Ausschalter irgendwo anbringt. Diese

Ausschalter, von denen Fig. 396 eine vielbenutzte Form von Voigt & Häffner in Frankfurt a. M. geöffnet zeigt, bestehen aus einem an dem Griff befestigten ebenen Metallstück, das beim Drehen des Griffes entweder auf den beiden federnden Metallstreifen, von denen einer in der Figur sichtbar ist, aufliegt, oder frei in der Luft sich befindet. Die Federn sind mit der Leitung verbunden. Durch Drehen des Griffes bewirkt man also abwechselnd Kontakt und Unterbrechung. Die ganze Kontaktvorrichtung befindet sich in einer Hülle von Holz, Porzellan oder Metall. Die Hülle kann natürlich auch sehr geschmackvoll mit Verzierungen ausgestattet werden.

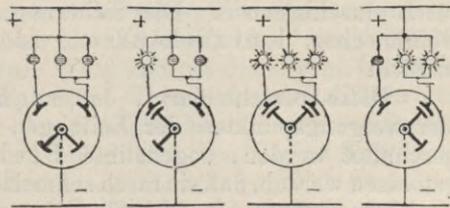
Fig. 397.



Es wird also z. B. die Leitung, welche in ein Zimmer führt und zwischen deren beide Drähte alle Lampen dieses Zimmers eingeschaltet sind, zuerst an diesen Ausschalter geführt, so daß der eine Leitungsdraht unterbrochen ist und die beiden Enden mit den federnden Metallstücken verbunden sind. Durch eine bloße Drehung des Griffes kann man dadurch sofort das ganze Zimmer erleuchten oder verdunkeln. Auch kann man die Ausschalter an einer Leitungsschnur von der Decke herabhängen lassen, wie Fig. 397 zeigt. Ein Druck auf den Knopf der Birne dreht die Kontaktstücke und bringt dadurch Kontakt hervor, ein folgender Druck dreht sie weiter und hebt den Kontakt wieder auf u. s. f. Gerade diese Leichtigkeit des Anzündens und Auslöschens von der Ferne macht das Glühlicht äußerst bequem und gibt ihm manche Vorzüge vor dem Gaslicht. Man kann auch den Ausschalter so einrichten, daß er mehrere Kontakte besitzt, so daß man z. B. je nach seiner Stellung von einem Lüster ein Viertel der Lampen, oder drei Viertel, oder alle Lampen brennen lassen kann. Solche Schalter nennt man Serienschalter.

Das Schema einer solchen Einrichtung ist in Fig. 398 gezeichnet. Zwischen die beiden horizontal gezeichneten Hauptleitungen sind zwei parallel geschaltete Leitungen gelegt, von denen die erste eine Lampe, die zweite zwei enthält. Der Serienschalter, der durch einen Kreis mit Kontakten und dem doppelarmigen Griff dargestellt ist, gestattet nun, wenn man den Griff in der Richtung des Uhrzeigers dreht, folgende Verbindungen zu machen. In der ersten Stellung ist alles ausgeschaltet, in der zweiten brennt die Einzellampe, in der dritten brennen alle drei Lampen, in der vierten bloß die beiden zusammengeschalteten. Solche Schaltungen kann man natürlich in beliebiger Komplikation ausführen.

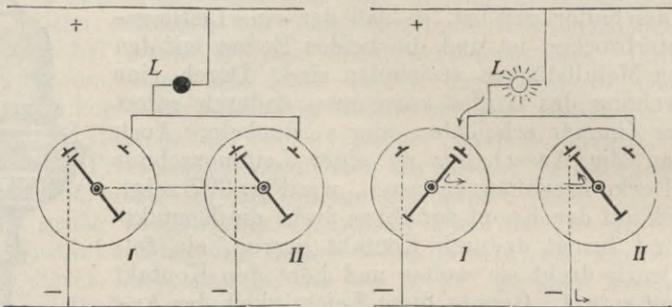
Fig. 398.



Häufig will man eine Glühlampe oder einen Lüster nicht bloß von einer Stelle aus anzünden und auslöschten können, sondern von

zwei oder mehr Stellen aus. Bei der Treppenbeleuchtung z. B. will man beim Eintreten in die Haustüre die Treppenlampen anzünden und an der Wohnungstüre sie auslöschten können oder umgekehrt. Die zu diesem Zweck dienenden Ausschalter bezeichnet man als Korrespondenzschalter. In Fig. 399 sieht man die beiden Schalter I und II, deren Drehpunkte durch eine Leitung verbunden sind, während von jedem Schalter der eine Kontakt mit der einen Leitung (—), der andere Kontakt mit der Lampe L und durch diese mit der zweiten Leitung (+) verbunden ist. Man sieht in der ersten Figur die Kontaktstücke parallel stehen, die Stromzufuhr zur Lampe unterbrochen ist und daher die Lampe nicht brennt, in der zweiten Figur stehen die Kontaktstücke gekreuzt und die Lampe erhält dadurch Strom und brennt.

Fig. 399.



Durch Weiterdrehen eines der beiden Kontakte kann man daher, wie auch der andere gerade steht, abwechselnd die Lampe anzünden oder auslöschten.

Eine wichtige Forderung ist für alle elektrischen Betriebe, daß die Apparate, also in unserem Falle die Glühlampen, gegen etwaige Zufälle, die durch zu starke Ströme entstehen, geschützt werden. Käme zufällig ein zu starker Strom in die Lampen, so würden diese rasch durchbrennen. Die Sicherung gegen diese Gefahr, gegen die Gefahr eines Kurzschlusses, ist zuerst von Edison angegeben worden.

Diese besteht darin, daß an allen passenden Stellen, an allen Verzweigungspunkten der Leitungen Bleistreifen in die Leitung eingeschaltet werden, sogenannte Bleisicherungen, welche so abgemessen werden, daß sie rasch schmelzen, wenn ein stärkerer Strom durch sie hindurchfließt als derjenige, den sie noch gerade aushalten sollen. Sowie der Strom momentan eine zu große Stärke bekommt, welche für die Lampen gefährlich sein könnte, schmilzt das Bleistück weg und unterbricht dadurch den Strom. Es erlöschen dann zwar alle Lampen, die hinter dieser Bleisicherung eingeschaltet sind, aber sie bleiben intakt und es läßt sich der Bleidraht mit Leichtigkeit ersetzen.

Solche Sicherungen, die jetzt zum Teil nicht aus Bleistreifen, sondern aus Silberstreifen hergestellt werden, werden in die Hauptleitungen, ferner in die Zweigleitungen und endlich an jeder Abzweigung

für eine Lampengruppe, also z. B. vor jedem Zimmer, eingeschaltet. Eine zweckmäßige Form der Bleisicherung besteht darin, daß man in einen Stöpsel aus Gips (Fig. 400), der am Boden eine Metallplatte und an der Seite eine metallische Schraube trägt, den Bleistreifen zwischen Grundplatte und Schraube befestigt. Die Stöpsel werden in einen Sicherheitsschalter (Fig. 401) eingeschraubt, zu dem die Leitungen von der Maschine geführt werden. Man verfertigt die Stöpsel für die Stromstärken 3, 5, 10, 24 u. s. w. Ampère. Für Schaltbretter werden die Bleisicherungen, die dort viel stärkere Ströme auszuhalten haben, in der Form der Fig. 402 hergestellt, ein Bleistreifen, der an beiden Seiten durch eine Klemme festgeschraubt werden kann. Bei hochgespannten Strömen von mehr als 500 Volt müssen die Bleisicherungen anders konstruiert werden, worauf aber hier nicht eingegangen werden kann.

Für kleine Einrichtungen, für einzelne Privathäuser z. B. mit 50, 60 Lampen, für die man eine besondere Maschine aufstellen muß,

Fig. 400.

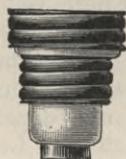


Fig. 401.

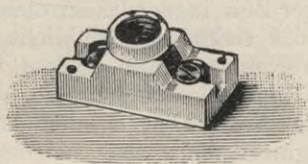


Fig. 402.



ist die Edisonsche Beleuchtung etwas kostspielig. Sie stellt sich dann nicht nur teurer als die Beleuchtung durch Gas, sondern sie ist auch umständlicher, insofern man eine besondere Bedienung für die Maschine braucht. Durch Anwendung von Akkumulatoren, welche von Zeit zu Zeit geladen werden, läßt sich allerdings die eigene Bedienung umgehen, aber dafür werden die Kosten der Anlage auch höher. Eine eigene Glühlichtbeleuchtung, mit eigener Maschine oder eigener Akkumulatoranlage, ist daher bis jetzt nur für solche Privathäuser anwendbar, in denen die Kosten gegenüber der Bequemlichkeit und Schönheit des Glühlichts keine Rolle spielen. Wohl aber ist die eigene Glühlichtbeleuchtung für große Hotels, Fabriken, Vergnügungsorte auch in Bezug auf den Kostenpunkt der Gasbeleuchtung nicht unterlegen und gewinnt ja deshalb in solchen Lokalitäten von Tag zu Tag immer mehr an Terrain. In diesen Fällen ist es aber gewöhnlich vorteilhaft, die Beleuchtung nicht direkt von der Maschine besorgen zu lassen, sondern indirekt, indem man durch die Maschine zunächst eine Akkumulatorenbatterie laden läßt und von dieser die Ströme für die Beleuchtung entnimmt. Der Vorteil besteht darin, daß erstens die Spannung der Akkumulatoren sehr konstant bleibt, zweitens aber, daß man von ihnen zu jeder Zeit Strom erhalten kann, wenn sie einmal geladen sind, also auch in der Nacht, so daß man nicht nötig hat, die Dynamomaschine Tag und Nacht laufen zu lassen.

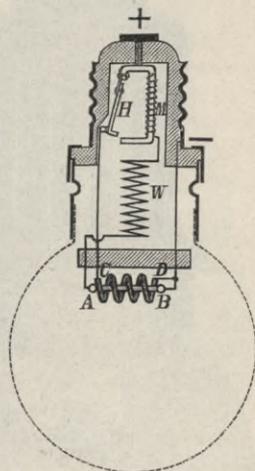
Für die Beleuchtung von Privathäusern ist es natürlich am be-

quemsten und vorteilhaftesten, wenn die elektrischen Ströme in großen Zentralen erzeugt und von diesen aus in die einzelnen Häuser ganzer Stadtteile oder Städte gesendet werden, ganz wie bei der Gasbeleuchtung von den großen Gasometern aus das Gas geliefert wird. Solche Zentralen sind allmählich in vielen großen, mittleren und kleinen Städten ausgeführt worden. Insbesondere sind die Elektrizitätswerke in Berlin eine großartige Anlage, welche einen sehr großen Teil von Berlin mit Elektrizität versorgt. Die Einrichtungen solcher Zentralstationen, sowie überhaupt die ganze Frage nach der Verteilung der Elektrizität von einer Stelle aus auf einen weiten Bezirk sind in Kap. 9 dieses Abschnittes behandelt.

Dem elektrischen Glühlicht ist durch die Erfindung des Auerschen Gaslichtes ein starker Abbruch geschehen. Das Auerlicht ist nicht nur bedeutend heller, sondern auch bedeutend billiger als das Glühlicht, und viele Anlagen, die bereits mit elektrischem Glühlicht beleuchtet waren, gingen trotz der größeren Unbequemlichkeit des Gaslichtes wieder zu diesem zurück, da die Einrichtung desselben mit Auerschen Strümpfen ökonomisch von erheblichem Vorteil ist. Es wird daher seit langer Zeit in der Elektrotechnik die Frage ventilirt, ob man nicht auch das elektrische Glühlicht so verbessern könne, wie Auer das Gaslicht verbessert hatte, indem man statt der glühenden Kohle, die ja sowohl beim elektrischen wie bei dem gewöhnlichen Gaslicht das Leuchtende ist, die weißglühenden Erden, mit denen die Glühstrümpfe imprägnirt sind, auch bei der Elektrizität als Leuchtörper benutzt. Diese Stoffe sind feuerbeständig und können eine viel höhere Temperatur als die Kohle annehmen und dadurch ein intensives und ökonomisches Licht ausstrahlen. Aber zum Unglück sind diese Substanzen, wie z. B. Magnesiumoxyd, in kaltem Zustand elektrische Nichtleiter. Erst bei sehr hohen Temperaturen, bei Rotglut, werden sie gute Leiter der Elektrizität und zwar namentlich dann, wenn man nicht eine einzige reine Substanz, sondern ein Gemisch mehrerer derartiger Substanzen anwendet. Aber gerade die hohe Temperatur, bei der sie erst leitend werden, macht ihre direkte Anwendung zu Beleuchtungszwecken schwierig, da ein Stäbchen aus solcher Substanz nicht von selbst durch den Strom glühend wird, weil es eben zunächst keinen Strom durchläßt, sondern erst vorher erwärmt werden muß, um überhaupt zu leiten. Wenn aber diese Schwierigkeit überwunden werden kann, so eignen sich diese Körper deswegen mehr für Beleuchtungszwecke, als die Kohle, weil sie höhere Temperaturen annehmen können als diese und dabei verhältnismäßig mehr Licht als Wärme ausstrahlen. Aus diesen Gründen hat sich seit längerer Zeit Professor Nernst bemüht, eine Lampe, die statt der Kohle gerade ein solches Magnesiastäbchen enthält, praktisch brauchbar zu machen, und es werden diese Nernstlampen seit kurzem von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in den Handel gebracht. Wenn man ein solches Stäbchen erst vorerwärmt hat, auf Rotglut, und dann den elektrischen Strom hindurchsendet, so leuchtet es hell weiß und verbraucht für gleiche Lichtstärke nur etwa die Hälfte der Watt, wie eine gewöhnliche Glühlampe. Die Vorwärmung geschieht

dabei durch einen automatischen Apparat. Die Einrichtung einer solchen Nernstlampe mit selbsttätiger Entzündung zeigt Fig. 403. Das Stäbchen AB ist der eigentliche Leuchtkörper aus Magnesia. Um diesen ist in einigen Windungen ein auf Asbest aufgewundener Platindraht CD gelegt, welcher zunächst von dem Strom zum Rotglühen gebracht wird und dadurch das Stäbchen AB erwärmt. Es geht nämlich der Strom beim Einschalten der Lampe von der +Klemme über H nach dem Platindraht C und D und dann zur —Klemme. Zugleich könnte der Strom auch gleichzeitig von der +Klemme über den kleinen Elektromagneten M und den Vorschaltwiderstand W zu dem Stäbchen AB gehen. Dieses ist aber eben in kaltem Zustand ein Nichtleiter. Die Platindrahtspirale erhitzt nun allmählich in $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Minute durch Strahlung den Magnesiafaden und dadurch geht nun wirklich der Strom in immer größerer Stärke durch M W A B zur —Klemme, und befördert durch seine Joulesche Wärme die Erhitzung desselben und infolgedessen auch seine Leitungsfähigkeit. Sowie dieser Strom eine passende Stärke erreicht hat, wird der Magnet M auch stark genug, seinen Anker H anzuziehen. Dadurch ist aber der Strom in der Platinspirale unterbrochen und der ganze Strom geht nun durch das Stäbchen AB und bringt dieses zum hellen Weißglühen. Das Licht der Nernstlampe ist sehr glänzend und weiß; es übertrifft an Glanz und Weiße das Auerlicht. Die Lampen (Modell B) sind, wie die Fig. 404 zeigt, mit einer übergeschobenen Kugelglocke versehen und tragen am Fuß das Edisongewinde, mit welchem sie in die gewöhnlichen Glühlampenfassungen eingeschraubt werden. Andere Lampen (Modell A), bei denen Stäbchen und Spirale vertikal stehen, werden für größere Lichtstärken gebraucht und sind zum Aufhängen eingerichtet. Sie haben Lichtstärken von 65 bis 135 Hefnerkerzen, während die kleineren des Modells B solche von 25 bis 40 Kerzen besitzen. Der Stromverbrauch beträgt bei diesen Lampen nur etwa 1,7 bis 2,0 Watt pro Kerzenstärke, während eine gewöhnliche Glühlampe nahezu das Doppelte, nämlich 3,2 bis 3,5 Watt pro Kerze verbraucht. Die Nernstlampen sind nicht so haltbar, wie die gewöhnlichen Glühlampen. Durchschnittlich nach 380 Brennstunden muß der Glühkörper ersetzt werden. Da aber die Lampen nicht luftleere Gefäße haben, wie die Glühlampen mit Kohlenfäden, so kann man bei ihnen den Faden leicht ersetzen. Trotzdem muß man bei den Nernstlampen für Ersatzkosten pro Jahr bedeutend mehr als bei den gewöhnlichen Lampen rechnen. Das langsame Anzünden, die kurze Lebensdauer, die Empfindlichkeit gegen Spannungsveränderungen, der hohe Preis sind allerdings schwerwiegende Nachteile dieser Lampe, denen aber als Vorteile die wesentliche Ersparnis an Stromkosten und die Schönheit des Lichtes gegenüberstehen. Für viele Zwecke, für Straßenbeleuchtung,

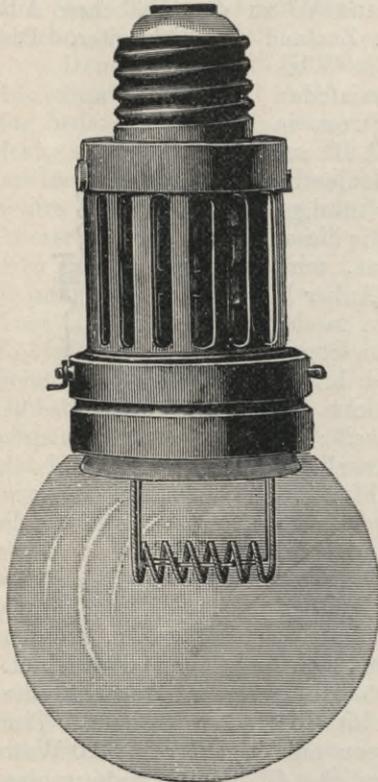
Fig. 403.



sowie für die Beleuchtung von Restaurationen, Sälen u. s. w. mag das Nernstlicht sich als nützlich, nicht im Gegensatz, sondern im Verein mit dem gewöhnlichen Glühlicht erweisen.

Auf einem ganz anderen Wege suchte Auer von Welsbach, der berühmte Erfinder des nach ihm benannten Gasglühlichts, eine viel ökonomischere Lampe herzustellen, als es die gewöhnlichen Glühlampen sind. Daß diese verhältnismäßig wenig Licht bei gegebener Energie-

Fig. 404.



zufuhr liefern, beruht darauf, daß sie nicht zu so hohen Temperaturen gebracht werden können, wie etwa die Kohlen des Bogenlichts. Die dünnen Fäden würden bei diesen hohen Temperaturen zu leicht zerstäuben. Je höher aber die Temperatur eines leuchtenden Körpers ist, um so mehr Licht strahlt er aus, im Verhältnis zur aufgewendeten Energie. Deswegen bestrebte sich Auer, das Glühlichtproblem dadurch zu lösen, daß er statt der Kohle das am allerschwersten schmelzbare Metall, Osmium, für die Glühlampenfäden benutzt. In diesen Osmiumlampen, die eben erst in den Handel gebracht werden und von denen Fig. 404a eine Abbildung gibt, ist die Temperatur und daher die Lichtstärke des Glühkörpers eine viel höhere, als bei den gewöhnlichen Lampen. Daher konsumieren sie auch bloß 1,5 Watt pro Kerze an Energie. Bisher sind diese Lampen nur für 16 bis 44 Volt Spannung zu konstruieren, was für den praktischen Gebrauch ein wesentlicher Nachteil ist. Man geht ja im Gegenteil wegen der Billigkeit der Stromfortleitung allmählich zu immer größeren Spannungen in den Zentralen über. Von 100 bis 110 Volt ist man jetzt

schon auf 220, ja sogar auf 440 Volt Spannung in den Leitungsnetzen gestiegen und in diesem Fall müßte man immer 3, 7, 15 solcher Osmiumlampen (von 35 Volt) hintereinander schalten und zusammen brennen lassen. Ob diese Schwierigkeiten durch die sonstigen Vorzüge der Osmiumlampe, die eine durchschnittliche Lebensdauer von 500 Stunden besitzt, werden überwunden werden können, wird erst die Zukunft lehren.

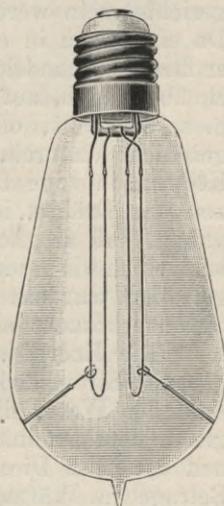
Das elektrische Glühlicht beruht auf der Jouleschen Wärme. Da nun aber ein Draht durch den elektrischen Strom nicht bloß zum Glühen erhitzt wird, so daß er Licht ausstrahlt, sondern da er durch mehr oder minder starke Ströme auf jeden beliebigen Grad erwärmt werden kann, so lag der Gedanke sehr nahe, diese Joulesche Wärme

durch passende Anordnung der Drähte auch zum Kochen und Heizen zu benutzen, also diese Wärme etwa in Gefäßen zu entwickeln, in welchen man Wasser zum Sieden oder durchströmende Luft für Heizzwecke auf hohe Temperatur bringen will.

Eine nähere Betrachtung ergibt aber zunächst, daß dieser Gedanke, obwohl er nahe liegt, doch gewissen Schwierigkeiten unterliegt, Schwierigkeiten, die sich nicht auf die technische Ausführbarkeit, sondern auf die Ökonomie dieses elektrischen Betriebes beziehen. Die Ökonomie nämlich hängt natürlich ab von dem Preise, zu dem die elektrische Energie geliefert werden kann. Unter normalen Umständen, wenn die elektrischen Ströme von Dynamomaschinen geliefert werden, die durch Dampfmaschinen getrieben werden, ist die elektrische Energie, wie man leicht einsieht, zunächst viel zu teuer für Heizzwecke. Denn in den Dampfmaschinen werden nur etwa 8 Proz. der Verbrennungswärme der Kohlen wirklich in mechanische Arbeit verwandelt, und von diesen 8 Proz. wird auch nur ein Teil, etwa 90 Proz. derselben, durch die von den Dampfmaschinen getriebenen Dynamomaschinen in elektrische Energie verwandelt, die man dann in den Heizapparaten wieder in Wärme umsetzt. Wenn man dieselbe Kohlenmenge, die man zum Betrieb der Dampf- und Dynamomaschinen verwendet hat, direkt in Öfen verbrennen würde, so würde man, auch bei nicht besonders zweckmäßig konstruierten Öfen, etwa 60 Proz. der Verbrennungswärme zur Verfügung haben, also etwa 8mal so viel als bei der indirekten Erwärmung durch den elektrischen Strom. Rationell ist also das elektrische Kochen und Heizen in diesem, zunächst vorliegenden, Fall keineswegs.

Die Sachlage wird aber in zwei Fällen anders. Erstens nämlich, wenn die Dynamomaschinen nicht durch Dampfmaschinen oder Gasmotoren getrieben werden, sondern durch Wasserkräfte. Wenn bei diesen die Einrichtung einmal gemacht ist, so ist es ganz gleichgültig in Bezug auf die Kosten, ob man Strom entnimmt oder nicht. Die eigentliche elektrische Energie wird also dann kostenlos geliefert — abgesehen von der in jedem Falle notwendigen Verzinsung des Kapitals — und daher kann auch das Heizen und Kochen dabei rationeller sein. Zweitens aber bürgert sich in denjenigen Städten, in denen der elektrische Strom in großen Zentralstationen erzeugt und überall hingeleitet wird — und das ist jetzt schon eine sehr stattliche Anzahl — die elektrische Heizung sehr rapid aus folgendem Grunde ein. Bei solchen Zentralstationen werden nämlich die Kosten der Anlage und des Betriebes gewöhnlich schon durch die für die Beleuchtung abgegebene Energiemenge gedeckt. Der Preis der elektrischen Energie für andere als Beleuchtungszwecke, also auch für Heizzwecke, wird deswegen sehr viel niedriger normiert und kann es auch schon deswegen werden, weil man eine viel bessere Ausnutzung

Fig. 404 a.



der gesamten Maschinenanlage erzielt, wenn man sie nicht bloß des Abends, wo sie für die Beleuchtung notwendig ist, sondern auch am Tage in Betrieb nimmt. Und die Benutzung der Apparate zum Kochen und Heizen findet ja in der Hauptsache in den Tagesstunden statt. Es kommt also wesentlich auf die Kosten an, zu welchen man die elektrische Energie haben kann, um zu entscheiden, ob es auch ökonomisch ratsam ist, mit elektrischen Apparaten zu heizen und zu kochen; also indirekt mit der Jouleschen Wärme, statt direkt mit der Wärme der Kohlen oder des verbrennenden Leuchtgases.

Wenn aber die Frage der Ökonomie erledigt ist, so bietet der elektrische Betrieb auch in diesem Gebiete eine große Menge Vorzüge, nämlich solche der Gefahrlosigkeit, der Reinlichkeit, der steten Betriebsbereitschaft, der großen Bequemlichkeit, so daß vermutlich auch hier, namentlich wenn große elektrische Zentralstationen immer mehr eingerichtet sein werden, die Elektrizität als Siegerin hervorgehen wird. Da ein Strom in einem Leiter fortwährend Wärme entwickelt, solange er fließt, so handelt es sich nur darum, diese Wärme auf andere Körper zu übertragen, auf die Metallwände von Gefäßen, in denen man Wasser u. s. w. kocht, oder auf die Luft eines Zimmers beim Heizen. Dies geschieht dadurch, daß man die sich erwärmenden Drähte mit diesen Körpern in enge Berührung bringt. Wichtig ist natürlich dabei, daß man die Drähte, in denen die Joulesche Wärme erzeugt wird, so anordnet, daß möglichst die ganze Wärme nutzbar verwendet wird. Bevor wir jedoch die Anordnungen besprechen, die wirklich für diese Zwecke getroffen wurden, wollen wir uns über die Größe des erforderlichen Stromverbrauchs ein Urteil bilden.

Die Energie, die ein Strom von gegebener Spannung und gegebener Stromstärke enthält, ist einfach gleich dem Produkt aus der Zahl der Watt, die dieser Strom mit sich führt, und der Zeit, also gleich dem Produkt aus der Zahl der Volt und der Zahl der Ampère und der Zeit. Diese Energie setzt sich in den Drähten in ihrem vollen Betrage in Wärme um und die entwickelte Wärmemenge ist also ebenso gleich dem Produkt der Watt und der Zeit. Diese Wärmemenge ist dann, wenn man die Zeit in Stunden rechnet, in Wattstunden ausgedrückt. Nun drückt man aber Wärmemengen gewöhnlich in Kalorien aus, wobei man unter einer Kalorie diejenige Wärmemenge versteht, durch welche 1 Liter Wasser in seiner Temperatur um 1° erhöht wird. Da (nach S. 311) 736 Watt gleich 1 Pferdekraft sind, so sind 736 Wattstunden gleich 1 Pferdekraftstunde. Nun leistet 1 Pferdekraft in jeder Sekunde 75 Kilogrammometer, also in 1 Stunde $3600 \times 75 = 270\,000$ Kilogrammometer Arbeit, also ist 1 Wattstunde gleich $\frac{270\,000}{736}$ Kilogrammometer, das ist rund 367 Kilogrammometer.

Die Physik lehrt aber, daß 1 Kalorie gleich der Arbeit von 435 Kilogrammometern ist. Mithin entspricht eine Wattstunde einer Wärmemenge von $\frac{367}{435} = 0,841$ Kalorien oder eine Kalorie entspricht 1,19 Wattstunden. Berechnen wir also nun, wieviel Watt ein Strom haben

müßte, der in 5 Minuten 1 Liter Wasser von Zimmertemperatur (15°) zum Sieden (100°) bringen könnte. Zu dieser Erwärmung sind offenbar 85 Kalorien, also 102 Wattstunden nötig. In Wirklichkeit wird man aber wegen der notwendigen Wärmeverluste, nicht bloß 102 Wattstunden, sondern zirka 120 Wattstunden nötig haben. Da diese in 5 Minuten also in $\frac{1}{12}$ Stunde geleistet werden sollen, so gehört ein Strom mit dem Effekt $12 \times 120 = 1440$ Watt dazu. Ist der Strom also etwa aus einer Leitung von 110 Volt genommen, so muß er eine Stärke von 13,1 Ampère haben; ist er aus einer Leitung von 60 Volt genommen, so braucht er eine Stärke von 24 Ampère u. s. w. Man sieht aus diesen Betrachtungen, daß ein Strom zur gleichen Wärmeleistung um so größeren Effekt, um so mehr Watt haben muß, in je kürzerer Zeit diese Leistung geschehen soll. Es werden also die Apparate, welche schnelle Erwärmung erzielen sollen, mit viel größeren Stromstärken betrieben werden müssen, als diejenigen, welche langsame Erwärmung, oder nur ein Warmhalten hervorbringen sollen.

Infolgedessen richtet man praktisch die Apparate so ein, daß sie mehrere parallel geschaltete Heizdrähte besitzen, von denen man entweder alle oder einige zu gleicher Zeit vom Strom durchfließen lassen kann. Zu rascher Erwärmung benutzt man sämtliche parallel geschaltete Drähte zu gleicher Zeit, wodurch, da der Widerstand bei Parallelschaltung klein ist, bei gegebener Spannung ein starker Strom und daher erhebliche Joulesche Wärme erzeugt wird. Zu langsamer Erwärmung oder zum bloßen Warmhalten benutzt man nur einige von den parallel geschalteten Drähten oder nur einen. Diese verschiedenartige Verbindung wird gewöhnlich durch Umstecken eines Stöpsels hervorgebracht.

Wenn in den Leitungen, an welche ein Heizapparat angeschlossen werden soll — und auch die Heizapparate werden, wie Glühlampen, Motoren u. s. w., alle parallel geschaltet —, eine bestimmte unveränderliche Spannungsdifferenz herrscht, so ist es leicht, den Widerstand des Drahtes zu bestimmen, der eine bestimmte Erwärmung in bestimmter Zeit hervorbringen soll. Ist z. B. diese Spannungsdifferenz 100 Volt und sollen in dem Apparat in 5 Minuten 300 Kalorien erzeugt werden, so würde die Rechnung folgendermaßen zu führen sein. Zu 100 Kalorien braucht man, wie oben erwähnt, abgesehen von den Verlusten 119 oder rund 120 Wattstunden, also zu 300 Kalorien braucht man 360 Wattstunden. Da 1 Watt gleich 1 Volt mal 1 Ampère ist, so braucht man bei der gegebenen Spannung von 100 Volt eine Elektrizitätsmenge von 3,60 Ampèrestunden. Da diese von dem Strom in dem zwölften Teil einer Stunde geliefert werden sollen, so muß der Strom die Stärke 43,2 Ampère haben. Wir wissen also, daß wir Drähte brauchen, in denen bei 100 Volt Spannung ein Strom von 43,2 Ampère fließt. Folglich muß der Draht, resp. das System von parallel geschalteten Drähten den Widerstand 100 Volt dividiert durch 43,2 Ampère, das ist 2,3 Ohm, haben. Damit sind die Dimensionen des Drahtsystemes gegeben. Will man z. B. lauter Drähte anwenden, deren jeder nur 3 Ampère führen soll, so muß man zirka 15 solche Drähte parallel schalten.

Wenn aber die Spannung in den Leitungen nicht ganz konstant gehalten wird — und Schwankungen bis zu 10 Proz. kommen im prakti-

sehen Betriebe vor —, so fließen stärkere Ströme durch die Drähte, als wofür sie normiert sind, und die Gefahr liegt vor, daß ein Draht, der zu stark erhitzt wird, dadurch wegschmilzt und die Leitung unterbricht. Man muß deshalb die Drähte so wählen, daß sie durch den normalen Strom nicht zu heiß werden, resp. daß sie ihre Wärme möglichst vollständig abgeben können, und insbesondere muß man schwer schmelzbare Drähte zu diesen Apparaten benutzen.

Man nimmt also zum Teil Drähte aus Nickel oder einer Nickellegierung. Diese aber würden, wenn die Luft zu ihnen Zutritt findet,

Fig. 405.

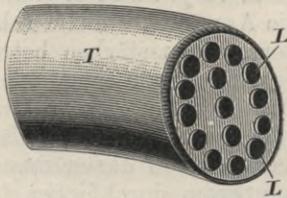
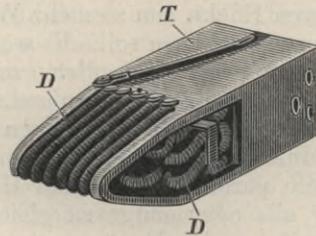
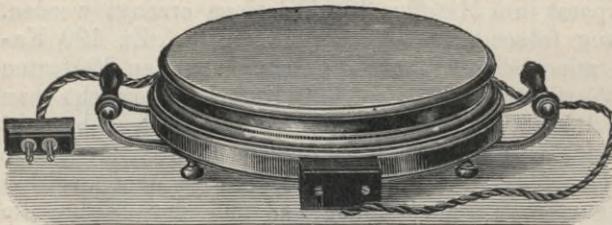


Fig. 406.



infolge der hohen Temperatur oxydieren und dadurch abbrennen. Um dies zu verhindern, umgibt man sie mit einer Emailmasse, die der Hitze Widerstand leistet und die den Zutritt der Luft verhindert. So werden bei den unten beschriebenen Heizapparaten von Helberger auf die einzelnen Drähte Glasperlen direkt aufgereiht, um eben die Oxydation zu vermeiden. Andererseits nimmt man aus demselben Grunde als Heizdrähte nicht solche von Nickel, sondern solche aus edlem Metall, insbesondere aus Platin, da diese ja auch bei hohen Temperaturen, bei dauernder Rotglut, nicht oxydieren. Derartig sind die Apparate von Stotz in Stuttgart eingerichtet. Die Platindrähte werden dabei auf eine

Fig. 407.



Asbestschnur aufgewickelt und zwar wird die Anordnung meistens so getroffen, daß jedesolche Spirale 1 Ampère aufnehmen kann. Braucht man stärkere Ströme, so werden eben mehrere

solche Spiralen parallel geschaltet. Die Drähte werden nun bei diesem System in Tonkörper eingebettet, welche in diejenigen Formen gebracht werden, wie sie zu dem betreffenden Apparat passen. Fig. 405 zeigt ein Stück eines gebogenen Tonkörpers T mit den Löchern LL zur Aufnahme der Drähte. Fig. 406 zeigt einen anderen Tonkörper, auf welchem die Drähte DD schon angebracht sind. Für Apparate, welche sehr viel Wärme entwickeln sollen, ist die Anwendung des Platins allerdings zu kostspielig und die Platindrähte werden dann

durch Drähte aus einer Nickellegierung ersetzt, jedoch so, daß die Temperaturerhöhung der Drähte keine zu große wird.

Diese Tonkörper mit ihren Drähten, welche als Heizkörper

bezeichnet werden, werden nun in die betreffenden Gefäße eingeschlossen, welche erwärmt werden sollen. So zeigt Fig. 407 einen Rechaud, Fig. 408 eine Teemaschine, Fig. 409 eine Bratpfanne. Die Heizkörper befinden sich in dem Boden der Gefäße, so daß die Drähte möglichst nahe an den Heizflächen sich befinden. An jedem Apparat gehen von den Heizdrähten Stifte nach außen, in welche ein Kontakt paßt (der in den Fig. 407 und 408 angesteckt ist). Dieser Kontakt wird durch eine Leitungsschnur an die Zimmerleitung angeschlossen. Um die Erwärmung der Apparate regulieren zu können, sind immer mehrere Heizdrähte getrennt im Apparat so angeordnet, daß sie nach Belieben alle oder einzeln oder in Gruppen zur Verwendung kommen. Die Art der Ausführung dieser Schaltungen zeigt Fig. 410. Es befindet sich nämlich in dem Heizgefäß

erstens eine Leitung, welche bei a anfängt und in dem Mitteldraht von b aufhört, zweitens eine Doppelleitung (zwei parallel geschaltete Drähte), welche bei c anfangen und in den beiden äußeren Linien

Fig. 408.



Fig. 409.



in b enden. Wird nun der dreiteilige Stöpsel S so gesteckt wie in Fig. I, so geht der Strom nur durch die eine Leitung ab, die Erwärmung ist schwach; wird er so gesteckt wie in II, so geht der Strom durch die Doppelleitung c b, die Erwärmung ist eine mittlere, und wird

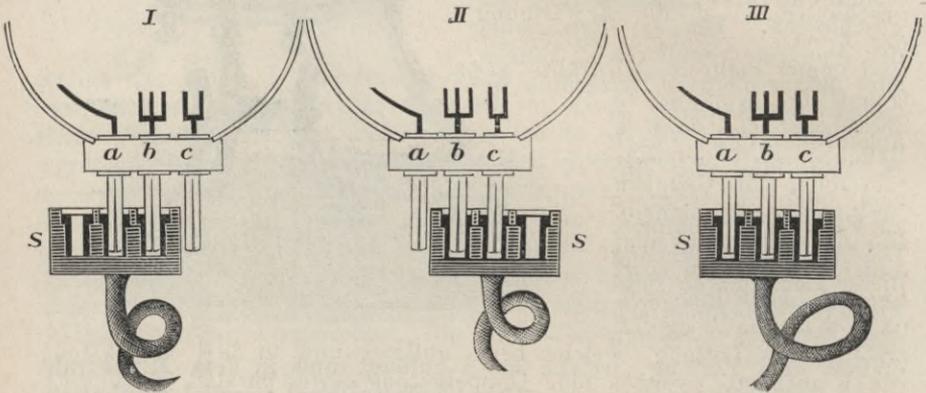
er endlich so gesteckt wie in III, so geht der Strom sowohl von a als von c nach b, die Erwärmung ist eine starke.

Ähnliche Einrichtungen sind auch bei den Apparaten von Helberger in München zur Regulierung getroffen. Die Heizdrähte werden bei diesen Apparaten, von denen z. B. Fig. 411 einen Brennscherenwärmer, Fig. 412 einen Inhalationsapparat zeigt, so angeordnet, daß sie, durch aufgereichte Glasperlen isoliert, direkt in Rinnen gelegt sind, die im Innern der Gefäße an den passenden Stellen eingeschnitten sind.

Ganz anders in der Konstruktion sind die zuerst durch die Gesellschaft „Prometheus“ in Frankfurt a. M. hergestellten, jetzt auch von anderen Firmen ausgeführten elektrischen Kochapparate. Bei diesen wird die Heizwirkung auf eigentümliche und sehr zweckmäßige Art erzeugt.

Es werden nämlich nicht eingelagerte Drähte durch den Strom erhitzt, wie bei den oben angeführten Apparaten, sondern die Kochgefäße werden mit einer schneckenförmig angeordneten sehr dünnen Metallschicht aus edlem Metall (Silber) versehen, welche auf einer

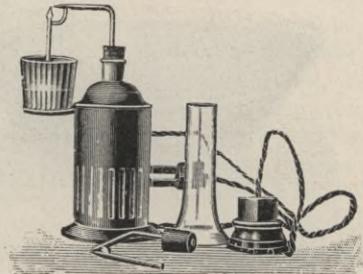
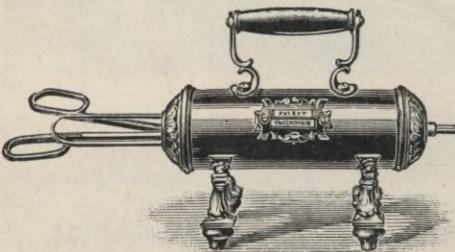
Fig. 410.



isolierenden Unterlage, Emaille, eingebrannt ist. Die Emaille befindet sich auf der Außenseite des Kochgefäßes, so daß die in den Metall-

Fig. 411.

Fig. 412.



streifen entwickelte Hitze sich fast ganz dem Innern des Gefäßes mitteilt. Das Kochgefäß wird außen mit einer Hülle umgeben, damit die

blanken Metallstreifen nicht frei liegen. Eine Ansicht eines solchen Kochgefäßes mit 3 gewundenen Metallstreifen, die verschiedenartig geschaltet werden können, zeigt Fig. 413. In Fig. 414 sieht man das Äußere des Gefäßes mit den 3 Kontakten a b c. Der Nutzeffekt dieser

Fig. 413.

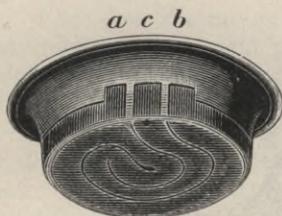


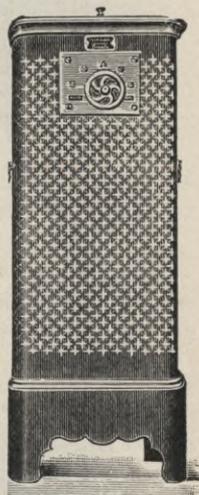
Fig. 414.



Apparate, die ebenfalls für alle Zwecke der Küche hergestellt werden, ist infolge der Konstruktion ein sehr hoher.

Solche Heizapparate der verschiedenen Konstruktionen werden nun nicht bloß für die Küche in kleinen und großen gefertigt, von der einfachen elektrischen Pfanne an bis zum vollständigen elektrischen Herd, sie werden auch für industrielle Zwecke, als Leimkocher, Siegellackkocher, Abdampfschränke, Brennstempel, Vergoldpressen, Satinierapparate u. s. w. hergestellt und zeichnen sich überall durch besondere Bequemlichkeit, Reinlichkeit und Gefahrlosigkeit aus. Um einen Anhalt über die Leistungsfähigkeit und den Stromverbrauch dieser Apparate zu erhalten, sei angeführt, daß die oben abgebildete Bratpfanne Ströme von 4, 8, 12 Ampère erhält, je nach der Schaltung, wobei immer eine Spannung von 100 Volt angenommen ist; ein Teekessel, mit 5, 4 oder 1 Ampère betrieben, bringt bei der größten Stromstärke 1 Liter Wasser in 15 Minuten zum Sieden; bei dem Inhalationsapparat, der 2 Ampère braucht, siedet das Wasser in 5 Minuten; ein Bratrost, mit 6 Ampère betrieben, ist in 5 Minuten zum Braten fertig, ebenso ist der Brennscherenwärmer, der 1 Ampère Strom braucht, in 5 Minuten zum Gebrauch fertig.

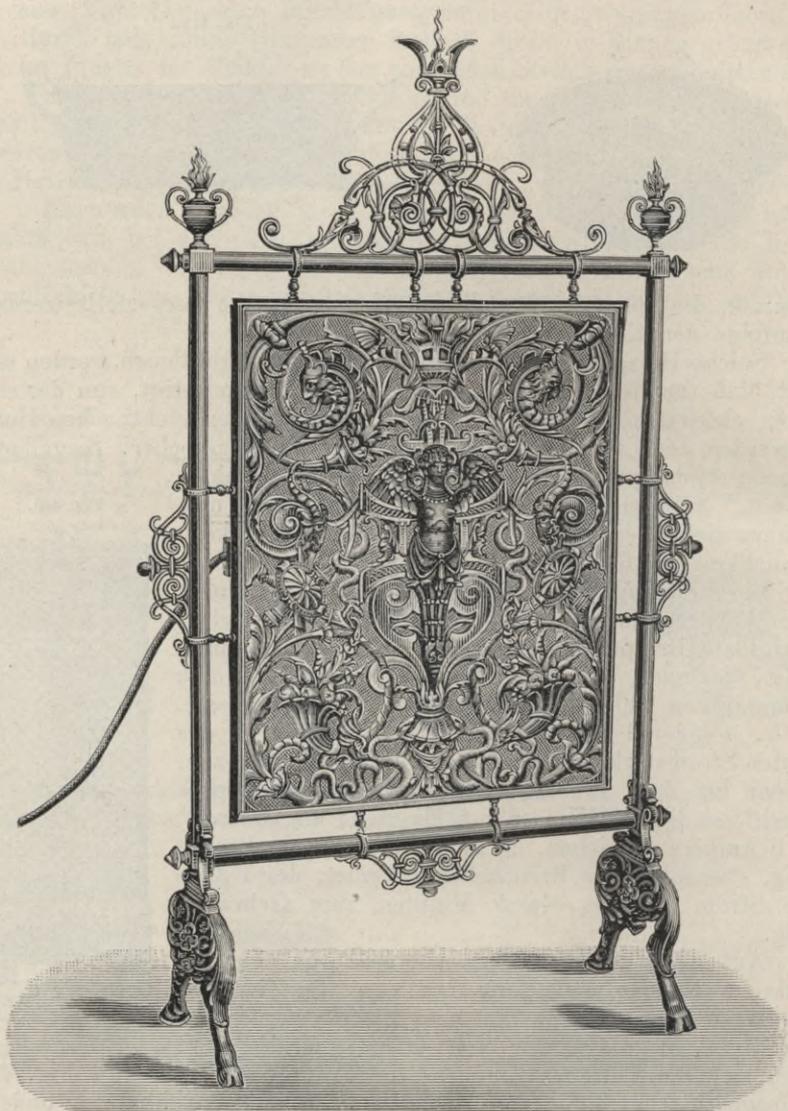
Fig. 415.



Außer für solche Kochzwecke läßt sich aber die Joulesche Wärme auch zum Heizen von Zimmern oder Wagen verwenden. Zu dem Zweck werden die Heizkörper in die Form von Öfen gebracht, an denen sich die Luft des Zimmers erwärmen kann. So zeigt Fig. 415 einen elektrischen Ofen von Helberger, der transportabel ist und in jedem Zimmer durch eine Leitungsschnur mit der elektrischen Leitung verbunden werden kann. Die Regulierung auf verschiedene Stromstärken, also verschiedene Erwärmung, geschieht hier durch Drehung des vorn oben sichtbaren Kontaktrades, welches die betreffenden Schaltungen vornimmt. Ein solcher Ofen wird in 5 Abstufungen mit 10 bis

50 Ampère betrieben und genügt zum Heizen eines Raumes bis zu 100 Kubikmeter Inhalt. Bei den Öfen dieser Form geschieht die Erwärmung hauptsächlich durch die Zirkulation der Zimmerluft durch

Fig. 416.

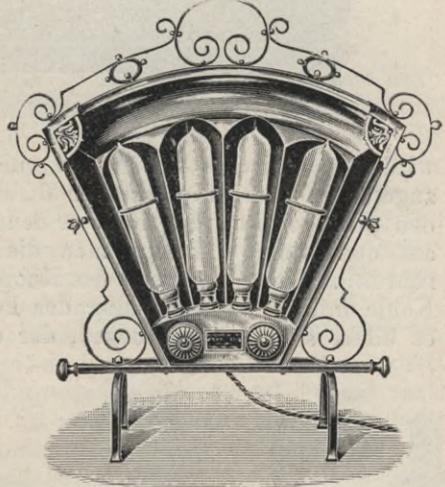


den Ofen hindurch. Die kalte Luft dringt von unten in den Ofen hinein, die warme strömt oben ab. Man kann aber dem Ofen leicht auch eine Form und zwar sogar eine sehr geschmackvolle Form geben, bei der hauptsächlich die strahlende Wärme benutzt wird. Einen

solchen Ofen von Stotz zeigt Fig. 416. Er hat die Form eines gewöhnlichen, fein verzierten Ofenschirms, ist aber selbst der Ofen im ganzen. Der mittlere flache Teil enthält die Heizkörper und wird durch die in der Figur sichtbare Schnur an die Leitung angeschlossen. Ein solcher Ofen braucht ungefähr 20 Ampère, um ein mittelgroßes Zimmer zu erwärmen.

Für den Zimmergebrauch entsprechen die bisher angeführten Öfen nicht immer dem gewohnten Geschmack. Viele Personen lieben das offene Kaminfeuer und fühlen sich durch die strahlende Wärme, die von solchem offenen Feuer ausgeht, angenehm berührt. Auch dieser Geschmacksrichtung vermag die elektrische Heizung Genüge zu leisten. Die Firma Prometheus liefert sehr geschmackvolle leuchtende Heizöfen, sogenannte Radiatoren, von denen Fig. 417 eine Form zeigt. Man sieht in diesem Ofen 4 große Glühlampen, welche durch den Strom zum Leuchten gebracht werden und welche zugleich erhebliche Wärme ausstrahlen. Diese Strahlung wird noch durch den kupfernen Hintergrund der Lampen erhöht. Diese Öfen eignen sich daher besonders zu rascher intensiver Erwärmung von Personen, die an den Ofen treten, ganz wie die offenen Kamine, während sie für die Durchwärmung ganzer Zimmer weniger geeignet sind. Ein solcher

Fig. 417.



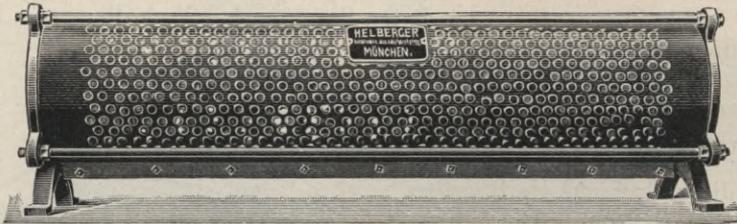
Ofen braucht, je nach der Größe, 1 bis 2 Kilowatt ($\frac{4}{3}$ bis $\frac{8}{3}$ Pferdekraft) an elektrischer Energie, also bei 100 Volt Spannung des Stromnetzes 10 bis 20 Ampère. Die Öfen bilden, wie aus der Figur ersichtlich ist, zugleich eine hübsche Zimmerzierde.

Die elektrischen Öfen haben auch vielfachen Eingang gefunden zur Heizung von elektrisch betriebenen Trambahnwagen. Dort ist ja Strom im Wagen vorhanden und der Ofen kann also leicht von diesem Strom betrieben werden. Diese Öfen werden, wie Fig. 418 zeigt, in niedriger, langer Form ausgeführt, damit sie unter den Sitzbänken Platz haben. Sie sind aus feuerfestem Material gebaut und mit einem durchlochtem Mantel umgeben, durch den die Luft zirkulieren kann.

Für manche Heizzwecke, namentlich wenn es sich um rasch her vorzubringende hohe Temperaturen handelt, sind die bisher beschriebenen Apparate, die auf der Erzeugung Joulescher Wärme in Metalldrähten oder Metallstreifen beruhen, nicht besonders geeignet, weil bei den hohen zu erzielenden Temperaturen ein Abschmelzen oder Abbrennen der Drähte nicht ausgeschlossen ist. In diesen Fällen wird zuweilen

mit Vorteil die Heizung durch den elektrischen Lichtbogen angewendet. Ein zweckmäßiger derartiger Apparat ist der LötKolben mit Lichtbogenheizung, den die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin konstruiert und der in Fig. 419 in der Ansicht, in Fig. 420 im Durchschnitt gezeichnet ist. Durch eine Leitungsschnur mit Stöpsel

Fig. 418.



wird dem Apparat Strom aus einer Leitung von 65 oder 100 Volt zugeführt. Der Kupferkolben *d*, der direkt zum Löten dient, bildet den positiven Pol, die Kohle *a* den negativen Pol. Durch einen Druck auf den Knopf *c* bringt man die Kohle mit dem Kupferpol in Berührung. Beim Loslassen des Knopfes springt dieser und mit ihm die Kohle infolge der Spannung der Feder *e* um zirka 1 mm zurück und es bildet sich der Lichtbogen, der das positive Kupfer rasch und stark

Fig. 419.

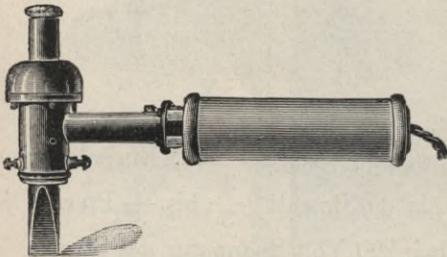
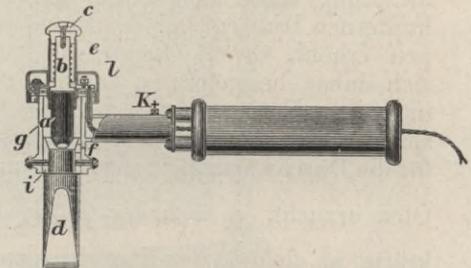


Fig. 420.



erhitzt. Durch ein kleines Loch bei *f* kann man den Lichtbogen beobachten. Ist die Kohle zu weit abgebrannt, so daß der Lichtbogen erlischt, so kann man ihn durch einen erneuten Druck auf den Knopf *c* wieder herstellen, was zirka jede halbe Stunde erforderlich ist. In ähnlicher Weise wendet man den Lichtbogen auch für elektrische Bügeleisen an.

Der elektrische Lichtbogen wird auch zum Betriebe elektrischer Öfen, aber nicht elektrischer Heizöfen, sondern elektrischer Schmelzöfen, benutzt und hat dafür sogar ganz besondere, sonst unerreichbare Eigenschaften. Da jedoch diese elektrischen Öfen bisher allein für chemische Zwecke verwendet werden, so wollen wir diese erst im Kap. 11, welches von der Elektrochemie handelt, besprechen.

7. Kapitel.

Die Arbeitsleistung durch Elektromotoren.

Die elektrische Beleuchtung war es zwar, welche den Anstoß zu der erfolgreichen Entwicklung der Elektrotechnik gab. Das Bedürfnis nach billigen und starken Strömen führte zu der Konstruktion der dynamoelektrischen Maschinen in immer größerer Vervollkommnung. Bald jedoch ergab sich eine Anwendung dieser starken Ströme zu Zwecken, deren Bedeutung eine viel größere ist, als sie die elektrische Beleuchtung erlangen kann, nämlich zur Erzeugung von mechanischer Bewegung, also zur Leistung von Arbeit, zur Verwandlung der Energie der elektrischen Ströme direkt in mechanische Arbeit.

Eine jede dynamoelektrische Gleichstrommaschine läßt sich in doppelter Weise verwenden. Wenn man den Anker derselben durch Aufwendung von Arbeit vor den Magnetpolen dreht, so erzeugt man in ihm Induktionsströme, und dies ist die ursprüngliche Verwendung der Maschinen. Wenn man aber andererseits durch die Bürsten in die Drahtwindungen der Maschine irgend einen elektrischen Strom schickt, so üben ja die Magnete auf den Strom im Anker Kräfte aus, und unter dem Einfluß dieser Kräfte müssen sich die Stromleiter, d. h. der Anker, bewegen. Wenn man also einen Strom von außen durch die Drahtwindungen des Ankers und der Magnete sendet, so muß der Anker sich drehen.

Man hatte schon lange versucht, diese elektromagnetischen Kräfte zur Leistung von Arbeit zu benutzen. Jacobi in Petersburg brachte eine solche, wie man sie damals nannte, „elektromagnetische Maschine“ (d. h. eine Maschine zur Erzeugung von Bewegung durch elektrische Ströme) in ein Boot, dessen Rad er mit der Achse des rotierenden Ankers in Verbindung gesetzt hatte, und ließ nun die Maschine durch eine große galvanische Batterie treiben. Die Maschine bewegte sich natürlich und trieb das Boot auf der Neva mit mäßiger Geschwindigkeit. Aber es war klar, daß eine solche Anwendung der Elektrizität zur Leistung von Arbeit nicht vorteilhaft sein konnte, denn es mußte ja in den Batterien Zink verbrannt werden, und wir haben auf S. 381 gesehen, daß die Erzeugung elektrischer Energie, von welcher ja die nutzbare Arbeit abhängt, durch Verbrennung von Zink etwa 15mal so viel Kosten verursacht, als durch Verbrennung von Kohlen. Es ist also unbedingt vorzuziehen, ein Boot durch Dampf treiben zu lassen, als durch Elektrizität, wenn man diese durch Oxydation von Zink erzeugen muß.

Ganz anders aber stellt sich die Angelegenheit, wenn man starke elektrische Ströme billig zur Verfügung hat, sei es direkt aus Dynamomaschinen oder indirekt aus geladenen Akkumulatoren. Mit solchen Strömen ist es sehr wohl möglich, ökonomisch und in sehr bequemer Form Arbeit zu leisten.

Wenn man also in eine Gleichstrommaschine von außen her einen elektrischen Strom einführt, so kommt ihr Anker in Drehung und kann Arbeit leisten. Woher man den Strom nimmt, den man in sie einleitet, ist ganz gleichgültig. Man kann ihn direkt aus einer Dynamomaschine nehmen; man kann den Strom aber auch aus Akkumulatoren oder aus galvanischen Elementen nehmen, wenn es die Ökonomie erlaubt und sonstige Rücksichten erfordern, oder man kann ihn endlich bei Stromverteilung durch Zentralstationen (s. Kap. 9) direkt aus der Leitung entnehmen. Das wesentlich Arbeitleistende ist also der elektrische Strom, und das Mittel, durch welches seine Energie in mechanische Arbeit verwandelt wird, ist die Dynamomaschine, die man deshalb auch als elektrischen Motor oder Elektromotor bezeichnet.

Ein elektrischer Motor, welcher durch einen Strom getrieben wird, kann also Arbeit leisten. Wenn man seine Achse durch Riemen oder Zahnräder oder auf irgend eine andere Weise mit der Welle einer Maschine in Verbindung setzt, die man treiben lassen will, so wird diese gedreht, und auf diese Weise leistet der Elektromotor Arbeit. Er tut es dadurch, daß ihm von der Elektrizitätsquelle elektrische Energie zugeführt wird.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, unterscheiden sich die Gleichstrommotoren in nichts von den Gleichstromdynamos zur Erzeugung von Strömen. Je nachdem man eine solche Gleichstrommaschine durch äußere Kraft oder durch einen eingeleiteten Strom dreht, erzeugt sie im ersten Fall Ströme, im zweiten Fall Arbeit. Wir können, um diese Umkehrbarkeit schärfer auszusprechen, dies auch so fassen: Eine Dynamomaschine verwandelt mechanische Energie in elektrische oder elektrische Energie in mechanische. Leitet man mechanische Energie in sie hinein, so gibt sie elektrische Energie heraus, leitet man elektrische Energie in sie hinein, so gibt sie mechanische Energie heraus.

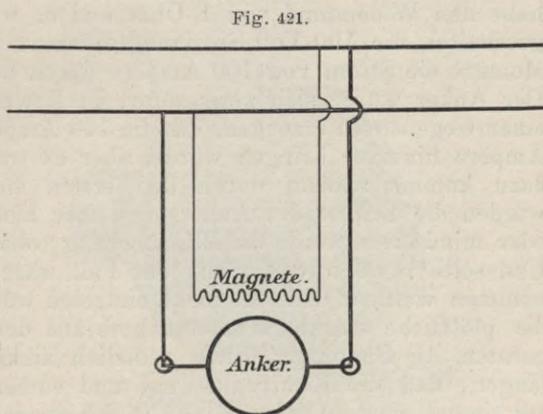
Da also in der Konstruktion kein Unterschied zwischen Dynamos (Generatoren) und Motoren für Gleichstrom besteht, so sind alle die einzelnen Typen von Gleichstromdynamos, die wir auf S. 344 bis S. 353 beschrieben haben, ebenso als Motoren wie als Generatoren zu benutzen. Wir werden im folgenden bei den Einzelmaschinen solche Gleichstrommotoren abgebildet sehen, brauchen sie also hier nicht darzustellen.

Wenn ein elektrischer Strom von den Bürsten aus in einen solchen Motor gesendet wird, so kommt der Anker in Drehung. Durch diese Drehung entsteht aber in dem Anker (dem Ring oder der Trommel) eine elektromotorische Kraft, welche für sich selbst einen Strom in entgegengesetzter Richtung nach außen senden würde, wie aus dem Lenzschen Gesetz (S. 216) sich ergibt. Die äußere elektromotorische Kraft, die den Strom in die Maschine sendet, muß also größer sein

als diese gegenwirkende elektromotorische Kraft. Die gesamte Energie, welche der Motor pro Sekunde aufnimmt, ist nun, wie immer, gleich dem Produkt aus der Stromstärke und der Klemmenspannung an seinen Enden. Diese Energie verbraucht er zum Teil in sich, nämlich für Reibung und Joulesche Wärme, also als sogenannte Leerlaufsarbeit, zum anderen Teil kann er sie an äußere Maschinerien als Arbeit abgeben. Er kann also eine Arbeit leisten, die, bis auf diese Leerlaufsarbeit, gleich dem Produkt aus seiner Klemmenspannung, seiner Stromstärke und seiner Geschwindigkeit, also seiner Tourenzahl ist. Wenn er immer dieselbe Arbeit leisten soll, so muß dieses Produkt immer gleich sein; soll er eine größere oder eine geringere Arbeit leisten, so muß dieses Produkt größer oder kleiner werden. Die Motoren werden nun entweder so benutzt, und das ist bisher der häufigste Fall, daß sie an die Leitung eines elektrischen Netzes, welches von einer Zentralsation auf gleicher Spannung erhalten wird, angeschlossen werden, oder sie werden in besonderen Kraftübertragungsanlagen benutzt. Diesen letzteren Fall werden wir im folgenden Kapitel besonders besprechen. Hier wollen wir also annehmen, daß die Elektromotoren an Leitungen angeschlossen sind, bei denen die Klemmenspannung stets konstant erhalten wird.

Die elektrischen Motoren, welche durch Gleichströme getrieben werden, können natürlich ebenfalls wie die stromerzeugenden Gleichstrommaschinen in dreifach verschiedener Schaltung ausgeführt werden, nämlich als Hauptstrommotoren, Nebenschlußmotoren und Motoren mit gemischter Schaltung. Die letzteren werden aber fast gar nicht verwendet.

Am vorteilhaftesten hat sich für Arbeitsleistungen bei konstanter Klemmenspannung der Nebenschlußmotor erwiesen. Wenn ein solcher an die beiden Leitungen angelegt wird, zwischen denen die gegebene Spannungsdifferenz herrscht, so ist, wie Fig. 421 zeigt, sowohl der Anker, als die Magnetbewicklung mit diesen Leitungen verbunden.



Daraus folgt zunächst, daß in der Magnetbewicklung immer ein Strom von derselben Stärke fließt, wie groß oder wie klein auch die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers sein möge. Also ist das Magnetfeld des Motors dauernd dasselbe. Die elektromotorische Gegenkraft, die der Motor erzeugt, ist nun abhängig, wie immer bei Induktionsströmen, von der Stärke des Magnetfeldes, der Windungszahl auf dem Anker und der Geschwindigkeit (Tourenzahl) desselben. Und

da die elektromotorische Gegenkraft stets, bis auf den Spannungsverlust im Innern des Motors, so hoch wird, wie die äußere Spannung, welche ihn treibt, so sieht man, daß der Motor immer nahezu dieselbe Tourenzahl behalten muß, ob er nun mit Belastung oder ohne dieselbe, also leer, läuft. Denn da die Spannung, die Windungszahl und das Magnetfeld ungeändert bleiben, so muß auch die Tourenzahl dieselbe bleiben. Das Resultat ist also, daß bei verschiedenen Belastungen, bei verschieden großen Arbeiten, die der Nebenschlußmotor zu leisten hat, die Tourenzahl nahe immer dieselbe bleibt und daß nur der Anker je nach der geleisteten Arbeit von verschiedenen starken Strömen durchflossen wird, von um so stärkeren, je größer die geleistete Arbeit ist. Daraus folgt zunächst, daß der Motor, bis auf die Leerlaufsarbeit, immer gerade so viel Energie von außen, von der Leitung aufnimmt als er Arbeit leistet. Bei halber Arbeit nimmt er bloß die halbe Energie auf, wenn die Leerlaufsarbeit zunächst unberücksichtigt bleibt. Die aufgenommene Arbeit aber drückt sich ja zuletzt in den Kosten der Kohlen aus, welche zu ihrer Erzeugung benutzt werden.

Damit nun der Motor recht große Kraft, namentlich beim Einschalten, also beim Anlauf, entwickle, auch wenn er belastet ist, also wenn eine Arbeitsmaschinerie an ihm hängt, ist es notwendig, sein Magnetfeld recht stark zu machen und den Widerstand des Ankers möglichst klein zu halten, damit die in ihm erzeugten Ströme recht stark werden.

Wenn aber die Elektromotoren einen sehr kleinen Ankerwiderstand haben, so treten bei dem Anschluß derselben an die Stromleitungen zunächst Übelstände auf. Nehmen wir an, ein solcher Motor habe den Widerstand von 1 Ohm und er werde zwischen zwei Leitern geschaltet, die 100 Volt Spannungsdifferenz haben, so würde im ersten Moment ein Strom von 100 Ampère durch die Drahtwindungen fließen. Der Anker würde sich zwar sofort in Bewegung setzen und dadurch einen Gegenstrom erzeugen, der die 100 Ampère bald auf 50, 20 u. s. w. Ampère hinunter bringen würde, aber es würde gewöhnlich gar nicht dazu kommen; denn durch den ersten momentanen starken Strom würden die Drähte des Ankers und ihre Isolierung beschädigt werden oder mindestens würde die Bleisicherung (oben S. 456) durchschmelzen. Und selbst, wenn das nicht der Fall wäre, wenn alle Maße so genommen werden, daß das nicht eintreten würde, so würde doch durch die plötzliche starke Stromentnahme aus dem Netz dieses in Störung geraten, die Spannung würde plötzlich sinken. Diese Umstände verlangen, daß die Elektromotoren, und namentlich die größeren, nicht auf einmal, sondern allmählich in den Stromkreis eingeschaltet werden. Dazu braucht es zunächst weiter nichts, als einen Vorschaltwiderstand, so daß der Strom erst durch einen großen Widerstand geht und dadurch schwach wird; wenn der Anker sich dann dreht und Gegenstrom erzeugt, dann wird der Widerstand allmählich verringert und schließlich kurz geschlossen, so daß der Motor allein im Stromkreis ist. Dabei werden bei größeren Motoren zuerst die Magnete eingeschaltet und dann allmählich der Anker. Die sogenannten Stufenschalter, die dieses Anlassen in Stufen besorgen, sind in einer von Siemens & Halske

herrührenden Form in Fig. 422 dargestellt. Sie haben im Innern natürlich Widerstände von passenden Größen, deren Enden in Kontaktstücke ausgehen, welche von dem einen mit dem Rade bewegten Gleitstück allmählich berührt werden.

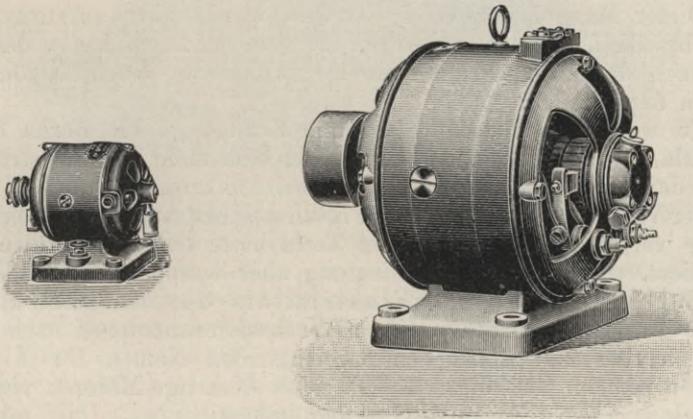
Die kleineren Motoren, von $\frac{1}{60}$ bis zu 2 Pferdekraften Leistung, werden jetzt von den großen elektrischen Gesellschaften in großen Mengen hergestellt, wodurch ihr Preis auch ein sehr geringer ist. Die äußere Form dieser Kleinmotoren ist bei allen Fabriken eine ähnliche geworden. Der drehbare Anker wird meistens durch ein Gehäuse vor Verunreinigung geschützt. Fig. 423 zeigt solche Motoren für $\frac{1}{60}$ und $\frac{1}{2}$ Pferdekraft im Verhältnis von 1:7 verkleinert.

Während so der Nebenschlußmotor bei jeder Leistung dieselbe Tourenzahl besitzt — eine Eigenschaft, die bei vielen Betrieben sehr geschätzt, ja sogar notwendig ist —, ist es natürlich andererseits auch möglich, die Tourenzahl des Motors zu ändern, und zwar dadurch, daß man eben die Stärke des Magnetfeldes ändert. Dazu braucht man bloß in die Magnetbewicklung einen Nebenschlußregulator einzuschalten. Bei gleichgehaltener äußerer Spannung muß dann der Motor um so rascher rotieren, damit er

Fig. 422.



Fig. 423.



dieselbe Gegenkraft erzeuge, je schwächer das Magnetfeld ist. Einschalten von Widerstand in die Magnetbewicklung erhöht also die Tourenzahl des Motors.

Wenn man dagegen einen Hauptstrommotor an zwei Leitungen von gegebener Spannungsdifferenz anlegt, so ist die Stärke des Magnet-

feldes nicht immer dieselbe, sondern wenn der Motor von einem stärkeren Strom durchflossen wird, ist auch das Magnetfeld stärker, und umgekehrt bei schwächerem Strom im Anker ist auch das Magnetfeld schwächer. Denn Anker und Magnetbewicklung werden dabei immer von demselben Strom durchflossen. Daraus folgt, daß ein solcher Motor nicht immer dieselbe Tourenzahl behalten kann. Hat er große Arbeit zu leisten, so ist sein Strom im Anker stark, daher auch das Magnetfeld stark und er läuft daher langsam. Hat er wenig Arbeit zu leisten, so läuft er rasch. Bei elektrischen Straßenbahnen benutzt man gewöhnlich Hauptstrommotoren. Diese gehen daher von selbst, ohne daß man irgendwie reguliert, auf Kurven und bei Steigungen langsamer als auf gerader Straße. Weiter aber folgt aus der Veränderlichkeit des Magnetfeldes, daß die Anzugskraft des Hauptstrommotors eine bedeutend größere ist, als die eines Nebenschlußmotors. Denn wenn der Hauptstrommotor mit starker Belastung plötzlich an die Spannung angelegt wird, so wird im ersten Moment der Strom im Anker und in der Magnetbewicklung sehr stark, so daß die Kraft, mit welcher der Anker sich dreht, eine sehr große ist, die auch die große Belastung leicht überwinden kann. Deshalb werden gerade bei elektrischen Trambahnen und Automobilen Gleichstrommotoren gern angewendet.

Während man so ohne Schwierigkeit mittels Gleichströmen durch Maschinen jeder Art Arbeit leisten lassen konnte, schien es lange Zeit unmöglich zu sein, dasselbe auch mit Wechselströmen zu erreichen, und es schien, daß die Wechselströme gerade dadurch wesentlich in ihrer Brauchbarkeit hinter den Gleichströmen zurückbleiben müßten, weil eben diese Arbeitsleistung unmöglich oder wenigstens nicht vorteilhaft und einfach möglich sei.

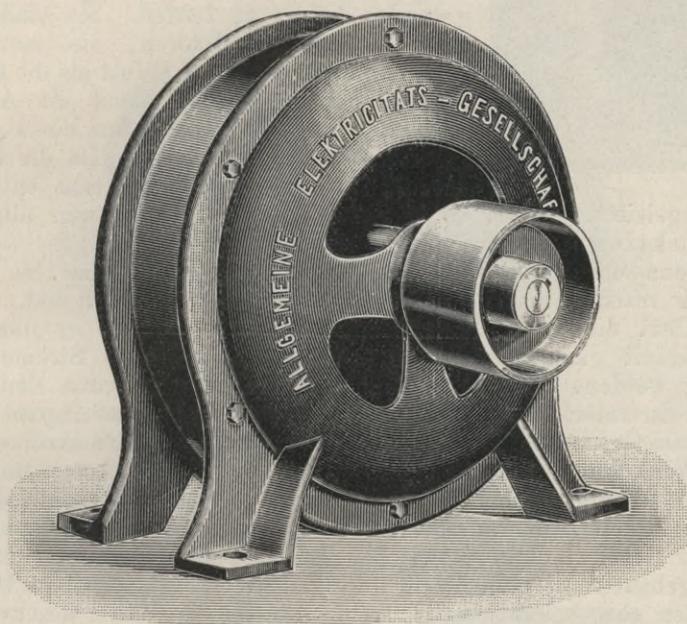
Dieser Mangel der Wechselströme wurde aber auf unerwartete Weise beseitigt, indem man lernte, zuerst durch Drehströme, dann aber auch nach demselben Prinzip durch gewöhnliche Wechselströme gute Motoren herzustellen.

Es war eine höchst bedeutsame Erfindung, als durch Ferraris und Tesla gezeigt wurde, daß man zwei oder mehr Wechselströme mit verschiedener Phase, also die Mehrphasenströme (S. 260), in sehr einfacher Weise zur Erzeugung von mechanischer Arbeit aus elektrischer Energie verwenden könne. Schon Tesla hatte einen derartigen Motor konstruiert, von allgemeiner Bedeutung aber wurde diese Methode erst, seit (1891) die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin und die Maschinenfabrik Oerlikon Wechselstrommotoren nach diesem System bauten und ihnen den bezeichnenden Namen Drehstrommotoren gaben. Seit dieser Zeit werden derartige Motoren von vielen Fabriken in verschiedener Ausführung gebaut.

Das Prinzip derselben ist folgendes: Die von einer primären Drehstrommaschine (S. 369) herkommenden drei Wechselströme verschiedener Phase werden in drei Gruppen um einen festen Eisenring geführt, so zwar, daß der erste Wechselstrom zwei diametral einander gegenüberliegende Spulensysteme durchläuft, der zweite zwei andere ebensolche, die um 60° von den ersten abstehen, der dritte zwei weitere,

die wieder um 60° von diesen abstehen. Nach dem früher (S. 259) Gesagten wird dann innerhalb des Ringes ein Magnetfeld gebildet, dessen Achse sich fortwährend verschiebt, sich innerhalb des Ringes fortwährend im Kreise herumdreht, und zwar mit derselben Periode, welche die Wechselströme haben, es entsteht ein sogenanntes magnetisches Drehfeld. Im Innern des festen Ringes befindet sich nun ein eiserner Anker, der Drahtwindungen trägt, die einfach in sich geschlossen sind. Dieser Anker kann als Ringanker oder als Trommelanker gewickelt sein. In den Drahtwindungen entstehen nun durch die Induktion von den vorbeilaufenden Polen Induktionsströme und durch

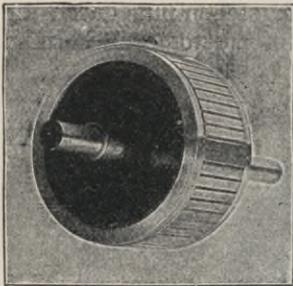
Fig. 424.



die Wechselwirkung zwischen den Polen und den Strömen fängt der Anker an, sich zu drehen. Der Anker würde auch rotieren, wenn er keine Drahtwindungen besäße, wegen der Anziehung zwischen den Polen und den Foucaultschen Strömen. Man zieht aber vor, den Anker mit Drahtwindungen zu versehen (es können auch Kupferstäbe direkt in das Eisen hineingelegt werden), um den Induktionsströmen, die im Kupfer natürlich viel stärker sind als im Eisen, vorgeschriebene und zwar die günstigsten Bahnen zu geben. Von solchen Drehstrommotoren zeigt Fig. 424 eine Abbildung, einen Motor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin. Man sieht das Eisengehäuse, an welchem innen die Wickelungen für den zugeführten Drehstrom angebracht sind. In Fig. 425 sieht man den Anker besonders abgebildet, eine Reihe von Kupferstäben auf einem Zylinder, durch zwei Metallringe verbunden. Einen solchen Anker bezeichnet man als

Kurzschlußanker. Zuvörderst erkennt man eine Besonderheit bei diesen Motoren. Der bewegliche Teil, der Anker mit seinen Windungen, braucht gar keinen Kollektor, keine Schleifringe, keine Bürsten, wie bei den Gleichstrommotoren, sondern die Ströme im beweglichen Teil werden direkt von denen im festen Teil induziert. Das ist zunächst ein großer Vorzug in Bezug auf die Haltbarkeit der Motoren. Denn

Fig. 425.



der Kollektor mit den Bürsten ist der empfindlichste Teil bei allen Gleichstrommotoren. Bei diesen Drehstrommotoren wird also die Achse des Ankers in gewöhnlicher Weise mit den Arbeitsmaschinen verbunden und durch dessen Rotation sind sie imstande, Arbeit zu leisten. Sie sind daher die einfachsten Motoren, die man sich denken kann, einfacher selbst als die Gleichstrommotoren, so daß damit die Arbeitsleistung durch Wechselströme einen großen Fortschritt gewonnen hat. Da die Ströme im Anker nur durch Induktion entstehen,

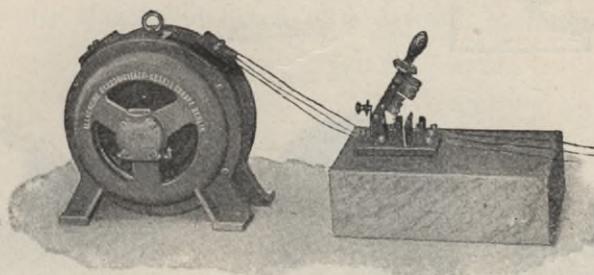
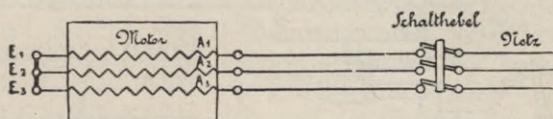
nicht zugeleitet werden, so bezeichnet man diese Motoren allgemein als Induktionsmotoren.

Wenn der Anker keine äußere Arbeit zu leisten hat, so rotiert er immer rascher, bis er nahezu dieselbe Geschwindigkeit hat, wie die Pole selbst, die im festen Ring herumlaufen. Würde er diese Geschwindigkeit ganz erreichen, so würden aber keine Ströme mehr induziert werden, weil keine relative Bewegung zwischen den Polen und den Stromleitern existieren würde. Sowie aber aus irgend einem Grunde die Geschwindigkeit des Ankers nachläßt, werden Ströme induziert. Wird nun der Motor belastet, d. h. wird seine Achse mit einer Maschine verbunden, bei der er Arbeit zu leisten hat, so wird seine Geschwindigkeit kleiner und nun leistet er die Arbeit. Diese Änderung der Geschwindigkeit zwischen Leerlauf und Belastung ist aber bei gut gebauten Maschinen sehr gering. Sie beträgt höchstens 10 Proz. Es werden eben schon bei geringem Unterschied in den Geschwindigkeiten starke Kräfte zwischen den Polen und den Strömen erzeugt. Dieser geringe Unterschied zwischen der Geschwindigkeit beim Leerlauf und bei voller Belastung bewirkt natürlich, daß ein Drehstrommotor immer nahezu dieselbe Geschwindigkeit hat, wie die Pole, die im festen Ring herumlaufen, also wie die Drehstrommaschine, die die Ströme erst erzeugt. Aber eben nur nahezu. Der Motor kann prinzipiell an Geschwindigkeit hinter dieser beliebig zurückbleiben; es braucht keine Gleichzeitigkeit, kein Synchronismus zwischen der Bewegung der Dynamomaschine und der des Motors zu herrschen, er ist also ein *asynchroner* Motor. Daß er nur wenig zurückbleibt, liegt eben daran, daß er dann schon die genügende Arbeit leistet.

Ein solcher Motor wird, wie Fig. 426 zeigt, direkt an die drei Leitungen angelegt, die von der Drehstromdynamomaschine kommen, und unter Zwischenschaltung eines Schalthebels, um den Strom ein- und ausschalten zu können.

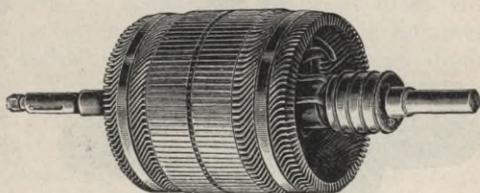
Beim Anlaufen, wenn der Motor noch stillsteht, wird eine sehr große Stromstärke verbraucht, teils deswegen, weil der Widerstand und die Selbstinduktion der festen Wickelung klein sind, teils deswegen, weil der Strom sofort in den Ankerwickelungen die starken Induktionsströme erzeugt. Um diese starke Stromentnahme beim Anlaufen zu vermindern und doch die Zugkraft des Motors nicht zu stören, kann

Fig. 426.



man nicht, wie bei Gleichströmen, in den zugeführten Strom Widerstand vorschalten, weil sonst die Zugkraft des Motors aufgehoben würde. Vielmehr schaltet man dann in die Ankerwicklung Widerstand und zwar induktionsfreien Widerstand (S. 251) ein. Um das aber tun zu können, muß man die Ankerwicklung doch wieder zu Schleifringen auf der Achse führen, an welchen man Bürsten schleifen läßt. Aus diesem Grunde werden größere Drehstrommotoren häufig nicht mit Kurzschlußanker, sondern mit einem Anker mit drei Schleifringen an der Achse und einem Anlaufwiderstand für den Anker ausgeführt. Fig. 427 zeigt einen solchen Anker mit Schleifringen.

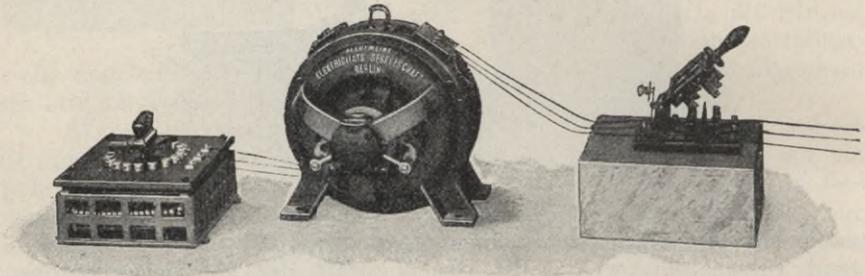
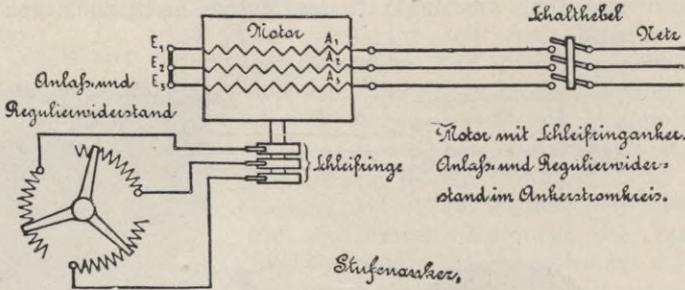
Fig. 427.



In Fig. 428 ist die Verbindung eines solchen Motors mit dem Netz dargestellt. Von dem Netz wird der Strom wie vorher durch einen Schalthebel in die feste Wickelung des Motors eingeführt. Der Anker aber, dessen Drähte in drei Teile zusammengefaßt sind, trägt die drei Schleifringe und diese sind mit dem dreiteiligen Rheostaten links verbunden, auf welchem ein dreiteiliger Hebel, wenn er sich im Sinne des Uhrzeigers bewegt, allmählich den großen, zunächst eingeschalteten Widerstand ausschaltet, bis zuletzt der Anker kurz geschlossen ist.

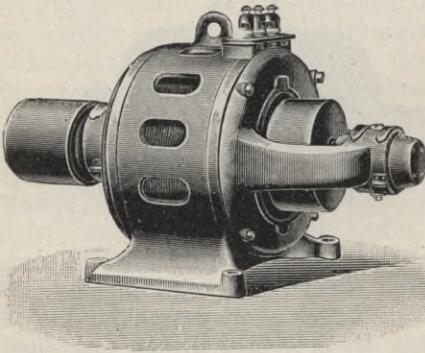
Das Anlassen von Drehstrommotoren kann man aber noch auf andere Weise erreichen, die von Siemens & Halske benutzt wird. Man kann nämlich die einzelnen Drähte des Ankers, die ja induziert werden,

Fig. 428.



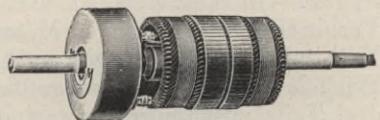
gegeneinander schalten, so daß der gesamte Strom in dem Anker gering ist, wodurch dasselbe erreicht wird, wie durch Einführung von Widerstand in den Anker. Ein solcher Motor läuft mit Kraft an. Sobald er eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat, werden selbsttätig die Ankerwindungen wieder normal geschaltet. Fig. 429 zeigt einen solchen Drehstrommotor mit Gegen-

Fig. 429.



schaltung, Fig. 430 den Anker allein, bei welchem die normale Schaltung selbsttätig bei erlangter großer Geschwindigkeit vor sich geht. Selbstverständlich kann man ebenso wie mit drei Dreiphasen-

Fig. 430.

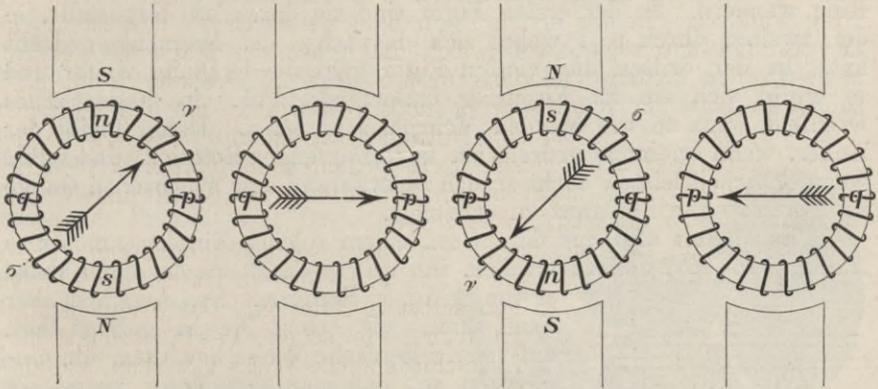


schaltung, Fig. 430 den Anker allein, bei welchem die normale Schaltung selbsttätig bei erlangter großer Geschwindigkeit vor sich geht. Selbstverständlich kann man ebenso wie mit drei Dreiphasen-

strömen, so auch mit zwei Zweiphasenströmen Induktionsmotoren betreiben.

Die Erfindung und praktische Durchbildung der Drehstrommotoren gab nun aber auch das Mittel an die Hand, wie man auch für gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom wirklich brauchbare Motoren konstruieren könne. Erst Anfang 1893 traten zu gleicher Zeit die Maschinenfabrik Oerlikon und C. L. Brown mit diesen Konstruktionen an die Öffentlichkeit. Diese Einphasenmotoren wirken zuerst überraschend, sind aber bei näherer Betrachtung leicht erklärlich. Auch bei ihnen wird, wie bei den Drehstrommotoren, der Wechselstrom nur um einen feststehenden Ring geleitet, während der bewegliche Anker bloß Drahtwindungen oder Stäbe enthält, die in sich kurz geschlossen sind. Insofern unterscheiden sich also die Einphasenmotoren gar nicht von den Drehstrommotoren, bloß daß sie eben, wie es scheint, kein sich drehendes Magnetfeld haben. Da das nun aber gerade der Witz

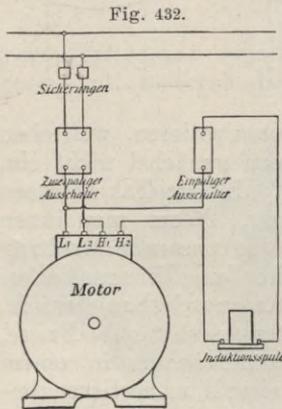
Fig. 431.



bei den Drehstrommotoren ist, da sie nur deswegen rotieren, weil eben bei ihnen ein Drehfeld erzeugt ist, so sieht man zunächst nicht ein, wieso solche Einphasenmotoren rotieren sollen. In der Tat kommen auch solche Motoren nicht von selbst in Drehung. Wenn man ihnen aber auf irgend eine künstliche Weise zuerst eine passende Drehung gegeben hat, so rotieren sie von selbst weiter und können dabei Arbeit leisten. Wie man ihnen zunächst die Anfangsdrehung erteilt, werden wir bald besprechen. Zunächst aber interessiert uns die Frage, ob und aus welchem Grunde ein solcher Kurzschlußanker in einem einfachen Wechselfeld weiter rotiert, wenn er einmal zu rotieren begonnen hat. Der Grund dafür ist derselbe wie für die Tatsache, daß in einem Grammeschen Ring die Indifferenzstellen, wo die Bürsten aufliegen, in der Drehrichtung verschoben sind (S. 327). Wenn ein Grammescher Eisenring mit Drahtumwicklung sich zwischen zwei Polen S und N befindet, wie in Fig. 431, und in der Richtung nach rechts gedreht wird, so wissen wir, daß durch die entstehenden Ströme nach der Ampèreschen Regel in dem Eisenring magnetische Pole ent-

stehen würden bei p und q , während durch die direkte Wirkung der induzierenden Magnete die Pole n und s entstehen. Das Resultat dieser beiden Wirkungen ist, daß sich die Pole bei ν und σ bilden, daß also die magnetische Achse die Richtung des Pfeiles $\sigma\nu$ hat. Wenn nun die beiden Feldmagnetpole N und S nicht von einem Gleichstrom gespeist werden, sondern von einem Wechselstrom, so wird der Südmagnetismus des oberen Pols von seinem größten Wert an allmählich abnehmen, er wird Null werden und wird dann in Nordmagnetismus übergehen, und umgekehrt wird es im unteren Pole sein. Entsprechend wird der Magnetismus des Ringes, der durch die Pole n und s gekennzeichnet ist, abnehmen, durch Null hindurchgehen und sich umkehren, aber immer in der Richtung ns oder sn wirken. Dagegen der durch die Bewegung des Ankers, der Ankerwindungen erregte Magnetismus wird immer die Richtung pq behalten und den größten Wert bekommen, wenn S und N sich gerade umkehren. In diesem Falle ist ja die Induktion immer am stärksten. Wir erhalten daher durch die Zusammensetzung dieser beiden Kräfte in dem Ring Pole, welche im Ring wandern. In der ersten Figur sind sie durch $\sigma\nu$ dargestellt, in der zweiten durch pq , wobei sich die Achse des Magneten gedreht hat. In der dritten und vierten Figur geht die Drehung weiter und so ergibt sich ein im Eisenring umlaufender Pol, ein magnetisches Drehfeld, ganz so wie bei den Mehrphasenströmen. Daher bleibt der Anker, wenn er einmal gedreht ist, in fortlaufender Rotation, und selbst wenn er Arbeit leistet, sucht er sich fortwährend dem synchronen Gange zu nähern, ohne ihn ganz zu erreichen.

Es kommt also nur darauf an, einem solchen Einphasenmotor zu Anfang eine Rotation zu erteilen, ihn angehen zu lassen, dann bleibt er von selbst in Rotation. Das Angehen aber kann man, wie schon Tesla gezeigt hat, auf verschiedenfache Weise bewirken, am einfachsten so, daß man den Motor zuerst als Mehrphasenmotor benutzt. Zu dem Zweck versieht man den feststehenden Teil des Motors außer mit der Hauptwicklung noch mit einer Hilfswicklung. An diese Hilfswicklung wird außen eine Induktionsspule von großem Selbstpotential angeschaltet, so daß beim Einschalten des Motors in die Leitung diese beiden Wicklungen Wechselströme führen, die verschiedene Phasen besitzen. Dadurch kommt nun der Anker, wie bei jedem Zweiphasenmotor, in Rotation. Hat er eine genügende Rotation erreicht, so schaltet man die Hilfss



pule durch einen einfachen Ausschalter aus und hat dann den Einphasenmotor. Ein Schema für diese Anordnung ist in Fig. 432 gegeben. Von den beiden Hauptleitungen für den Wechselstrom, die oben in der Figur gezeichnet sind, zweigen sich zwei Drähte zu dem Motor ab, die durch die Sicherungen und den Ausschalter zu den Enden L_1 und L_2 der Hauptwicklung des Motors führen. Parallel zu dem

Strom in dieser Hauptwicklung zweigt sich der Strom ab, der durch einen Ausschalter und die Induktionsspule in die Enden der Hilfswicklung H_1 und H_2 geht. Sobald der Motor läuft, öffnet man den Ausschalter in dem Hilfskreis und der Motor läuft nun von selbst weiter.

Seit der Erfindung des asynchronen Wechselstrommotors sind nun auch diejenigen Anlagen, bei denen reiner Wechselstrom verwendet wird, im Stande, sowohl Licht wie auch Arbeit durch Elektrizität zu erzeugen, wenn auch der Einphasenmotor nur ein Nothelf ist.

Von allen Motoren aber hat sich der Drehstrommotor bei weitem als der brauchbarste für die meisten Zwecke erwiesen. Er ist nicht bloß vorteilhafter als der Einphasenmotor, sondern er ist auch in vieler Beziehung dem Gleichstrommotor überlegen, überlegen an Kleinheit, Billigkeit, bequemer Gebrauchsfähigkeit ohne Wartung, größerer Anschmiegsamkeit an die Bedürfnisse der Praxis. Der Drehstrommotor läßt sich geradezu als ein idealer Motor bezeichnen.

Die Anwendbarkeit aller elektrischen Motoren, sowohl der Gleichstrommotoren, wie auch der für Drehstrom und Wechselstrom, ist nun natürlich eine sehr ausgedehnte. Sie sind überall da zu benutzen, wo eine Elektrizitätsquelle mit konstanter Spannung zur Verfügung steht, also insbesondere da, wo die Elektrizität aus Zentralstationen in die Häuser und Werkstätten geleitet wird.

Die Elektromotoren, namentlich die kleineren, haben im allgemeinen ziemlich große Umdrehungsgeschwindigkeiten. Um nun den Elektromotor mit den Arbeitsmaschinen zu verbinden, hat man vielfache bekannte Mittel. Brauchen die Arbeitsmaschinen selbst große Geschwindigkeiten, so ist es am einfachsten, den Motor direkt auf die Achse der Arbeitsmaschine zu setzen und diese dadurch zu treiben. So werden elektrische Ventilatoren bequem so konstruiert, daß die

Fig. 433.

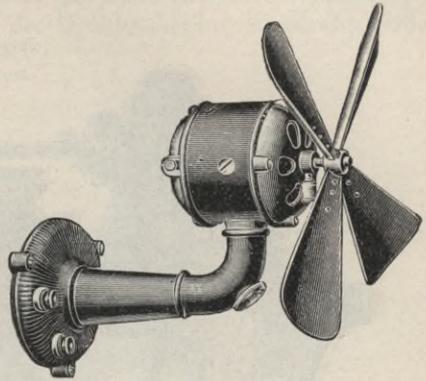
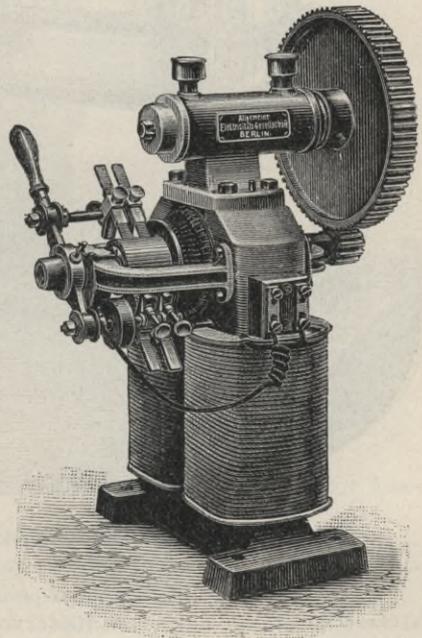
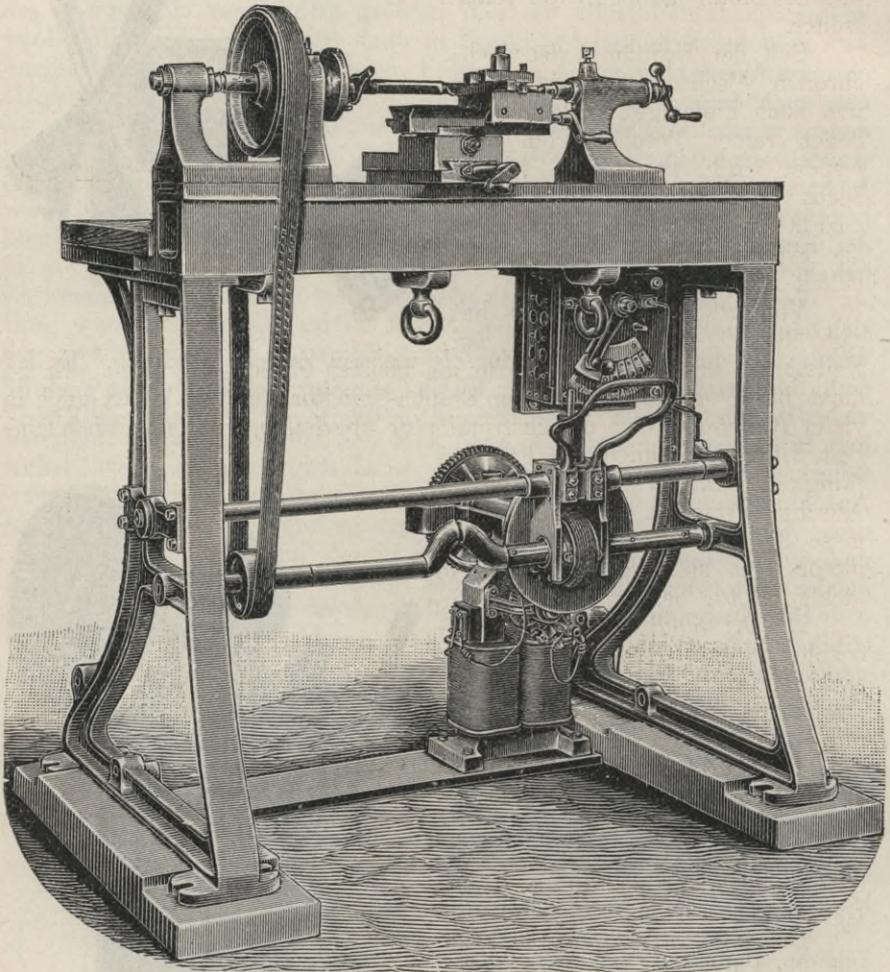


Fig. 434.



Ventilatorflügel direkt auf die Achse des Motors aufgesetzt werden. Fig. 433 zeigt einen Konsolventilator mit Drehstrommotor von Siemens & Halske. Mit 60 Watt, d. i. kaum $\frac{1}{10}$ Pferdekraft, lassen sich schon Ventilatoren betreiben, die pro Stunde bis 1800 cbm Luft befördern.

Fig. 435.



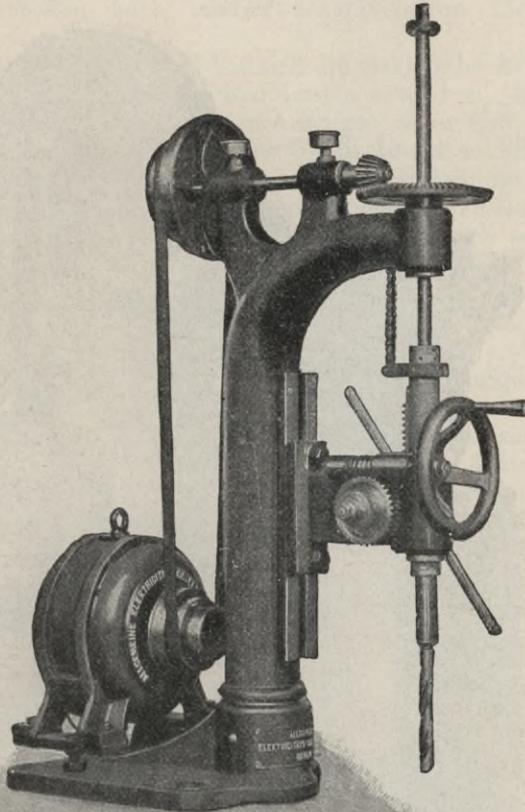
Ebenso wird bei Zentrifugen der Elektromotor am bequemsten direkt auf die Achse derselben gesetzt.

In manchen Fällen wird die Bewegung von dem Motor auf die Arbeitsmaschine durch ein Rädervorgelege bewirkt. Eine bequeme Einrichtung dazu, bei der das Rädervorgelege gleich fest mit dem Motor verbunden ist, zeigt Fig. 434.

In dieser Weise ist z. B. der Antrieb eingerichtet, mit welchem der Motor in Fig. 435 die Drehbank treibt. Es ist das eine elektrisch

betriebene Drehbank der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Der Motor sitzt unten am Fußgestell der Drehbank. Die Drehung des Ankers wird durch eine Zahnradübersetzung auf die unten sichtbare Welle übertragen, von der aus mittels Riemen die Drehbankspindel gedreht wird.

Fig. 436.



Der rechts oben sichtbare Widerstand dient zum Einschalten und Ausschalten des Motors.

In den meisten Fällen aber geschieht die Verbindung des Elektromotors mit der Arbeitsmaschine durch Riemen oder Schnüre. So zeigt Fig. 436 die Anbringung eines Drehstrommotors an einer Schnellbohrmaschine.

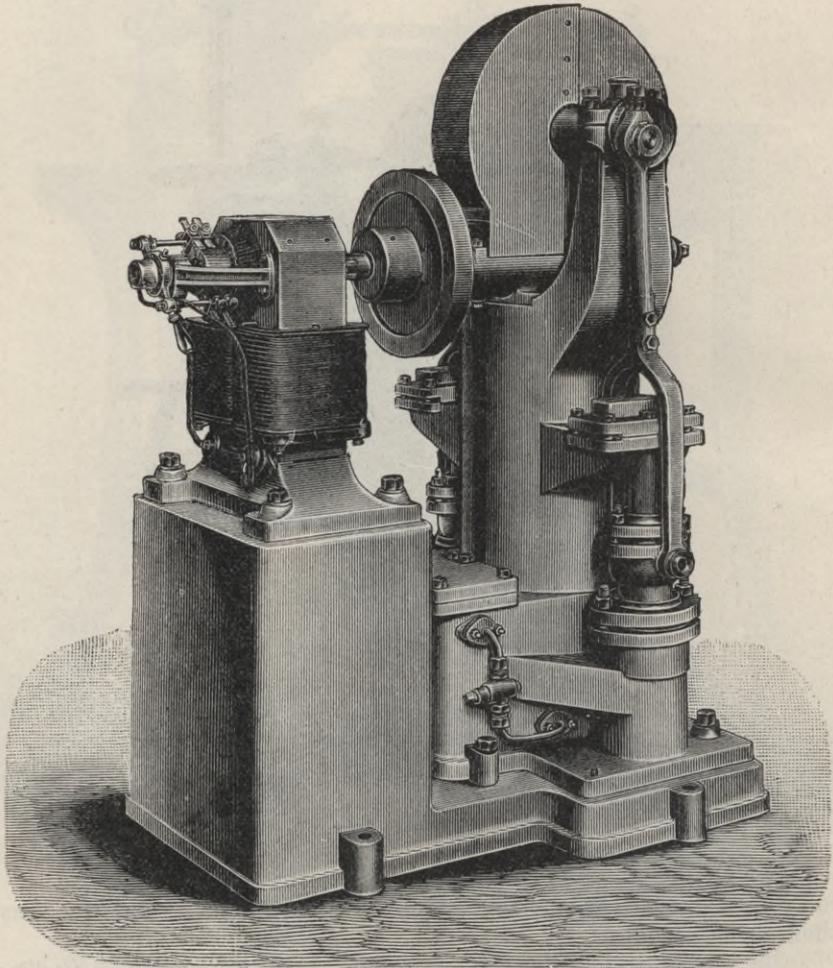
Bei elektrisch betriebenen Wasserpumpen, von denen Fig. 437 eine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft zeigt, wird die Bewegung des Elektromotors durch ein Schneckengetriebe oder durch Stirnräder auf die Pumpe übertragen.

Ferner sind bei Drehbohrmaschinen biegsame Wellen, wie sie

bei den Zahnärzten im Gebrauch sind, besonders vorteilhaft, und es läßt sich dadurch für Drehbohrer und Stoßbohrer der elektrische Betrieb mit großer Leichtigkeit einrichten.

Sehr vorteilhaft sind die Elektromotoren in großen Fabriken, bei denen sie die großen, umständlichen und viel Arbeit konsumierenden

Fig. 437.



Haupttransmissionen beseitigen. Statt von der Dampfmaschine die Bewegung durch Riemen auf große Wellen mit gemeinschaftlichem Antrieb zu übertragen und von diesen wieder auf zweite, ja sogar auf dritte Wellen, bringt man vorteilhaft an jeder Arbeitsmaschine oder an einer nahestehenden Gruppe von Arbeitsmaschinen einen Elektromotor an, zu dem die Kraft durch bequem zu führende Drähte geleitet wird, statt durch die unbequemen und kraftverzehrenden Riementransmissionen.

Eine wesentliche Bedeutung hat die elektrische Arbeitsleistung in Bergwerken wegen ihrer großen Gefahrlosigkeit und wegen der Leichtigkeit, mit der die Leitung zu den Motoren geführt werden kann, gewonnen. Die Elektromotoren werden dort zum Betrieb von Pumpen, Ventilatoren und Bohrmaschinen gebraucht.

Ebenso werden auf Kriegs- und Handelsschiffen eine Reihe mechanischer Arbeiten leicht und zweckmäßig von Elektromotoren geleistet.

Ein sehr ausgedehntes Feld hat sich die elektrische Arbeitsleistung bei den Aufzügen für Personen und Lasten erworben. Es stellt sich nämlich der Betrieb eines elektrischen Aufzuges, wenn eine Stromzufuhr in dem Hause vorhanden ist, ungefähr 5- bis 10mal so billig, wie der Betrieb mittels Gasmaschinen oder mittels Wasserleitungswasser, und zwar aus dem Grund, weil der Elektromotor eben nur zu laufen braucht, wenn der Aufzug in Betrieb gesetzt ist, und weil sich sein Energieverbrauch durchaus nach der gerade beförderten Last richtet. Die elektrischen Aufzüge werden jetzt derart konstruiert, daß der Elektromotor im Keller oder auf dem Boden neben dem Schacht für den Aufzug steht. Der Aufzug selbst hängt an Seilen, und durch den Elektromotor werden diese Seile auf eine Trommel aufgewickelt oder von ihr abgewickelt, wobei der Aufzug sich hebt oder senkt. Es müssen natürlich dabei Vorrichtungen angebracht sein, daß man von dem Fahrstuhl selbst aus den Motor in Betrieb setzen kann und zwar ihn nach der einen oder anderen Richtung in Bewegung bringen kann. Auch für die Bewegung von Laufkränen in Fabriken und von Schiffskranen ist der Antrieb durch Elektromotoren jetzt bereits vielfach im Gebrauch.

Die Vorzüge der Elektromotoren bestehen in der sofortigen Betriebsbereitschaft, in der Gefahrlosigkeit, in dem kleinen Raum, welchen sie einnehmen, und der Billigkeit der Anlage, verglichen mit den Anlagekosten für kleine Gasmaschinen oder Dampfmaschinen und endlich darin, daß sich ihr Verbrauch direkt nach der Leistung richtet. Denn da die Klemmenspannung konstant bleibt, so ist der Effekt allein abhängig von der Stromstärke, die nach der Leistung größer oder kleiner wird. Die verbrauchte Stromstärke, die mit einem Elektrizitätszähler (s. Kap. 9) gemessen und nach irgend einem Satz berechnet wird, bedingt die Kosten des Betriebes.

Die große Bedeutung der elektrischen Arbeitsleistung besteht darin, daß es durch sie möglich wird, kleine Motoren, kleine Kräfte unter $\frac{1}{2}$ Pferdestärke, bequem aufzustellen und zu betreiben. Diese Maschinenbetriebskraft in kleinem Umfange ist es gerade, welche dem Kleingewerbe früher fehlte. Aus Mangel an Maschinenbetrieb kam es in Nachteil gegenüber dem Großgewerbe. Durch Einführung von elektrischen Strömen, die in Zentralstationen erzeugt und überallhin geleitet werden, werden nun aber dem Kleingewerbe Motoren schon von $\frac{1}{16}$ Pferdekraft geliefert, welche ihre Arbeit zu billigem Preise leisten und deren Verbrauch an Elektrizität in demselben Verhältnis steht, wie die geleistete Arbeit.

Die elektrische Kraftverteilung ist also nationalökonomisch und sozialpolitisch von hervorragender Wichtigkeit. Die Elektrizität

selbst wird dabei in großen Zentralstationen, sei es durch Maschinenkraft, sei es durch Wasserkraft erzeugt, und durch ihre Vermittelung wird die Kraft auf viele Stellen verteilt. Technisch ist es dabei notwendig, diese Verteilung so zu bewerkstelligen, daß ein Motor den andern nicht stört, daß z. B. der eine Motor außer Tätigkeit gesetzt werden kann, ohne daß die anderen Motoren in ihrem Gange beeinflusst würden und dadurch unzweckmäßig arbeiten. Diese Aufgabe ist ganz analog derjenigen, welche beim Betrieb von Glühlampen in einem ganzen Stadtteil sich ergab. Auch dort kam es darauf an, jede Glühlampe unabhängig von den anderen zu machen, es durften 100, 1000 Lampen zu gleicher Zeit ausgelöscht werden, ohne daß die anderen dadurch gestört wurden. Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die Glühlampen alle nebeneinander geschaltet werden und daß die Dynamomaschinen, welche den ganzen Strom erzeugen, so reguliert werden, daß in den Leitungen, zwischen welchen die Glühlampen eingeschaltet sind, stets dieselbe Spannung herrscht. Genau so ist die Lösung, die für die elektrische Arbeitsleistung allgemein gebraucht wird.

Auch bei der Arbeitsverteilung werden alle Elektromotoren, die also an den verschiedenen Stellen Arbeit zu leisten haben, nebeneinander (parallel) in den Stromkreis eingeschaltet, der von der Zentralstation kommt.

Die Größe der Arbeit, welche jeder Elektromotor pro Sekunde leisten kann, ist gleich dem Produkt aus seiner Klemmenspannung und der Stromstärke, welche in ihm herrscht. Die Stromstärke in jedem parallel geschalteten Elektromotor hängt, wenn seine Klemmenspannung dieselbe bleibt, nur ab von der Arbeit, die der Motor leistet. Wenn man also bewirken kann, daß die Klemmenspannung an den Enden jedes Elektromotors dieselbe bleibt, welches auch die Vorgänge sonst in dem Stromkreis sind, so wird jeder Motor ganz unabhängig von den Vorgängen in den anderen Maschinen sein. Dies ist also das Einzige, was verlangt wird: Es muß an den Enden jedes Elektromotors stets dieselbe Klemmenspannung herrschen. Und dies wird erreicht, indem man die Elektromotoren alle parallel zwischen Leitungen von konstant gehaltenem Spannungsunterschied einschaltet.

Der Gebrauch der Elektromotoren hat sich in den letzten Jahren rapid ausgedehnt. In allen Städten, in welchen durch elektrische Zentralstationen eine bequeme Zuleitung des elektrischen Stromes vorhanden ist, wird für den Betrieb von Elektromotoren jetzt schon ebensoviel und mehr an Strom verbraucht, als für die Erzeugung von Licht, und überall zeigt sich der leichte, gefahrlose, bequeme und auch billige Betrieb der Elektromotoren von größtem Vorteil. In diesem Sinne trägt also die Elektrizität das Ihrige mit dazu bei, um die jetzt im Vordergrund des Interesses stehende soziale Frage der Lösung dadurch näher zu bringen, daß sie den Kleinen dieselben Vorteile in der Arbeitsleistung zuwendet, welche die Großen schon lange haben.

8. Kapitel.

Die elektrische Kraftübertragung.

Die große Leichtigkeit, mit der elektrische Ströme auf Drähten über weite Strecken hinweggeführt werden können und die man anfangs nur in der Telegraphie verwertete, um Signale und Zeichen in die Ferne zu schicken, diese Eigenschaft der Elektrizität wird seit der Erfindung der Dynamomaschine, seitdem sich die sogenannte Starkstromtechnik entwickelt, zu einer der größten und folgenreichsten Aufgaben benutzt, nämlich dazu, Kräfte, sei es die von der Natur direkt gebotenen oder die von uns künstlich hergestellten, ihre Wirksamkeit an weit entfernten Stellen ausüben zu lassen, zu der Übertragung der Kraft.

Im Grunde genommen haben wir es bei allen Leistungen der Elektrizität mit einer Übertragung der Kraft zu tun. Wenn wir z. B. im Keller eines Hauses eine Gasmaschine aufstellen, durch diese eine Dynamomaschine treiben und mit deren Strömen in den einzelnen Stockwerken Glühlampen speisen, oder Bogenlampen brennen lassen, oder Elektromotoren treiben, so haben wir schon die Kraft der Gasmaschine oder, besser gesagt, die Arbeit, die die Gasmaschine leistet, in die verschiedenen Stockwerke übertragen und sie teils zur Beleuchtung, teils wieder zur Leistung von Arbeit (durch die Elektromotoren) verwendet. Man spricht aber in diesem Fall nicht von Kraftübertragung, weil die Entfernung zwischen der Stelle, wo die Kraft vorhanden ist, und denjenigen Stellen, wo sie nützliche Arbeit leistet, eine geringe ist, die man eventuell auch durch andere Transmissionsmittel überwinden konnte, sondern man spricht von eigentlicher Kraftübertragung erst dann, wenn die Entfernungen so groß sind, daß man außer durch Elektrizität nur durch komplizierte Mittel, wie Druckluft oder Drahtseile, die Kraft überhaupt verwenden könnte. Prinzipiell ist aber natürlich ein Unterschied zwischen der Kraftübertragung auf geringe und auf große Entfernungen nicht vorhanden.

Bei der elektrischen Kraftübertragung werden also zuerst durch Aufwendung von Arbeit, z. B. von einer Dampfmaschine oder einer Wasserkraft, elektrische Ströme in einer Dynamomaschine erzeugt; diese werden durch Drahtleitungen beliebig weit fortgeführt und in eine zweite Dynamomaschine, den Elektromotor, eingeführt und dessen Anker wird dann durch sie in Drehung versetzt. Durch diese Drehung kann man dann die zweite Maschine Arbeit leisten lassen, indem man ihre Bewegung in gewöhnlicher Weise durch Riemen oder Zahnräder auf irgend eine Arbeitsmaschine überträgt, wie wir das im vorigen Kapitel

besprochen haben. Da die beiden Dynamomaschinen, die stromgebende und die arbeitsleistende, beliebig weit auseinanderstehen können, so kann man also die Ströme da erzeugen, wo die Betriebskraft billig ist, und kann auf elektrischem Wege Arbeit dort leisten, wo die Betriebskraft teuer ist. Ferner kann man die elektrischen Ströme ja beliebig verzweigen, man kann also auch von einer Kraftmaschine aus mittels Elektrizität die Kraft auf beliebig viele Punkte verteilen, was bei direkter Benutzung der Kraftmaschine nur in speziellen Fällen möglich ist.

Im letzteren Falle hat man also eine Übertragung und Verteilung von Arbeit.

Die elektrische Arbeitsübertragung, wie sie eben skizziert wurde, erfordert mithin notwendig eine Reihe von Maschinen. Erstens nämlich die Kraftmaschine, den Motor. Hauptsächlich wird als solcher eine Turbine genommen werden, da es sich meistens um die Verwertung von Wasserkräften handelt, es kann aber auch eine Dampfmaschine oder eine Gasmaschine oder ein durch Wind getriebenes Rad die ursprüngliche Kraftmaschine sein. Von dieser Kraftmaschine wird die Bewegung auf eine Dynamomaschine übertragen, in welcher die mechanische Arbeit in elektrische Ströme umgewandelt wird. Diese Dynamomaschine nennt man die primäre Maschine. Von ihr aus werden dann die elektrischen Ströme durch Drähte fortgeleitet bis zu einer zweiten Dynamomaschine, der sekundären Maschine, deren Anker durch diese elektrischen Ströme in Drehung kommt und Arbeit leisten kann. Man braucht also in dieser Anordnung einen Motor, eine primäre und eine sekundäre Dynamomaschine und eine Drahtleitung zu jeder elektrischen Kraftübertragung.

Die hauptsächlichste Anwendbarkeit dieser direkten elektrischen Kraftübertragung besteht, wie gesagt, darin, daß eine Kraftquelle dadurch an einer Stelle Arbeit leisten kann, von der sie weit entfernt ist. Es dient also diese elektrische Übertragung der Arbeit hauptsächlich dazu, um Wasserkräfte an entfernten Stellen Arbeit verrichten zu lassen. Die Energie, welche von Wasserfällen und überhaupt von fließendem Wasser zum Treiben von Maschinen benutzt werden kann, wird ja von der Natur in unerschöpflicher Fülle direkt geboten, und die Benutzung derselben erfordert oft keine viel größeren Kosten als die der ersten Einrichtung. Wenn also auch bei der elektrischen Kraftübertragung auf einigermaßen weite Entfernungen 25 Proz. der Arbeit verloren gehen sollten, so kann es doch in vielen Fällen von großem Vorteil sein, diese direkt dargebotenen natürlichen Kräfte zur Arbeitsleistung zu verwenden, die man sonst ganz unbenutzt lassen muß. In der Tat macht die Ausnutzung der Wasserkräfte auf elektrischem Wege seit einigen Jahren sehr bedeutende Fortschritte. Die Schweiz ist darin mit gutem Beispiel vorgegangen, aber auch in Deutschland haben die Industriellen allmählich die große Bedeutung dieser Kraftübertragung einsehen gelernt.

Ein anderes Gebiet der Anwendung der elektrischen Kraftübertragung, das aber erst anfängt, angebaut zu werden, ist folgendes. Alle unsere Arbeitsmaschinen werden ja hauptsächlich vermittelt Dampfmaschinen durch Verbrennung von Kohlen getrieben, und es müssen

die Kohlen aus den Bergwerken an die betreffenden Stellen geschafft werden, wo sie verwendet werden sollen. Falls die Kosten dieses Transportes größer sind als der Verlust, den man an Energie (und an Zinsen der Einrichtungskosten) durch die elektrische Kraftübertragung erleidet, so empfiehlt es sich offenbar mehr, die Kohlen, anstatt sie zu transportieren, an den Bergwerken selbst in großen Dampfmaschinen zu verbrennen und die Kraft auf elektrischem Wege dorthin zu leiten, wo man sie braucht.

Ferner ist es in vielen Fällen auch vorteilhaft, auf elektrischem Wege Kraft zu übertragen, wenn es gilt, eine Reihe von weit auseinander liegenden kleinen Maschinen zu betreiben. Erfahrungsgemäß stellt sich der Verbrauch an Kohlen für kleine Dampfmaschinen von wenigen Pferdekraften relativ ziemlich doppelt und dreifach so hoch, als für große Dampfmaschinen schon von 50 bis 100 Pferdekraften. Wenn man also statt einer Reihe von kleinen Dampfmaschinen eine große aufstellt und ihre Arbeit auf elektrischem Wege an verschiedene Orte verteilt, so kann man an Unterhaltungs- und Einrichtungskosten sparen. Dies sind einige Fälle, in denen die elektrische Kraftübertragung mit Vorteil eintritt.

Es fragt sich jedoch zuerst, welches speziell die Vorgänge bei der elektrischen Kraftübertragung sind, und auf welche Ausbeute man dabei rechnen kann.

Wenn die primäre Maschine von einem Motor getrieben wird und in dem ganzen äußeren Stromkreis sich keine andere Maschine befindet, so hängt die Stromstärke im ganzen Kreise nur ab von der elektromotorischen Kraft der Maschine und dem gesamten Widerstande, sowohl dem inneren der Maschine, als dem äußeren des Stromkreises, und zwar nach dem Ohmschen Gesetz.

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft der Maschine}}{\text{Gesamtwiderstand}}$$

Bei bestimmter Tourenzahl und bestimmtem Widerstand hat die Maschine eine bestimmte elektromotorische Kraft und es herrscht daher eine bestimmte Stromstärke. Die elektromotorische Kraft der Maschine wird um so größer, je größer deren Geschwindigkeit ist, weil dann die Dauer der einzelnen Induktionen eine um so geringere ist.

Befindet sich nun eine zweite Dynamomaschine in dem Stromkreis und wird diese durch den Strom der ersten in Bewegung gesetzt, so entsteht in dem Anker derselben ja ebenfalls eine elektromotorische Kraft, welche der der ersten Maschine, wie wir wissen, entgegengesetzt ist. Es besteht also jetzt der Gesamtwiderstand des ganzen Systems aus dem inneren Widerstand der beiden Maschinen und aus dem Widerstand der Verbindungsdrähte. Und die gesamte elektromotorische Kraft, die im Stromkreise wirkt, ist die Differenz der elektromotorischen Kräfte beider Maschinen, so daß sich die Stromstärke jetzt nach dem Ohmschen Gesetz folgendermaßen darstellt:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Differenz der elektromotorischen Kräfte}}{\text{Gesamtwiderstand}}$$

Wenn also der Gesamtwiderstand des Stromkreises jetzt der gleiche ist wie früher, so ist doch die Stromstärke jetzt eine geringere als in dem Fall, wo keine sekundäre Maschine vorhanden war, weil eben die elektromotorische Kraft der zweiten Maschine entgegenwirkt. Die elektromotorische Kraft jeder Maschine hängt außer von dem gesamten Widerstand und ihrer sonstigen Einrichtung nur ab von der Geschwindigkeit, mit welcher ihr Anker rotiert. Sind also die beiden Dynamomaschinen gleich gebaut, so hängt die Stromstärke nur ab von der Differenz der Geschwindigkeit beider Maschinen und dem Gesamtwiderstand. Daraus ergibt sich ein merkwürdiges Resultat. Wenn beide Maschinen ganz gleich gebaut sind und gleich schnell rotieren, so muß die Stromstärke im gesamten Stromkreis gleich Null sein. Die beiden Maschinen könnten aber bloß dann gleich schnell rotieren, wenn in beiden keine Reibungswiderstände zu überwinden wären. Dann hätte man also den Fall, daß von dem Motor die primäre Maschine getrieben wird, daß durch den Strom, der in ihr erzeugt wird, die sekundäre Maschine in Bewegung kommt, daß diese immer rascher rotiert, wodurch die Stromstärke im ganzen Stromkreis immer mehr abnimmt, und daß sie schließlich so rasch rotiert, wie die erste, wobei dann durch die Leitung kein Strom fließt. In diesem Fall wird weder an der primären Maschine Arbeit geleistet, noch von der sekundären Maschine Arbeit abgegeben, in diesem Falle findet also gar keine Übertragung von Kraft statt. Dieser Fall ist natürlich nicht zu realisieren, obwohl er mit großer Annäherung praktisch erreicht werden kann.

Sobald man aber die zweite Maschine Arbeit leisten läßt, indem man sie z. B. eine Dreschmaschine treiben läßt, so nimmt ihre Geschwindigkeit, also auch ihre elektromotorische Gegenkraft ab, wodurch die Stromstärke im ganzen Kreise vergrößert wird.

Wir wollen annehmen, es sei eine elektrische Kraftübertragung im vollen Gange. Es seien also zwei Dynamomaschinen vorhanden, die durch eine beliebige Leitung verbunden seien, und es werde etwa durch eine Dampfmaschine der ersten fortwährend Energie zugeführt, während die zweite fortwährend nutzbare Arbeit leistet, z. B. Wasser aus einer Grube hebt. Wir wollen sehen, wie sich die aufgewendete und die nutzbare Arbeit zueinander verhalten. Beide Maschinen haben dabei gewisse Geschwindigkeiten und durch die ganze Leitung und die Maschinen fließt ein Strom von bestimmter Stärke.

Die gesamte Arbeit, die von der Dampfmaschine in jeder Sekunde auf die erste Maschine übertragen wird, wird nun zu folgenden Leistungen benutzt:

Erstens dient sie dazu, die Reibungswiderstände der primären Maschine zu überwinden.

Zweitens erzeugt sie durch die Drehung der primären Maschine in dieser Foucaultsche Ströme, welche sich in Wärme umsetzen und die für die Arbeitsleistung, ebenso wie die Reibung, nutzlos sind.

Drittens aber erzeugt sie in der primären Maschine eine elektromotorische Kraft, welche nun den Strom durch die ganze Leitung und in die sekundäre Maschine sendet.

Der gesamte Effekt dieses Stromes ist gleich dieser elektromotorischen Kraft multipliziert mit der Stromstärke, und zwar ist dieser Effekt in Watt ausgedrückt, wenn die elektromotorische Kraft in Volt, die Stromstärke in Ampère gemessen wird. Aber von diesem ganzen Effekt wird ein Teil in der primären Maschine selbst verbraucht, nämlich in Joulesche Wärme verwandelt, und derjenige Effekt, der von der Maschine nach außen abgegeben wird, in die Leitung und in die sekundäre Maschine, ist nur gleich dem Produkt aus der Klemmenspannung der Maschine und der Stromstärke (s. S. 356). Wozu nun dieser Effekt im äußeren Stromkreis verwendet wird, das ist Sache der Anordnung, der Leitung u. s. w. Er kann eventuell vollständig nutzbar verwendet werden. Deshalb kann man das Verhältnis, in welchem dieser äußere Effekt zur aufgewendeten Arbeit steht, welches wir oben S. 340 als das Güteverhältnis der Maschine bezeichnet haben, auch zweckmäßig den industriellen Wirkungsgrad der primären Maschine nennen. Dieser Wirkungsgrad beträgt bei guten Dynamomaschinen 85 bis 90 Proz. und mehr.

Der Effekt im gesamten äußeren Stromkreis wird nun zu folgenden zwei Leistungen verwendet. Erstens dient ein Teil zur Erwärmung der Leitung zwischen der primären und sekundären Maschine nach dem Jouleschen Gesetz. Diese Leistung wollen wir als Leitungsverlust bezeichnen. Sie hat offenbar wirtschaftlich nur die Bedeutung eines Verlustes und es ist unsere Aufgabe, sie möglichst zu verringern. Der übrige Teil des gesamten äußeren Effekts wird von der sekundären Maschine absorbiert.

Wesentlich für die Leistung der Kraftübertragung ist nur der letztere Teil. An den Klemmen der sekundären Maschine herrscht eine bestimmte Klemmenspannung. Diese mit der Stromstärke multipliziert, gibt den Effekt in Watt, welcher von der zweiten Maschine absorbiert wird.

Dieser von der zweiten Maschine aufgenommene Effekt wird nun einerseits nutzlos verwendet zur Überwindung von Reibungswiderständen, zur Erzeugung Foucaultscher Ströme und zur Erwärmung der Drähte in der zweiten Maschine nach dem Jouleschen Gesetz; andererseits aber wird er nutzbar verwendet, nämlich zur Leistung der nutzbaren Arbeit, welche eben gerade von der sekundären Maschine verlangt wird (in unserem Beispiel zum Heben von Wasser).

Ganz entsprechend, wie oben bei der primären Maschine, bezeichnen wir nun hier das Verhältnis, in welchem die nutzbare Arbeit der zweiten Maschine zu dem gesamten von ihr aufgenommenen Effekt steht, als den industriellen Wirkungsgrad der sekundären Maschine.

Endlich bezeichnen wir das Verhältnis der ganzen geleisteten Nutzarbeit der sekundären Maschine zur gesamten von der primären Maschine aufgenommenen Arbeit als den Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung. Es ergibt sich ohne weiteres, daß dieser letztere Nutzeffekt um so größer wird, je größer die Wirkungsgrade der beiden einzelnen Maschinen sind und je geringer der Leitungsverlust ist. Der Leitungsverlust ist aber um so geringer, je kleiner die Stromstärke ist,

die in der Leitung fließt, also um so geringer, je mehr die Klemmenspannungen der beiden Maschinen einander nahe kommen.

Um nun diese Verhältnisse besser übersehen zu können, soll ein Beispiel aus einer ausgeführten Kraftübertragungsanlage angeführt werden. In Kriegsstetten in der Schweiz befindet sich nämlich eine Wasserkraft, deren Arbeit auf elektrischem Wege nach Solothurn übertragen wird, welches 8 km von Kriegsstetten entfernt ist. In Kriegsstetten befinden sich zwei primäre Maschinen hintereinander, in Solothurn ebenfalls zwei sekundäre Maschinen. Die Leitung zwischen beiden Stationen besteht aus Kupferdraht von 6 mm Dicke. Es war nun bei einem Versuch die ganze Arbeit pro Sekunde, welche auf die primären Maschinen von der Wasserkraft übertragen wurde, 30,85 Pferdekkräfte. Die Stromstärke ergab sich in der ganzen Leitung zu 11,474 Ampère und die Klemmenspannung an der primären Maschine betrug dabei 1753,3 Volt. Folglich war der Effekt im ganzen äußeren Stromkreis $1753,3 \times 11,474$ Watt, also 27,33 Pferdekkräfte. Und daher ergab sich der industrielle Wirkungsgrad der primären Maschine

zu $\frac{27,33}{30,85} = 0,886$. Das heißt 88,6 Proz. der Arbeit, welche auf die erste Maschine übertragen wird, gehen in den äußeren Stromkreis. Die übrigen 11,4 Proz. werden nutzlos in Wärme verwandelt.

An den Klemmen der zweiten Maschine ergab sich nun ferner eine Spannung von 1655,9 Volt. Mithin ist der ganze von der zweiten Maschine aufgenommene Effekt $1655,9 \times 11,420$ Watt, das ist 25,69 Pferdekkräfte. (Die Stromstärke war in der zweiten Maschine etwas kleiner, weil in der Leitung die Isolation nicht vollkommen war.)

Daraus ergibt sich, daß in der Leitung $27,33 - 25,69 = 1,64$ Pferdekkräfte verloren gingen, welche in Joulesche Wärme umgesetzt wurden. Die Nutzarbeit nun, welche die zweite Maschine pro Sekunde leistete, wurde ebenfalls direkt gemessen und ergab sich zu 23,21 Pferdekkräfte. Von dem ganzen in sie eingeführten Effekt von 25,69 PS wurden also noch 2,48 Pferdekkräfte zur Überwindung der Reibungswiderstände, zur Erzeugung Foucaultscher Ströme und zur Erzeugung der Jouleschen Wärme in der sekundären Maschine verwendet. Der industrielle

Wirkungsgrad der zweiten Maschine ist daher $\frac{23,21}{25,69} = 0,903$. Die

zweite Maschine verwandelt also 90,3 Proz. von der in sie eingeführten elektrischen Energie in mechanisch nutzbare Arbeit. Endlich ist der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung gleich dem Verhältnis der zurückgewonnenen nutzbaren Arbeit von 23,21 Pferdekkräften zu der gesamten aufgewendeten Arbeit von 30,85 Pferdekkräften, also gleich $\frac{23,21}{30,85} = 0,756$. Mithin werden 75,6 Proz. der gesamten aufgewendeten Arbeit in diesem Falle auf 8 km übertragen und dort wieder nutzbar gewonnen.

Eine sehr wesentliche Frage ist es nun, welchen Einfluß die Entfernung der beiden Maschinen auf den Nutzeffekt der Kraftübertragung hat. Je weiter die Maschinen voneinander stehen, desto länger

müssen die Drähte sein, die beide Maschinen miteinander verbinden. Die Leitungsdrähte werden durch den Strom erwärmt und die Erwärmung ist direkt proportional ihrem Widerstand, wird also, unter sonst gleichen Umständen, um so größer, je länger die Verbindungsdrähte sind. Diese Erwärmung geschieht auf Kosten des Effektes im äußeren Stromkreis der primären Maschine, sie bildet also direkt eine Verringerung der von der sekundären Maschine nutzbar zu leistenden Arbeit.

Unsere obige Betrachtung über den Nutzeffekt der Kraftübertragung läßt uns sofort diesen Einfluß erkennen. Der Nutzeffekt hängt erstens ab von der Güte der beiden Maschinen, von ihrem industriellen Wirkungsgrad. Dieser ist bei allen neueren Maschinen 85 bis 90 Proz. oder mehr, also ein recht hoher. Zweitens hängt dieser Nutzeffekt aber ab von dem Verhältnis der Klemmenspannung an der sekundären und primären Maschine. Je größer dieses Verhältnis ist (es kann höchstens gleich 1 werden), um so besser ist der Nutzeffekt. Es kommt also darauf an, dieses Verhältnis möglichst groß zu machen. Nun ist aber die Klemmenspannung an der sekundären Maschine immer kleiner als die an der primären Maschine, und zwar um so viel, als der Spannungsverlust (S. 71) beträgt, der zur Überwindung des Widerstandes der Leitung verbraucht wird. Wird daher die Leitung sehr lang, so hat man zwei Mittel, um trotzdem das Verhältnis der Spannungen beider Maschinen möglichst nahe an 1 zu bringen, die beiden Klemmenspannungen möglichst gleich zu machen. Das eine Mittel besteht darin, daß man den langen Leitungsdrähten einen großen Querschnitt gibt. Denn dadurch wird ja der Widerstand der gesamten Leitung wieder klein. Hat etwa die Leitung die doppelte Länge zu bekommen, als in einer bereits ausgeführten Anlage, und gibt man ihr nun auch den doppelten Querschnitt, so bleibt der Spannungsverlust zwischen beiden Maschinen, also auch der Nutzeffekt, un geändert. Aber dieses Hilfsmittel ist praktisch nicht anwendbar, weil man dann bei einigermaßen großen Entfernungen sehr dicke Kupferstäbe zur Leitung nehmen müßte, welche die Kosten der Anlage überaus verteuern würden.

Das zweite Mittel aber besteht darin, daß man überhaupt die Klemmenspannungen beider Maschinen sehr groß macht. Dann macht nämlich die Abnahme der Spannung von der ersten bis zur zweiten prozentisch viel weniger aus, als bei kleineren Spannungen. Nehmen wir z. B. die obige Kraftübertragungsanlage in Solothurn an. Dort war

die Klemmenspannung an der primären Maschine 1753,3 Volt,

die Klemmenspannung an der sekundären Maschine 1655,9 Volt,

also der Spannungsverlust auf der 8 km langen Leitung 97,4 Volt und das Verhältnis der beiden Klemmenspannungen, von dem der Nutzeffekt

abhängt, $\frac{1655,9}{1753,3} = 0,944$. Der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung

ist gleich dem Produkt aus den beiden industriellen Wirkungsgraden der Maschinen und diesem Verhältnis der Spannungen, also gleich

$$0,886 \times 0,903 \times 0,944 = 0,756.$$

Wäre nun die Leitung doppelt so lang, 16 statt 8 km, so würde der Spannungsverlust in der Leitung 194,8 Volt betragen. Um trotzdem dasselbe Verhältnis der Klemmenspannungen zu bekommen, würde man bloß beiden Maschinen nahezu die doppelte Klemmenspannung zu erteilen brauchen, der ersten etwa 3480 Volt, der zweiten also 3285,2 Volt. Dann wäre, trotz des größeren Spannungsverlustes in der Leitung, das Verhältnis der Klemmenspannungen dasselbe, wie in dem angeführten Fall, nämlich $\frac{3285,2}{3480} = 0,944$ und daher auch der Nutzeffekt der Kraftübertragung derselbe.

Um nun größere Klemmenspannungen zu erhalten, muß man Maschinen von hoher elektromotorischer Kraft nehmen, also im allgemeinen Dynamomaschinen, welche eine große Anzahl Drahtwindungen auf dem Anker haben. Es läßt sich also auch mit den gewöhnlichen Telegraphendrähten Arbeit auf große Entfernung mit erheblichem Nutzeffekt übertragen, wenn man nur bewirkt, daß beide Maschinen sehr hohe elektromotorische Kraft haben.

Die oben angeführten Maschinen in Solothurn haben schon eine verhältnismäßig hohe Klemmenspannung, und gerade deswegen ist der Nutzeffekt der Arbeitsübertragung dort ein so hoher.

Diese Forderung, daß zur elektrischen Kraftübertragung auf große Entfernungen die angewandten Ströme sehr hochgespannt sein müssen, hat zuerst der französische Ingenieur Marcel Deprez bestimmt ausgesprochen, und er hat unentwegt die Ansicht verteidigt, daß durch passende Konstruktion der Maschinen, d. h. durch Maschinen für hohe Spannung, man auf jede Entfernung hin Arbeit von beträchtlicher Größe mit großem Nutzeffekt übertragen kann.

Nun haben wir schon mehrfach gesehen, daß Dynamomaschinen für Gleichstrom sich für sehr hohe Spannungen — für mehr als 1000 Volt — nicht gut bauen lassen, weil bei den einander nahen Wicklungen die Isolation kaum ausreichend gemacht werden kann, und weil ferner der Kommutator den hohen Spannungen gefährlich ist. Viel vorteilhafter sind für hohe Spannungen die Wechselstrom- und Drehstrommaschinen. Diese kann man direkt bis zu Spannungen von 10000 Volt konstruieren und damit schon auf sehr große Entfernungen vorteilhaft Arbeit übertragen. Ferner aber kann man sogar noch bei Wechselströmen, wie wir wissen, sehr leicht durch die Transformatoren der Spannung des Stromes noch viel höhere Werte geben, wenn es darauf ankommt. Und ferner kann man an denjenigen Stellen, an denen die Arbeit gebraucht wird, die hohen Spannungen, die immer gefährlich sind, wieder vollständig beseitigen, indem man dort durch Transformatoren aus den hohen Spannungen wieder passend niedrige hervorbringt. Die Drehströme mit Transformatoren sind also das Ideal für Arbeitsübertragungen auf weite Entfernungen, sie sind auch den gewöhnlichen einphasigen Wechselströmen deswegen überlegen, weil ja die Drehstrommotoren viel vorteilhafter sind als diejenigen für gewöhnlichen Wechselstrom.

Von der Richtigkeit dieser Betrachtungen überzeugt, hat nun im Jahre 1891 die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin

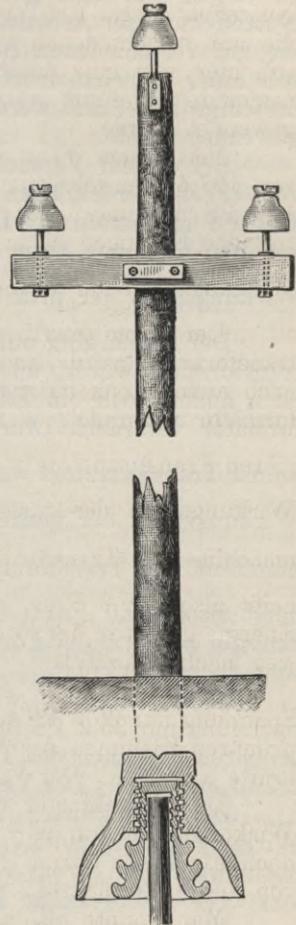
in Verbindung mit der Maschinenfabrik Oerlikon eine großartige Kraftübertragungsanlage ausgeführt, welche in einem exzeptionell schwierigen Fall die Möglichkeit der vorteilhaften elektrischen Übertragung von Arbeit mit den heutigen Mitteln beweisen sollte, nämlich die berühmte Kraftübertragung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main auf eine Entfernung von 175 km.

Es sollten von einer Wasserkraft in Lauffen zirka 200 Pferdekkräfte an die dortige Dynamomaschine abgegeben werden, und es kam darauf an, möglichst viel Pferdekkräfte nach Frankfurt zu bringen. Dazu war eine kolossale Spannung, 15—20 000 Volt, nötig, und diese wurde durch Drehströme mit Transformatoren hergestellt.

Die Anlage war folgende. In Lauffen wurde durch eine Turbine eine große Drehstromdynamomaschine getrieben, welche bis zu 300 Pferdekkräfte aufnehmen konnte. Sie lieferte drei getrennte Ströme von je 50 Volt Spannung und bis zu 1400 Ampère Stärke. Die Ströme wurden durch kurze Kupferkabel von 27 mm Durchmesser zu dem primären Transformator, einem Öltransformator für Drehstrom (S. 414) gesendet. Dort wurden die drei Ströme von 50 Volt und 1500 Ampère transformiert in Ströme von etwa 14 000 Volt und 4,3 Ampère. Die letzteren Ströme von nur 4,3 Ampère ließen sich nun auf verhältnismäßig dünnen Drähten weiterleiten. Es wurden für die drei Ströme drei blanke Kupferdrähte von 4 mm Durchmesser benutzt, welche nun, wie Telegraphenleitungen, von Lauffen nach Frankfurt geführt wurden. Es wurden dazu zirka 3000 Stangen verwendet, welche je drei Porzellanisolatoren trugen, wie es Fig. 438 zeigt. Diese Isolatoren hatten inwendig Rinnen, die mit Öl gefüllt waren, damit nicht Elektrizität von den Drähten über die Oberfläche der Isolatoren — die immer feucht sind — zu den eisernen Trägern der Isolatoren gelangen könne und so zur Erde abgeleitet werde.

Die in Frankfurt ankommenden hochgespannten Ströme wurden nun durch weitere Öltransformatoren wieder zurücktransformiert auf etwa 100 Volt, so daß sie dann wieder Stärken bis zu 700 Ampère erhielten. Ein Teil dieser Ströme wurde zur Speisung einer Lampenbatterie von 1000 Glühlampen benutzt, ein anderer Teil derselben betrieb einige Drehstrommotoren. Von den letzteren setzte einer eine Pumpe in Bewegung, durch welche ein Wasserfall von 10 m Höhe in

Fig. 438.



Frankfurt gespeist wurde. So war ein Teil der Energie des Wasserfalls in Lauffen nach vielen Umformungen und nach einem zurückgelegten Weg von 175 km wieder in die Energie eines Wasserfalls in Frankfurt verwandelt.

Der Versuch, so hochgespannte Ströme auf so weite Entfernung zu leiten, war also gelungen, und es kam darauf an, wie groß der Nutzeffekt dieser Arbeitsübertragung war. Von den vielen Experimenten, die mit verschiedenen Belastungen der Maschinen ausgeführt wurden, soll hier, um eine deutliche Einsicht in die Verhältnisse zu gestatten, dasjenige angeführt werden, bei dem die größte Arbeit in Lauffen aufgewendet wurde.

Bei diesem Versuch lieferte die Turbine in Lauffen einen Effekt von 197,4 Pferdekraften in die Dynamomaschine. Von diesen wurden 12,6 PS im Innern der Dynamomaschine verbraucht und 148,8 gingen von den Klemmen ab in den äußeren Stromkreis, so daß der industrielle Wirkungsgrad der primären Maschine $\frac{148,8}{197,4} = 93,5$ Proz. war.

Der Strom ging nun zunächst zum primären Transformator, wo er transformiert wurde, und von den sekundären Klemmen desselben ging nach außen noch ein Effekt von 177,6 PS, so daß 7,2 PS im Transformator verbraucht wurden. Der industrielle Wirkungsgrad des primären Transformators war also $\frac{177,6}{184,8} = 96,1$ Proz., und der industrielle Wirkungsgrad der ganzen primären elektrischen Installation (Dynamomaschine und Transformator zusammen) war $\frac{177,6}{197,4} = 89,9$ Proz. Das heißt also, 89,9 Proz. der gesamten von der Turbine aufgewendeten Energie gehen in der Form von sehr hochgespanntem Strom von Lauffen weg nach Frankfurt.

In der Leitung wurden bei diesem Versuch infolge der hohen Spannung nur 25,2 PS für Joulesche Wärme verbraucht, so daß an die primären Klemmen des Transformators in Frankfurt noch 152,4 Pferdekraften ankamen. Der Verlust in der Leitung betrug also etwa 15 Proz.

Der Frankfurter Transformator hatte nun einen industriellen Wirkungsgrad von 95,7 Proz., d. h. er verwandelte den eingeführten hochgespannten Strom von 152,4 PS Effekt in niedrig gespannten Strom von 145,8 Pferdekraften Effekt.

Man konnte also in Frankfurt 145,8 PS von den Klemmen des Transformators als niedrig gespannten Strom von etwa 100 Volt abnehmen und beliebig verwenden für Beleuchtung, Arbeitsleistung oder dergleichen.

Daher ist der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung zwischen der Turbine in Lauffen und der Verbrauchsstelle in Frankfurt $\frac{145,8}{197,4} = 73,9$ Proz.

Wenn man die enorme Entfernung und die hohen angewendeten Spannungen bedenkt, so ist dieser Nutzeffekt ein außerordentlich großer.

Allerdings zeigt dieser Versuch auch, daß man praktisch auf so weite Entfernungen nur sehr große Kräfte übertragen kann. Denn

wenn auch der Verlust an Energie ein verhältnismäßig niedriger ist, so sind doch die Kosten der Anlage (der Stangen und Drähte) so hoch, daß sie die Rentabilität bei geringer Größe der übertragenen Arbeit aufheben. Je größer aber die ganze übertragene Arbeit ist, desto weniger kommen die Anlagekosten praktisch in Betracht.

Aber andererseits hat dieser Versuch klar gezeigt, daß die Ausführung solcher elektrischer Kraftübertragungsanlagen mit hohem Nutzeffekt jetzt überall und auf alle in Betracht kommenden Entfernungen möglich ist. Wo also die Herleitung von Energie aus der Ferne sich rechnerisch lohnt, da besteht auch keine Schwierigkeit mehr in der praktischen Ausführung der Anlage, und in der Tat sind jetzt bereits eine größere Zahl von Kraftübertragungsanlagen ausgeführt, bei denen normal eine Spannung von 10 000 Volt in den Leitungsdrähten herrscht.

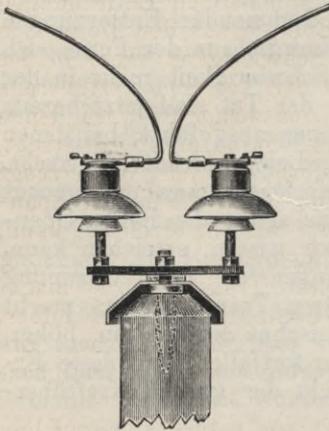
Dabei umgeht man den primären Transformator ganz, und erzeugt vielmehr in der primären Drehstrommaschine selbst die hohen Spannungen von 10 000 Volt, was man ja, wie wir wissen, erreichen kann, da dort nur in den feststehenden Windungen die hohe Spannung herrscht. Durch die Beseitigung des primären Transformators macht man den Wirkungsgrad der primären elektrischen Installation höher, weil die Verluste im primären Transformator fortfallen, und diese Erhöhung drückt sich dann auch im Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung aus.

Das Bestreben der Elektrotechnik geht aber natürlich darauf hin, zu noch viel höheren Spannungen zu gelangen. Auch liegen schon Versuche mit Kraftübertragungen von 50 000—100 000 Volt Spannung vor. Die Schwierigkeiten der Isolation wachsen aber bei diesen hohen Spannungen rapid, und außerdem ist die Gefahr solcher Anlagen, bei denen elektrische Funken auf 10—30 cm Entfernung aus den Leitungen an jeder Stelle heraus schlagen können, eine sehr große. In den meisten Fällen begnügt man sich daher, Kraftübertragungen auf solche Entfernungen nur einzurichten, bei denen man mit 5 000—10 000 Volt Spannung noch wirtschaftliche Resultate erzielt.

Bei Fernleitungen, die sich oft auf viele Kilometer erstrecken und welche Spannungen bis zu 10 000 Volt führen, ist eine Vorsichtsmaßregel von hoher Bedeutung, nämlich die Sicherung aller Apparate gegen Blitzschlag. Wenn irgendwo auf dem Wege der Blitz in die Leitung schlägt, so kann er, oder wenigstens ein Teil von ihm, in die Maschinen und Apparate dringen und diese zerstören. Man kann sich aber durch sogenannte Leitungsblitzableiter davor schützen. Der Blitz ist nämlich eine äußerst rasche elektrische Bewegung, die sogar häufig, wie es scheint, aus sehr raschen elektrischen Schwingungen (s. S. 263 u. folg.) besteht. Wir wissen aber, daß bei sehr raschen elektrischen Bewegungen nicht der gewöhnliche Widerstand es ist, welcher den Stromdurchgang erschwert, sondern die Selbstinduktion. Eine kleine Luftstrecke von einigen Millimetern Abstand, etwa zwischen zwei Metallplatten, läßt die Blitzentladung leicht durchgehen, obwohl der Widerstand der Luft enorm ist, während ein paar Meter Kupferdraht, namentlich wenn er spiralförmig aufgerollt ist, dem Blitz einen viel schwereren Weg bieten. Dadurch aber kann man einen Blitz, der

in eine Leitung eingedrungen ist, unschädlich machen. Man schaltet nämlich an jeder Leitung, die zur Maschine führt, je ein paar solche Platten derartig ein, daß je die eine Platte mit je einer Leitung, die andere mit der Erde verbunden ist. Ein solches System nennt man einen Leitungsblitzableiter. Ist ein Blitz in die Leitung geschlagen, so gelangt er, bevor er an die Maschinen kommt, an diesen Blitzableiter und überspringt den Luftzwischenraum und geht zur Erde, dringt aber nicht in die Maschinen ein. Ebenso schaltet man solche Blitzableiter vor jeden zu schützenden Apparat.

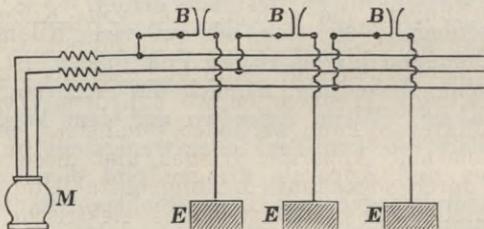
Fig. 439.



Bei hochgespannten Strömen aber, um die es sich für uns jetzt handelt, ist dabei noch eine große Schwierigkeit vorhanden. Zunächst muß natürlich der Abstand der Platten oder Drähte, die den Blitzableiter bilden, so groß sein, daß der eigentliche Maschinenstrom nicht durch die Luftschicht gehen kann, der Abstand muß größer sein als die Schlagweite, welche zu der vorhandenen Maschinenspannung gehört. Schlägt aber der Blitz in die Leitung ein und geht er durch den Blitzableiter zur Erde, so wird dadurch das Metall der beiden Blitzableiterplatten zum Teil zerstäubt und die Luft zwischen den Platten wird erwärmt, so daß nun der Maschinenstrom diesen Widerstand auch überwinden kann, es bildet sich sofort ein Lichtbogen zwischen den Platten und der Maschinenstrom fließt nun auch einerseits durch den Blitzableiter zur Erde,

wobei der Lichtbogen dauernd anhält und starke Feuererscheinungen und Feuergefahr bietet. Der Blitz ist zwar beseitigt, aber die Maschine ist, vielleicht gleich mit allen beiden oder drei Polen, mit der Erde verbunden, der Teufel ist zwar ausgetrieben, aber nur durch Beelzebub. Man muß daher dafür sorgen, daß sofort nach einem Blitzdurchgang der entstehende Lichtbogen wieder ausgelöscht wird. Das beste und einfachste Mittel dazu sind die Hörnerblitzableiter von Siemens & Halske, von denen Fig. 439 eine Abbildung gibt. Dieser

Fig. 440.



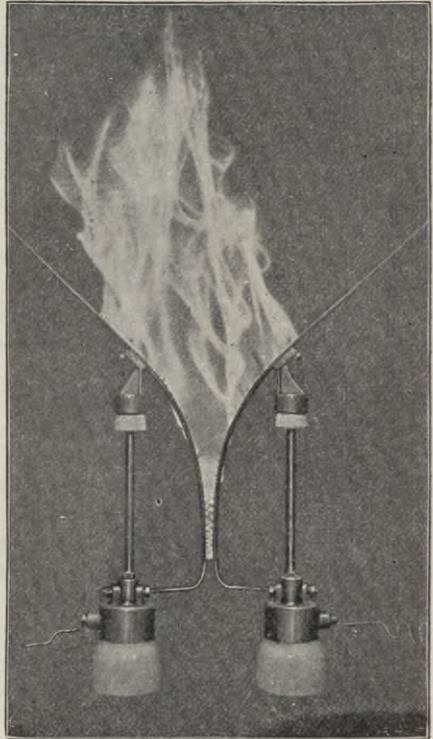
wobei der Lichtbogen dauernd anhält und starke Feuererscheinungen und Feuergefahr bietet. Der Blitz ist zwar beseitigt, aber die Maschine ist, vielleicht gleich mit allen beiden oder drei Polen, mit der Erde verbunden, der Teufel ist zwar ausgetrieben, aber nur durch Beelzebub. Man muß daher dafür sorgen, daß sofort nach einem Blitzdurchgang der entstehende Lichtbogen wieder ausgelöscht wird. Das beste und einfachste Mittel dazu sind die Hörnerblitzableiter von Siemens & Halske, von denen Fig. 439 eine Abbildung gibt. Dieser

besteht aus zwei gebogenen Stäben, welche unten einen kleinen Abstand haben, der sich nach oben immer mehr erweitert. Bildet sich durch den Blitz unten an der engsten Stelle ein Lichtbogen, so wird dieser sofort, da die erwärmte Luft nach oben dringt, aufwärts getrieben, er wandert den Hörnern entlang nach oben, bis der Abstand so groß geworden ist, daß die Maschinenspannung ihn nicht überwinden kann. Dadurch verlöscht er ganz von selbst. In Fig. 440 ist gezeichnet, wie diese Blitzableiter in der Nähe einer Drehstrommaschine angebracht werden. Von jeder der drei Leitungen führt ein kurzer, etwas gewundener Draht zu dem einen Horn des Blitzableiters B, und von dessen anderem Horn geht ein gerader Draht zu einer in der Erde vergrabenen Platte E. Dadurch ist die Maschine geschützt.

Ebensolche Vorsichtsmaßregeln ergreift man bei den Transformatoren, bei den Motoren und auf der Fernleitung in gewissen Abständen. In Fig. 441 ist dargestellt, wie ein Lichtbogen in einem solchen Hörnerblitzableiter aussieht. Es ist dies eine Momentaufnahme. Die Fußpunkte der einzelnen Entladungen wandern rasch nach aufwärts, und in 2 Sekunden ist der Lichtpunkt erloschen.

Die Kraftübertragungen auf größere Entfernung beginnen jetzt eine große Rolle in der Industrie zu spielen, ja sie bilden in Verbindung mit der Verteilung der Kraft eine der wichtigsten Aufgaben der Industrie im allgemeinen und der Elektrotechnik im besonderen. Denn da es jetzt auf einfache Weise möglich ist, beliebig vielen Maschinen elektrisch von einer Stelle aus die Kraft zuzuführen, so ist dadurch eine eigentümliche Kombination von Zentralisierung und Dezentralisierung der Arbeit ermöglicht, für die es bisher kein Beispiel gab, die aber jetzt in manchen Industriegegenden schon praktisch durchgeführt wird. Bisher nämlich konnten nur die ganz großen Fabriken aller der Vorteile teilhaftig werden, welche einerseits sehr große Wasserkräfte, andererseits sehr große Dampfmaschinen bieten. Diese liefern ja die Kräfte außerordentlich viel billiger, um den dritten Teil bis zur Hälfte der Kosten, als kleine Turbinen, kleine Dampfmaschinen. Wo also große Maschinen, sei es von Dampf, sei es von Wasser getrieben, aufgestellt waren, da konnte sich, in nächster Nähe derselben, eine große

Fig. 441.



Industrietätigkeit entwickeln, der Betrieb war ein rein zentralisierter. Jetzt aber ist es möglich, solche große Maschinen, solche große Wasserkräfte zu benutzen und auf elektrischem Wege diese Kräfte in weitem Umfange, auf viele Ortschaften zu verteilen, also die Vorteile der zentralisierten Krafterzeugung mit denen des dezentralisierten Kraftverbrauchs zu verbinden. So entstehen z. B. an der Oberspree, in Sachsen, in der Nähe des Rheinfalls, bei München große Industriegegenden, in welchen die Krafterzeugung auf eine Stelle konzentriert ist, während durch elektrische Kraftübertragung die Vorteile dieser konzentrierten Erzeugung allen einzelnen, selbst den kleinsten Industriellen zu gute kommen. Es ist kein Zweifel, daß diese lebenskräftige Kombination sich allmählich immer weiter ausbreiten wird, und man kann daher ruhig, ohne von der Zukunft desavouiert zu werden, die Prophezeiung aussprechen, daß der elektrischen Kraftübertragung und Kraftverteilung die Zukunft gehört.

9. Kapitel.

Die Verteilung elektrischer Energie.

Mit der wachsenden Ausdehnung der Benutzung des elektrischen Stromes wuchsen auch in ungeahntem Maße die Anforderungen, welche an die Elektrotechnik gestellt wurden. War man anfangs schon zufrieden, wenn man in einzelnen Räumen einige Bogenlampen von einer Maschine aus treiben lassen konnte, so kam bald durch das elektrische Glühlicht die Forderung an die Elektrotechnik heran, eine größere oder kleinere Anzahl von Glühlampen so von einer Quelle aus mit Strom zu versorgen, daß jede Lampe unabhängig von der anderen wäre und beliebig, ohne die anderen zu stören, angezündet oder ausgelöscht werden könne. Als dies erreicht war, trat als nächste Aufgabe die hervor, auch Bogenlampen und Glühlampen zusammen in demselben Kreise zu betreiben. Solange solche Betriebe sich auf einzelne Gebäude oder Räume erstreckten, waren diese Forderungen nicht allzu schwer zu erfüllen. Große Schwierigkeiten traten erst ein, als man daran ging, ganze Stadtteile, ja ganze Städte mit Bogenlicht und Glühlicht zu beleuchten, wobei immer die Forderung der gänzlichen Unabhängigkeit aller einzelnen Beleuchtungsobjekte obenan gestellt war. Zu diesen Forderungen an die Zentralisation trat dann bald noch die hinzu, den Strom nicht nur zu Beleuchtungszwecken, sondern auch zu Arbeitszwecken durch Elektromotoren und jetzt auch zu Heizzwecken zu liefern. Es mußten so direkte Methoden für die Verteilung der elektrischen Energie ausgearbeitet werden, welche mit den wachsenden Anforderungen auch immer schwieriger und komplizierter wurden.

Eine Reihe von Bogenlampen von derselben Maschine zu speisen, bot nach Erfindung der Differentiallampe keine erheblichen Schwierigkeiten mehr. Man schaltet die Bogenlampen hintereinander in einen Kreis, und durch die feine Regulierung der Differentiallampe ist jede Lampe unabhängig von der anderen. Allerdings wird bei einer Anzahl hintereinander geschalteter Bogenlampen die notwendige Spannung des Stromes bald sehr groß. Da jede Bogenlampe etwa 45 Volt Spannung an ihren Klemmen gebraucht, so muß ein Strom, der 20 Bogenlampen hintereinander speisen soll, schon etwa 1000 Volt Spannung haben, wenn man den Spannungsverlust in der Leitung berücksichtigt. Mit Gleichstrommaschinen und namentlich mit Wechselstrommaschinen lassen sich solche Spannungen jetzt sicher erzielen, und die billigste und einfachste Art, eine Reihe von Bogenlampen allein zu treiben, ist

daher die der Hintereinanderschaltung. Sie ist anwendbar vor allem immer dann, wenn jede Gefahr, daß Unberufene die Leitungsdrähte berühren können, ausgeschlossen ist. Sie ist aber nicht anwendbar, wenn die hochgespannten Ströme in bewohnte Räume eingeführt werden müssen, da sie dann zu Unglücksfällen führen könnte. Ein anderes System der Bogenlichtbeleuchtung wurde zuerst von Gülcher praktisch ausgearbeitet, nämlich das der Parallelschaltung von Bogenlampen. Von der Maschine gehen dabei zwei Leitungsstränge — voneinander isoliert — aus, welche eine Spannungsdifferenz von 50 bis 65 Volt haben. Zwischen diese Leitungsstränge werden die Bogenlampen alle nebeneinander geschaltet und zwar jede noch mit einem besonderen Widerstand. Dieser Widerstand verbraucht einen Teil der 50 bis 60 Volt, und jede Lampe bekommt dann ihre notwendige Klemmenspannung von 40 bis 45 Volt und ihre notwendige Stromstärke. Die Stromstärke in den Hauptleitern, von denen die Lampen abgezweigt werden, muß natürlich so groß sein, daß sie jeder Lampe ihre notwendige Intensität abgeben kann. Wenn also z. B. jede Lampe bei 50 Volt Spannung einen Strom von 10 Ampère zum Brennen braucht, so muß, bei 20 Lampen nebeneinander, der Strom in den Hauptleitungen 200 Ampère betragen. Es ist selbstverständlich, daß sowohl bei der einen (Serien-) wie bei der anderen (Parallel-) Schaltung man dieselbe Menge benutzter Energie hat, abgesehen von den Verlusten in den Leitungen. Bei der Serienschaltung braucht man bei 20 Lampen in diesem Falle einen Strom von 10 Ampère mit 1000 Volt Spannung, also im ganzen 10000 Watt Effekt (ohne die Verluste), und bei der Parallelschaltung braucht man einen Strom von 200 Ampère mit 50 Volt Spannung, also wieder 10000 Watt Effekt. Der Unterschied liegt bei beiden Schaltungsweisen wesentlich in dem Aufwand für das Leitungsmaterial.

Die Frage nach der zweckmäßigen Verteilung der Elektrizität auf viele einzelne Verbrauchsstellen wurde aber erst dringend, als Edison die Glühlichtbeleuchtung in die Praxis einführte. Beim Bogenlicht hatte man höchstens 40 bis 50 Verbrauchsstellen einzurichten, die unabhängig voneinander sein sollten, beim Glühlicht ging aber diese Zahl sofort in die Tausende. Außerdem waren die vielen Bogenlampen, die von einer Maschine zu speisen waren, gewöhnlich in der Benutzung eines einzelnen, z. B. einer Stadtverwaltung bei Straßenbeleuchtungen, und es konnte ihr Betrieb im voraus geregelt werden. Beim Glühlicht aber traten sofort eine große Anzahl von Benutzern (Abonnenten) ein, von denen einer um den anderen sich nicht zu kümmern hatte, und jeder wollte immer genau so viel Lampen löschen oder brennen können, als er gerade brauchte, ohne nach seinem Nachbar zu fragen. Es mußte also die volle Unabhängigkeit jeder Lampe von der anderen hervorgebracht werden, während sie alle in einem Stromkreise sich befinden, d. h. von einer Maschinenstation aus gespeist werden.

Edison selbst war es, der sofort bei der Einführung des Glühlichts auch die praktische Lösung für diese Verteilung fand. Er schaltete nämlich die Lampen alle nebeneinander (parallel), also so, wie es in Fig. 442 gezeichnet ist, in welcher M die Maschine und

1, 2, 3 bis 10 die Lampen sind. Durch die Nebeneinanderschaltung der Lampen wird der gesamte Widerstand des äußeren Stromkreises kleiner als der jeder einzelnen Lampe. Haben die Verbindungsdrähte (welche man ja beliebig stark nehmen kann) einen sehr kleinen Widerstand, der in der folgenden Betrachtung vernachlässigt werden möge, dann herrscht an den Enden jeder Lampe dieselbe Spannungsdifferenz, nämlich diejenige, welche an den Endklemmen der Maschine vorhanden ist. Die Leitungen von den Endklemmen der Maschine bis zu den letzten Lampen macht man dabei so dick, gibt ihnen einen so geringen Widerstand, daß der Spannungsverlust (Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand) nur 2 bis 3 Proz. beträgt. Solange daher die Spannungsdifferenz an den Enden der Maschine (die Klemmenspannung) dieselbe bleibt, so lange ist auch die Stromstärke in jedem Zweig, da dessen Widerstand unverändert ist, dieselbe, so lange brennt also jede Lampe normal und unveränderlich. Und daraus ergibt sich, daß alle Lampen vollständig unabhängig voneinander sind, daß man

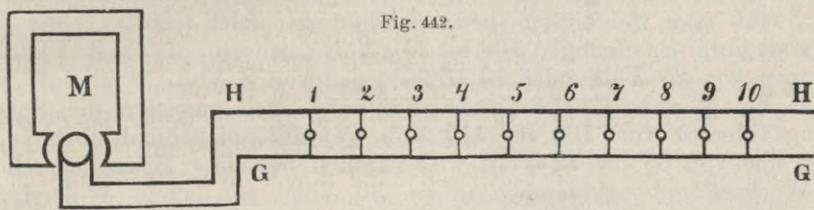


Fig. 442.

beliebig viele auslöschten oder einschalten kann, wenn nur dafür gesorgt wird, daß die Klemmenspannung an den Enden der Maschine dauernd dieselbe bleibt.

Diese Lösung der Aufgabe läßt sich aber sofort auch auf den Fall erweitern, wie zuerst Deprez zeigte, daß der Strom von der Maschine nicht nur zum Betrieb von Glühlampen benutzt werden soll, sondern daß er auch zum Betrieb von elektrischen Motoren verwendet werden soll. Schaltet man in Fig. 442 an Stelle der Lampen 1, 2 bis 10 je einen elektrischen Motor ein und hält man an den Enden der Maschine die Spannung dauernd konstant, so fließt durch jeden Motor ein Strom von der Stärke, wie er der von ihm geleisteten Arbeit entspricht. Aber jeder Motor ist dabei ganz unabhängig von dem anderen. Die konstante Klemmenspannung ist hinreichend, aber auch notwendig, um alle Forderungen des gemischten Betriebes von Glühlampen und Motoren zu erfüllen. Natürlich müssen die Motoren so konstruiert sein, muß der Widerstand ihrer Wicklung so abgemessen sein, daß sie bei der konstant gegebenen Klemmenspannung die maximale von ihnen verlangte Arbeit leisten können. Ebenso können auch an Stelle der Lampen 1 bis 10 Heizapparate eingeschaltet werden, die auch für konstante Klemmenspannung konstruiert werden.

Bei diesem System der Parallelschaltung aller Verbrauchsapparate ist es nun notwendig, daß man eine normale Spannungsdifferenz festsetzt, welche in dem Leitungssystem herrschen soll. Denn es müssen eben alle Glühlampen, Motoren und Heizapparate so konstruiert sein,

ihr Widerstand muß so abgemessen sein, daß sie bei der gegebenen Spannung gerade die zu ihrem normalen Betriebe nötige Stromstärke erhalten.

Es hat sich nun nach dem Vorgang von Edison eingebürgert, bei Gleichströmen eine Spannungsdifferenz von ca. 110 Volt (100 bis 110 Volt) in den Hauptleitungen anzuwenden. Die Glühlampen für große Anlagen werden also so konstruiert, daß sie bei dieser Spannung gerade die normale Lichtstärke (gewöhnlich von 16 Kerzen) geben, und ebenso werden auch die Motoren und die Heizapparate für diese Spannung eingerichtet. Zwischen zwei solche Leiter, die 110 Volt Spannungsdifferenz haben, kann man nun auch Bogenlampen einschalten. Denn da eine Bogenlampe ca. 45 Volt Spannung braucht, so kann man immer 2 Bogenlampen hintereinander mit einem Widerstand zwischen die Leitungsstränge schalten, und auch diese erhalten dann ihren normalen Strom. Ebenso kann man aber auch Glühlampen von geringer Leuchtkraft, die weniger Spannung bedürfen und vertragen, zwischen die Leitungen von 110 Volt Spannungsdifferenz einschalten. Nur muß man von diesen ebensoviel hintereinander schalten, daß die Summe ihrer Spannungen 100 bis 110 Volt ausmacht, also z. B. 4 Glühlampen von 25 Volt, oder 13 Glühlampen von 8 Volt.

Bei Wechselstromanlagen wird auch zuweilen die Spannungsdifferenz von 100 bis 110 Volt gewählt, manchmal aber auch nur eine von 65 bis 72 Volt, weil nämlich bei dieser Spannung schon 2 Wechselstrombogenlampen (à ca. 30 Volt) mit einem Widerstand eingeschaltet werden können.

Dieses System der Parallelschaltung ist also ganz ausgezeichnet geeignet, eine Verteilung der elektrischen Energie zu liefern, die allen Anforderungen entspricht.

Die Hauptforderung dabei ist, daß die Klemmenspannung an der erzeugenden Maschine dauernd konstant erhalten wird. Zu dem Zwecke muß der Maschinist an einem Voltmeter die Spannung dauernd kontrollieren und muß durch Regulierung des Nebenschlusses an der Maschine die Spannung sofort wieder auf den normalen, vorgeschriebenen Wert bringen, wenn sie sich verändert.

Die Einschaltung der Widerstände in den Nebenschluß wird übrigens nicht immer durch den Maschinisten mit der Hand bewirkt, sondern geschieht zuweilen selbsttätig, durch geeignete, von den Strömen erregte Elektromotoren.

Ferner wird die Erzeugung einer großen Menge von Elektrizität, die sich auf sehr viele Gebrauchsapparate verteilt, zweckmäßig nicht von einer einzelnen Dynamomaschine besorgt, sondern von mehreren, die man nach Bedarf einschaltet. Denn der Bedarf an Elektrizität ist bei der Verteilung der Elektrizität ein sehr wechselnder. Die Lampen brennen größtenteils nur des Abends und während eines Teiles der Nacht, die Motoren laufen hauptsächlich während des Tages. Man stellt deswegen in den Zentralstationen mehrere Maschinen auf, von denen jede nur einen Strom von einer gewissen Maximalstärke liefert, und erst wenn mehr Strom gebraucht wird, als diese eine Maschine liefert, schaltet man eine zweite, dritte Maschine ein. Diese Maschinen

werden immer parallel geschaltet, und zu dieser allmählichen Einschaltung, von der die Konsumenten nichts merken dürfen — es darf sich z. B. die Lichtstärke der Lampen nicht vergrößern noch verringern — gehören besondere Einrichtungen, die wir aber nicht erörtern können.

Von der Dynamomaschine aus oder, besser gesagt, von ihren beiden Polen gehen nun zunächst Drähte (oder Kabel) zu einem Schaltbrett, welches alle notwendigen Apparate, Voltmeter, Ampèremeter, Ausschalter, Widerstände für den Nebenschluß und den Hauptstrom, Bleisicherungen u. s. w. enthält. Sind in der Zentralstation mehrere Maschinen vorhanden, so werden deren Pole alle durch je einen Ausschalter hindurch mit zwei Schienen auf dem Schaltbrett, den sogenannten Sammelschienen, verbunden, so daß dadurch die Maschinen alle parallel geschaltet sind. Von den Sammelschienen geht nun eine doppelte Hauptleitung durch die Stadt, welche unterirdisch gelegt ist und welche aus Kabeln von großem Querschnitt besteht, da sie die starken Hauptströme zu führen hat. In jede Straße gehen nun wieder Kabel von geringerem Querschnitt, und zwar von jedem Hauptkabel aus eines. Noch geringeren Querschnitt haben die Leitungen die in die Nebenstraßen führen, und endlich noch kleineren diejenigen, die in die einzelnen Häuser führen. Die Einrichtung ist also ganz analog wie bei der Gasleitungseinrichtung.

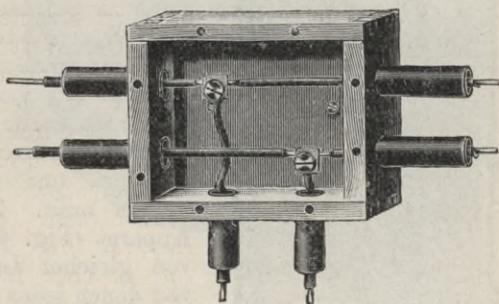
Für diese Leitungen verwendet man jetzt häufig Kabel, die aus einer inneren Kupferseele und einem konzentrischen, aus Drähten gebildeten Kupferleiter bestehen, so daß die eine Leitung ganz von der anderen umgeben ist. Es sind also dann beide Leitungen in demselben Kabel enthalten. Der äußere Leiter ist mit Isolationsmasse umgeben, und über der Isolationsmasse befindet sich ein Bleimantel und darüber häufig noch eine sogenannte Eisenarmierung, d. h. eine Hülle aus Eisenband.

Die Abzweigungen von den Hauptkabeln, sowie die von den Nebenkabeln und endlich die Lampen und Motoren jedes einzelnen Hauses sind alle nebeneinander geschaltet. Da, wo die Nebenleitungen von den Hauptleitungen abgezweigt werden, werden Verbindungskasten angewendet, welche diese Abzweigungsstellen enthalten.

Fig. 443 zeigt einen solchen Verbindungskasten für zwei Leitungen. In dem Kasten findet die Abzweigung der Nebenleitungen von den Hauptleitungen, die durch Ebonitrohre in den Kasten eingeführt sind, statt.

Wenn auf diese Weise die elektrische Energie mit Sicherheit verteilt wird und jeder Konsument infolge der Parallelschaltung mit konstanter Spannung unabhängig von allen anderen ist, so ist nur noch

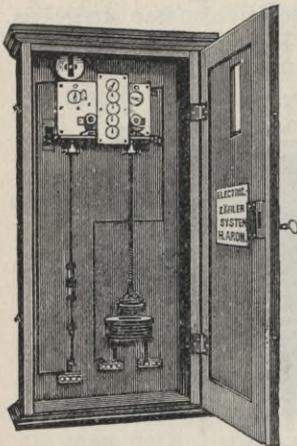
Fig. 443.



eine Sache von höchster Bedeutung. Es muß nämlich jeder Konsument wissen, wie viel Elektrizität er verbraucht hat, und es muß auch die Gesellschaft, die die Elektrizität liefert, wissen, wie viel Elektrizität etwa in jeder Wohnung, die elektrisch beleuchtet ist, konsumiert worden ist, weil sich danach der zu zahlende Preis richtet. Es handelt sich also um die Anbringung von Elektrizitätsmessern.

Solche Elektrizitätszähler oder Verbrauchszähler kann man auf verschiedene Weise konstruieren. Die Aufgabe ist, die in einer bestimmten Anlage, etwa in einer Wohnung, während einer gewissen Zeit (etwa 1 Monat) konsumierte elektrische Energie zu messen. In jeder Sekunde leistet nun ein elektrischer Strom eine Arbeit, welche gleich dem Produkt seiner Spannung (in Volt) und seiner Stromstärke (in Ampère) ist. Die Zahl der Watt (Voltampère) eines Stromes gibt also die in jeder Sekunde vom Strom geleistete, also zugleich die vom Konsumenten verbrauchte elektrische Energie an. Diese mit der ganzen Verbrauchszeit multipliziert, gibt die gesamte verbrauchte Energie. Die Verbrauchszeit wird gewöhnlich in Stunden gerechnet, und daher ist die Zahl der Wattstunden dasjenige, was der Verbrauchsmesser konstatieren soll. Wäre die Spannung des Verteilungsnetzes durchaus konstant, sagen wir 110 Volt, so brauchte der Verbrauchszähler nur die Zahl der Ampèrestunden zu messen (Produkt aus der Stromstärke und der Zeit). Denn diese Zahl der Ampèrestunden mit 110 multipliziert gibt dann die Zahl der Wattstunden. Gewöhnlich aber ist die Spannung der Anlagen nicht so absolut konstant und es müssen daher

Fig. 444.



Apparate benutzt werden, die direkt die Wattstunden messen, weil das diejenige Größe ist, für deren Lieferung die Gesellschaft einen Geldaufwand, meistens in Form von Kohlenverbrennung, zu machen hat und die daher der Konsument nach festgesetztem Einheitspreis zu bezahlen hat.

Der Wattstundenzähler von Aron mißt die Wattstunden dadurch, daß er das Produkt aus den Ampère und den Volt, also die Watt durch die Kraft bestimmt, welche zwei stromdurchflossene Rollen aufeinander ausüben, und die Zeit zugleich durch ein Pendel mißt. Zu dem Zweck sind in dem Apparat (Fig. 444) zwei Pendel angebracht, von gleicher Länge und gleichem Gewicht, von denen jedes auf ein Uhrwerk wirkt. Wenn die beiden Pendel nur unter dem Einfluß der Erdschwere schwingen, wie es gewöhnlich

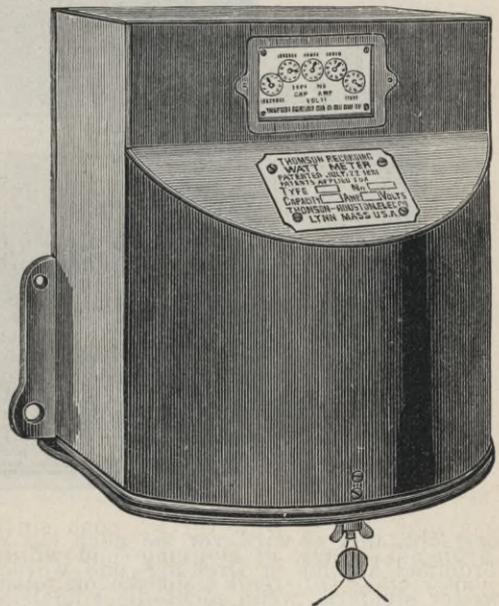
der Fall ist, so gehen beide gleich rasch, die beiden Uhrwerke haben dasselbe Tempo. Mit den beiden Uhrwerken ist nun ein Zeiger so verbunden, daß er nur durch die Differenz ihrer Geschwindigkeiten in Bewegung versetzt wird. Solange also nur die Erdschwere auf beide Pendel wirkt, bewegt sich der Zeiger nicht, trotzdem beide Pendel schwingen. Nun ist aber das Ende des einen Pendels (in der Figur

des rechten) mit einer Drahtrolle aus feinem Draht versehen und unterhalb derselben befindet sich, fest aufgestellt, eine Drahtrolle aus dickem Draht. Geht durch jede dieser Rollen ein Strom hindurch, so wirken diese ja aufeinander mit einer Kraft, die von dem Produkt der Stromstärke abhängt und die wir als elektrodynamische Kraft früher kennen gelernt haben. Das Pendel steht jetzt also unter der Wirkung zweier Kräfte, nämlich der Erdschwere und der elektrodynamischen Kraft der Ströme, und es schwingt infolgedessen rascher. Dadurch kommt nun aber der Zeiger in Bewegung und man sieht leicht ein, daß sein Weg gerade von dem Produkt aus den beiden Stromstärken und der Dauer des Stromes abhängt.

Durch die feste Rolle wird nun der Hauptstrom selbst geschickt, die bewegliche Rolle aber ist direkt zwischen die beiden Hauptleitungen des Hauses eingeschaltet. Da nun ihr Widerstand unveränderlich ist, so ist der Strom, der die bewegliche Rolle durchfließt, nur abhängig von der Spannung zwischen den Hauptleitern und daher ist die elektrodynamische Kraft zwischen den beiden Rollen von dem Produkt der Spannung und der Stromstärke, also direkt von den zu messenden Watt abhängig. Das Differentialuhrwerk mißt daher das Produkt aus den Watt und der Zeit, also die Wattstunden. Die Zifferblätter geben direkt die Energie und zwar in Hektowattstunden an, indem das erste die Einer, das zweite die Zehner u. s. w. der Hektowattstunden zeigt. Zugleich sieht man, daß dieses Instrument nicht bloß für Gleichstrom, sondern auch für Wechselstrom geeignet ist. Denn die Kraft zwischen den Strömen in den beiden Rollen ist dieselbe, wenn der Strom in beiden zugleich umgekehrt wird.

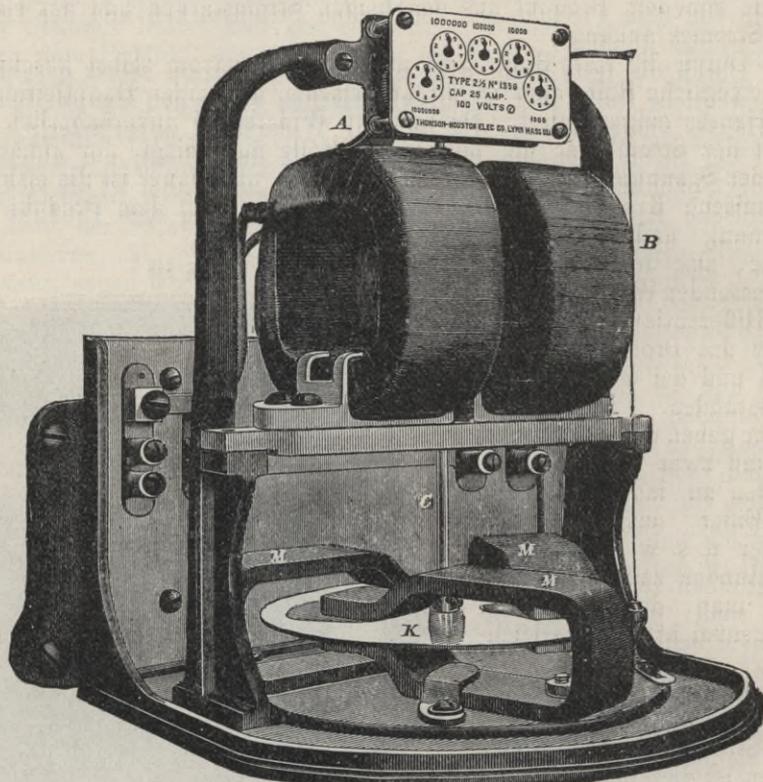
Ein anderer sehr brauchbarer und verbreiteter Elektrizitätszähler, der aus Amerika herübergekommen ist, ist der Thomson-Houston-Zähler, welcher von der Elektrizitäts-Gesellschaft Union (U.E.G.) in Berlin verbreitet wird. Derselbe ist in Fig. 445 in geschlossener Form abgebildet; in Fig. 446 sieht man die innere Einrichtung. Der Zähler ist ein Elektromotor ohne Eisen, der eine Kupferscheibe zwischen Magnetpolen dreht. Die Arbeit des Stromes wird zur gleichmäßigen Drehung dieser Scheibe, die ja durch die Magnetpole gedämpft wird (S. 226), ver-

Fig. 445.



wendet, und die Geschwindigkeit dieser Drehung ist daher ein Maß für die verbrauchten Watt. An Stelle der Feldmagnete eines Elektromotors sieht man hier zwei Spulen A und B von dickem Draht, durch welche der Hauptstrom geleitet wird. Zwischen ihnen befindet sich der Anker, auch ohne Eisen, aber in Form einer Trommel gewickelt, mit vertikaler Achse c. Die Trommelwicklung wird zwischen die Leitungen eingeschaltet, zwischen denen die betreffende Spannung

Fig. 446.



herrscht, und es wird vor sie noch ein Widerstand vorgeschaltet. Die Trommel kommt in Drehung und würde ihre Geschwindigkeit immer weiter steigern, wenn nicht die eingeleitete Energie zur Leistung einer Arbeit verbraucht würde. Diese Arbeit besteht in der Drehung der unten sichtbaren Kupferscheibe K zwischen den Polen der drei Hufeisenmagnete M M M. Der Anker und die Scheibe kommt also in gleichmäßige Drehung und treibt dadurch mittels Zähnen die Räder, welche ihre Zeiger auf den Zifferblättern oben haben, an denen man nun direkt Wattstunden abliest, wenn der Apparat auf diese abgeglichen ist. Das geschieht durch Veränderung des Vorschaltwiderstandes oder durch Lagenänderungen der Magnetpole. Für Wechselströme und Dreh-

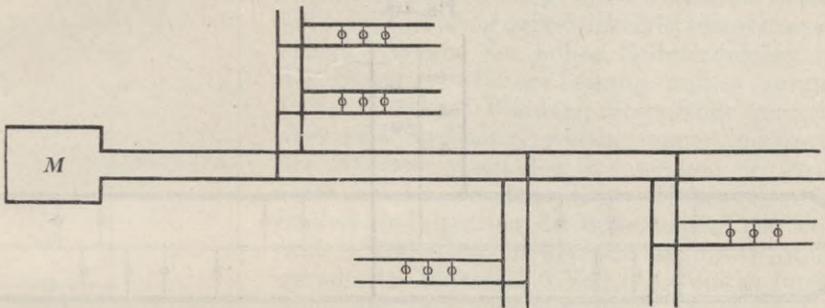
ströme wird ein ähnlicher Apparat mit einem Induktionsmotor (S. 478) benutzt.

Auf gleichen oder ähnlichen Prinzipien beruhen die meisten sonst in Gebrauch stehenden Elektrizitätszähler.

Bisher hatten wir immer angenommen, daß die Zuleitung des Stromes von der Zentrale nach den einzelnen Verbrauchsstellen so geschieht, daß von der Maschine die beiden Hauptleiter, von etwa 110 Volt Spannung, ausgehen, daß von diesen sich für die einzelnen Straßen oder Häuserkomplexe wieder je zwei Leiter abzweigen und so weiter. Das Schema dieser Leitungsführung ist in Fig. 447 angegeben. Man nennt dieses System das Zweileitersystem.

Dieses System ist zwar das einfachste und übersichtlichste, aber zugleich für größere Entfernungen ein sehr teures. Denn da die Hauptleitungen den Strom für alle Verbrauchsapparate führen müssen, also

Fig. 447.



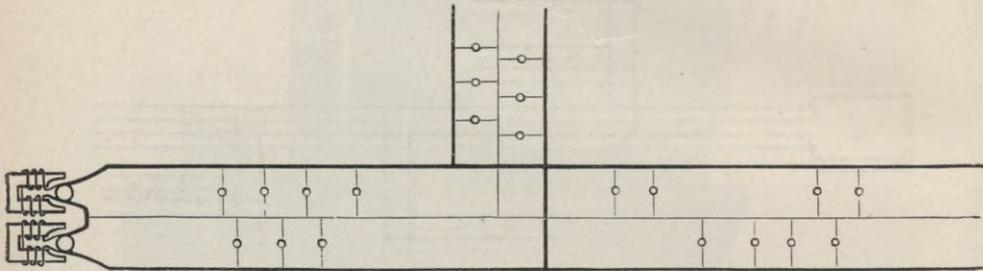
sehr große Stromstärken vertragen müssen, so müssen sie außerordentlich geringen Widerstand haben, damit einerseits nicht zu viel Joulesche Wärme entwickelt wird und damit andererseits der Spannungsverlust vom Anfang der Leitung bis zum Ende ein geringer ist, wie er es bei dem System der Parallelschaltung auch nur sein darf. Daher muß man sehr dicke Kupferstäbe als Leitungen nehmen, und es hat sich gezeigt, daß man nicht mehr ökonomisch mit dieser Verteilung arbeiten kann, wenn die letzte Lampe mehr als 800 m von der Maschine entfernt ist. Das Zweileitersystem eignet sich also nur für Bezirke bis zu 800 m Radius.

Um größere Bezirke mit Strom versorgen zu können, gingen Edison und Hopkinson zu einer Kombination über, die sich als sehr vorteilhaft erwiesen hat und die man das Dreileitersystem nennt. Bei diesem werden in der Zentrale zwei Maschinen, die je 110 Volt Spannung an ihren Klemmen haben, hintereinander geschaltet, so daß an ihren äußeren Klemmen 220 Volt Spannung herrschen. Von den beiden Endklemmen, aber auch von den miteinander verbundenen Mittelklemmen geht nun je eine Leitung durch die Stadt. Die mittlere Leitung nennt man die Kompensationsleitung. Zwischen die Mittelleitung und die eine resp. die andere der Hauptleitungen werden nun die Lampen, Motoren etc. parallel geschaltet, wie es Fig. 448

zeigt, so daß diese an ihren Enden doch nur 110 Volt Spannung besitzen. Aber die beiden Hauptleitungen können jetzt, da sie die Verbrauchsenergie bei doppelter Spannung führen, geringeren Querschnitt haben. Allerdings kommen noch die Kosten der doppelten Maschine, der Mittelleitung und der größeren Zahl von Regulierungs- und Meßapparaten hinzu, so daß dieses System sich doch nur für eine Fläche bis zu 1200 m Radius als vorteilhaft erweist. Dabei konstruiert man übrigens jetzt häufig die Motoren für 220 Volt Spannung, so daß man diese direkt zwischen die beiden Außenleiter einschaltet. Man bemüht sich auch, Glühlampen für 220 Volt herzustellen, doch bisher noch ohne viel Erfolg. Nur die Nernstlampen werden leicht für 220 Volt konstruiert.

Wenn man zwei solche Dreileitersysteme hintereinander schaltet, also 4 Maschinen und 5 Leiter benutzt, so kommt man zu dem Fünfleitersystem, welches nun noch größere Flächen mit Strom zu ver-

Fig. 448.

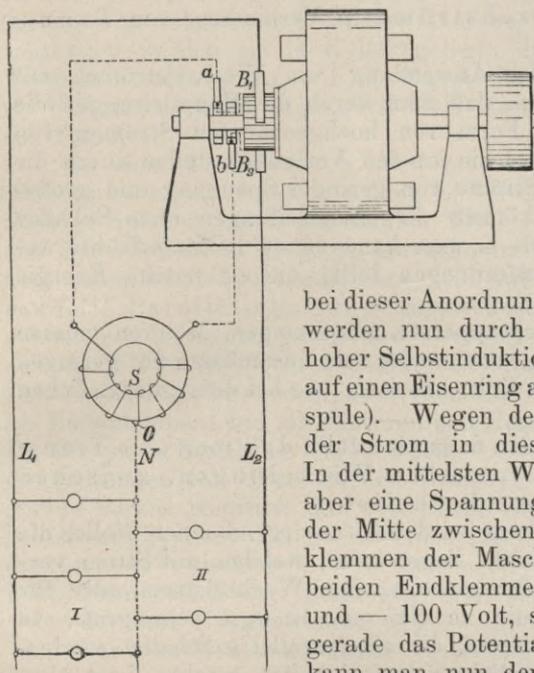


sorgen gestattet, welches aber bereits sehr unübersichtlich ist. Bei diesen Stromverteilungen werden die Maschinen möglichst in der Mitte des Netzes aufgestellt, welches mit Strom zu versorgen ist. Gewöhnlich wird jetzt auch noch in dem Maschinenhaus eine Akkumulatorenbatterie aufgestellt, wodurch, da die Akkumulatoren in den Zeiten des geringsten Strombedarfs geladen werden, eine rationelle Ausnutzung der Maschinenanlage möglich ist, die auch an sich dadurch kleiner gewählt werden kann.

Beim Dreileitersystem, das bei einigermaßen großen Anlagen mit Gleichstrom jetzt immer gewählt wird, braucht man zunächst zwei Dynamomaschinen für je 110 Volt Spannung. Man kann aber auch statt dessen eine Akkumulatorenbatterie von 220 Volt Spannung mit einer einzigen Dynamomaschine für 220 Volt Spannung anwenden. Dann läßt man nämlich die Akkumulatoren von der Maschine laden und führt von den Endklemmen der beiden äußersten Akkumulatorenzellen und von der mittelsten Zelle aus die drei Drähte durch die Stadt. Man hat sich vielfach bemüht, bei dem Dreileitersystem auch in Fällen, wo keine Akkumulatorenbatterie vorhanden ist, mit einer einzigen Dynamomaschine von 220 Volt auszukommen. Das wird jetzt sicher und ohne große Verteuerung der Maschinen erreicht durch den sogenannten Spannungsteiler, der von der Allgemeinen Elektrizi-

täts-Gesellschaft (A.E.G.) in Berlin konstruiert wird. Es werden nämlich bei einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine für 220 Volt zwei

Fig. 449.



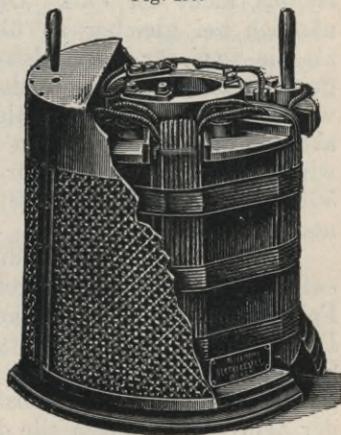
einander gerade gegenüberliegende Spulen des Ankers (Trommel oder Ring) verbunden mit zwei Schleifringen auf der Achse, an welchen Bürstenschleifen. Wir wissen, daß in jeder einzelnen Spule bei der Rotation Wechselströme erzeugt werden. Es gehen daher auch von den Bürsten

bei dieser Anordnung Wechselströme aus. Diese werden nun durch eine feststehende Rolle von hoher Selbstinduktion geleitet, welche am besten auf einen Eisenring aufgewickelt ist (eine Drosselspule). Wegen der hohen Selbstinduktion ist der Strom in dieser Leitung immer gering. In der mittelsten Windung dieser Rolle herrscht aber eine Spannung, welche immer gerade in der Mitte zwischen den Spannungen der Endklemmen der Maschine liegt. Haben also die beiden Endklemmen die Spannungen 100 Volt und — 100 Volt, so herrscht an dieser Stelle gerade das Potential 0 Volt. An diesen Punkt kann man nun den Mittelleiter im Dreileiter-

system ohne weiteres anlegen. Fig. 449 zeigt diese Anordnung. Man sieht oben die Gleichstrommaschine mit ihrem gewöhnlichen Kommutator, an dem die Bürsten B_1 und B_2 schleifen. Außerdem sieht man die Schleifringe mit den Bürsten a und b , von denen der Wechselstrom zu dem Spannungsteiler S geht. An den Punkt O dieses Apparats wird der Mittelleiter N angelegt, während die beiden äußeren Leiter L_1 und L_2 von den Bürsten B_1 und B_2 ausgehen. Die Ansicht eines solchen Spannungsteilers, der wie ein Transformator gebaut ist und keine Bedienung braucht, da er keine beweglichen Teile enthält, zeigt Fig. 450.

Das Dreileitersystem ist äußerst bequem für die Verteilung der Energie und ist auch, wie erwähnt, bis zu Entfernungen von 1200 m rings um die Zentrale noch praktisch. Will man größere Bezirke mit Gleichstrom versorgen, so muß man mehrere Zentralen, wie es z. B. in Berlin der Fall ist, oder man muß Unterstationen errichten,

Fig. 450.



in denen Akkumulatorenbatterieen stehen, die nun selbst wieder ihren Bezirk mit Strom versorgen.

Vorteilhafter aber tritt für solche größere Entfernungen zwischen der Zentralstation und den Verbrauchsapparaten das System der Wechselströme oder Drehströme in Verbindung von Transformatoren ein.

Der große Vorzug der Anwendung von Wechselströmen mit Transformatoren beruht darin, daß man durch die Hauptleitungen die elektrische Energie in der Form von hochgespannten Strömen von geringer Intensität sendet und sie an den Verbrauchsstellen durch die Transformatoren wieder in Ströme von geringer Spannung und großer Intensität umsetzt. Daher können die Hauptleitungen ohne Schaden große Widerstände haben, d. h. man kann dünne Leitungsdrähte anwenden und auf weite Entfernungen billig die elektrische Energie fortleiten.

Die einzelnen Verbrauchsapparate, alle Lampen, Motoren müssen natürlich auch da unabhängig voneinander sein und müssen mit geringen Spannungen, gewöhnlich 110 Volt, arbeiten, wie bei dem gewöhnlichen Zweileitersystem.

Diese Forderungen werden dadurch erfüllt, daß man alle Transformatoren, d. h. deren primäre Wickelungen, zwischen die Hauptleitungen parallel schaltet.

Bei dieser Stromverteilung wird also an irgend einer Stelle, die auch ganz außerhalb des Bezirks liegen kann, welcher mit Strom versorgt wird, eine Maschine für gewöhnlichen Wechselstrom oder für Drehstrom aufgestellt. Ist die zu liefernde Energie sehr groß, so stellt man mehrere Maschinen auf, die alle parallel geschaltet werden, was allerdings lange Zeit ziemliche Schwierigkeiten machte, jetzt aber sich in sicherer Weise bewerkstelligen läßt. Die Ströme dieser Maschinen sendet man in die Hauptleitungen und zwar hat man bei einphasigem Wechselstrom zwei Hauptleitungen, bei Drehstrom aber drei Leitungen anzuwenden. Diese dritte Leitung scheint dem Drehstrom als Mangel gegenüber dem reinen Wechselstrom anzuhafte. Indessen ist das nicht der Fall. Die drei Leitungen für Drehstrom brauchen nämlich bei gleicher zu übertragender Energie nicht dicker zu sein, als die zwei für Wechselstrom. Das für die Leitung benötigte Kupfergewicht ist also das gleiche. Es ist nur die dritte Leitungsführung, welche bei der Drehstromleitung verteuern wirkt, ein Nachteil, der aber durch die sonstigen Vorzüge des Drehstroms weit überwogen wird. Man verwendet für die Hauptleitungen Ströme von 1000 bis 5000, ja auch bis 10 000 Volt Spannung, in Ausnahmefällen sogar noch mehr.

Die Hauptleitungen, die den hochgespannten Strom führen, werden entweder durch die Luft geführt oder unterirdisch verlegt. In letzterem Falle werden konzentrische Kabel angewendet, bei denen die eine Leitung die andere umgibt, im ersteren Falle werden die Drähte auf Stangen durch Isolatoren befestigt. Trotz der hohen Spannungen genügt diese Isolation meistens. So werden die Hauptleitungen von der Zentrale aus durch alle diejenigen Bezirke hindurchgeführt, welchen

Strom zugeführt werden soll. In jedem solchen Bezirk gehen nun von den Hauptleitungen Abzweigungen ab, welche zu je einem Transformator geführt werden, und zwar werden, wie gesagt, alle Transformatoren parallel geschaltet. Die Transformatoren werden bei Luftleitungen gewöhnlich in besondere Häuschen gestellt. Bei unterirdischen Leitungen werden sie in Keller gelegt. In jedem Falle werden die Transformatoren ebenso wie die Hauptleitungen so angebracht, daß sie für Unberufene nicht zugänglich sind, eben wegen der hohen Spannung des Stromes.

In dem Transformator wird nun die Energie des Stromes so transformiert, daß derselbe an den Enden der sekundären Klemmen nur niedrige Spannung hat, gewöhnlich 100 bis 110 Volt. Der Strom, der aus den sekundären Klemmen herauskommt, ist nun derjenige, welcher zum eigentlichen Verbrauch dient, und zwar wird natürlich hierbei die bewährte Parallelschaltung angewendet. Von den Endklemmen der sekundären Leitungen gehen also zwei oder drei parallele Hauptdrähte aus, die je 110 Volt Spannungsdifferenz haben, sie führen durch den Bezirk hindurch und zwischen sie werden alle Lampen, sowohl Glühlampen als Bogenlampen, und alle Motoren und Heizapparate parallel geschaltet. Da für jeden Bezirk ein eigener Transformator vorhanden ist, so haben die Leitungen für diese starken Nutzströme nur geringe Länge und gerade daraus resultiert die wesentliche Ersparnis in den Anlagekosten bei diesem System. Bei Drehströmen mit ihren drei Leitungen werden die Lampen zwischen je zwei Leitungen eingeschaltet, während die Drehstrommotoren drei Leitungen brauchen, von denen je eine von jeder der drei Hauptleitungen abgezweigt wird.

Der eine Übelstand dieses Verteilungssystems besteht darin, daß die Transformatoren (ihre primären Wickelungen) auch vom Strom durchflossen werden müssen, selbst wenn in der sekundären Leitung gar kein Strom gebraucht wird. Da nun das Ummagnetisieren des Ringes immer Arbeit verbraucht, so muß diese Arbeit also während der ganzen 24 Stunden des Tages geleistet werden, während der Strombedarf nur an ca. 6 Stunden stattfindet. Dadurch wird ein ziemlich erheblicher Prozentsatz der elektrischen Energie nutzlos verbraucht. Ein zweiter sehr erheblicher Übelstand des Wechselstromsystems ist der, daß es keine Akkumulatoren für Wechselstrom gibt. Deswegen müssen die großen Maschinen Tag und Nacht arbeiten, obwohl der Verbrauch ja nur zu gewissen Stunden ein erheblicher ist. Bei Gleichströmen kann man, durch Aufspeichern des Stromes in den Akkumulatoren, die letzteren zur Stromabgabe in den Stunden geringen Bedarfs benutzen, während beim Wechselstrom und Drehstrom für die wenigen Lampen, die etwa in der Nacht brennen, die großen Maschinen dauernd im Betrieb sein müssen.

Trotz dieser Übelstände ist dieses Verteilungssystem, das unter anderem in Wien, in Rom, in Luzern, in Nürnberg, in Heilbronn, in Marienbad, in Amsterdam, am Gardasee und an vielen anderen Orten in dauerndem Betrieb ist, für große Bezirke wesentlich billiger und vorteilhafter als das Gleichstromsystem, und da die Drehstrommotoren jetzt sogar den Gleichstrommotoren den Rang abgelaufen haben, so ist

das Drehstromsystem als ein mindestens gleichberechtigter, ja häufig überlegener Faktor neben die verschiedenen Gleichstromsysteme für die Verteilung elektrischer Energie getreten. Da nun diese beiden Systeme, jedes bei besonderen Verhältnissen, ihre besonderen Vorzüge besitzen, so macht dadurch die Verteilung elektrischer Energie unter den verschiedensten örtlichen Verhältnissen jetzt immer weitere Fortschritte. Insbesondere werden in der neuesten Zeit die Zentralen in großen Städten mit Vorliebe nach dem Drehstromsystem mit Transformatoren eingerichtet.

10. Kapitel.

Die elektrischen Bahnen, Boote und Automobile.

Seitdem die Elektrizität einmal in die Reihe der schwere Arbeit verrichtenden Kräfte eingetreten und durch ihre leichte und rasche Fortpflanzungsfähigkeit im stande war, ihre Arbeit weit von dem Orte zu verrichten, an dem sie erzeugt wurde, seit dieser Zeit lag auch die Möglichkeit vor, die Elektrizität zur Beförderung von Eisenbahnen, Trambahnen, Wagen, Booten u. dergl. zu verwenden, und diese Einführung der Elektrizität in das Gebiet des Transportwesens hat schon jetzt bei diesem neue und bequeme Formen hervorgebracht und wird voraussichtlich noch weiter zu einer Umgestaltung und Vervollkommnung desselben führen.

Schon im Jahre 1879 hatten Siemens & Halske die erste elektrische Eisenbahn bei der Gewerbeausstellung in Berlin hergestellt. Das Prinzip der elektrischen Eisenbahnen, deren Idee zuerst von Werner Siemens ausgesprochen und ausgeführt wurde, ist folgendes: Wenn ein elektrischer Strom von außen in eine Dynamomaschine, einen Elektromotor, eingeführt wird, so kommt der Anker derselben in Rotation. Überträgt man nun die Rotation der Achse des Ankers in irgend einer Weise auf Räder, welche auf Schienen laufen können, und führt man in den Elektromotor irgendwie einen Strom ein, so müssen sich die Räder mit dem Elektromotor und einem fest mit ihnen verbundenen Wagen auf den Schienen fortbewegen, und die elektrische Eisenbahn ist fertig.

Es ist also dieses Problem der elektrischen Eisenbahn ein spezieller Fall des Problems der elektrischen Arbeitsleistung und Kraftübertragung. Ein elektrischer Strom wird irgendwo erzeugt (sei es durch eine Dynamomaschine, die irgendwo in der Nähe der Bahn steht, sei es durch Akkumulatoren oder Batterien), er wird in den Motor des Eisenbahnwagens eingeleitet, und dadurch kommt dieser in Bewegung. Das ist also prinzipiell nichts anderes als jede andere elektrische Kraftübertragung.

Aber bei dieser speziellen Aufgabe treten besondere Schwierigkeiten auf, deren hauptsächlichste die ist: Wie soll man dem Eisenbahnwagen (dem Motor) den elektrischen Strom zuführen? Bei einer feststehenden Kraftübertragungsanlage hat man eine bestimmte Entfernung zwischen der primären Dynamomaschine und dem Elektromotor, und man kann diese daher durch festliegende Drähte verbinden. Bei

einer elektrischen Eisenbahn aber bewegt sich der Motor, und sein Abstand von der primären Dynamomaschine ist kein fester, es muß also auch die Leitung für den Strom veränderliche Länge haben. In der Tat ist dies die schwierigste Frage bei dem elektrischen Eisenbahnbetrieb.

Der nächste Gedanke ist natürlich der, daß man die Schienen selbst zur Leitung des Stromes benutzt, und dies wurde auch von Siemens & Halske bei der obenerwähnten ersten elektrischen Eisenbahn getan.

Bei dieser enthielt jeder elektrische Eisenbahn- oder Trambahnwagen in seinem Unterteil den Elektromotor, dessen Achse mit den Rädern des Wagens so verbunden war, daß er seine Bewegung durch Zahnräder auf die Räder des Wagens übertrug. In den Motor wurde ein Strom eingeführt, der von der primären Dynamomaschine kam. Diese selbst stand fest in der Nähe der Bahn neben einer großen Dampfmaschine, von der sie ihre Rotation erhielt. Der Strom von der primären Maschine wurde durch die Schienen dem Elektromotor, der sekundären Maschine, zugeführt, und zwar waren drei Schienen vorhanden. Auf den beiden äußeren bewegten sich die Räder, die mittlere diente allein für die Zuführung des Stromes. Von dieser wurde der Strom durch Rollen in die Dynamomaschine eingeführt und ging dann, nachdem er die Drähte des Ankers und der Elektromagnete durchlaufen hatte, durch die Wagenräder zu den äußeren Schienen und durch diese zur primären Maschine zurück.

Doch zeigte es sich bald, daß es nur in speziellen Fällen möglich ist, die Schienen zur Stromleitung zu benutzen. Bei feuchtem Wetter nämlich und auch wenn Schnee zwischen den Schienen liegt, sind die mittlere und die äußeren Schienen leitend verbunden, und es wird dadurch der Strom, der durch die Leitung geht, zu sehr geschwächt. Deshalb begann man bald nach anderen Mitteln zu suchen, um den Strom in einen Wagen sicher und ohne Verlust einzuführen.

Im Laufe der Entwicklung der elektrischen Eisenbahn wurden nun verschiedene Methoden für die Zuleitung der Elektrizität gefunden, und zwar sind es bisher drei verschiedene Systeme, durch die man elektrische Eisenbahnen betreibt, nämlich das System der oberirdischen Zuführung des Stromes, das System der unterirdischen Zuführung und endlich das System ohne Zuführung des Stromes aus der Ferne, nämlich das System der Akkumulatorbahnen.

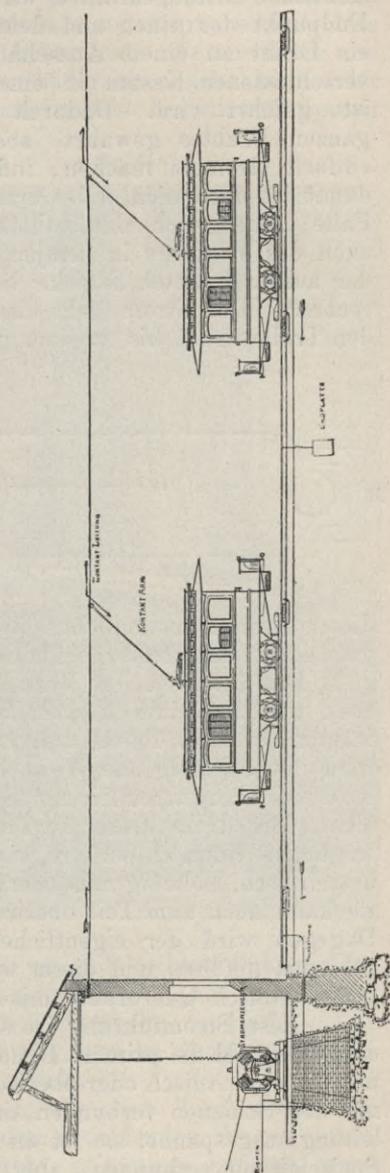
Die oberirdische Stromzuführung wurde schon von Siemens & Halske bei einer ihrer ersten Anlagen, nachdem sich die Schienenleitung als unzureichend erwiesen hatte, eingeführt, wurde aber dann namentlich in Amerika, wo das elektrische Straßenbahnsystem zuerst die meisten Fortschritte gemacht hatte, weiter ausgebildet und ist von dort wieder nach Europa übergegangen. In der Mehrzahl aller Fälle ist es dieses System, welches bei Trambahnen und Eisenbahnen jetzt angewendet wird. Bei diesem System wird über den Schienen ein besonderer blanker Draht ausgespannt, durch welchen der Strom von der Maschine fließt. Diesen Draht, Arbeitsleiter oder Trolleydraht genannt, berührt nun ein mit dem Wagen verbundener Arm fortdauernd und leitet da-

durch den Strom in den Wagen, also in den im Wagenuntergestell befindlichen Elektromotor. Von diesem aus geht der Strom dann durch die Schienen wieder zur Dynamomaschine zurück, womit der Stromkreis geschlossen ist. Laufen auf einer Bahn, wie gewöhnlich, mehrere Wagen zu gleicher Zeit, so sind diese infolgedessen alle parallel geschaltet, wie man aus Fig. 451 erkennt. Links steht die primäre Dynamomaschine; die beiden Hauptleitungen, die von dieser ausgehen, sind: oben der Arbeitsleiter, unten die Schienen, und zwischen beiden sind alle Wagenmotoren nebeneinander geschaltet.

Es befindet sich also bei diesem System auf der Decke jedes Wagens ein Arm, gewöhnlich aus Stahlrohr gefertigt, welcher oben eine Kontaktrolle trägt, die längs dem Arbeitsleiter rollt und von diesem den Strom abnimmt. Der Arm ist nun mit starken Federn unten versehen, so daß die Rolle immer an den Arbeitsdraht herangedrückt wird, auch wenn dieser zwischen zwei Befestigungspunkten durchhängt, also nicht überall dieselbe Höhe über den Schienen hat, oder wenn er, wie bei Viadukten, besonders niedrig gespannt ist. Der federnde Arm muß immer die Kontaktrolle an den Leiter anpressen. Man bezeichnet dieses System des Arbeitsleiters mit einer Kontaktrolle als das Trolleysystem.

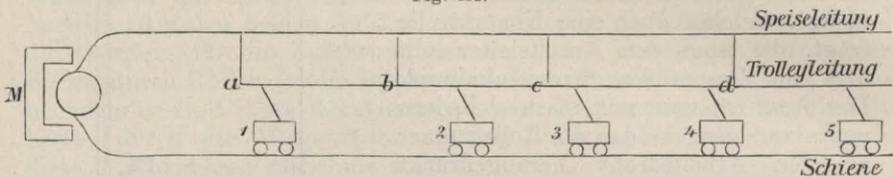
So einfach aber läßt sich das Trolleysystem nur in wenigen Fällen verwenden. Wenn durch den Arbeitsleiter fortlaufend und ununterbrochen der Strom gesendet wird, so können beim wirklichen Betrieb Schwierigkeiten entstehen. Es kann z. B. durch einen Brand notwendig sein, eine Rettungsleiter aufzustellen, den Draht durchschneiden und entfernen zu müssen, oder es kann der Draht verletzt werden und reißen. Dadurch müßte der Betrieb so lange auf der ganzen Strecke eingestellt werden, bis das Hindernis sachgemäß beseitigt ist. Um solche Störungen zu beschränken, wird der Arbeitsdraht in einzelne Strecken von 200—500 m

Fig. 451.



Länge, je nach der Straßenlage, geteilt, und an diesen Teilungsstellen wird in den Arbeitsleiter selbst ein isolierendes Stück eingesetzt. Die elektrische Verbindung aber zwischen den an dieser Stelle zusammen-treffenden Leitungsdrähten wird dadurch hervorgebracht, daß von dem Endpunkt des einen und dem Anfangspunkt des nächsten Stückes je ein Draht zu einem Ausschalter (S. 398), der gewöhnlich in einem verschlossenen Kasten in einem nahe befindlichen Hause angebracht ist, geführt wird. Dadurch ist der elektrische Zusammenhang des ganzen Drahtes gewahrt, aber man kann nun eine solche Strecke einfach stromlos machen, indem man die Ausschalter öffnet. Aber damit ist noch nicht alles erreicht. Denn offenbar findet in solchem Falle immer noch eine vollständige Unterbrechung des Stromes, also auch des Verkehrs in demjenigen Teile der Leitung statt, der hinter der ausgeschalteten Strecke liegt, von der Maschinenstation aus ge-rechnet. Der Strom geht eben dann von der Maschinenstation durch den Trolleydraht bis zu dem geöffneten Ausschalter und durch die auf

Fig. 452.



dieser Strecke befindlichen Wagen zur Erde. Aber die hinter dem geöffneten Ausschalter befindlichen Wagen erhalten keinen Strom.

Das Interesse des Verkehrs verlangt aber, daß in solchen Fällen eben nur auf einer kleinen Strecke der Betrieb unterbrochen wird, während er sonst überall aufrecht erhalten werden soll. Diese Forderung wird nun auf folgende Weise erfüllt. Von der primären Maschine aus wird eine Hauptstromleitung (Speiseleitung) gelegt, welche nur dazu dient, den Strom weiter zu führen, welche aber nicht von einem beweglichen Kontakt berührt wird. Diese Leitung kann oberirdisch oder unterirdisch, beliebig nah oder weit von den Schienen geführt werden, sie kann auch zum Teil oberirdisch, zum Teil unterirdisch gelegt sein. Dagegen wird der eigentliche Kontaktleiter (Trolleyleiter) über den Schienen geführt, und dieser wird in gewissen Abständen, alle 100 bis 200 m, durch Querdrähte mit dem Speiseleiter verbunden.

Diese Stromführung ist schematisch in Fig. 452 dargestellt. In dieser zeigt M die primäre Dynamomaschine an, deren Bürsten einerseits mit der unterirdisch oder oberirdisch gelegten Speiseleitung, andererseits mit den Schienen verbunden sind. Über den Schienen ist die Trolleyleitung ausgespannt; sie ist an verschiedenen Punkten a, b, c, d mit der Speiseleitung verbunden, aber von den Schienen ist sie isoliert. Solange kein Wagen fährt, fließt auch kein Strom durch die Trolleyleitung. Fahren nun die Wagen 1, 2, 3, 4, 5, so bildet jeder durch Vermittlung des Trolleyleiters eine Verbindung zwischen Schienen und Speiseleitung und jeder erhält, da sie alle parallel geschaltet sind, seinen

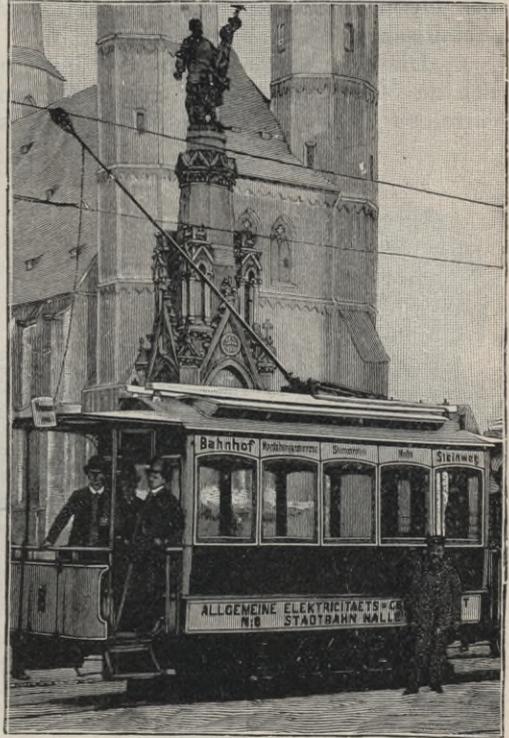
Teil des ganzen Stromes. Durch diese Einrichtung ist erstens jede Störung in einem Arbeitsleiter nur auf die Strecke von 100 bis 200 m beschränkt. Wenn der Trolleyleiter an einer Stelle bricht oder entfernt werden muß, so geht der Strom trotzdem durch die Speiseleitung und wird den anderen Sektionen des Trolleyleiters zugeführt, so daß also die einzelnen Wagen doch ihren Strom bekommen. Ferner kann die Speiseleitung zum Schutz gegen alle Beschädigungen sehr hoch oder unterirdisch angebracht werden. Drittens braucht bei diesem System der Trolleyleiter nur so dick zu sein, wie er zur sicheren Führung der Rolle notwendig ist. Er braucht nicht, wenn sehr starke Ströme (bei vielen gleichzeitig fahrenden Wagen) notwendig sind, so stark zu sein, daß er diese Ströme ohne großen Verlust aufnehmen kann. Denn der Hauptstrom geht durch die Speiseleitung, und jede Sektion des Trolleyleiters wird nur von Zweigströmen durchflossen.

Der Trolleyleiter wird gewöhnlich an Drahtseilen aufgehängt, die entweder über die Straße gespannt werden und an den Häusern befestigt sind, oder die an besonderen Masten, welche neben den Schienen stehen, angebracht sind. Die Leitungsführung läßt sich dabei auch so einrichten, daß sie für das Auge gefällig ist. Bei Kurven und Weichen muß man natürlich sorg-

fältig den Trolleyleiter so spannen, daß er eine sichere Führung für die Rolle gibt, damit diese nicht herauspringt. Fig. 453 zeigt einen solchen elektrischen Trambahnwagen der Stadtbahn in Halle. Man sieht die Stange mit der Kontaktvorrichtung, welche von der Wagen-
decke aus sich gegen den Trolleyleiter drückt.

Die Rolle kann natürlich zuweilen von dem Trolleyleiter abspringen. Dann ist die Stromzufuhr zu dem betreffenden Wagen unterbrochen. Wenn der Wagen im Gefälle geht, so kann er dadurch, wenn man ihn nicht sofort bremst, ins Laufen kommen und Unglück anrichten. Deswegen wird von Siemens & Halske und anderen Firmen bei ihren Anlagen statt der Gleitrolle ein Gleitbügel angewendet, bei dem ein solches Abspringen nicht vorkommen kann. Der Gleit-

Fig. 453.

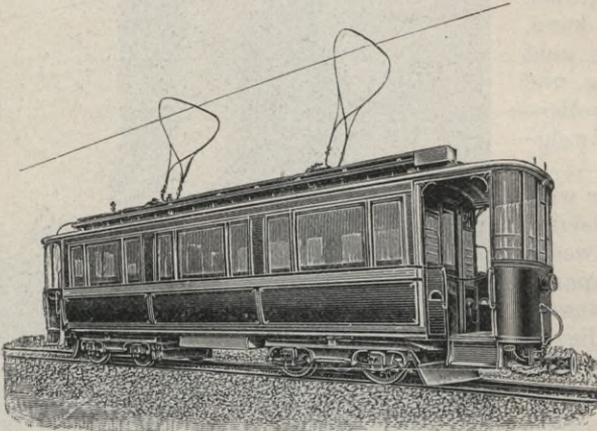


bügel, von denen zwei an dem Wagen Fig. 454 angebracht sind, ist wie die Rolle an einem beweglichen Arm befestigt und wird von unten gegen den Trolleydraht gedrückt. Die Länge der Kontaktfläche des Bügels verhindert im Gegensatz zu der kleinen Kontaktfläche der Rolle das Abspringen vollständig. Außerdem brauchen die Kurven in der Trolleyleitung nicht so eng sich den Schienenkurven anzuschließen, so daß die Führung des Trolleydrahtes einfacher wird.

Da die Schienen immer die Rückleitung des Stromes zur Station übernehmen müssen, so muß man dafür sorgen, daß sie in gutem Kontakt miteinander stehen. An den Stößen werden daher zwei Schienen bei elektrischen Bahnen gewöhnlich durch angelötete Kupferbleche metallisch miteinander verbunden.

Die Spannungsdifferenz der Hin- und Rückleitung wird gewöhnlich zu 500 Volt gemacht und wird immer konstant erhalten. Da die einzelnen Trambahnwagen zwischen diesen beiden Leitungen parallel geschaltet sind, so

Fig. 454.



genügt das Konstanterhalten der Spannung, um einem jeden Motor, unabhängig von den anderen, den ihm notwendigen Strom zu verschaffen.

Ein vollbesetzter Trambahnwagen braucht pro Kilometer Fahrt auf ebener Bahn ungefähr 400 Wattstunden zugeführter Energie. Der Energiebedarf, also auch

der Strombedarf eines Trambahnwagens, ist aber nicht immer derselbe, sondern variiert sehr. Beim Angehen des Wagens von der Ruhe aus ist er etwa 5- bis 10mal so groß als beim Laufe auf horizontaler Strecke, bei Steigungen wird er natürlich größer, beim Herunterfahren auf geneigter Bahn geringer. Die Motoren für den Trambahnbetrieb müssen daher mit großer Zugkraft von der Ruhe aus angehen. Das leisten, wie wir S. 476 gesehen haben, am besten die Hauptstrommotoren, und deswegen werden diese fast allein bei Trambahnen angewendet. Dabei muß ein solcher Motor, da er unten am Wagengestell angebracht ist, ziemlich niedrig sein, und er muß außerdem, da er dem Straßenschmutz ausgesetzt ist, vollständig eingekapselt sein. Die Motoren werden daher für diese Zwecke so gebaut, daß das Magnetsystem einen vollständigen gußeisernen Kasten um den Anker herum bildet, der aber leicht geöffnet werden kann.

In Fig. 455 und 456 ist ein solcher Straßenbahnmotor der Union

(U.E.G.) mit aufgeklapptem Gehäuse und in geschlossenem Zustand dargestellt.

Die Motoren, deren Anker in Zahnäder auslaufen, treiben vermittels Zahnradübersetzung die Räder des Trambahnwagens. Die Geschwindigkeit des Motors ist gewöhnlich eine viel höhere, als die Wagenräder sie haben dürfen, und deswegen muß die Übersetzung eintreten.

Das Untergestell eines Trambahnwagens, wie er von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft hergestellt wird, zeigt Fig. 457. Man sieht hier zwei Dynamomaschinen (älterer Form und nicht eingekapselt), die federnd befestigt sind. Jeder Anker dreht zunächst ein kleines Zahnrad und dieses greift in ein größeres ein, welches nun die Wagenräder bewegt. Die Zahnäder laufen in Öl, um sich wenig abzunutzen und um das Geräusch zu vermindern. Auf dem federnd angebrachten viereckigen, aber vorn zugespitzten Eisenrahmen sitzt der eigentliche Waggon.

Um die Geschwindigkeit des Wagens regulieren zu können und um den Wagen nach Bedarf vorwärts oder rückwärts fahren zu lassen, ist am Platze des Wagenführers ein Regulierapparat, Kontroller oder Fahrshalter genannt, angebracht.

Auf einer zylindrischen Walze, die von dem Wagenführer durch eine Kurbel gedreht wird, sind übereinander eine Reihe von Kontaktstücken angebracht, auf welchen Federn schleifen können. Jedes Federpaar ist mit einem der Systemteile verbunden, welche nun durch den Kontroller in verschiedener Weise zusammengeschaltet werden sollen. Man sieht in Fig. 458 einen Kontroller für Straßenbahnzwecke der E.-G. Schuckert geöffnet in zwei Stellungen und nebenan das abgenommene Gehäuse. Die Kontaktstücke werden mit den Ankerdrähten, mit den Drähten der Magnetbewicklungen und mit Rheostatenwiderständen verbunden. Man kann nun die

Geschwindigkeit dadurch regulieren, daß Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet werden, oder dadurch, daß die Magnetbewicklung aus mehreren Teilen besteht, die parallel oder hintereinander geschaltet werden. Um den Motor rückwärts laufen zu lassen, muß man die

Fig. 455.

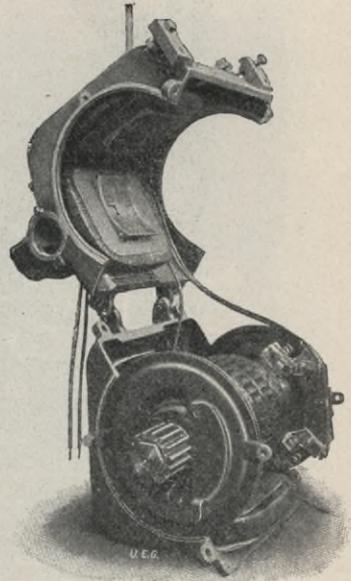
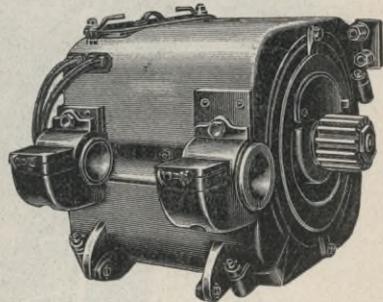


Fig. 456.



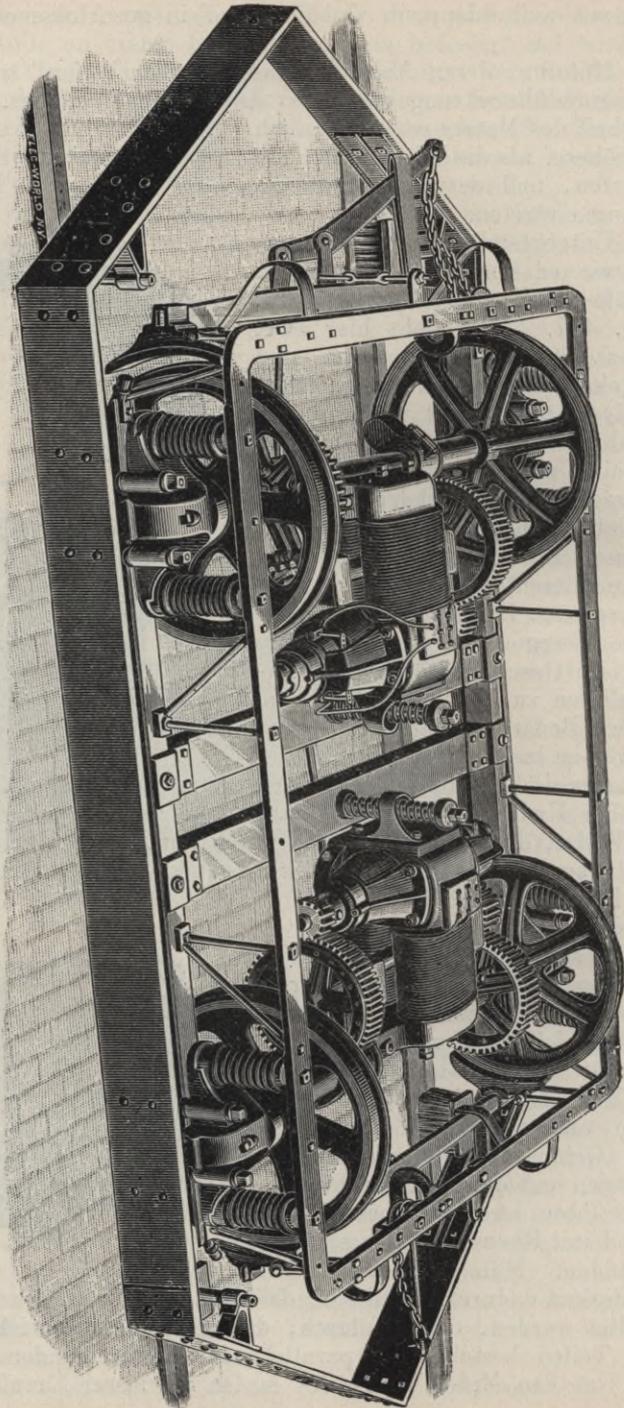
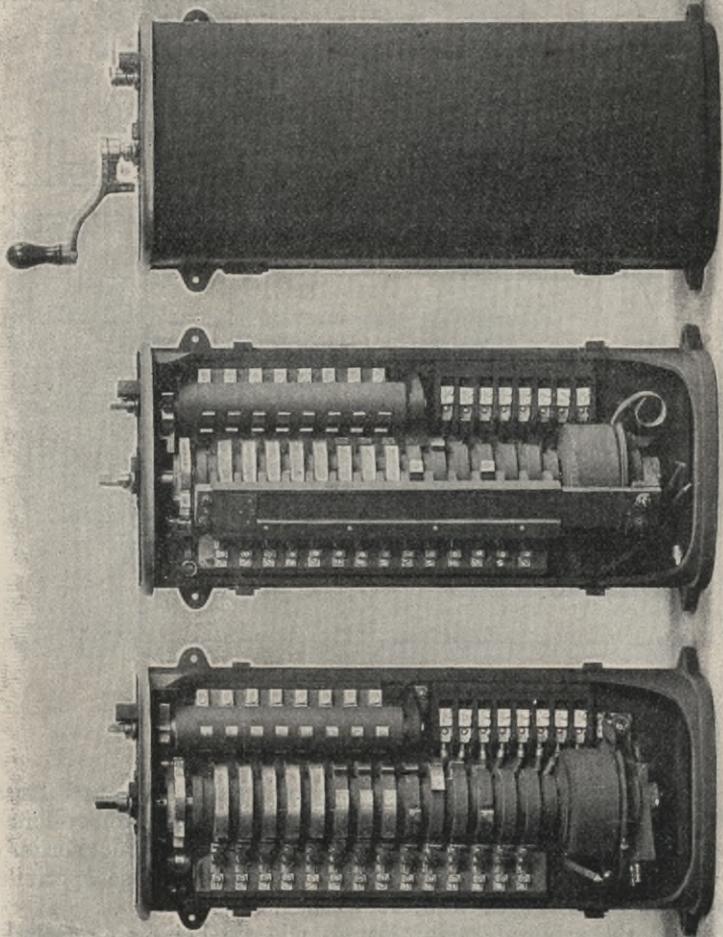


Fig. 457.

Stromrichtung im Anker oder in den Magneten umkehren, nicht in beiden zugleich. Zu dem Zwecke ist in dem Kontroller noch eine zweite Walze, die Reversierwalze, angebracht, die nur bei Strom-

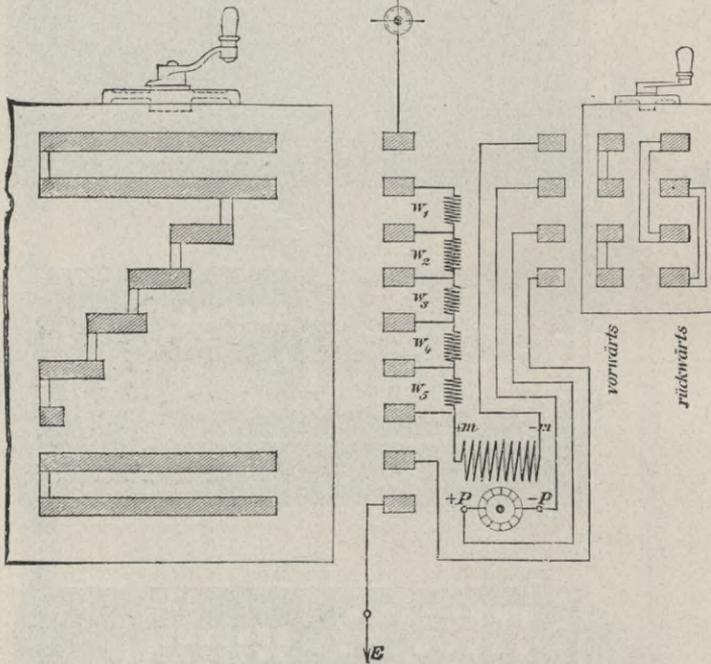
Fig. 458.



umkehrung benutzt wird. In Fig. 458 sieht man sie auf der rechten Seite. Ein einfaches Schema der Verbindungen bei dem Schuckertschen Kontroller mit Umkehrwalze zeigt Fig. 459. Links ist die Walze für die Änderungen der Geschwindigkeit, rechts die für die Umkehrung.

Der Strom kommt von oben in den Hebel herein. Bei der ersten Stellung sind alle Widerstände w_1 bis w_5 vor den Motor geschaltet, der aus der Magnetwicklung mm und dem Anker PP besteht. Man sieht, wie durch Weiterdrehen der Kurbel links die Widerstände allmählich ausgeschaltet werden, der Wagen also immer schneller läuft. Wenn bei der Umkehrwalze der Hebel nach links steht, läuft der Motor vorwärts, wird er nach rechts gestellt, so ist der Strom im

Fig. 459.

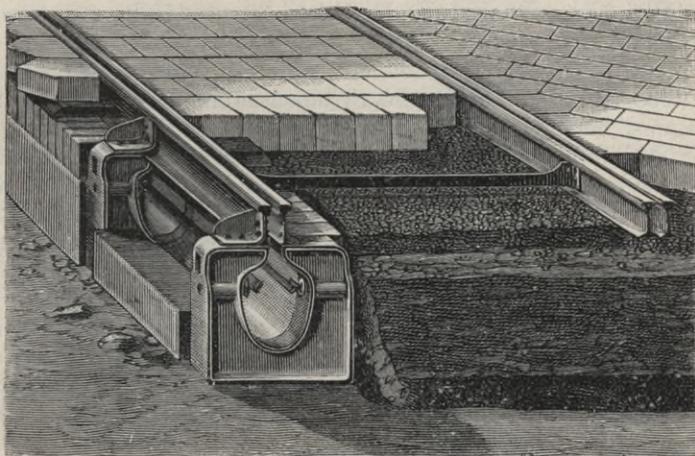


Anker umgekehrt und er läuft zurück. Da bei der Ein- und Ausschaltung der starken Ströme an den Kontaktstücken des Kontrollers leicht Funken und Lichtbogen entstehen, so muß man dafür sorgen, daß diese Funken rasch ausgelöscht werden. Doch soll diese spezielle Einrichtung hier nicht weiter erörtert werden.

Die oberirdische Stromzuführung, wie sie bei diesen Bahnen gebraucht wird, ist zwar durch die beschriebenen Einrichtungen recht sicher gemacht. Aber die Drähte, die über die Straßen dabei laufen müssen, und namentlich die vielen Querdrähte, welche den Trolleydraht tragen, machen im allgemeinen keinen sehr erfreulichen Eindruck, obwohl durch neuere Einrichtungen das ästhetische Gefühl nicht mehr in dem Maß beleidigt wird, wie es bei den älteren elektrischen Bahnen der Fall war, wo die von dem Wagen nachgeschleppten schlaffen Seile, die auf der Leitung liefen, das Gefühl der höchsten Unordentlichkeit und Unsicherheit erzeugten.

Bei der unterirdischen Stromzuführung ist nun eine solche Veränderung des Straßenanblicks ganz vermieden, allerdings auf Kosten einer erheblichen Verteuerung der Anlage. Ein solches Trambahn-system ist von Siemens & Halske in Budapest und zum Teil in Berlin und Wien eingerichtet worden. Bei dieser Anlage befindet sich unter der einen Schiene fortlaufend ein Kanal, wie aus Fig. 460 ersichtlich ist, dessen oberen Abschluß eben die eine Schiene bildet. Dieselbe besitzt in der Mitte eine Rille von 33 mm Weite, durch welche der Kanal für einen von dem Wagen herabreichenden Kontaktarm zugänglich ist. In dem Kanal sind nun zwei nackte Leitungen aus dickem Winkel-eisen angebracht, die also unterhalb der einen Schiene laufen. Zwischen diesen bewegt sich der Kontaktarm, bestehend aus einer gut isolierten

Fig. 460.



Platte, die an ihrem unteren Ende zwei drehbare Metallzungen trägt. Diese berühren die beiden Leitungen und führen so den Strom von der einen Leitung nach oben in den Motor des Trambahnwagens und von diesem zur anderen Leitung zurück. Die beiden Leitungen haben eine Spannungsdifferenz von 300 Volt. Es ist ersichtlich, daß dieses System von elektrischen Trambahnen sich dem Äußeren nach gar nicht von den gewöhnlichen Trambahnen unterscheidet, nur daß eben die Pferde nicht vorhanden sind. Die Anlagekosten sind dagegen natürlich höhere, weil der Kanal unterhalb des Straßenniveaus geführt werden muß. Besondere Vorrichtungen müssen dabei getroffen werden, um den Kanal von Wasser und Schnee und Schmutz zu befreien. Trotzdem sind die bisherigen Anlagen, die allerdings sehr rentable Linien umfassen, durchaus erfolgreiche. Für andere Verhältnisse aber wäre dieses System wohl meistens zu kostspielig.

Auf eine dritte Weise kann man Tramways elektrisch betreiben, indem man nämlich den Elektromotor durch Akkumulatoren speist und die Akkumulatoren mit dem Wagen fahren läßt. Bei diesen Akkumulatorenbahnen braucht man offenbar gar keine besondere Strom-

leitung. Jeder Wagen hat seine Kraftquelle mit sich, ganz wie ein bisheriger Trambahnwagen, nur daß bisher die Kraftquelle, nämlich die Pferde, vor dem Wagen, dort aber, die Akkumulatoren, in dem Wagen sich befinden.

In dieser Weise sind einige Tramways in Berlin, Hamburg, Brüssel, Paris einfach so umgewandelt worden, daß statt des Pferdebetriebs ein elektrischer Betrieb eingerichtet wurde. Der vorher geladene Akkumulator treibt, indem er selbst in dem Tramwaywagen sich befindet, die Dynamomaschine, welche ihrerseits die Räder des Wagens in Bewegung setzt. Nach einigen Stunden, wenn der Akkumulator erschöpft ist, wird er an einer Station durch einen neuen ersetzt. Da die Akkumulatoren dabei Stößen und Erschütterungen ausgesetzt sind, so müssen sie geschlossen sein, damit die Säure nicht verschüttet wird.

Die Bleiakkumulatoren in der Form, wie sie bisher zu stationären Anlagen verwendet wurden, eignen sich aber zunächst nur sehr wenig für den elektrischen Tramwaybetrieb. Erstens sind sie viel zu schwer und zweitens ist ihnen die starke Stromentnahme, die beim Anfahren eines Wagens, bei Steigungen und Kurven stets stattfinden muß, gefährlich. Die Akkumulatorbahnen haben deswegen mit großen Schwierigkeiten zu kämpfen, um auch nur mit den anderen elektrischen Bahnen konkurrieren zu können. Die Bestrebungen der Akkumulatorenfabriken, die auf Herstellung von brauchbaren Trambahnakkumulatoren seit Jahren gerichtet waren, haben Erfolge bisher insofern gehabt, als es gelungen ist, Battereien von viel geringerer Empfindlichkeit gegen Ladung und Entladung mit zu hoher Stromstärke zu konstruieren. So kann man jetzt bereits die Ladung, die ein Trambahnakkumulator für eine Stunde Arbeit braucht, ihm in einer Viertelstunde zuführen.

Da sich manche Städte gegen das Oberleitungssystem sträuben, weil die über die Straßen gespannten Drähte die Schönheit, namentlich der eleganten Straßen, beeinträchtigen, so ist man jetzt in manchen Orten, z. B. in Hannover und Wien, zu einem gemischten System übergegangen, welches die Akkumulatorbahn mit der Oberleitungsbahn verbindet. Es werden nämlich dabei in den äußeren Stadtteilen, die die Wagen zu durchfahren haben, die oberirdischen Drähte wie gewöhnlich gespannt, und der Strom wird von ihnen durch einen Kontaktarm in den Wagen geleitet. Im Wagen befindet sich aber selbst eine Akkumulatorenbatterie, welche parallel zum Motor geschaltet ist, also bei dieser Fahrt durch die äußeren Stadtteile selbst mit geladen wird. In der inneren Stadt dagegen oder in besonders vornehmen Straßen fehlt die Oberleitung und die vorher geladene Batterie treibt nun den Motor. Es kann natürlich dabei die Batterie, da sie nur auf kürzere Strecken Strom abzugeben hat, kleiner gewählt werden, und außerdem nimmt das Laden, da es während der Fahrt geschieht, keinen Aufenthalt in Anspruch. Der Kontaktarm wird beim Übergang von den äußeren Straßen zu den nicht mit Oberleitung versehenen einfach auf die Wagendecke umgelegt.

Die elektrischen Trambahnen empfehlen sich vor allen durch die Tatsache, daß der Maschinenbetrieb bedeutend billiger ist als der

Pferdebetrieb. Ferner dadurch, daß bei elektrisch betriebenen Bahnen auch zeitweilig weit größere Kräfte leicht zur Entwicklung kommen können als bei Pferdebahnen. Bei starken Steigungen z. B., bei denen man sonst Vorspannpferde benutzen muß, braucht der elektrische Motor nur mit stärkerem Strom, d. h. ohne eingeschaltete Widerstände zu laufen, um diese Kraft zu entwickeln. Die elektrischen Wagen können auch, wo es erlaubt ist, weit schneller fahren als die von Pferden gezogenen. Ferner kann ein elektrischer Wagen wegen des Fortfalls der Pferde größer gemacht werden als ein anderer Wagen, ohne die Straßen mehr zu sperren, und endlich kann man bei elektrischem Betrieb, wenn Andrang vorhanden ist, dem elektrischen (Motor-) Wagen andere Wagen anhängen oder man kann auch leicht viel mehr Wagen laufen lassen als bei normalem Betrieb, falls nur die primäre Dynamomaschine von vornherein groß genug gewählt ist. Dies sind Vorzüge, welche der weiteren Einführung des elektrischen Trambahnbetriebs zu Hilfe kommen. In der Tat hat sich auch überall, wo elektrische Trambahnen eingeführt sind, eine ganz außerordentliche Zunahme des Verkehrs gezeigt und, was für die Direktionen die Hauptsache ist, neben der beträchtlichen Erhöhung der Einnahmen pro Wagenkilometer ergab sich ausnahmslos eine beträchtliche Verminderung der Ausgaben. Daher wird der Pferdebetrieb in nicht zu langer Zeit gänzlich und überall durch den elektrischen Betrieb der Trambahnen verdrängt sein. In manchen Orten, in denen wegen der schwierigen Terrainverhältnisse eine Pferdebahn überhaupt nicht möglich war, weil sie unrentabel gewesen wäre, ist man sogar direkt zum elektrischen Trambahnbetrieb, ohne den sonstigen Umweg, gekommen, ebenso wie ja auch in vielen kleineren Orten sich die elektrische Straßenbeleuchtung zweckmäßig einführen ließ, ohne daß diese vorher Gasbeleuchtung gehabt hätten.

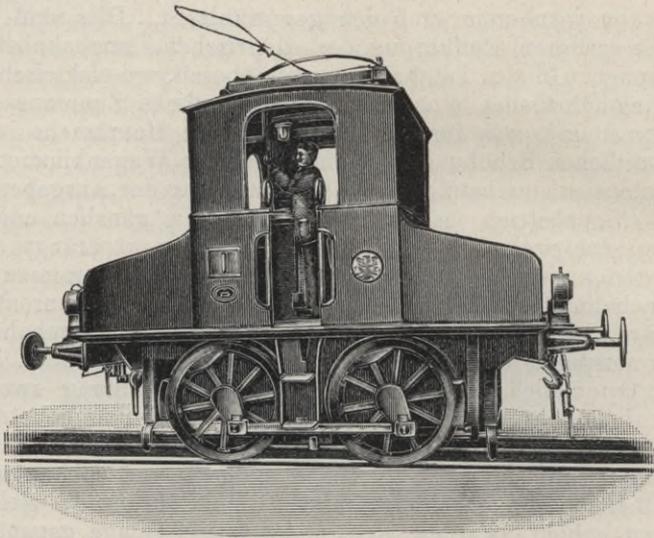
Der elektrische Betrieb beginnt nun auch vielfach für kleine Nebenbahnen, für landwirtschaftliche Bahnen und insbesondere für Bahnen in Bergwerken sich einzuführen. Die Führung der elektrischen Oberleitung erhöht zwar die Kosten der Geleisanlage gegenüber den gewöhnlichen Bahnen. Aber man braucht zur Erzeugung der Kraft nur eine einzige große Dampfmaschine stationär aufzustellen, welche viel weniger Kohlen pro Pferdekraft verbraucht als eine Lokomotive, und man erspart die sehr teuren Dampflokomotiven, indem man die viel billigeren elektrischen Lokomotiven benutzt. Außerdem kann das Geleise einfacher gebaut werden, weil die schweren Lokomotiven fortfallen. Solche elektrische Lokomotiven werden in verschiedenen Formen gebaut. Sie eignen sich wegen ihrer dauernden Betriebsbereitschaft für manche Zwecke, z. B. für Beförderung von Gütern auf Anschlußgeleisen von den Fabriken nach den Stationen und umgekehrt, ferner auch im Eisenbahndienst selbst für das Rangieren von Zügen. Die Lokomotiven werden zuweilen als Akkumulatorlokomotiven eingerichtet, meistens aber auch für Oberleitungsbetrieb. Fig. 461 zeigt eine solche Lokomotive der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft für den Rangierdienst in Gleiwitz. Für Grubenbahnen werden diese Lokomotiven natürlich viel niedriger eingerichtet.

Ebenso wie im Stadtverkehr und für Kleinbahnen bieten aber

auch die elektrischen Bahnen für den Fernverkehr gewisse Vorteile. Für große Entfernungen eignet sich aber nur der Drehstrom und es werden also Drehstrombahnen, wie schon an einigen Orten, so allmählich noch mehr entstehen.

Da aber bei elektrischen Bahnen jeder einzelne Wagen einen Motor besitzen kann, so eignen sie sich ganz besonders zum Einzelbetrieb. Rasch aufeinander folgende einzelne Wagen, jeder mit einer beschränkten Zahl von Personen, wie sie gerade bei Straßenbahnen eingeführt sind, und die mit großer Geschwindigkeit laufen, werden allmählich auch für größere Entfernungen eingeführt werden. In der Tat ist schon vor vielen Jahren von der Firma Ganz & Co. ein aus-

Fig. 461.



fühliches Projekt ausgearbeitet und der öffentlichen Diskussion unterworfen worden, welches zwischen Wien und Pest eine elektrische Bahn einrichten will, bei der eine Fahrgeschwindigkeit von 250 km in der Stunde erreicht werden soll, also über 30 Meilen, während bisher die raschesten Züge kaum 12 Meilen erreichen. Und dabei sollen auf dieser Strecke die Wagen in Abständen von 10 bis 60 Minuten aufeinander folgen. Jeder Wagen soll für 200 Personen Platz haben. Diese Bahn sollte durch Wechselströme von hoher Spannung, 10 000 Volt, betrieben werden, die an den einzelnen Sekundärstationen, Abschnitten der Bahn, entweder durch Transformatoren in niedrig gespannte Wechselströme oder durch Umformer in Gleichströme verwandelt werden sollen. Vor einigen Jahren hat sich in Berlin eine Gesellschaft für elektrische Schnellbahnen gebildet, welche die vielen schwierigen Fragen, die hierbei auftreten, genau untersucht. Sie hofft, elektrische Bahnen bauen zu können, welche mit 200 Kilometer per Stunde Geschwindigkeit befahren werden, und beginnt zunächst mit kleinen Versuchsstrecken,

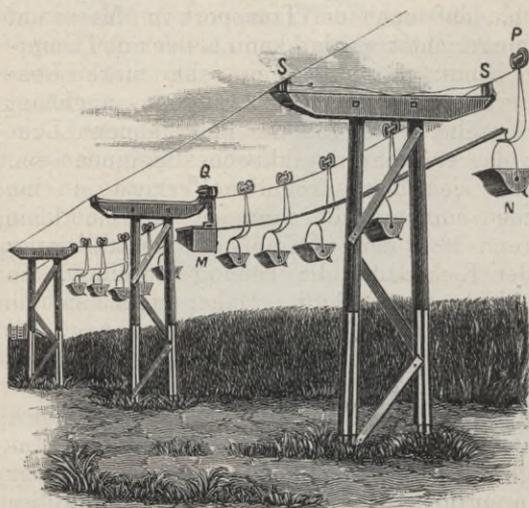
um alle in Betracht kommenden Verhältnisse auszuprobieren. Es gelang bereits auf diesen Strecken mit 150 Kilometer Geschwindigkeit sicher und anstandslos zu fahren. Wenn diese kühne Idee, wie zu hoffen ist, sich auf großen Bahnen verwirklichen läßt, dann hat die Elektrizität auch auf diesem Gebiete den mächtigsten ihrer Konkurrenten, den Dampf, besiegt. In der Tat eignen sich die Elektromotoren viel mehr für große Geschwindigkeiten als die Dampfmaschinen, weil die ersteren nur rotierende Bewegungen besitzen, die Dampfmaschinen aber hin und her gehende Teile haben, welche ihre Bewegung erst in eine rotierende umwandeln müssen. Die Fortschritte der Technik und die Unternehmungslust des Kapitals werden hoffentlich auch hier die bürokratische Ängstlichkeit besiegen, und dadurch dem menschlichen Verkehr einen neuen großartigen Aufschwung geben.

Die Elektrizität unterscheidet sich eben in ihren Wirkungen von der Dampfkraft so wesentlich, daß auch der Transport von Massen auf elektrischem Wege anders eingerichtet werden kann als der mit Dampfkraft. Die Dampfeisenbahn benutzt vorteilhaft eine sehr starke Lokomotive, an welche eine sehr große Last in vielen Waggons angehängt wird. Wollte man jeden einzelnen Waggon mit einer kleinen Lokomotive versehen, so würde das ein sehr unpraktisches Beginnen sein. Die Elektrizität dagegen läßt sich ohne erhebliche Verluste in eine ganz Anzahl kleiner Maschinen einleiten, die dann jede nur eine kleine Arbeit leisten können. Wenn also beim Dampf die Zentralisierung notwendig ist, so ist bei der Elektrizität die Teilung vorteilhaft, die Zentralisierung aber auch nicht unvorteilhaft. Daher eignet sich die Elektrizität besser als der Dampf zum Betrieb von Trambahnen, für Bahnen in Bergwerken, für landwirtschaftliche Bahnen und wohl ebenso gut wie der Dampf zum Betrieb von großen Vollbahnen.

Das Prinzip der Teilung ist beim Transport von Waren noch mit anderen Mitteln auf elektrischem Wege in speziellen Fällen angewendet worden. Die englischen Gelehrten Jenkin, Ayrton und Perry haben ein System des Warentransports ausgearbeitet und praktisch versucht, welchem sie den Namen *Telpherage* gaben. Wenn man nämlich eine Menge kleiner Lasten, jede für sich, fortschaffen will, dann hat man große Vorteile in Bezug auf den Bau der Bahn. Ein schwerer Eisenbahnzug mit vielen Waggons braucht einen sorgfältig gearbeiteten Schienenweg. Die Fortschaffung einer Last von 200 kg dagegen kann leicht auf einem ausgespannten Drahtseil von nicht zu großer Dicke in der Luft geschehen. Dies ist das Prinzip der *Telpherage*. Praktisch wurde sie bisher nur zweimal in England ausgeführt, zuerst in Glynde (Sussex) auf dem Gut des Lord Hampden. Fig. 462 gibt eine allgemeine Ansicht dieser *Telpherlinie*. In Entfernungen von je 20 m sind Pfosten aufgestellt, auf denen zwei Stahldrähte von 19 mm Stärke hängen, einer für die Hinfahrt, der andere für die Rückfahrt. Die Leitung SS ist nun, wie man sagt, übers Kreuz geführt, so daß in der einen Linie der erste, dritte, fünfte Abschnitt (durch die Pfosten getrennt) mit dem positiven Pol der Maschine, der zweite, vierte, sechste mit dem negativen Pol verbunden ist, während es auf der anderen Linie umgekehrt ist. Eine elektrische Lokomotive M

zieht nun immer fünf Wagen und ist mit dem letzten dieser Wagen, N, durch einen Kupferdraht verbunden. Die Länge dieses Zuges, Lokomotive und fünf Wagen, ist nun stets etwas größer wie der Abstand der Pfosten, so daß also immer die Lokomotive auf einem positiven Abschnitt, der letzte Wagen auf einem negativen aufsitzt oder umgekehrt. Während also z. B. der positive Strom direkt in die Lokomotive, den Motor, aus dem Drahtseil eintritt, geht er durch den Kupferdraht zu dem letzten Wagen N und von diesem in die Maschine zurück. Der Motor dreht sich also und die Maschine mit den an sie geketteten Wagen bewegt sich auf dem Stahlseil durch Reibung weiter. Außer den fünf Wagen, die sie hinter sich schleppt, stößt die Lokomotive noch die fünf vor ihr befindlichen Wagen, so daß für je zehn Wagen eine Lokomotive nötig ist.

Fig. 462.

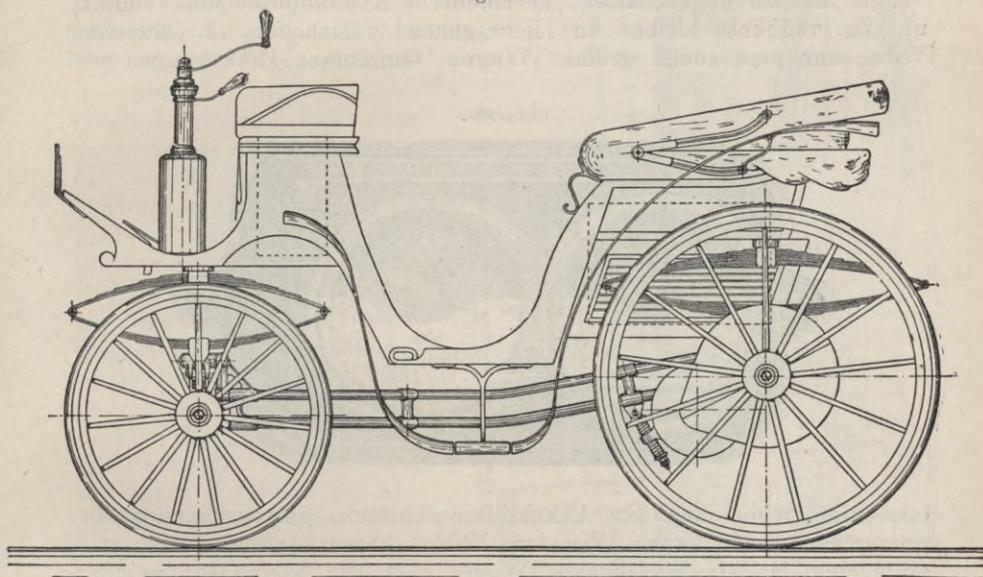


Die Aufgabe dieses Transports ist die Beförderung von Material, welches aus kleinen Stücken besteht — Sand, Erz, Tonerde — mit mäßiger Geschwindigkeit, auf größere Entfernungen. Es braucht dabei kein Boden angekauft zu werden, Brücken, Dämme etc. sind unnötig, es können Steigungen bis 1:8 überwunden werden und der Transport braucht keine Beaufsichtigung. Nach Berechnungen von Perry kommen dabei die Beförderungskosten für einen Zentner auf eine Meile zwischen 25 und 35 Pfennig, während sie bei Karrentransport etwa eine Mark betragen würden. Es ist wohl möglich, daß auch diese Anwendung der Kraftübertragung noch eine weitere Zukunft hat. Dieser Betrieb entspricht im Prinzip dem Drahtseiltriebwerk, nur daß das Seil hierbei fest bleibt und die Waggons sich bewegen, während beim Drahtseilbetrieb das Seil mit den Waggons sich bewegt.

Die Ersetzung des Pferdebetriebs durch Maschinenbetrieb hat in den letzten Jahren bekanntlich auch in dem gewöhnlichen Fuhrwesen große Fortschritte gemacht, indem man Droschken, Equipagen, Omnibusse, Gepäckwagen u. s. w. als Automobile eingerichtet hat. Die meisten dieser Automobile werden so betrieben, daß sie einen Benzin- oder Petroleummotor mit sich führen. Sie haben daher die Nachteile, daß sie nicht ungefährlich sind, daß sie infolge der hin und her gehenden Bewegung des Motorkolbens und des verpuffenden Dampfes Lärm machen, der namentlich für die Fahrenden selbst auf die Dauer

lästig ist, und daß sie, was auch die Fahrenden besonders merken, unangenehm riechenden und schmutzenden Dampf verbreiten. Von allen diesen Nachteilen wäre ein elektrisches Automobil frei, da ein Elektromotor von selbst eine rotierende Bewegung hat und nicht erst eine hin und her gehende in eine rotierende umzusetzen braucht und da bei einem Elektromotor von Geruch, von Schmutz und von Gefahr keine Rede ist. Aber um ein Automobil elektrisch zu betreiben, muß man außer dem Motor, der an sich leicht ist, noch eine Akkumulatorenbatterie mitführen, und diese bildet den großen, im wahren Sinne schwerwiegenden Nachteil der elektrischen Automobile. Trotzdem

Fig. 463.



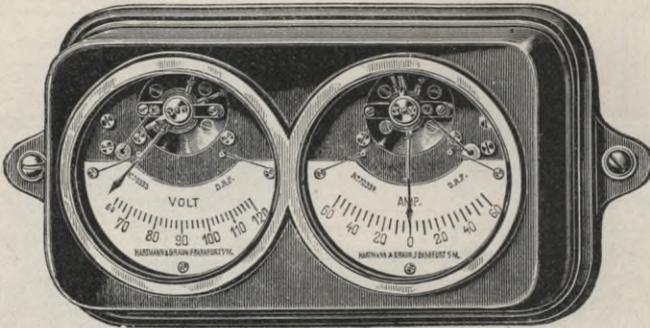
werden solche bereits jetzt konstruiert und man hofft auf verschiedenen Seiten, daß auch hier die Elektrizität die anderen Kräfte aus dem Felde schlagen wird.

Um ein Automobil elektrisch zu betreiben, müssen die Räder des Wagens durch einen Elektromotor in Bewegung gesetzt werden, und der Motor muß seinen Strom von einer Akkumulatorenbatterie erhalten. Eine Ausführung eines solchen Wagens als Viktoriawagen zeigt Fig. 463. Die Akkumulatorenbatterie von 44 Zellen befindet sich unter den Sitzen in einem Kasten. Das Gewicht des vollbesetzten Wagens mit der Batterie beträgt 1100 kg. Die Batterie ist von solcher Größe gewählt, daß sie für 30—40 km Fahrt bei einer Ladung ausreicht. Die Motoren befinden sich zwischen den Hinterrädern und greifen an diesen an und zwar ist für jedes Rad ein Motor angebracht. Die Motoren sind federnd aufgehängt und auch der ganze Wagenkasten ist mit dem Untergestell durch Federn verbunden. Vorn beim Wagenführer ist erstens eine kräftige, durch den Fuß zu betreibende Bremse und außerdem ein

Steuer zur Lenkung des Wagens und ein Regulator zum Anfahren, zur Änderung der Geschwindigkeit und zum elektrischen Bremsen, was durch Widerstände bewirkt wird. Diese Regulatoren werden auch hier Kontroller genannt und ganz ähnlich eingerichtet, wie beim Tram-bahnbetrieb (s. o. S. 523 u. ff.).

Als äußeres Kennzeichen, daß ein Automobil elektrisch betrieben wird, dient immer ein Volt- und Ampèremeter, welches vorn beim Führer angebracht wird und diesen über Strom und Spannung seines Motors auf dem Laufenden hält, welches aber insbesondere auch beim Laden der Batterie notwendig ist. Fig. 464 zeigt ein solches kombiniertes Instrument von Hartmann & Braun. Natürlich werden bei einem solchen Wagen alle Errungenschaften der modernen Automobiltechnik benutzt, um ihn möglichst leicht und leichtgehend zu machen. In derselben Weise kann man auch größere Wagen, Omnibusse, Paketwagen etc.

Fig. 464.



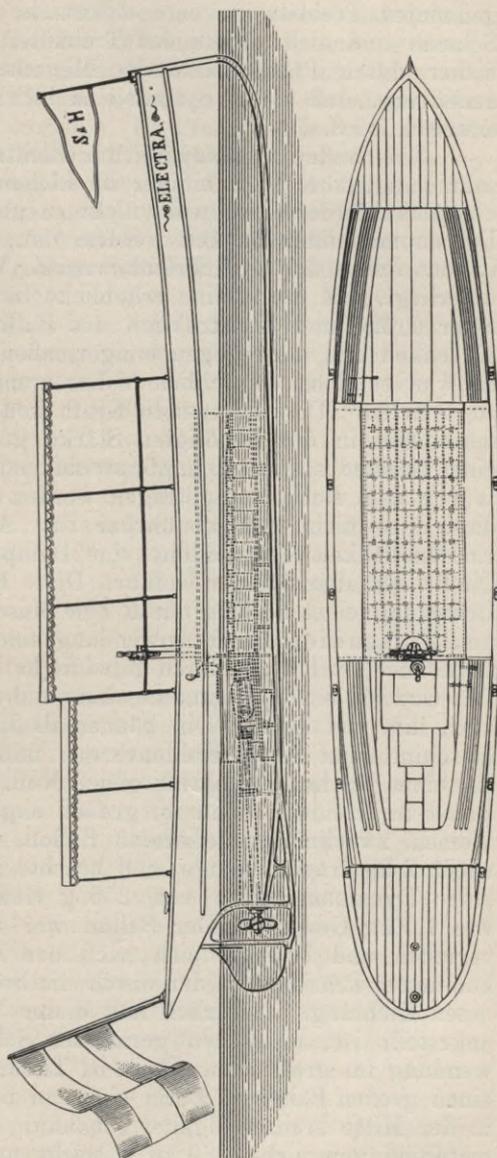
einrichten, wobei dann die Akkumulatorenbatterie entsprechend größer genommen werden kann. Was den Effektverbrauch anbetrifft, so wird angegeben, daß ein zweisitziger Wagen bei zirka 25 km Geschwindigkeit und 80 Volt Spannung der Batterie etwa 20 Ampère verbraucht. Der Effekt ist danach 1600 Watt, gleich etwas über 2 Pferdekräften.

Solche Automobile eignen sich naturgemäß bisher nur für den Verkehr innerhalb derjenigen Orte, in denen elektrische Zentralen vorhanden sind. Durch diese kann die Batterie nach gewissen Zeiten wieder geladen werden und es sind die Bleiakkumulatoren so eingerichtet, daß z. B. bei dem obigen Wagen eine Ladung von $\frac{1}{4}$ Stunde wieder für 10—15 km Fahrt ausreicht. Zu größeren Ausflügen lassen sich bisher diese elektrischen Automobile, oder wie sie in Frankreich vorteilhaft bezeichnet werden, diese Elektromobile nicht benützen, weil sie nicht für sehr lange Zeit Energie mit sich nehmen können. Doch hängt dieser Nachteil nur von der noch geringen Verbreitung der elektrischen Zentralen ab. Könnte man darauf rechnen, in jedem Dorf elektrischen Strom (und zwar Gleichstrom zum Laden der Akkumulatoren oder Wechselstrom mit Umformern) zu finden, wie es in einigen Teilen der Schweiz bereits der Fall ist, so könnte man mit solchen Elektromobilen auch große Touren unternehmen, und es ist zu hoffen,

daß es dazu noch einmal kommen wird. Der neue Edisonsche Akkumulatormotor (S. 395), wenn er sich bewährt, wird hier jedenfalls ein wichtiges Gebiet seiner Anwendung finden.

Für die Schifffahrt im großen ist der elektrische Betrieb natürlich nicht brauchbar. Große Schiffe haben ihre Dampfmaschinen und brauchen die Umsetzung der Dampfkraft in Elektrizität nicht. Dagegen lassen sich kleine Vergnügungsboote, in welche man keine Dampfmaschinen bringen will, elektrisch betreiben, und zwar auch mittels Akkumulatoren, die an der Landungsstelle von einer Dynamomaschine geladen werden. Fig. 465 gibt eine Ansicht und einen Grundriß des Bootes „Elektra“, das von Siemens & Halske eingerichtet war und auf der Spree lief. Dasselbe enthält in seiner mittleren, überdeckten Abteilung 80 Akkumulatoren. Der Elektromotor, der durch den Strom der Akkumulatoren getrieben wird, befindet sich hinten und ist mit der Welle der Schiffschraube verbunden. Der Steuermann kann durch Drehen einer Kurbel Widerstände ein- oder ausschalten und so die Geschwindigkeit des Schiffes verändern. Die Ladung der Akkumulatoren geschieht an den Landeplätzen, jede Ladung reicht für drei bis vier Stunden Fahrt. Das Schiff faßt 30 Personen und kann bis zu anderthalb Meilen in der Stunde zurücklegen. In letzter Zeit

Fig. 465.



hat man begonnen, die Elektrizität für die Schlepsschifffahrt geeignet zu machen, was um so wichtiger ist, da die Anlegung großer Kanäle, wie sie jetzt in Aussicht stehen, erfordert, daß auf diesen der Transport

mit möglichst vollkommenen Mitteln geschehe. Von den verschiedenen Systemen, die sich dem elektrischen Betrieb hierbei bieten, ist vollständig durchgearbeitet und am Finowkanal erprobt dasjenige von Siemens & Halske. Bei diesem läuft neben dem Kanal, auf dem sogenannten Treidelweg, eine elektrische kleine Lokomotive auf einer Schiene und zieht durch das Treidelseil die Schiffe, ganz so, wie es bisher durch Pferdekraft oder Menschenkraft geschah. Es ist anzunehmen, daß dieses System sich in vieler Beziehung als vorteilhaft erweisen wird.

Eine andere Anwendung der Elektrizität für den Transport liegt sehr nahe, aber trotz einiger im kleinen gelungenen Versuche ist an eine Zukunft derselben wohl nicht zu glauben. Es sollten nämlich die Dynamomaschinen benutzt werden, um, von Batterien gespeist, Luftballons durch die Luft fortzubewegen. Wenn es auch keinem Zweifel unterliegt, daß durch eine erhebliche bewegende Kraft und bei geeigneter Größe und Konstruktion des Ballons es möglich ist, denselben zu lenken und auch gegen einigermaßen starke Winde fortzubewegen, so war es doch tatsächlich bisher unmöglich, darin größere Erfolge zu erzielen. Die bewegende Kraft konnte zuerst allein von Dampfmaschinen in der benötigten Stärke geliefert werden. Das Gewicht einer solchen starken Dampfmaschine mit ihrem Kohlenvorrat, welcher ja von dem Ballon mitgetragen werden müßte, ist aber so groß, daß diese Idee nicht gut ausführbar ist. Außerdem ist bei der leichten Entzündlichkeit des Ballons eine Dampfmaschine an demselben eine Quelle der allerhöchsten Gefahr. Diese beiden Hindernisse, welche der Bewegung eines Ballons durch eine Maschine im Wege stehen, glaubte nun Tissandier durch Anwendung einer Dynamomaschine beseitigen zu können, welche er durch galvanische Elemente speisen lassen wollte. Das Gewicht einer Dynamomaschine und der dazu nötigen Batterie sollte nach ihm viel kleiner sein können als das einer gleichwertigen Dampfmaschine samt ihrem Kohlenvorrat, und die Feuergefährlichkeit wäre bei einer solchen Triebkraft gleich Null. Tissandier hat auch Versuche zuerst im kleinen, dann im großen angestellt. Er konstruierte einen kleinen, zweckmäßig geformten Ballon, der außer seinem eigenen Gewicht 2 kg tragen konnte, und brachte in denselben das kleine Modell einer Dynamomaschine von 250 g Gewicht und einen Akkumulator von 1,3 kg Gewicht. Der Ballon war mit Steuerruder und Schraube versehen und bewegte sich nach den Angaben Tissandiers mit vollkommener Präzision in der durch die Stellung des Steuers vorgezeichneten Richtung. Natürlich läßt dieser Versuch, der bei ruhiger Luft angestellt ist, nicht den geringsten Schluß auf eine praktische Verwendung im großen zu. Doch ist Tissandier weiter gegangen. Er hat einen großen Ballon in Form einer an beiden Seiten zugespitzten, aber in der Mitte breiten Zigarre gebaut, in dessen Korb er eine Dynamomaschine von zirka 280 kg Gewicht und eine Batterie von 34 Elementen setzte. Mit diesem Ballon stieg er selbst auf in Begleitung seines Bruders und konnte den Ballon mit Leichtigkeit dirigieren und auch noch gegen einen Wind von 3 m Geschwindigkeit ankämpfen lassen. Auf Grund dieser Erfahrung hoffte er mit größeren Ballons

und stärkeren Schrauben auch gegen ziemlich starke Winde den Ballon lenken zu können und auf diese Weise das Problem der Lenkung des Luftballons lösen zu können.

In derselben Richtung arbeiteten nach ihm die beiden französischen Hauptleute Renard und Krebs, welchen es zum erstenmal gelang, mit ihrem lenkbaren Ballon „La France“ einige vollständige Rundfahrten zu machen. Der Ballon enthielt eine Dynamomaschine und eine Batterie, welche ihr den Strom lieferte. Aber trotzdem dieser Versuch gelungen ist — sie konnten 10 Pferdekkräfte eine Stunde lang wirken lassen und dem Ballon 6 m Eigengeschwindigkeit geben — steht man damit erst am Anfang der Lösung dieses Problems. Sollte es gelingen, sehr leichte und wirksame Akkumulatoren zu konstruieren, etwa aus Aluminium — wozu allerdings wenig Aussicht ist — so wird auch dieses schwierige Problem des lenkbaren Luftschiffes vielleicht eine Lösung finden.

11. Kapitel.

Die Elektrochemie.

Schon vor dreißig Jahren sprach Werner Siemens, der Schöpfer der modernen Elektrotechnik, aus, daß in dem Bereich der chemischen Prozesse dem elektrischen Strom noch die größte Zukunft bevorzuzustehen scheine. „Gerade auf diesem Gebiete,“ sagt Siemens, „wird der elektrische Strom voraussichtlich künftig die größten Erfolge aufzuweisen haben und auf ihm der Menschheit die größten Dienste leisten können. Technisch noch ganz ungebaut liegt das weite, so viel versprechende Gebiet der Elektrolyse feuerflüssiger Leiter da, und weder die wissenschaftliche noch die technische Chemie hat die analytische und synthetische Kraft des Stromes bisher gebührend gewürdigt.“

Es hat lange gedauert, bis diese Voraussage sich zu erfüllen begann, aber dafür wird in den letzten Jahren mit um so größerem Eifer die Ausbildung gerade dieser neuen Technik, der Elektrochemie, von vielen Seiten in Angriff genommen, und diese Bestrebungen haben schon sehr wertvolle Früchte getragen und versprechen von Tag zu Tag noch neue ungeahnte Errungenschaften.

Unter der Elektrochemie verstehen wir hier ganz allgemein die Darstellung chemischer Stoffe auf elektrischem Wege. Wir verstehen nicht darunter die Galvanoplastik, obwohl diese sich auch der Elektrolyse bedient, da es der Elektrochemie wesentlich auf die Stoffe ankommt, die sie bereitet, der Galvanoplastik aber auf die Form, in welcher sie die erzeugten Stoffe benutzt.

Die Aufgaben, die die Elektrochemie bisher im wesentlichen hat lösen können, sind folgende: Erstens die Gewinnung reiner Metalle aus hüttenmännisch gewonnenen zusammengesetzten Produkten oder aus sonstigen natürlich vorkommenden oder künstlich hergestellten Verbindungen derselben. Diese Aufgabe ist mit vollem Erfolg gelöst worden für die Darstellung des Kupfers, des Goldes, des Aluminiums, des Magnesiums, des Zinns, Arsens, Antimons und einiger anderer Substanzen. Man bezeichnet diesen Teil der Elektrochemie zweckmäßig als elektrische Metallurgie.

Eine zweite Aufgabe besteht in der Herstellung wertvollere chemischer Verbindungen aus minder wertvollen durch Vermittelung des elektrischen Stromes. Diese Aufgabe ist bisher im wesentlichen gelöst bei der Erzeugung von Soda, von Chlor und von Ätzkali und

Ätznatron durch Hilfe der Elektrolyse und bei der Erzeugung von Calciumkarbid mit Hilfe des elektrischen Lichtbogens.

Die dritte Aufgabe besteht in der Herstellung gewisser chemischer Stoffe, welche sofort bei ihrem Entstehen durch Oxydation oder Reduktion von schon vorhandenen Substanzen wertvolle Dienste leisten. Zu dieser Abteilung gehört die elektrische Darstellung des Ozons, ferner das Bleichverfahren von Hermite und die Methoden zur Reinigung der Ablaufwässer.

Das hauptsächlichste Mittel, dessen sich die Elektrochemie bedient, ist die Elektrolyse, die Eigenschaft des galvanischen Stromes, daß er zusammengesetzte Flüssigkeiten in ihre Bestandteile zerlegt. Aber die Elektrolyse ist nicht das einzige Hilfsmittel der Elektrochemie, vielmehr macht sie sich auch jede andere brauchbare Eigenschaft des elektrischen Stroms dienstbar. Dazu gehören hauptsächlich die Wärmewirkungen des elektrischen Stroms und insbesondere die außerordentlich hohen Temperaturen, welche man durch den elektrischen Lichtbogen erzeugen kann, bei denen alle Substanzen, selbst die am schwersten schmelzbaren (außer der Kohle), mit Leichtigkeit flüssig werden. Eine weitere Eigenschaft der Elektrizität, welche bei der Darstellung des Ozons angewendet wird, ist die Entladung hochgespannter Elektrizität durch Gase, welche mit einer Veränderung dieser Gase verbunden ist, die vielleicht auch elektrolytischer Natur ist.

Es ist selbstverständlich, daß die Technik auch, wo es für sie von Vorteil ist, rein chemische Prozesse zur Unterstützung der elektrolytischen Prozesse mit zu Hilfe nimmt und gerade in der Vielseitigkeit, welche die Kombination von elektrolytischer und rein chemischer Umsetzung bietet, liegt die Aussicht auf eine großartige Weiterentwicklung dieser neuen Technik.

Die Elektrolyse, das wichtigste Hilfsmittel der Elektrochemie, besteht, wie im ersten Teil Kap. 6 ausführlich auseinandergesetzt ist, darin, daß der elektrische Strom, wenn er durch eine zusammengesetzte leitende Flüssigkeit gesendet wird, bewirkt, daß die beiden Bestandteile dieser Flüssigkeit, die Ionen, sich an den Elektroden abscheiden, der positive Bestandteil, das Kation (das Metall resp. der Wasserstoff), an der Kathode, der Rest, das Anion, an der Anode. Das Grundgesetz der Elektrolyse, das bei allen Anwendungen derselben stets Gültigkeit hat, ist das Gesetz von Faraday, welches ausagt, daß die Menge der zersetzten Flüssigkeit, also auch die Menge der abgeschiedenen Ionen wächst mit der Stärke des Stromes und mit der Dauer des Stromdurchgangs und daß diese Mengen bei den verschiedenen Stoffen im Verhältnis von deren chemischen Äquivalenten stehen.

Da die chemischen Äquivalentzahlen für alle Substanzen bekannt sind, und da man aus Experimenten weiß, wie viel Kupfer der Strom 1 Ampère in 1 Sekunde oder Minute oder Stunde abscheidet (S. 315), so kann man sofort angeben, wie viel von jeder chemischen Substanz an einer Elektrode abgeschieden werden wird, wenn eine Elektrizitätsmenge gleich 1 Ampèrestunde (also der Strom 1 Ampère 1 Stunde lang, oder der Strom 5 Ampère $\frac{1}{5}$ Stunde lang u. s. w.) durch eine Lösung

dieser Substanz hindurchgeht. Eine Reihe solcher Zahlen ist in folgender Tabelle zusammengestellt:

Durch 1 Ampèrestunde werden abgeschieden:

Name des Stoffes	mg	Name des Stoffes	mg
Aluminium	337,0	Nickel	(731
Blei	3858,4	Platin	1096
Eisen	(1047	Silber	3632,4
Gold	698	Zink	4026
Kupfer	2452	Zinn	1217,2
	(1181	Chlor	2221
	2362	Jod	1323
Magnesium	454,3	Sauerstoff	4730
			298

Bei einigen dieser Stoffe, nämlich Eisen, Kupfer, Nickel, sind zwei verschiedene Zahlen angegeben. Das kommt daher, daß diese Stoffe zwei verschiedene Äquivalentgewichte besitzen, je nach der Verbindung, in der sie stehen. Unter dem Äquivalentgewicht einer Substanz versteht man ja das Atomgewicht derselben (welches unveränderlich ist), dividiert durch die Valenz (Wertigkeit) der Substanz, welche eben in verschiedenen Verbindungen verschieden sein kann. Z. B. Kupfer ist gewöhnlich zweiwertig. Aus Schwefelsäure SO_4H_2 und Kupfer wird Kupfervitriol SO_4Cu , woraus man sieht, daß 1 Atom Kupfer 2 Atome Wasserstoff (H_2) ersetzt, daß also Kupfer hier zweiwertig ist. Eine solche Verbindung ist z. B. auch das Kupferchlorid CuCl_2 , in welchem 1 Atom Kupfer mit 2 Atomen Chlor verbunden ist. Da nun das Atomgewicht des Kupfers 63,18 ist, wie die Chemie bestimmt hat, so ist das Äquivalentgewicht des Kupfers in solchen Verbindungen 31,59. Dagegen gibt es andere Verbindungen des Kupfers, die sogenannten Oxydulverbindungen oder Kuprosalze, in denen das Kupfer einwertig ist. Eine solche Verbindung ist das wichtige Kupferchlorür CuCl (oder Cu_2Cl_2), in welchem 1 Atom Kupfer mit 1 Atom Chlor verbunden ist. In diesen Verbindungen ist daher das Äquivalentgewicht doppelt so groß, nämlich 63,18 und daher wird durch den Strom 1 Ampère aus ihnen in einer Stunde doppelt so viel Kupfer (nämlich 2362 mg) abgeschieden, wie aus den anderen Verbindungen, die man Oxydulverbindungen oder Kuprisalze nennt, und bei denen diese Menge bloß 1181 mg beträgt. Zu den Oxydulverbindungen des Kupfers gehört außer dem Kupferchlorür noch das Kupferjodür CuJ , das Kupferoxydul Cu_2O und das Kupfersulfür Cu_2S , welches letztere nichts anderes als der natürlich vorkommende Kupferglanz ist.

Ähnlich ist es beim Eisen, nur daß das Eisen nicht ein- oder zweiwertig, sondern zwei- oder dreiwertig ist. Aus Schwefelsäure SO_4H_2 und Eisen Fe wird Eisenvitriol SO_4Fe , wobei also das Eisen zweiwertig ist. Diejenigen Verbindungen, in welchen das Eisen zweiwertig ist, nennt man Oxydulverbindungen (oder Ferrosalze). Zu diesen gehört außer dem Eisenvitriol das Eisenchlorür FeCl_2 , das Eisenoxydul FeO , das kohlen-saure Eisen CO_3Fe (Spateisenstein), das Eisensulfür FeS .

Dagegen in anderen Verbindungen ist das Eisen dreiwertig, und diese nennt man Oxydverbindungen oder Ferrisalze. Zu ihnen gehört das Eisenchlorid FeCl_3 (oder besser Fe_2Cl_6) und das Eisenoxyd Fe_2O_3 (Roteisenstein). Das Atomgewicht des Eisens ist 55,88, also ist das Äquivalentgewicht desselben in den Ferrosalzen 27,94, in den Ferrisalzen 18,63, so daß aus den Ferrosalzen durch 1 Ampèrestunde 1047 mg, aus den Ferrisalzen aber nur 698 mg abgeschieden werden. Ebenso ist Nickel zwei- oder dreiwertig.

Hat man nun irgend eine Metallsalzlösung in einem Gefäß (Bad) und sendet man einen Strom durch das Bad, welches ja einen bestimmten Widerstand hat, so gehört zunächst eine bestimmte Spannungsdifferenz dazu, um den Strom überhaupt durch den Widerstand zu senden. Diese Spannung ist nach S. 71 gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Bades; denn so groß ist der Spannungsverlust, den der Strom erleidet, wenn er nur den bestimmten Widerstand überwindet.

Außerdem aber entsteht ja, wie wir wissen, stets, wenn durch einen Elektrolyten ein Strom hindurchgesendet wird, eine elektromotorische Gegenkraft, die der Polarisation, und die Spannung des Stromes, der durch den Elektrolyten geht, muß also diese Polarisation auch noch überwinden; d. h. also die gesamte Spannung des Stromes, durch den Elektrolyse erfolgen soll, muß mindestens gleich sein der Summe

1. aus der elektromotorischen Kraft der Polarisation und
2. dem Spannungsverlust infolge des Widerstandes des Bades.

Wenn man z. B. einen Strom mittels Platinelektroden durch eine Lösung von Kupferchlorid gehen läßt, so hat die entstehende Polarisation eine elektromotorische Kraft von 1,35 Volt. Hat nun das Bad einen Widerstand von 0,5 Ohm und läßt man Ströme von 1, 2, 3 Ampère hindurchgehen, so ist der Spannungsverlust im Bad 0,5; 1; 1,5 Volt, also ist der gesamte Spannungsunterschied an den beiden Enden des Bades gleich

$$1,85; 2,35; 2,85 \text{ Volt.}$$

Von der Spannung, von der Zahl der Volt, die man zu einem elektrolytischen Prozeß braucht, und von der Stromstärke hängen aber wesentlich die Kosten des Prozesses ab. Denn der Effekt des Stromes, d. h. die Arbeit pro Sekunde, die der Strom in dem elektrolytischen Bad leistet, ist ja immer gleich:

$$\text{Anzahl der Volt} \times \text{Anzahl der Ampère.}$$

Um diesen Effekt zu erzeugen, muß man entweder eine Dynamomaschine treiben oder galvanische Elemente anwenden, in denen Zink verbrannt wird, d. h. den Effekt muß man durch Aufwand von Kosten hervorbringen. Die nutzbare Leistung bei dem elektrolytischen Prozeß hängt aber von der Menge der abgesetzten Ionen, also nach dem Faradayschen Gesetz nur von der Stromstärke ab. Man sieht daraus, daß die nutzbare Leistung um so größer wird im Verhältnis zum Gesamtaufwand, je kleiner die notwendige Spannung ist.

Wir haben also als erste Folgerung:

Ein elektrolytischer Prozeß wird um so vorteilhafter sein, je geringer die notwendige Spannung des Stromes ist.

Sehr drastisch kann man die eben erörterte Tatsache so ausdrücken, daß man sagt, bei einem technischen elektrolytischen Prozeß bringen die Ampère Geld und die Volt kosten Geld.

Es kommt also wesentlich für einen ökonomischen Betrieb darauf an, die Volt, die Spannung des Bades, möglichst klein zu machen. Die Spannung setzt sich aber, wie eben erwähnt, aus zwei Teilen zusammen, der Widerstandsspannung und der Polarisationsspannung, wie man sie kurz nennen kann.

Da nun die zur Überwindung des Widerstandes des Bades notwendige Spannung, die Widerstandsspannung, nicht veränderlich ist, wenn der Widerstand der Substanz einmal gegeben ist — sie ist ja gleich dem Produkt aus der angewandten Stromstärke und diesem Widerstand — so sieht man, daß es wesentlich darauf ankommt, die Polarisationspannung zu vermindern, d. h. die Polarisation bei dem Prozesse möglichst klein zu machen.

Man kann das auch auf folgende Weise einsehen. Wenn wir einen galvanischen Strom in dem Bad haben, der gerade 1 Pferdekraft Effekt hat, also 736 Volt-Ampère nach S. 313, und wenn wir annehmen, daß die notwendige Spannung zum Betriebe des Prozesses in jedem Falle gerade 1 Volt wäre, so können wir aus den oben S. 540 angeführten Zahlen berechnen, wie viel Kilo der einzelnen Substanzen durch 1 Pferdekraft pro Stunde abgeschieden werden. Der Strom hätte nämlich dann die Stärke von 736 Ampère, und wir brauchen die obigen Zahlen bloß mit 736 zu multiplizieren und statt in Milligramm in Kilo auszudrücken. Das gibt folgende Resultate:

Durch 1 Pferdekraft werden pro Stunde ausgeschieden (wenn die Spannung des Bades 1 Volt betragen würde):

Aluminium	0,248 Kilo	Nickel	0,538 Kilo
Blei	2,893 „	Platin	2,673 „
Eisen	0,770 „	Silber	2,963 „
Gold	0,513 „	Zink	0,896 „
Kupfer	1,804 „	Zinn	1,635 „
	0,869 „	Chlor	0,974 „
Magnesium	1,738 „	Jod	3,481 „
	0,334 „	Sauerstoff	0,219 „

Ist aber die notwendige Spannung des Bades nicht 1 Volt, sondern, wie z. B. bei Nickelsalzen, 4 Volt, so wird durch eine Pferdestunde nicht 0,538, sondern nur 0,135 Kilo abgeschieden. Je größer die notwendige Spannung ist, desto kleiner ist also die pro Pferdekraft und Stunde abgeschiedene Menge der Metalle, und umgekehrt.

Für einen möglichst nützlichen elektrochemischen Betrieb ist also die notwendige Bedingung, daß die Polarisierung im Bade möglichst klein gemacht werde. Nun beruht die Polarisierung darauf, daß die beiden Elektroden des Bades infolge der Elektrolyse chemisch different gegeneinander sind. Je verschiedener die beiden Elektroden gegeneinander sind, d. h. je weiter sie in der Spannungsreihe auseinander stehen, desto größer ist die Polarisierung.

Man kann das aber auch noch in anderer Weise auffassen. Wenn ein Strom durch den Elektrolyten hindurchgeht und dessen Ionen trennt, so muß er eine bestimmte Arbeit leisten. Diese Arbeit ist so groß wie die sogenannte Wärmetönung des betreffenden Prozesses, nur daß diese gewöhnlich in Kalorien, im Wärmemaß ausgedrückt ist, während man die Arbeit in Kilogrammmetern mißt. Man braucht aber bekanntlich bloß die (kleinen) Kalorien mit 0,435 zu multiplizieren, um sie in Kilogrammmeter umzuwandeln. Also z. B. wenn Kupfersulfat CuSO_4 in wässriger Lösung zersetzt werden soll, so braucht man dazu eine Arbeit von 55 960 kleinen Kalorien oder

$$55\,960 \times 0,435 \text{ Kilogrammmeter}$$

für je ein zerlegtes Grammolekül Kupfersulfat (d. h. für 159 g, entsprechend der Formel CuSO_4). Diese Arbeit muß der Strom leisten, diese Arbeit steckt aber dann auch wieder aufgespeichert in der elektrolytischen Zelle. Es scheidet sich eben an der einen Elektrode das Kupfer, an der anderen die Schwefelsäure ($\text{SO}_3 + \text{O}$) aus. Diese Substanzen polarisieren die Elektroden und in der Polarisierung steckt eben wieder eine Quelle von Arbeitsmöglichkeit, denn die polarisierten Elektroden können, wenn sie verbunden werden, wieder einen Strom, den Polarisationsstrom erzeugen, können also Arbeit leisten. Wenn man nun aber die abgeschiedenen Substanzen, welche als freie Ionen zum Teil sehr reaktionsfähig sind, an den Elektroden nicht frei auftreten läßt, sondern sie neue Verbindungen eingehen läßt, so entsteht wieder eine Wärmemenge statt der vorher verbrauchten, und infolgedessen ist die zur Elektrolyse notwendige Wärmemenge nun kleiner als vorher, folglich ist auch die in der Zelle aufgespeicherte Arbeit dann kleiner als vorher, d. h. die Polarisierung ist geringer.

Damit haben wir das Mittel gefunden, durch welches wir die Polarisierung verkleinern können. Wir müssen es so einrichten, daß die Ionen an der einen oder an beiden Elektroden neue Verbindungen eingehen, die eine der zu überwindenden Wärmetönung möglichst gleiche erzeugen.

Ein Zahlenbeispiel wird das klar machen. Wenn wir eine Zelle mit Kupfervitriollösung haben und als Elektroden Platinplatten verwenden, so brauchen wir zur Zersetzung des Kupfervitriols, wie oben angegeben, $55\,960 \times 0,435$ Kilogrammmeter Arbeit für je ein Molekül, das sind hier 2 Äquivalente Kupfer, die sich abscheiden. Diese 24 343 Kilogrammmeter Arbeit für je 2 abgeschiedene Äquivalente Kupfer stecken nun aufgespeichert in der Zelle und zwar in der Form der Polarisierung. Fließt der Polarisationsstrom, so kann er also wieder dieselbe Arbeit leisten. Daraus können wir zunächst die elektromoto-

rische Kraft der Polarisation berechnen. Ein Strom nämlich, der 2 Äquivalente Kupfer abscheidet, muß (nach S. 148) $2 \times 96\,540$ Coulomb mit sich führen. Nun ist aber die Zahl der Volt mal der Zahl der Coulomb (hier eben: $2 \times 96\,540$) dividiert durch 9,81 gleich der von dem Strom geleisteten Arbeit in Kilogrammmetern (hier also: 24343), also ist in unserem Fall die Zahl der Volt gleich $\frac{24\,343 \times 9,81}{2 \times 96\,540} = 1,56$.

So groß wäre also die elektromotorische Kraft der Polarisation, wenn keine Nebenprozesse stattfinden.

Macht man nun aber die Anode nicht aus Platin, sondern aus Kupfer und schiebt man jetzt einen Strom hindurch, so verbindet sich sofort das Anion SO_4 mit dem Kupfer zu neuem Kupfersulfat und infolgedessen entsteht nun wieder eine Wärmetönung von 55 960 Kalorien, also hebt sich die vom Strome bei der Ausscheidung des Kupfers (an der Kathode) geleistete und die bei der Auflösung des Kupfers (an der Anode) gewonnene Wärmetönung auf, mithin steckt jetzt keine Arbeit mehr aufgespeichert in der Zelle, d. h. die Polarisation ist nun gleich Null geworden. In der Tat hat man jetzt keine Polarisation mehr, weil nun eine Kupferplatte und eine mit Kupfer bedeckte Platinplatte in die Flüssigkeit tauchen, die keine elektrische Differenz haben.

Das Mittel also, um mit möglichst niedrigen Spannungen auszukommen, besteht darin, daß man Vorsorge trifft, daß die Ionen an den Elektroden die Möglichkeit vorfinden, in chemische Verbindungen einzutreten (die natürlich dem Prozeß nicht schädlich sein dürfen), oder mit anderen Worten, man muß den Ionen Gelegenheit geben, an den Elektroden Arbeit zu leisten.

Da bei den metallurgischen Prozessen das Kation (das Metall) dasjenige Produkt ist, dessen Reindarstellung man wünscht, so handelt es sich also wesentlich darum, an der Anode chemische Arbeitsgelegenheit zu schaffen. An der Anode tritt nun immer derjenige Bestandteil des Elektrolyten auf, welcher oxydierend wirkt, also z. B. SO_4 oder NO_3 oder Cl u. dergl. Man muß daher für reichliche Oxydationsarbeit an der Anode Sorge tragen. Das wird man in vielen Fällen dadurch erreichen, daß man als Anode eine Substanz in das Bad bringt, welche durch die Wirkung des Anions selbst aufgelöst wird und dadurch möglichst dieselbe Verbindung entstehen läßt, welche elektrolysiert wird, wie in unserem Beispiel eine Kupferplatte. Man kann aber auch das Anion zunächst auf die elektrolytische Flüssigkeit wirken lassen, nicht auf die Anode, und diese in zweckmäßiger Weise oxydieren lassen. Wir werden Beispiele von beiden Methoden unten kennen lernen.

Mit dieser Betrachtung hängt noch folgende wichtige Frage zusammen. Für einen elektrolytischen Prozeß mit gegebenen Elektroden ist nicht jede Stromstärke gleich gut geeignet, sondern es muß vielmehr die Stromstärke in einem passenden Verhältnis zu der Oberfläche der Elektroden stehen. Um das einzusehen, nehmen wir wieder an, daß wir Kupfervitriol zersetzen, und daß die Anode aus Kupfer besteht. Die Anode habe eine bestimmte Oberfläche, z. B. von $\frac{1}{2}$ qm.

Wenn der Strom hindurchgeht, so tritt an der Anode SO_4 auf, welches sie auflöst und zu CuSO_4 umwandelt. Je stärker der Strom ist, desto mehr SO_4 tritt in gleicher Zeit auf, desto mehr CuSO_4 wird also entwickelt. Das geht aber natürlich nur so lange fort, bis nicht die Abscheidung von SO_4 eine zu reichliche ist. Ist sie nämlich zu groß, d. h. ist die Stromstärke zu groß, so findet das SO_4 nicht mehr eine genügende Fläche an der Anode vor, um das Kupfer aufzulösen. Daraus sieht man, daß je nach der Größe der Anode man höchstens eine bestimmte Stromstärke anwenden darf, um den Prozeß zweckmäßig zu führen. Ist die Anode doppelt so groß, also in unserem Falle 1 qm, so kann man natürlich auch die doppelte Stromstärke anwenden. Man bezeichnet das Verhältnis der Stromstärke zur Größe der Anodenfläche als die Stromdichtigkeit und muß also sagen, für jeden Prozeß ist eine maximale Stromdichtigkeit vorhanden, die ohne Schaden nicht überschritten werden kann. Die Stromdichtigkeit wird gewöhnlich angegeben als Zahl der Ampère pro Quadratmeter Anodenfläche.

Dieselbe Betrachtung gilt aber auch für die Kathode. Auch da ist die Stromdichtigkeit von wesentlichem Einfluß auf das Produkt der Elektrolyse. Ist z. B. die Stromstärke zu groß im Verhältnis zur Größe der Kathode, so scheidet sich zu viel Metall ab und dieses kann dann häufig bei seiner Entstehung das Wasser mehr oder minder zersetzen. Es bildet sich dann kein kompakter Niederschlag des Metalls, sondern ein schwammiger oder poröser. Also ist eine weitere Forderung für jeden elektrochemischen Prozeß, daß man die günstigste Stromdichte durch Versuche ermittelt. Es kann der Fall vorkommen, daß eine bestimmte Stromstärke zwar für die Anode gerade passend ist, für die Kathode aber zu klein oder zu groß ist. Dann muß man eben die Fläche der Kathode größer oder kleiner machen als die Anodenfläche.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen gehen wir nun dazu über, einige wichtige elektrochemische Prozesse zu besprechen, die bisher in die Praxis eingeführt wurden.

Am längsten wird die Elektrolyse benutzt zur Gewinnung des Reinkupfers, nicht aus den natürlich vorkommenden Kupfererzen selbst, sondern aus dem sogenannten Schwarzkupfer, welches aus den natürlichen Erzen durch hüttenmännisches Verfahren erhalten wird. Das Schwarzkupfer enthält hauptsächlich Kupfer, aber dabei noch Verunreinigungen von Schwefelkupfer, Schwefeleisen, auch von Silber, Platin, Gold, Wismut, Zinn etc. Es handelt sich darum, aus diesem unreinen Kupfer durch Elektrolyse ganz reines — daher viel wertvolleres — Kupfer zu erhalten und zugleich die wertvolleren Beimischungen, Silber etc., zu gewinnen.

Zu dem Zweck wird das Schwarzkupfer in Form von großen dicken Platten gegossen und diese werden als positive Elektrode (Anode) in ein Bad von schwefelsaurem Kupfer, das noch sauer ist, gestellt. Als negative Elektrode dient eine gleich große, dünne Scheibe von reinem Kupfer. Wird ein Strom durch das Bad geschickt, so löst sich das unreine Kupfer in der durch die Elektrolyse an ihm auf-

tretenden Schwefelsäure auf, während das reine Kupfer an der negativen Elektrode sich abscheidet, wenn man die Stromstärke passend wählt. Man rechnet für jeden Quadratmeter Elektrodenfläche 20 bis 40 Ampère. Aus der positiven Elektrode gehen die Verunreinigungen teilweise in die Kupfervitriollösung (Lauge), teilweise setzen sie sich zu Boden. So erhält man bei Schwarzkupfer Silber, Zinn, Wismut, Gold, Platin, Blei in geringen Mengen, welche sich im Schlamm niedersetzen und eventuell aus diesem besonders gewonnen werden könnten. In dem Hüttenwerk zu Ocker i. S., wo diese elektrolytische Reinigung des Kupfers zuerst angewendet wurde, erzeugte man schon lange auf diese Weise ein vorzüglich reines Kupfer, sogenanntes Elektrolytkupfer. Jetzt wird diese Methode in einer großen Reihe von Kupferhütten angewendet.

Wichtig ist bei diesem Prozeß eine sorgfältige Bewegung der Lauge. Je größer die fremden Beimengungen in der Anode sind, desto größer ist die elektromotorische Kraft der Polarisation. Je unreiner also das Kupfer ist, desto größer ist die notwendige Spannung, desto weniger lohnend ist also diese Anlage. Sie ist am zweckmäßigsten, wenn in dem Rohkupfer nicht mehr als $\frac{1}{2}$ Proz. Unreinheiten enthalten sind.

Die notwendige Spannung, um die Polarisation zu überwinden, ist, wenn die Lauge noch sauer und nicht stark verunreinigt ist, bei Schwarzkupfer 0,025 Volt. Diese Spannung ist, wie man sieht, sehr gering, eben weil an der Anode wieder Kupfer aufgelöst wird.

Das so gewonnene Elektrolytkupfer wird zum Gebrauch erst geschmolzen, weil es direkt spröde und zerbrechlich ist infolge von kristallinischer Struktur. Seit der Einführung der elektrolytischen Kupferdarstellung ist es erst möglich, im Handel ganz reines Kupfer, eben das Elektrolytkupfer, zu beziehen, welches für viele Zwecke, namentlich auch für elektrotechnische Zwecke wegen seiner ausgezeichneten Leitungsfähigkeit die unreinen Kupfersorten allmählich immer mehr verdrängt.

Die Elektrolyse des Kupfers gibt auch die Mittel an die Hand, um direkt Kupferröhren ohne Naht herzustellen. Dies geschieht nach dem Verfahren von Elmore, welches in Leeds in England und in Schladern an der Sieg praktisch ausgeführt wird. Bei diesem Verfahren befindet sich in dem Bad aus schwefelsaurem Kupfer als negative Elektrode eine Eisenwalze, welche fortwährend gedreht wird und auf welcher das Kupfer niedergeschlagen wird. Als positive Elektrode wird sogenanntes Chilikupfer genommen, welches vorher durch Schmelzen und rasches Eintropfen in Wasser zu Kupferschrot gemacht wird. Dasselbe befindet sich auf einem Sieb aus Kupferdraht am Boden des Bades. Während der Elektrolyse gleitet ein Achatstein fortwährend an der rotierenden Walze hin und her und macht dadurch das gefällte Kupfer glatt und dicht. Der Strom wird der rotierenden Walze durch schleifende Bürsten zugeführt. Jedes Bad wird mit 1 Volt Spannung betrieben. Die Stromstärke kann eine sehr hohe sein, da die einzelnen abgelagerten Kupferschichten durch den Achat zusammengepreßt werden, so daß der Kupferniederschlag eine sehr hohe Dichte bekommt. Nach etwa 144 Stunden ist eine Schicht von 3,2 mm Wandstärke auf der

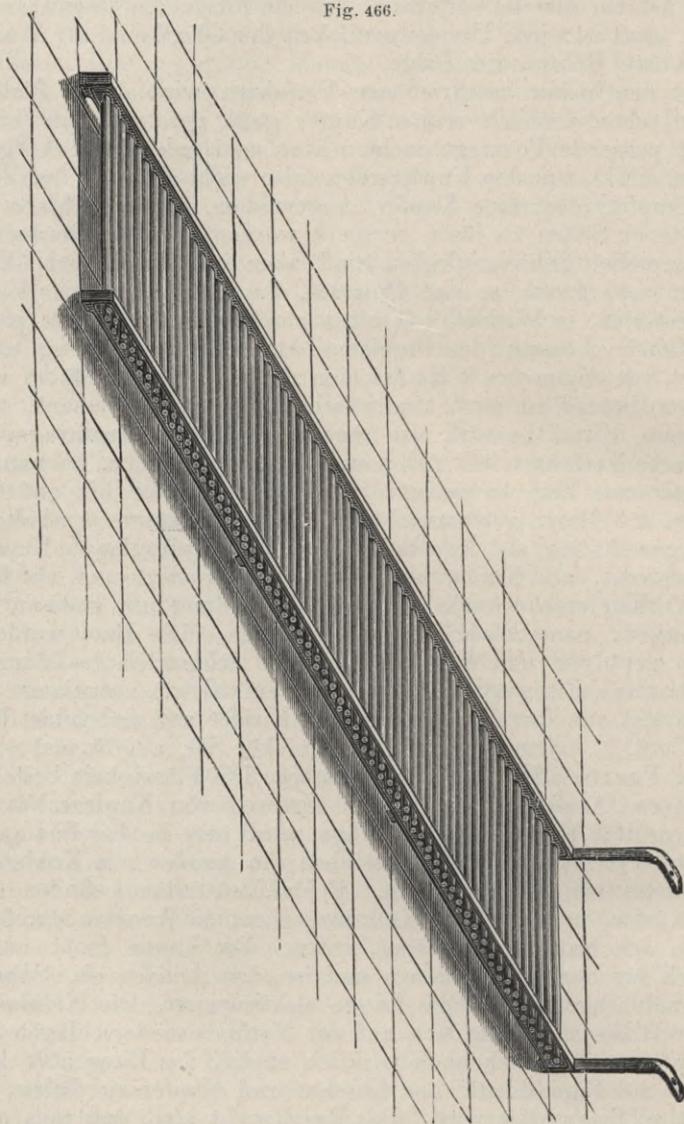
Eisenwalze vorhanden. Hat der Kupferniederschlag die gewünschte Dicke gewonnen, so wird der Eisenkern durch geeigneten Walzendruck und Erwärmung herausgeschoben und die Kupferröhre ohne Naht ist fertig. Die so erzeugten Röhren haben eine sehr große Zugfestigkeit. Wichtig ist bei diesem Verfahren, daß die Form, die Eisenwalze, vollkommen glatt ist; jede Unregelmäßigkeit der Oberfläche der Walze hat unbrauchbare Röhren zur Folge.

Bei den bisher beschriebenen Verfahren wird durch Elektrolyse also nur schon ziemlich reines Kupfer ganz gereinigt und eventuell sofort in passende Form gebracht. Eine noch wichtigere Aufgabe ist aber die, direkt aus den Kupfererzen (also nicht erst aus dem Produkt Schwarzkupfer) das reine Kupfer zu gewinnen. Diese Aufgabe ist von verschiedenen Seiten zu lösen versucht worden. Die praktischen, nicht die prinzipiellen Schwierigkeiten sind aber bei dieser und ähnlichen Aufgaben sehr große, so daß Prozesse, die auf dem Papier sich sehr leicht gestalten, in Wirklichkeit oft unausführbar sind. Eine praktisch durchgeführte Lösung des Problems der Kupfergewinnung aus den Erzen ist von Siemens & Halske in die Technik eingeführt worden, und dieser Prozeß ist auch theoretisch deswegen interessant, weil er ein zweites Mittel benutzt, um Anodenarbeit hervorzubringen. Das Siemenssche Verfahren läßt sich sowohl auf kupferreiche, als namentlich auf kupferarme Erze anwenden, wobei alles Kupfer bis auf 0,1 bis höchstens 0,5 Proz. gewonnen wird. Die Kupfererze enthalten das Kupfer gewöhnlich als Kupfersulfür Cu_2S (Kupferglanz, Kupferkies, Buntkupfererz), als Kupfersulfid CuS (Kupferindig) und als Kupferoxyd CuO (Kupferschwärze), immer in Verbindung mit anderen Metallverbindungen, namentlich Eisenverbindungen. Die Erze werden nun sehr fein gepulvert und dann durch eine schwachsaure Lösung von schwefelsaurem Eisenoxyd $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Ferrisulfat) ausgelaugt. Diese Substanz löst aus den Kupfererzen das Kupfer auf und bildet Kupfervitriol (CuSO_4), indem sie selbst ein Molekül SO_4 abgibt und sich dadurch zu Ferrosulfat (FeSO_4) reduziert. Die Flüssigkeit besteht also nach diesem Auslaugen aus einem Gemisch von Kupfersulfat CuSO_4 und Ferrosulfat FeSO_4 . Diese Lauge wird nun in das Bad gebracht und dort elektrolysiert. Dabei bestehen die Anoden aus Kohlenstäben, die Kathoden aus Kupferblechen. Beide Elektroden befinden sich in flachen Kästen, und zwar die Kathoden oben, die Anoden, durch Tuchfilter von den Kathoden getrennt, unten. Die Lauge fließt nun kontinuierlich bei den Kathoden ein und bei den Anoden ab. Sobald der Strom hindurchgeht, wird die Lauge elektrolysiert. Die Kationen sind Kupfer und Eisen, welche sich auf der Kathode niederschlagen sollten. Das Kupfer schlägt sich auch wirklich nieder, das Eisen aber hat bekanntlich die Eigenschaft, aus Kupfervitriol Kupfer zu fällen, indem es selbst zu Eisensulfat wird. Das Resultat ist also, daß teils als primäres, teils als sekundäres Produkt sich nur Kupfer auf der Kathode abscheidet. An der Anode nun tritt SO_4 auf und dieses oxydiert sofort das vorhandene Ferrosulfat (FeSO_4) zu Ferrisulfat $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Hier wird also die notwendige Oxydationsarbeit nicht durch Auflösen der Anode, sondern durch Oxydieren der Flüssigkeit geleistet

— eine durch dieses Verfahren zum ersten Male in die Praxis eingeführte wichtige Neuerung.

Nachdem also im Kathodenraum das Kupfer schon größtenteils

Fig. 466.



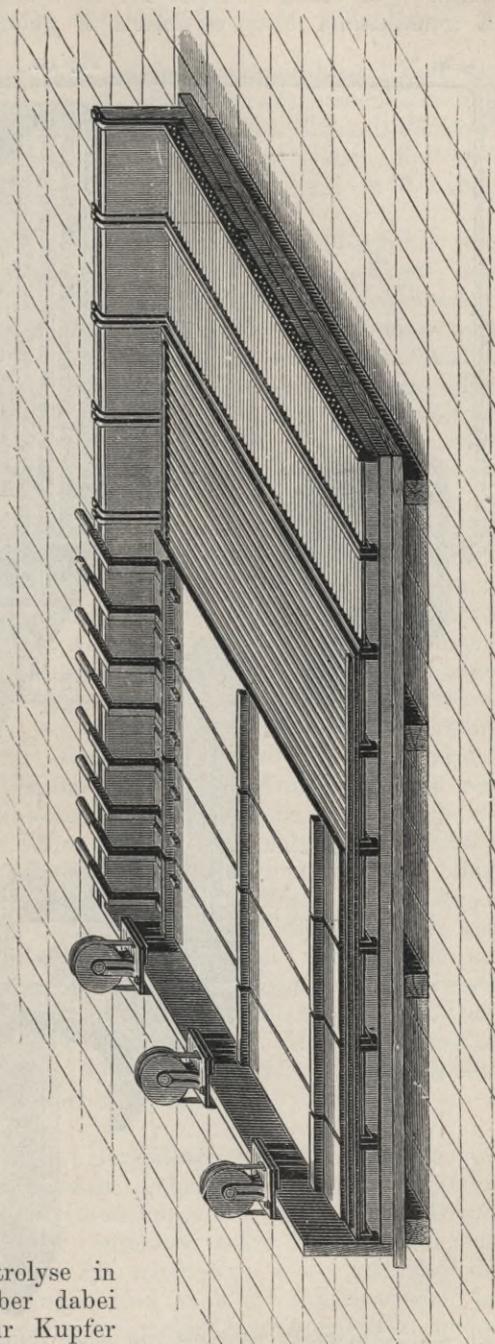
ausgefällt war, wird im Anodenraum die Lauge wieder zu Ferrisulfat oxydiert, welches nun von neuem dazu benutzt wird, die vorhandenen Erze auszulaugen. Und so geht also der Prozeß kontinuierlich fort.

Die Anoden bestehen bei diesem System, wie Fig. 466 zeigt,

aus runden präparierten Kohlenstäben, von denen 200 Stück zu einem System von 1,35 m Länge und 0,405 m Breite durch Bleiumguß verbunden sind. Solche Anodensysteme kommen nun auf den Boden der Bäder, von denen Fig. 467 eine Ansicht zeigt. Es sind das flache Holzkästen, die innen durch Juteleinen gedichtet sind. Auf dem Boden, der schräg zuläuft, liegen die Anodensysteme, von denen man in der Figur einige sieht. Über diese wird ein Leinwandfilter gelegt, welches in einen Holzrahmen gespannt ist. Dieses bildet unten den Anodenraum, über sich den Kathodenraum. Die Kathoden sind Holzplatten, die auf der Unterseite mit Kupferblechen beschlagen sind. Auf diesen scheidet sich das Kupfer ab. Damit die Lauge im Kathodenraum gleichmäßig verteilt sei, wird sie dort durch ein Rührwerk geführt. In den Kathodenraum fließt die Lauge (Kupfersulfat und Ferrosulfat) oben hinein und aus dem Anodenraum fließt unten Ferrisulfat wieder ab.

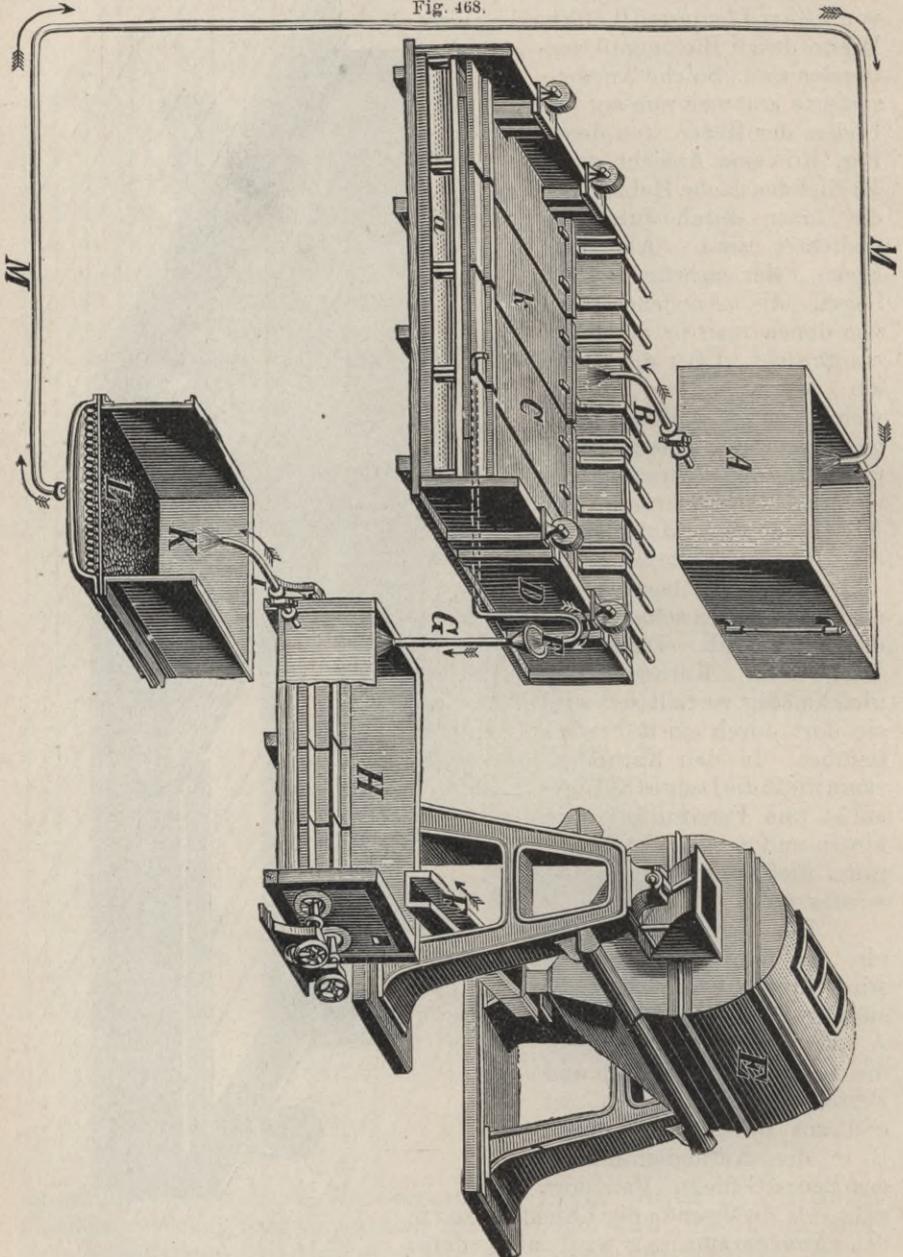
Der ganze Prozeß ist also ein Kreisprozeß und er wird durch Fig. 468 vollständig dargestellt. Darin ist A ein Gefäß, in welchem die Lauge (Kupfersulfat und Ferrosulfat) vorhanden ist und aus welchem sie durch B in den Kathodenraum K des Bades C fließt. Von dort geht sie während der Elektrolyse in den Anodenraum a, wird aber dabei zu Ferrisulfat, indem sie ihr Kupfer ganz abgibt. Das Ferrisulfat fließt

Fig. 467.



durch G in einen Behälter H, in welchen die durch die Kugelmühle E gemahlene Erze mittels F gelangen. In diesem Behälter H

Fig. 468.



ist ein Rührwerk, welches die Erze und das Ferrisulfat gut durcheinander rührt. Das Erzpulver und die jetzt wieder entstandene Lauge

werden dann durch sogenannte Nutschen K getrennt. Das Erz bleibt bei L, während die Lauge durch das Rohr M wieder zum Bassin A befördert wird.

Die bei diesem Prozeß notwendige Betriebsspannung ist 1 Volt, die Stromdichte beträgt 120 Ampère pro Quadratmeter Kathodenfläche und man erhält von der theoretischen Kupfermenge in Wirklichkeit 95 Proz.

Anlagen nach diesem vorzüglich ausgebildeten System sind von Siemens & Halske in Martinikenfelde bei Berlin und in Kedabeg und Kalakent im Kaukasus ausgeführt worden.

Andere für denselben Zweck ersonnene Verfahren übergehen wir.

Für die anderen schweren unedlen Metalle außer dem Kupfer hat sich der elektrische Betrieb noch wenig eingebürgert. Um insbesondere Zink aus seinen Erzen elektrolytisch zu gewinnen, hat man verschiedene chemisch-elektrische Verfahren ersonnen, welche aber bisher der Kosten wegen noch nicht zur Einführung gebracht wurden. Ein Verfahren von Siemens & Halske, bei welchem das metallische Zink direkt aus den Erzen gewonnen wird, enthält ebenso einen vollständigen Kreisprozeß, wie ihr oben beschriebenes Kupfergewinnungsverfahren. Notwendig ist zu diesem Verfahren, daß die Zinkerze in Form von Zinkoxyd zur Verwendung kommen, wozu man also entweder direkt zinkoxydhaltige Erze oder hüttenmännisch gewonnene Produkte nehmen muß. Diese Erze werden nun klein gemahlen und durch eine warme Lösung von neutralem Aluminiumsulfat ausgelaugt. Es bildet sich dadurch eine Lösung, die ein Gemisch von Zinksulfat und einem basischen Aluminiumsulfat enthält. Diese Lösung ist nun die Lauge, die weiter elektrolysiert wird. Und zwar wird die Lösung im ganzen, also ohne Diaphragmen, in die Bäder gebracht, so zwar, daß erstens ein konstanter Zufluß und Abfluß der Lauge eingerichtet wird und daß ferner die Lauge in starker Zirkulation ist. Als Anoden werden nun Bleibleche, als Kathoden Zinkbleche in das Bad gehängt. Durch die Elektrolyse wandern Zink und Aluminium in der Richtung zur Kathode. Das Zink scheidet sich auch wirklich aus, das Aluminium aber bildet mit der Lauge sofort wieder neutrales Aluminiumsulfat. An der Anode entsteht freier Sauerstoff. Die Lauge, die unten abfließt, besteht also wieder aus neutralem Aluminiumsulfat und kann nun wieder zur weiteren Auslaugung von Erzen dienen. Die Spannung bei diesem Prozeß beträgt 3 Volt, die Stromdichte kann auf 60 Ampère pro Quadratmeter gesteigert werden. Das erhaltene Zink ist ein glänzendes Produkt, das frei von Aluminium ist. Ebenso stellt die Gesellschaft Schuckert ein sehr reines Zink elektrolytisch dar, aber nach einem geheim gehaltenen Verfahren.

Auch für die elektrolytische Darstellung von Nickel hat die Gesellschaft Schuckert ein eigenes, geheim gehaltenes Verfahren. Die Ausgangsmaterialien für die Gewinnung von Nickel und Kobalt, die sogenannten Speisen und Steine, enthalten außer diesen immer noch Eisen, Zink und Kupfer und es ist schwierig, diese während der Elektrolyse zu entfernen. Außerdem sind auch die Polarisierungen bei Nickel und Kobalt, in Ermangelung geeigneter Oxydationsarbeit, immer recht erheblich.

Dagegen haben Siemens & Halske ein vollständiges und auch praktisch (in Wien) durchgeführtes Verfahren angegeben, um Antimon und Arsen rein darzustellen. Dieses Verfahren ist ebenfalls im Prinzip ihrem Kupfergewinnungsverfahren ähnlich, doch ist es, da diese Metalle praktisch nicht von großer Wichtigkeit sind, überflüssig, es hier auseinanderzusetzen.

Praktische Verwendung hat die Elektrolyse dagegen erhalten zur Abscheidung des Zinns aus den Abfällen von Weißblech (verzinntes Eisen), welche 3—9 Proz. Zinn enthalten. Diese Weißblechabfälle werden in Holzkörbe verpackt und in die Bäder gesenkt. In den Bädern befindet sich verdünnte Schwefelsäure. Die Körbe werden während des Betriebes auf und ab bewegt, damit die Säure überall hinkommt. Diese Weißblechabfälle dienen als Anoden. Als Kathoden werden neben die Körbe verzinnte Kupferbleche gestellt. Das Zinn wird dann durch den Strom von den Anoden abgelöst und auf den Kathoden niedergeschlagen. Nach dem Ablösen des Zinns von den Anoden löst sich das Eisen auf und es bildet sich Eisenvitriol, so daß die Flüssigkeit nach einiger Zeit durch neue ersetzt werden muß. Die Spannung an den Bädern beträgt kaum 2 Volt, die Stromdichte 30 Ampère pro Quadratmeter. Das Zinn schlägt sich anfangs, wenn die Lösung sehr sauer ist, schwammig nieder, nachher wird es pulverig und kristallinisch in Form von Nadeln. Es ist reiner als gewöhnliches Zinn, wie es im Handel zu haben ist.

Einen wichtigen Erfolg hat die Elektrochemie zu verzeichnen bei der Gewinnung des Goldes. In einer Reihe von Goldminen in Transvaal wird im großen Stil der sogenannte Siemensprozeß ausgeführt, dessen technische und finanzielle Resultate höchst zufriedenstellend sind. Der Siemensprozeß besteht in folgendem: Die goldhaltigen Erze und Rückstände werden mit einer sehr verdünnten Lösung von Cyankali behandelt, welche das Gold auflöst. Diese Cyangoldkalilösung wird dann durch den Strom elektrolysiert, so daß das Gold sich auf Bleiplatten niederschlägt. Von diesen wird es in bekannter Weise abgetrieben. In der Anwendung des Cyankalis zum Lösen des Goldes ähnelt das Verfahren dem Cyanidprozeß von Mac Artur-Forrest, welcher vielfach benutzt wird. Bei diesem Prozeß wird aber das Gold aus der Cyanlösung durch Zinkspäne gefällt, während es bei dem Siemensprozeß durch Elektrolyse gefällt wird. Die Folge dieses Unterschiedes ist die, daß beim Cyanidprozeß viel mehr konzentrierte Cyankalilösungen angewendet werden müssen (von zirka 0,3 Proz.) als bei dem Siemensprozeß, wo sie nur 0,05, ja sogar nur 0,01 Proz. Cyankali enthalten. Bei dem hohen Preis des Cyankali macht dies viel aus. Außerdem scheidet sich bei dem Cyanidprozeß das Gold als loses Pulver auf den Zinkspänen ab, während es hier als fester Niederschlag auf den Bleiplatten erscheint. Bei dem Siemensprozeß werden die goldhaltigen Substanzen (Erze oder Tailings) in möglichst feines Pulver verwandelt; dann werden sie mit der Cyankalilösung in eisernen Gefäßen von zirka 100 cbm übergossen und dadurch wird das Gold ausgelaugt. Die Goldlauge wird dann in eiserne Fällungsbehälter von zirka 20 cbm Inhalt eingelassen und dort wird sie elektrolysiert. Dabei dienen als

Kathoden, wie gesagt, Bleiplatten, als Anoden aber dienen Eisenbleche. Durch die Lauge wird dieses Eisen aufgelöst und Berlinerblau gebildet, welches aber wieder in Cyankali übergeführt wird. Von dem Goldgehalt der Rückstände werden auf diese Weise zirka 70 Proz. gewonnen. Dieser Siemensprozeß verdrängt in Südafrika allmählich den Forrestprozeß, da er ebenso wie dieser die Ausbeutung sehr schwach goldhaltiger Massen gestattet und bequemer und billiger wie dieser ist.

Dies sind die sämtlichen bisher praktisch bewährten Verfahren, um Schwermetalle mit Hilfe des elektrischen Stromes zu erhalten. Das Gemeinschaftliche bei allen diesen Verfahren ist das, daß die Metalle aus den Lösungen in ihrer Salze abgeschieden werden können.

Dieses Verfahren läßt sich nun bisher nicht anwenden bei den Leichtmetallen. Diese wirken im Entstehungszustande immer zersetzend auf das Wasser und können daher aus den Lösungen nicht elektrolytisch erhalten werden. Es ist allerdings durchaus nicht ausgeschlossen, daß es in Zukunft durch geeignete Verbindung von chemischer und elektrischer Umsetzung doch möglich sein wird, auch hier die bequemen Lösungen zur Elektrolyse zu benutzen. Bisher ist das aber nicht der Fall, vielmehr muß man hier die Abscheidung der Metalle aus den geschmolzenen, feurig-flüssigen Verbindungen der betreffenden Metalle vornehmen.

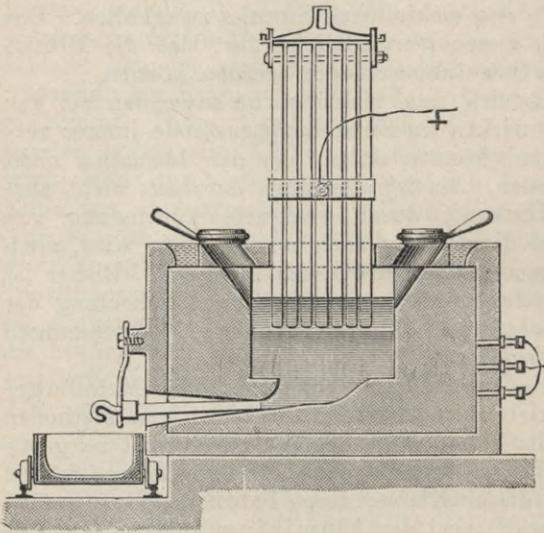
Im kleinen ist so die Darstellung fast aller dieser Metalle gelungen. Für den Großbetrieb aber sind teils die bisherigen Methoden noch nicht brauchbar, teils haben diese Metalle auch nicht so große Verwendbarkeit, daß ihre Darstellung in großen Mengen lohnen würde.

Die einzigen Metalle dieser Klasse, deren Fabrikation im großen tatsächlich vorgenommen wird, sind das Aluminium und das Magnesium, ja es ist eigentlich erst, seitdem man auf elektrischem Wege das Aluminium billig herzustellen lernte, dieses Metall Gegenstand des täglichen Gebrauchs geworden. Das Aluminium hat eben so außerordentlich wertvolle Eigenschaften, daß in vielen Fällen das Eisen völlig von dem Aluminium verdrängt wird. Auch Legierungen des Aluminiums mit Kupfer und Zink, die sogenannten Aluminiumbronzen, haben sehr wertvolle Eigenschaften. Das Magnesium dagegen hat bisher noch sehr geringe Verwendung gefunden.

Zur Erzeugung des reinen Aluminiums und der Aluminiumbronzen ist unter anderen in Neuhausen in der Schweiz ein Verfahren in Gebrauch, welches dort von der Aktiengesellschaft für Aluminiumindustrie angewendet wird. In Neuhausen sind nämlich von den Kräften des Rheinfall es über 2000 Pferdekräfte nutzbar gemacht, um die Dynamomaschinen zu betreiben, welche den Strom liefern, der einerseits die Salze feurig-flüssig macht und andererseits sie elektrolysiert. In einen großen Kohlentiegel, wie ihn Fig. 469 zeigt, der außen mit Eisen verschalt ist, wird das Fluordoppelsalz von Aluminium und Natrium gebracht, dem dann während des Betriebes fortwährend Aluminiumoxyd in geeigneter Menge zugesetzt wird. In dem Kohlentiegel befindet sich, wenn man reines Aluminium darstellen will, entweder unten eine Kathode aus Eisen, oder, in anderen Fällen, bildet der Kohlentiegel selbst die Kathode. Als positive Elektrode dient das oben in

der Figur sichtbare Bündel von Kohlenplatten. Der Tiegel hat seitlich zwei schräge Schachte, durch welche die Tonerde eingeführt wird, und unten eine durch einen Kohlenstab verschließbare Öffnung, aus welcher das gebildete Metall abgelassen werden kann. Die positive Elektrode wird zunächst bis zur Berührung mit der negativen heruntengelassen und dann, während der Strom durchgeht, gehoben. Es bildet sich ein

Fig. 469.



Lichtbogen, der das Aluminiumsalz schmilzt. Ist dieses erreicht, so wird die Anode weiter gehoben und in die Schmelze hineingebracht, so daß der Lichtbogen aufhört und nun die Elektrolyse beginnt. Durch die Joulesche Wärme wird die Masse dabei immer flüssig erhalten. Es wird bei diesem Prozeß ein Strom von 15 Volt Spannung, aber von 12 000 Ampère Stromstärke angewendet. Aus der geschmolzenen Tonerde scheidet sich durch Elektrolyse das Aluminium an der negativen Elektrode ab. Bringt man auf den Boden des

Tiegels geschmolzenes Kupfer oder Messing, so bekommt man Legierungen des gebildeten Aluminiums mit diesen Metallen, die Aluminiumbronzen, sonst erhält man reines Aluminium. Durch dieses Verfahren wird Aluminium in solchen Mengen dargestellt, daß sein Preis von 200 auf weniger als 2,50 Mark für 1 kg gesunken ist.

Zu dieser Aluminiumgewinnung werden kolossale Dynamomaschinen in Neuhausen benutzt, von denen die neuen jede bis zu 7500 Ampère Stromstärke liefern.

In ähnlicher Weise wird das Magnesium durch Elektrolyse des geschmolzenen Magnesiumchlorids von einer Aktiengesellschaft in Bremen hergestellt.

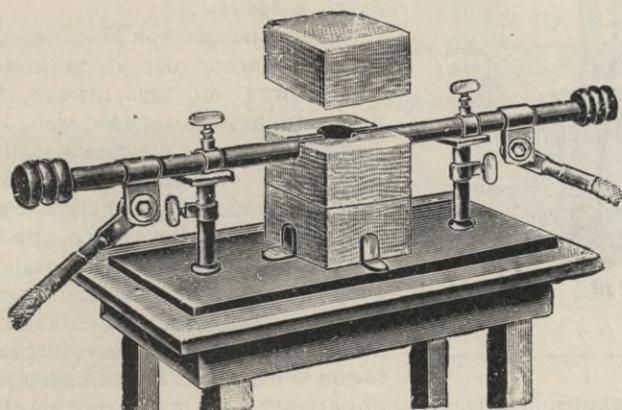
Bei der Aluminiumgewinnung ist es direkt die Joulesche Wärme, die in dem Elektrolyten beim Stromdurchgang entwickelt wird, welche die Verflüssigung desselben und darauf die Elektrolyse hervorbringt.

Auch in anderen Fällen werden jetzt die hohen Temperaturen, die man durch den elektrischen Lichtbogen erhält, zur Erzeugung chemischer Stoffe, sei es durch Verbindung, sei es durch Zerlegung, benutzt. Diese Methode ist hauptsächlich von dem französischen Chemiker Moissan ausgegangen, der weitreichende und große Untersuchungen unter Anwendung des Lichtbogens gemacht hat. Er konstruierte sich für seine Zwecke einen elektrischen Schmelzofen,

in welchem direkt die hohe Temperatur des Lichtbogens zur Erzielung chemischer und physikalischer Prozesse benutzt wurde. Die Ansicht eines solchen Ofens ist in Fig. 470 gegeben. Der eigentliche Ofen besteht aus einem dreiteiligen Block aus Magnesit oder Schamotte, von denen der oberste den Deckel bildet. Die beiden starken Kohlen sind horizontal in den zweiten Block eingeführt, in welchem die zu schmelzende Substanz sich in einem Tiegel aus Kohle oder Magnesit oder geschmolzener Magnesia, je nach der zu erzielenden Temperatur, befindet. An die Kohlen werden seitlich die Zuleitungskabel von der Stromquelle befestigt. Diese Öfen werden von der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt in Frankfurt a. M. hergestellt.

In derartigen Öfen hat zuerst Moissan mit Strömen von 110 Volt Spannung und bis zu 1000 Ampère Stromstärke experimentiert. Im

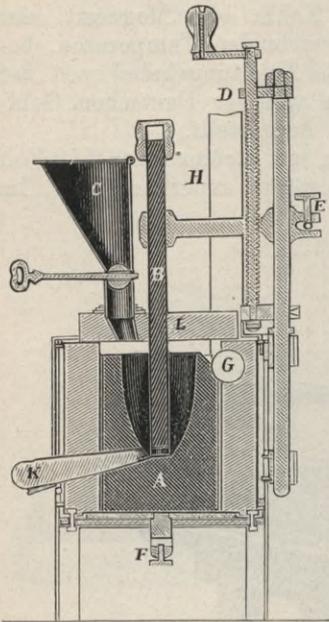
Fig. 470.



Betrieb werden die Kohlen selbst durchweg glühend und aus den Öffnungen schlagen weitreichende Flammen von 40 bis 50 cm Länge heraus. Da ein Strom von 110 Volt und 1000 Ampère einen Effekt von 110 000 Watt hat, und da 736 Watt gleich einer Pferdekraft sind, so braucht man zum Betrieb eines solchen Lichtbogens ungefähr 150 Pferdekräfte. Bei noch stärkeren Strömen, solchen bis zu 2000 Ampère, halten die Öfen aus Kalk nicht mehr, der Kalk wird flüssig wie Wasser. In diesen Fällen fütterte Moissan die Vertiefung im Ofen mit Platten aus Magnesia und dahinter liegenden Kohlenplatten aus. Ein solcher Ofen gestattete natürlich nur immer mit einer begrenzten Menge von Substanz zu arbeiten. Es werden aber jetzt von derselben Firma auch elektrische Öfen hergestellt, welche einen kontinuierlichen Betrieb gestatten. So zeigt z. B. Fig. 471 den Durchschnitt eines solchen Ofens. Der Tiegel A besteht entweder aus Kohle, wobei er zugleich als negative Elektrode dient, oder er besteht aus Magnesit, und dann wird der Strom durch einen Kohlenstab, der durch ein Loch in dem Tiegelboden geht, in diese eingeführt. Bei F befindet sich die Klemme für das negative Stromkabel. Die positive Kohle B, die bei E

mit dem positiven Kabel verbunden wird, kann durch die Schraube D gehoben oder gesenkt werden. Durch den Falltrichter C mit beweglichem Boden kann das zu verarbeitende Material nachgefüllt werden, während durch die Abstichöffnung bei K das geschmolzene Material entfernt werden kann. Etwaige Gase, die sich bei dem Prozeß bilden, entweichen durch die Öffnung G nach H.

Fig. 471.



In solchen Öfen gelingt es, eine große Reihe von Körpern im reinen Zustand in großen Quantitäten herzustellen, Chrom, Mangan, Molybdän, Wolfram, Uran, Vanadin, Zirkon, Titan, und ebenso deren Verbindungen zu studieren. Auch die Herstellung künstlicher Diamanten, allerdings in kleinen Quantitäten, war dadurch möglich.

Von besonderer Wichtigkeit, sowohl in theoretischer wie in praktischer Hinsicht, war die aus diesen Versuchen fließende Kenntnis, daß sich bei diesen Temperaturen die meisten Metalle mit dem Kohlenstoff zu einem neuen Körper chemisch verbinden. Diese Verbindungen nennt man allgemein Karbide, und Moissan stellte so Karbide von Lithium, Calcium, Baryum, Strontium, Cer, Lanthan, Yttrium, Thorium, Aluminium, Mangan, Uran, Silizium, Bor dar. Hervorragende praktische Wichtigkeit haben bisher nur erstens

das Siliziumkarbid (Karbonium) erlangt, welches härter als alle anderen Körper ist und nur vom Diamanten wenig übertroffen wird und welches daher zum Schleifen der Körper vielfach Verwendung findet, vor allem aber zweitens das Calciumkarbid, welches man jetzt auch gewöhnlich, ohne nähere Bezeichnung, Karbid nennt. Bringt man nämlich ein Gemenge von Kalk (CaO) und Kohle (C) in solchem Verhältnis in den elektrischen Ofen, daß auf je 1 Molekül CaO (56 g) 3 Moleküle Kohlenstoff (36 g) kommen, so verbindet sich das Calcium mit dem Kohlenstoff zu Calciumkarbid (CaC_2) und es entweicht Kohlenoxyd (CO). Das entstehende Karbid ist eine dunkle, homogene Masse, die sich leicht spalten läßt. Die hervorragende Bedeutung des Calciumkarbids besteht darin, daß, wenn man es in Wasser bringt, sich sofort ein Gas, Acetylen, bildet und zwar reines Acetylen, wenn das Calciumkarbid rein ist. Es verbindet sich nämlich der Kohlenstoff (C_2) mit dem Wasserstoff des Wassers (H_2) zu Acetylen (C_2H_2) und das Calcium (Ca) des Karbids mit dem Sauerstoff (O) des Wassers zu Kalk (CaO). Das Acetylen, ein Kohlenwasserstoff, ist nun brennbar, und zwar brennt es mit viel hellerer Flamme als Leuchtgas. Da nun das Karbid ein fester, leicht transportabler Körper, und da die Reaktion mit Wasser eine so einfache ist, so beginnt jetzt eine neue Beleuchtungsart sich einzubürgern,

nämlich die Beleuchtung mit Acetylgas, statt mit Leuchtgas. Eine Reihe von Unglücksfällen, die im Anfang bei dieser Acetylenbeleuchtung vorgekommen sind, haben zu genauerer Untersuchung der dabei vorhandenen Umstände geführt, und es wurde festgestellt, daß wenn das Acetylen unter einem Drucke steht, der den der Atmosphäre nur wenig übersteigt, daß es dann vollkommen gefahrlos ist, während es allerdings bei höheren Drucken zu sehr gefährlichen Explosionen Anlaß gibt. Die Acetylenindustrie, die sich in den letzten Jahren immer mehr ausbreitet, ist direkt aus der Elektrochemie hervorgegangen, insofern diese das Calciumkarbid auf einfache Weise und mit sehr großer Ausbeute liefert. Mit 1 Pferdekraft kann man in 24 Stunden 3,5 Kilo Karbid gewinnen.

Aber mit dieser Darstellung von reinen Metallen oder Metalllegierungen sind die Möglichkeiten, wie man die elektrolytischen Wirkungen des Stromes benutzen kann, noch lange nicht erschöpft. Da bei jedem elektrolytischen Prozeß an der Kathode reduzierende, an der Anode oxydierende Stoffe entstehen, so kann man in sehr vielfältiger Kombination aus den elektrolysierten Substanzen neue bilden, welche von höherem Wert sind, als die Ausgangsmaterialien. Es kommt eben nur darauf an, ob die Oxydationen und Reduktionen durch Vermittelung des Stromes billiger zu erzeugen sind, als durch rein chemische Oxydations- und Reduktionsmittel. Bisher hat sich schon in einer Reihe von Fällen das elektrolytische Verfahren billiger erwiesen, als andere rein chemische Verfahren, und dazu kommt noch der große Vorzug, daß man auf elektrischem Wege die Substanzen reiner erhält, als auf anderen Wegen.

Da indes diese Verfahren, soweit sie wirklich praktisch benutzt werden, sehr geheim gehalten werden und eine Reihe von speziellen chemischen Kenntnissen voraussetzen, so sollen sie hier nicht näher angeführt werden.

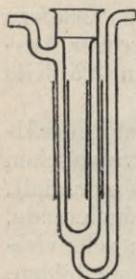
Dagegen soll kurz ein Verfahren besprochen werden, durch welches es gelingt, mittels des elektrischen Stromes Stoffe zu bleichen, nämlich das Hermitesche Bleichverfahren, welches namentlich zum Bleichen von Papier und von Textilstoffen benutzt wird. Zu dem Zwecke wird ein Bad hergestellt, welches ein Gemenge von Chlormagnesium und Steinsalz (oder Seesalz) gelöst enthält, und zwar werden dem Wasser am besten 5 Proz. Steinsalz und 0,5 Proz. Seesalz zugesetzt. Wird ein Strom durch ein solches Bad (mit der Spannung von 5 Volt) hindurchgeleitet, so wird gleichzeitig das Chlornatrium und das Chlormagnesium zersetzt. Das entstehende Natrium (an der Kathode) fällt aber sofort die Magnesia aus dem Chlormagnesium und zersetzt andererseits auch das Wasser. Der Sauerstoff des Wassers mit dem entstehenden Chlor bildet zunächst Unterchlorsäure, die sich wieder in chlorige Säure und Chlorsäure spaltet. Es entsteht also an dem negativen Pol Magnesia, während am positiven Pol Chlorsäure (ClO_5) und chlorige Säure (ClO_3) sich bilden.

Die letzteren geben aber ihren Sauerstoff an den Farbstoff der zu bleichenden Pflanzenfasern ab und bleichen diese, wobei sich zunächst Chlorwasserstoffsäure und dann wieder Chlormagnesium bildet.

Der chemische Prozeß bei diesem Verfahren ist nicht in vollkommen genügender Weise aufgeklärt. Die bleichende Wirkung des Stromes ist aber so groß, daß dieser Prozeß an vielen Stellen praktisch eingeführt ist.

Solche Anwendungen des elektrischen Stromes dürften sich in Zukunft noch viele ergeben, wenn in diese neue Technik erst genügend erfindungsreiche Kräfte eingetreten sein werden, die sowohl in elektrischer wie namentlich in chemischer Denkweise sich gleich sicher bewegen können.

Fig. 472.

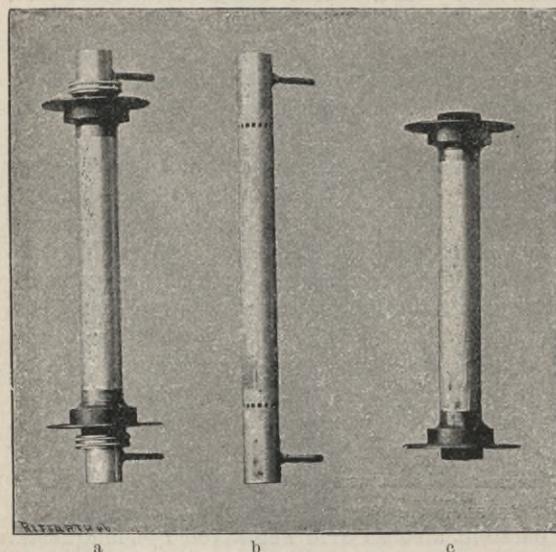


Eine ganz abweichende elektrische Erzeugungsweise wird endlich für ein chemisches Produkt angewendet, welches für sehr verschiedene Zwecke sich als vorteilhaft erweist, nämlich für das Ozon. Ozon ist bekanntlich eine Modifikation des Sauerstoffs, von der die Chemiker annehmen, daß sie darin besteht, daß in einem Ozonmolekül 3 Atome Sauerstoff miteinander verbunden sind, während in einem gewöhnlichen Sauerstoffmolekül nur zwei derselben in Verbindung treten. Das dritte Sauerstoffatom des Ozons aber ist verhältnismäßig schwach gebunden und trennt sich

daher leicht von dem Molekül, so daß Ozon infolgedessen starke oxydierende Wirkung besitzt.

Immer wenn eine elektrische Entladung, sei es ein Funke oder eine Glimmentladung, durch die Luft oder durch Sauerstoff geht, bildet sich Ozon, welches an seinem eigentümlichen Geruch leicht erkannt wird. Man bemerkt den

Fig. 473.



Ozongeruch immer, wenn man aus Influenzmaschinen Funken zieht, ebenso bei dem Arbeiten

mit Induktionsapparaten. Sehr intensiv tritt der Ozongeruch insbesondere bei den Versuchen nach der Tesla'schen Anordnung auf, von denen S. 280 f. die Rede war. Einen Apparat, um Ozon in verhältnismäßig großen Mengen zu erzeugen, hat W. Siemens bereits 1857 unter dem Namen Ozonröhre

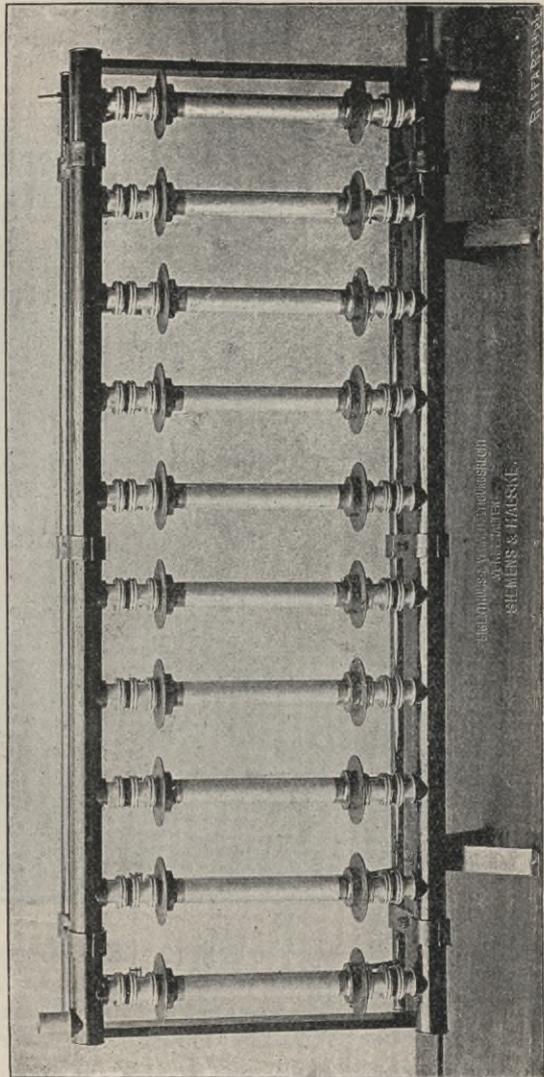
konstruiert. Dieselbe besteht, wie Fig. 472 zeigt, aus zwei ineinander gesteckten und oben zusammengeschmolzenen Glasröhren, von denen die äußere ein Zufluß- und ein Abflußrohr für die Luft resp. den Sauerstoff hat. Die innere Glasröhre ist innen, die äußere außen mit Stanniol

belegt, so daß man einen Kondensator hat, dessen Belegungen das Stanniol, dessen dielektrische Zwischenschicht die Glaswände und die Luft sind. Ladet man die Belegungen dieses Kondensators durch rasch wechselnde Ströme von hoher Spannung, so wird in der Luft Ozon erzeugt. Es hat sich nämlich gezeigt, daß das Ozon in größerer Menge erzeugt wird, wenn nur

dunkle Entladungen durch die Luft hindurchgehen, als wenn wirklich Funken durch sie hindurchschlagen. Solche Ozonröhren haben sich sehr gut bewährt, so daß auch heute noch von Siemens & Halske die Ozonerzeugung durch derartige Röhren ausgeführt wird. Nur werden an die beiden Glasröhren nicht mehr die leitenden Belegungen aufgeklebt, sondern es wird vielmehr das innere Rohr mit Wasser gefüllt und das äußere in Wasser gestellt, so daß das Wasser selbst die Belegungen bildet. Für größere technische Betriebe wenden Siemens & Halske diese Röhren in einer Form an, welche sie als Ozonglimmeröhren bezeichnen. Eine Ansicht einer solchen gibt Fig. 473 a. Sie ist folgendermaßen konstruiert. Das Innere der Röhre bildet ein Metallrohr (Fig. 473 b), dessen mittlerer Teil durch eine Metallplatte oben und unten abgeschlossen ist,

so daß Kühlwasser, welches durch das obere Ansatzrohr einfließt, den mittleren Teil der Röhre ausfüllt und unten abfließt. Um diesen mittleren Teil des Rohres herum ist nun eine metallbelegte Glimmeröhre (Fig. 473 c) gelegt, und zwar ist sie durch ihre Fassung mit

Fig. 474.



so daß Kühlwasser, welches durch das obere Ansatzrohr einfließt, den mittleren Teil der Röhre ausfüllt und unten abfließt. Um diesen mittleren Teil des Rohres herum ist nun eine metallbelegte Glimmeröhre (Fig. 473 c) gelegt, und zwar ist sie durch ihre Fassung mit

dem Metallrohr verschraubt. Durch die in Fig. 473b sichtbaren Lochreihen strömt die Luft, die oben in das Metallrohr eintritt, in den Zwischenraum zwischen Metallrohr und Glimmerrohr, wird dort ozonisiert und strömt unten aus den Lochreihen wieder ab. Ein aus zehn solchen Röhren bestehendes Rohrgitter zeigt Fig. 474.

Zum Betrieb der Ozonröhren werden hochgespannte Wechselströme benutzt, die aus Wechselstrommaschinen entnommen und durch

Fig. 475.

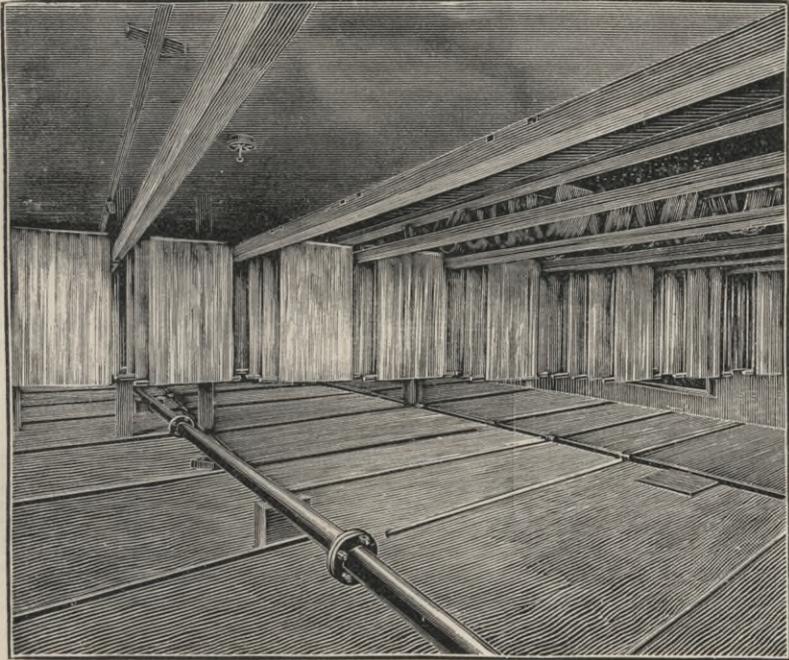


Transformatoren auf die gewünschte hohe Spannung gebracht werden. Indes hat sich durch Versuche gezeigt, daß nicht jeder beliebige Wechselstrom gleich geeignet zur Ozonerzeugung ist, vielmehr hängt die Größe der Wirkung namentlich davon ab, welche Form die Wechselströme haben, ob sie regelmäßige oder unregelmäßige sind, ein Unterschied, den wir auf S. 246 erklärt haben. Es werden daher zum Betriebe der Ozonröhren von Siemens & Halske eigene Wechselstrommaschinen benutzt, deren Konstruktion aber nicht näher verlaublich.

Wichtige Anwendung hat nun das Ozon in der Bleicherei er-

fahren, indem es dabei die sogenannte Rasenbleiche ersetzt. Die Garne werden nämlich erst, wie gewöhnlich, mit Chlorkalk behandelt, dann aber statt auf Rasen gebleicht zu werden, in den Ozonkammern aufgehängt, nachdem sie vorher noch mit schwachen Lösungen von Salzsäure, Terpentin oder Ammoniak getränkt wurden. Das Ozon wird in Glimmerröhren erzeugt, die, wie Fig. 475 zeigt, in großer Anzahl in Schränken aufgestellt sind. Von dort wird es durch Rohre in die Ozonkammern (Fig. 476) geleitet, in welchen die Garne aufgehängt

Fig. 476.



werden. Nach 6—7 Stunden ist das Garn zweckmäßig gebleicht, hat die sogenannte $\frac{3}{4}$ -Bleiche erhalten.

Wenn auch die Kosten dieses Verfahrens nicht geringer sind, als die des gewöhnlichen Bleichverfahrens, so hat es doch den Vorteil, daß erstens die Zeit des Bleichens eine viel geringere ist, etwa nur $\frac{1}{3}$ der sonstigen, und daß der Bleicher nicht mehr vom Wetter abhängt, wie bei der Rasenbleiche, sondern daß er eben die ganze Behandlung in geschlossenen Räumen vornehmen kann.

Außer dieser Anwendung zum Bleichen hat sich das Ozon als wichtig erwiesen zur Reinigung von Stoffen, namentlich von Stärkerivaten, und es wird ein neues Verfahren in die Praxis eingeführt, durch welches man Stärke, Dextrin, Kristallgummi in vorzüglicher Reinheit mittels Ozon herstellt. Andere Benutzungen des Ozons, wie zum künstlichen Altern von Holz, von Weinen und Spirituosen, zur

Vernichtung der Reblaus, sind noch nicht, oder nur zum Teil, in die Praxis übergegangen.

So hat sich gezeigt, daß in diesem noch jungen Gebiet der Elektrochemie bereits eine sehr große Anzahl von technisch und kommerziell höchst wichtigen Errungenschaften gewonnen worden sind, und der Ausspruch Werner Siemens', der an den Anfang dieses Kapitels gestellt wurde, hat sich zum Teil schon erfüllt, und seine weiteren Voraussagungen für die Zukunft werden voraussichtlich sich auch als richtig erweisen.

12. Kapitel.

Die Galvanoplastik.

Die wunderbare Eigenschaft des elektrischen Stromes, daß er flüssige Leiter, Elektrolyte, bei seinem Durchgang in ihre Bestandteile zerlegt, und daß diese Bestandteile an den Elektroden frei auftreten, führte schon im Jahre 1837 Jacobi dazu, darauf eine Methode zum Überziehen von Körpern mit Metallen zu gründen. Dadurch gab er den Anstoß zu der Galvanoplastik, der Kunst, auf galvanischem Wege Metallniederschläge auf den Oberflächen von Körpern hervorzubringen, und seit dieser Zeit hat sich die Galvanoplastik zu einem bedeutenden Industriezweig ausgebildet und immer neue Aufgaben in ihre Domäne gezogen.

Jede Lösung eines Metallsalzes, z. B. eine Kupfervitriollösung, wird durch einen elektrischen Strom, wie wir wissen (S. 134 f.), elektrolysiert, und es scheidet sich das Metall an der negativen Elektrode ab, der übrige Bestandteil, der die Säure enthält, an der positiven Elektrode. Besteht die positive Elektrode aus demselben Metall, welches in dem gelösten Salz enthalten ist, so wird für jedes Äquivalent des Metalls, das sich an der negativen Elektrode abscheidet, ein Äquivalent desselben Metalls von der positiven Elektrode aufgelöst, die Flüssigkeit bleibt also immer gleich konzentriert und es findet nur an der positiven Elektrode eine Auflösung des Metalls, an der negativen ein Niederschlagen desselben Metalls statt.

Auf diese Weise kann man also die negative Elektrode mit einer Schicht eines Metalls überziehen, und je nach dem Metallsalz, das man anwendet, kann man Gegenstände verkupfern, vernickeln, vergolden, verzinnen, verplatinieren, verstählen. Jedoch eignet sich nicht jedes Metallsalz gleich gut, um solche galvanoplastische Niederschläge zu liefern, es haben sich im Gegenteil durch die Erfahrung für die verschiedenen Metallniederschläge bestimmte Salze und bestimmte Konzentrationen der Lösungen als besonders zweckmäßig erwiesen. Im allgemeinen nämlich sind es nicht die direkten Produkte der Elektrolyse, welche schöne Metallniederschläge ergeben, sondern vielmehr die durch sekundäre Prozesse erzeugten. Es werden daher gewöhnlich Doppelsalze angewendet, aus welchen das gewünschte Metall nicht durch den Strom direkt ausgeschieden wird, sondern erst dadurch, daß das wirkliche Kation es aus seiner Verbindung chemisch verdrängt. Doch ist dabei noch immer die Konzentration der Flüssigkeit, aus welcher das

Metall niedergeschlagen werden soll, des Bades, von wesentlichem Einfluß auf die Schönheit des Niederschlags, und es haben darin die einzelnen Fabriken ihre besonderen Geheimnisse. Ebenso ist auch bei der Galvanoplastik, wie bei der eigentlichen Elektrochemie, die passende Stromdichte (S. 545) für jeden Prozeß besonders zu bestimmen. Zu große Stromdichten machen häufig die Metallniederschläge rau und brüchig, zu kleine machen sie oft schwammig. Man muß also zur richtigen Führung jedes galvanoplastischen Prozesses die Stromstärke im Verhältnis zur Oberfläche der Kathode richtig wählen.

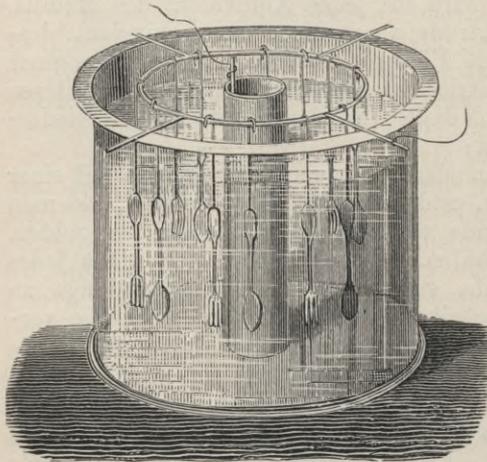
Zwei Aufgaben lassen sich sofort bei der Galvanoplastik unterscheiden. Die eine Aufgabe besteht darin, gewisse Gegenstände mit einem dünneren oder dickeren Überzug eines Metalls, z. B. Gold, zu versehen, so daß der Überzug auf ihnen haften bleibt. Das ist die Aufgabe der sogenannten Galvanostegie. Die zweite Aufgabe ist die, Gegenstände, z. B. Gipsmedaillen, mit einer dickeren Schicht eines Metalls zu überziehen, so daß man diese Schicht von ihnen abnehmen kann und dadurch einen Abdruck des ursprünglichen Gegenstandes erhält. Dies ist die Aufgabe der Galvanoplastik im eigentlichen Sinne. Beide Aufgaben sind nur durch ihre Benutzung verschieden, ihre Lösung auf galvanischem Wege ist dieselbe.

Wenn ein leitender Körper, also gewöhnlich ein Metall, mit einem galvanoplastischen Überzug versehen werden soll, der auf ihm haften soll, so ist es vor allen Dingen nötig, die Oberfläche des Metalls ganz von allen Verunreinigungen zu befreien, oder, wie man sagt, zu dekapieren. Diese Dekapierung kann bei manchen Metallen dadurch geschehen, daß man sie in Säuren eintaucht, also auf chemischem

Wege, bei anderen muß man auf mechanischem Wege durch Bürsten und Reiben dieselbe zu bewerkstelligen suchen.

Es werden dann die zu überziehenden Gegenstände, also z. B. Löffel und Messer und Gabeln, alle zusammen in das Bad getaucht, z. B. in ein Silberbad, und alle parallel miteinander verbunden, also etwa alle an einen Metallstab leitend angehängt, der mit der negativen Elektrode der Stromquelle verbunden ist. Ein solches Bad zeigt z. B. Fig. 477. Oben auf dem hohen Glasgefäß befindet sich

Fig. 477.



in der Mitte ein Ring von Messing, der durch vier Stäbchen auf dem Rand des Gefäßes aufsitzt. An dem Ring hängen alle zu versilbernden Gegenstände, und sie sind durch den Ring alle mit der negativen Elektrode der Batterie verbunden.

Als positive Elektrode steht in diesem Falle ein zylinderförmiges Silberblech in der Mitte des Bades, damit alle Gegenstände möglichst gleichmäßig stark versilbert werden.

Die als negative Elektrode dienenden Gegenstände überziehen sich dann mit einer Schicht von Silber, die sich ganz genau der Form der Gegenstände anschließt und um so dicker wird, je länger man den Strom durchfließen läßt. Die Gleichmäßigkeit des Überzugs wird noch dadurch befördert, daß man die Gegenstände von Zeit zu Zeit umkehrt.

Größere Bäder werden aus Kästen hergestellt, die entweder aus emailliertem Gußeisen oder Steinzeug, oder bei sauren Bädern aus Holz gemacht werden, welches innen mit Blei ausgeschlagen oder mit Pech gestrichen wird.

Ein solches größeres Bad ist in Fig. 478 abgebildet. Es besteht aus einer Steinzeugwanne, auf deren oberem Rand fünf voneinander isolierte Messingstäbe liegen. Der erste, dritte und fünfte Stab sind links, der zweite und vierte rechts miteinander verbunden und die linke Seite wird mit dem positiven Pol der Batterie, die rechte mit dem negativen in Verbindung gesetzt. An die mit dem negativen Pol verbundenen Stäbe werden die galvanoplastisch zu überziehenden, etwa zu verkupfernden Gegenstände, an die anderen in diesem Fall Kupferbleche oder Bleche aus dem gewünschten anderen Metall angehängt. Da die zu überziehenden Gegenstände mitten zwischen den Metallplatten hängen, so werden sie gleichmäßig überzogen. Auch hier wird die Gleichmäßigkeit wieder durch zeitweiliges Umhängen befördert. Da man ferner auch in diesem Gebiet jetzt das Hauptaugenmerk auf quantitative Messungen von Stromstärke und Spannung legt, um immer genau unter den besten Bedingungen zu arbeiten, so schaltet man parallel zu den Enden des Bades ein Voltmeter ein und in die Leitung zum Bade einen Regulierwiderstand. Man sieht in der Figur oben die zwei Hauptleitungen von der Batterie oder Dynamomaschine. An diese ist das Bad angeschlossen unter Zwischenschaltung eines Regulierwiderstandes. Das Voltmeter mißt die Spannung des Bades.

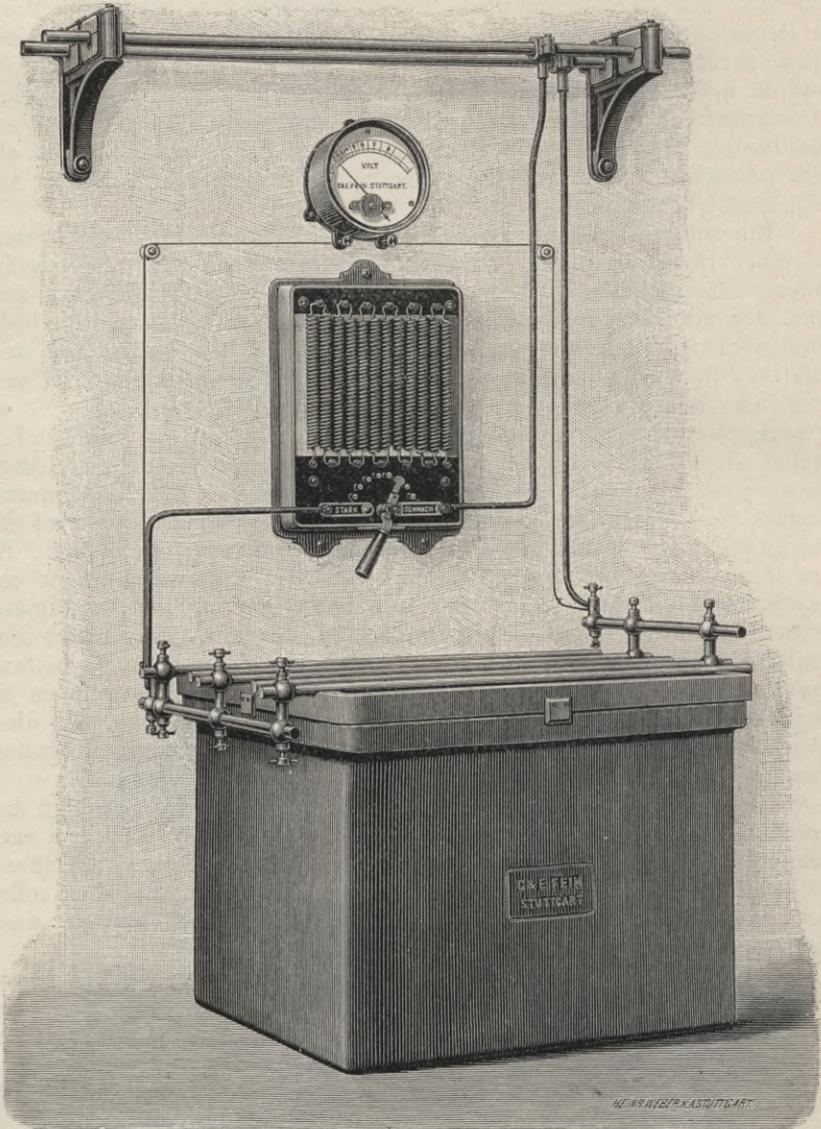
Die Vorschriften für die einzelnen Metallbäder, die öffentlich bekannt sind, sind nicht immer diejenigen, nach denen die Fabriken auch wirklich arbeiten. Vielmehr haben diese zum Teil geheime Verfahren, die sich allmählich als vorteilhaft herausgestellt haben. Indessen sollen hier einige Zusammensetzungen von Bädern angeführt werden, nach denen man sicher arbeiten kann.

Das Bad zur Versilberung besteht aus einer Lösung von Cyansilberkalium, welche man in der für die Versilberung passenden Zusammensetzung erhält, wenn man in 1 l Wasser 12 g reines Cyankalium auflöst und dazu 46 g Kaliumsilbercyanid gibt, welches sich ebenfalls auflöst. Die passende Stromdichte für guten Silber Niederschlag ist 0,5 Ampère pro Quadratdezimeter.

Zum Verkupfern nimmt man gewöhnlich eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol) oder eine Lösung von Cyankupferkalium, letztere namentlich bei der Verkupferung von Eisen- und Zinkgegenständen. Die letztere enthält auf 100 l Wasser 1,7 kg Soda, 2,5 kg doppelt Schwefelsaures Natron, 2 kg essigsäures Kupfer

(kristallisiert) und 2,0 kg Cyankalium. Die passende Stromdichte ist dabei etwa 0,4 Ampère pro Quadratdezimeter, während sie bei dem

Fig. 478.



Kupfervitriolbad sehr viel größer sein kann, bis ca. 3 Ampère pro Quadratdezimeter.

Zum Vergolden braucht man am vorteilhaftesten eine Lösung von Cyangoldkalium. Es wird als passendes Goldbad empfohlen eine

Lösung, welche in 10 l Wasser 10 g Cyankali, 500 g phosphorsaures Natron, 150 g doppeltschwefelsaures Natron und 15 g Chlorgold enthält. Das Bad wird bei 50° angewendet und pro Quadratdezimeter 0,2 Ampère benutzt. Besondere Formen der Vergoldung sind die sogenannte grüne und rote Vergoldung, bei welcher der Goldüberzug nicht aus reinem Gold besteht, sondern aus Gold, welches mit Silber, resp. Kupfer versetzt ist. Es ist sehr schwierig, die richtige Zusammensetzung des Bades zu finden, aus welchem grünes oder rotes Gold von gewünschter Nüance abgeschieden wird. Man läßt deshalb den Strom selbst die richtige Zusammensetzung bereiten. In ein gewöhnliches (braunes) Goldbad, in welchem das zu überziehende Metall als negative Elektrode hängt, taucht man als positive Elektrode eine reine Silberplatte. Diese löst sich durch den Strom auf, und dadurch ändert sich die Zusammensetzung des Bades allmählich und der Niederschlag auf dem negativen Metall bekommt allmählich die grüne Farbe. Sobald die gewünschte Nüance da ist, wird der Strom unterbrochen und nun als positive Elektrode eine Platte aus grünem Gold hineingehängt, welche dann den Prozeß bis zu Ende durchführt. Dasselbe Verfahren wird bei der roten Vergoldung mit einer Kupferplatte statt der Silberplatte angewendet.

Zum Vernickeln nimmt man ein Bad, welches pro Liter 70 g schwefelsaures Nickeloxydulammoniak enthält, also mit dem Nickelsalz gesättigt ist, ferner 25 g Ammoniumsulfat und 5 g Zitronensäure enthält. Die Stromdichte ist 0,5—0,7 Ampère pro Quadratdezimeter. Nickelüberzüge sind namentlich bei Eisengegenständen sehr wertvoll, weil sie das Rosten hindern. Auch Messinggegenstände werden jetzt sehr häufig vernickelt. Zu einer haltbaren Vernickelung gehört unbedingt vollständige Reinheit der zu behandelnden Flächen. Zum Vernickeln muß man, wegen der hohen Polarisierung, eine größere Spannung als für die anderen Bäder anwenden, nämlich so, daß man an jedem Nickelbad 4 Volt Spannung erhält.

Zum Verstählen benutzt man ein Bad, welches pro Liter 30 g Eisensulfat, 30 g Eisenalaun und 90 g Salmiak, in Wasser gelöst, enthält. Die Stromdichte beträgt nur 0,02 Ampère pro Quadratdezimeter. Zum Verstählen von Druckplatten, von denen weiter unten die Rede sein wird, nimmt man Bäder aus säurefreier Eisenchlorürlösung.

Während man früher für diese galvanoplastischen Arbeiten stets sich der galvanischen Elemente bediente und infolgedessen bei großen Fabriken eine sehr große Anzahl derselben benutzen mußte, ist seit der Einführung der Dynamomaschine auch in diesem Zweig der Elektrotechnik ein Umschwung eingetreten. Man kann natürlich jede Dynamomaschine, welche gleichgerichtete Ströme liefert, zur Galvanoplastik benutzen. Die galvanoplastischen Bäder sind jedoch immer so große, ausgedehnte Flüssigkeitsmengen, daß ihr galvanischer Widerstand fast verschwindend ist. Es ist also für galvanoplastische Zwecke zwar eine Maschine nötig, welche einen starken Strom liefert, aber sie braucht nur geringe elektromotorische Kraft zu haben. Es werden daher die Maschinen für galvanoplastische Zwecke mit sehr geringem inneren

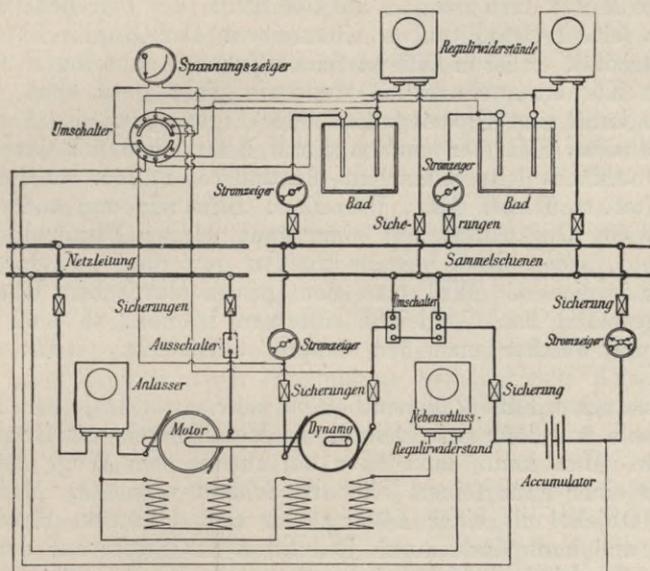
Widerstand gebaut und zwar wendet man immer Nebenschlußmaschinen an. Es kommt ja für die Galvanoplastik wesentlich darauf an, daß stets derjenige Pol, welcher mit den zu überziehenden Gegenständen verbunden ist, der negative Pol bleibt, daß nicht etwa die Elektromagnete der Dynamomaschine ihre Polarität während des Betriebes umkehren und so die Gegenstände, statt z. B. vernickelt zu werden, entnickelt werden. Ein solches Umkehren kann aber bei Hauptstrommaschinen leicht eintreten, wenn Anker, Magnete und Bad hintereinander geschaltet werden. Bei der Elektrolyse entsteht ja immer Polarisierung und also auch ein Polarisationsstrom, welcher dem Maschinenstrom entgegenwirkt (s. S. 153 f.). Wenn also z. B. während des Betriebes die Geschwindigkeit der Maschine plötzlich abnimmt, etwa durch eine momentane Störung des Motors, so überwiegt der Polarisationsstrom, es fließt also ein Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Maschine, und die Pole der Elektromagnete werden umgekehrt. Kommt die Dynamomaschine wieder in richtigen Gang, so bleiben doch die Pole der Elektromagnete umgekehrt, weil eine Dynamomaschine ja nur den vorhandenen Magnetismus ihrer Eisenteile verstärkt. Der Strom der Maschine hat also nun die entgegengesetzte Richtung wie früher; der vorher negative Pol wird jetzt positiver Pol. Alle die Niederschläge auf den Gegenständen im Bade werden also nun wieder aufgelöst.

Auf sehr einfache Weise wird diese Gefahr durch die Nebenschaltung der Elektromagnete beseitigt, wie wir bereits S. 396 gesehen haben, wo erwähnt wurde, daß zum Laden von Akkumulatoren ebenfalls Nebenschlußdynamos und aus demselben Grunde gewählt wurden.

Will man in Orten, in welchen durch elektrische Zentralen Strom verteilt wird, eine galvanoplastische Einrichtung betreiben, so hat man gewöhnlich mit der Schwierigkeit zu rechnen, daß die Spannung des Stromes, wie ihn die Zentralen liefern, eine sehr hohe ist, 100 bis 250 Volt, während man zum Betrieb der Bäder nur Spannungen von 3 bis 6 Volt braucht. In diesem Falle kann man sich derart helfen, daß man von dem Strom der Zentrale zunächst einen Elektromotor treiben läßt und daß man von diesem erst eine passende Dynamomaschine, die Ströme von wenigen Volt Spannung, aber hoher Stromstärke zu liefern im stande ist, antreibt. Man benutzt also dann einen Maschinensatz (S. 416), welcher die hohe Spannung in niedrige verwandelt. In diesem Falle schaltet man auch gewöhnlich noch parallel zur Dynamomaschine einige Akkumulatoren, damit diese im Falle, daß keine Bedienung für den Motor vorhanden ist, die Stromlieferung übernehmen. Eine Schaltung für diesen häufig vorkommenden Fall, bei dem zwei parallel geschaltete Bäder von der Netzleitung der Zentrale aus indirekt mit Strom versorgt werden sollen, zeigt Fig. 479, eine Schaltung, die kompliziert aussieht, aber leicht zu verstehen ist. Der Strom von der Zentrale kommt in die beiden Leitungen links, die als Netzleitung bezeichnet sind. Von der einen Schiene dieser Leitung geht der Strom durch eine Sicherung und einen Anlasser (Widerstand) zu dem Elektromotor, der als Nebenschlußmotor gezeichnet ist, und

geht von dessen rechter Bürste durch einen Ausschalter und eine Sicherung zur anderen Netzschiene. Der Motor kommt in Rotation und treibt die mit ihm direkt gekuppelte oder durch Riemen mit ihm verbundene Dynamomaschine, die ebenfalls eine Nebenschlußmaschine ist. Der Nebenschluß derselben (die Magnete) wird durch einen Regulierwiderstand direkt von der Netzleitung gespeist. Von den Bürsten dieser Dynamo gehen die Leitungen durch Sicherungen und Stromzeiger zu den zwei Schienen rechts, die als Sammelschienen bezeichnet sind. Es kann aber auch durch den Umschalter der Strom dieser Dynamo erst in den Akkumulator geleitet werden und dann zur Schiene, oder

Fig. 479.



es kann der Strom vom Akkumulator direkt in die Schienen geleitet werden. An die Sammelschienen, die also, wie gesagt, wenige Volt Spannung haben, sind nun die beiden Bäder oben parallel geschaltet und jedes ist mit einem Regulierwiderstand versehen. Durch besondere Drähte, die zu dem Umschalter und Spannungszeiger (Voltmeter) links oben führen, kann man die Spannung jedes einzelnen Teiles, der Dynamomaschine oder des Akkumulators oder jedes der beiden Bäder messen.

Mit starken Strömen ist es nun möglich, in kurzer Zeit beliebig große Mengen von Gegenständen mit Niederschlägen von Metallen zu versehen, und diese Niederschläge können mit einiger Sorgfalt so gleichmäßig gemacht werden, daß sie den feinsten Konturen des Gegenstandes sich anschmiegen. Wenn der galvanische Niederschlag, wie es beim Vergolden, Versilbern, Vernickeln fast stets verlangt wird, fest auf dem Gegenstande haften soll, so muß dessen Oberfläche, wie schon

erwähnt, vollständig rein sein, sie muß dekapiert werden. Die geringste Spur von Fett auf einem Körper läßt den galvanischen Niederschlag nicht fest auf ihm haften, sondern man kann ihn dann leicht ablösen. Dies ist namentlich beim Vernickeln zu beobachten. Gut haftende Nickelüberzüge können nur auf absolut reinen Flächen niedergeschlagen werden. Die Gegenstände, welche galvanisch überzogen sein sollen, müssen stets leitend sein, da sie ja als negative Elektroden in die Flüssigkeit tauchen müssen. Das einfachste ist daher, auf Metallen galvanische Niederschläge hervorzubringen. Aber auch nicht leitende Körper kann man galvanoplastisch überziehen, wenn man bloß ihre Oberfläche leitend macht, wenn man sie, wie die galvanoplastische Technik es nennt, metallisiert. Das einfachste und gewöhnlich angewendete Mittel dazu ist das, die Oberfläche des betreffenden Körpers mit ganz feinem Graphitpulver einzureiben. Der Graphit ist ein Leiter der Elektrizität, er ist in äußerst feinen Zustand zu bringen und haftet leicht an Körpern, namentlich wenn sie nicht ganz eben und glatt sind. So kann man Gipsmedaillen oder Figuren, ebenso Figuren aus Holz, Alabaster, Marmor einfach durch Bestreichen mit Graphitpulver an der Oberfläche leitend machen. In anderen Fällen, wo der Graphit nicht haftet, z. B. bei Glas, Porzellan, Elfenbein und anderen, muß man erst den Gegenstand mit einer ganz dünnen Firnißschicht überziehen und, wenn diese beinahe trocken geworden ist, das Graphitpulver aufstreichen. Will man den galvanoplastischen Überzug von dem Gegenstand nachher leicht entfernen können, so muß man die Bürste, mit welcher man den Graphit aufstreicht, etwas mit Talg einfetten.

In manchen Fällen, namentlich bei sehr zarten Objekten, Früchten, Blumen u. s. w., läßt sich aber dieses Metallisieren mit Graphit nicht anwenden. Man kann dann aber auf chemischem Wege den Gegenstand mit einer ganz feinen leitenden Schicht versehen. Man braucht nur das Objekt mit einer Lösung von salpetersaurem Silber einzustreichen und kann dann durch Reduktion das Silber auf dem Objekt in einer sehr feinen Schicht niederschlagen. Das salpetersaure Silber löst sich in Wasser leicht, in warmem Alkohol zwar schwer, aber doch etwas. Mit dieser Lösung überstreicht man dann die Objekte (Blumen und Früchte z. B. mit einer alkoholischen Lösung), und wenn man sie dann dem Sonnenlicht aussetzt, so scheidet sich das Silber aus der Lösung in Form eines ganz feinen, schwarzen Pulvers auf der Oberfläche ab und macht diese nun leitend genug, um galvanoplastisch überzogen werden zu können.

Auf diese Weise kann man auf jedem beliebigen Körper einen galvanischen Überzug hervorbringen. Will man diesen Überzug nachher auch leicht wieder von dem Objekt trennen, will man Abdrücke des Gegenstandes haben, so muß man bewirken, daß der Überzug von vornherein nicht fest an dem Gegenstand haftet. Zu dem Zweck ist es nun notwendig, den Gegenstand vor dem Einhängen in das Bad an seiner Oberfläche einzufetten. Meistenteils und am leichtesten werden diese Abdrücke in Kupfer gemacht. Der leitende oder metallisierte Gegenstand wird, etwas gefettet, als negative Elektrode in eine Lösung

von schwefelsaurem Kupfer gebracht, und wenn die niedergeschlagene Schicht eine gewisse Dicke erreicht hat, ist es leicht, sie einfach abzunehmen. So macht man von Kunstwerken, von Gipsfiguren, von Medaillen, Münzen galvanische Kupferabdrücke. Ja man kann sogar von Photographieen galvanische Abdrücke in Kupfer erhalten. Eine Daguerrotypplatte wird mit einer sehr verdünnten Lösung von Cyankali übergossen, abgewaschen und dann in das Bad gehängt. Wenn ein schwacher Strom 5 bis 8 Stunden hindurchgeflossen ist, so ist auf der Platte eine Kupferschicht vorhanden, welche sich leicht mit einem Messer ablösen läßt und welche die Photographie bis in die feinsten Details wiedergibt.

Galvanische Abformungen werden jetzt fast allein zur Reproduktion von Stahlstichen und Holzschnitten angewendet. Von einem Holzschnitt z. B. lassen sich nicht ohne Schaden sehr viele Abdrücke machen. Man verfertigt daher von einem solchen Holzschnitt, den man durch Graphit metallisiert, beliebig viele galvanische Abformungen, Klischees oder Galvanos genannt, und macht von jedem solchen Klischee nur so viele Abdrücke, als man scharf erhalten kann. Dabei ist eine Stromdichte von etwa 1 Ampère pro Quadratdezimeter anzuwenden. Dasselbe Verfahren wendet man oft bei Drucken, bei Schriftsätzen an, von welchen man, nachdem sie gesetzt sind, erst galvanische Klischees anfertigt, die man dann nur so oft benutzt, als sie scharfe Abdrücke geben. Um Kupferplatten, die durch viele Abdrücke sehr leiden, beliebig oft reproduzieren zu können, macht man auch galvanoplastische sogenannte Hochplatten von ihnen (in denen die Zeichnung erhaben ist) und kann dann von den Hochplatten beliebig viele Klischees abnehmen. Oft macht man auch die Originalkupferplatte des Stiches dadurch widerstandsfähig, daß man sie galvanoplastisch mit einer dünnen Schicht Eisen überzieht, verstäht oder noch besser vernickelt. Dazu dienen Eisenchlorürbäder für die Verstählung und Bäder aus schwefelsaurem Nickeloxydul für die Vernickelung. Eine solche verstählte oder vernickelte Kupferstichplatte erlaubt eine sehr große Menge von Abdrücken. Man hat von verstähten Platten bis 15 000, von vernickelten bis 40 000 Abzüge in tadelloser Form erhalten können.

Während auf der negativen Elektrode das Metall aus der Lösung niedergeschlagen wird, wird die positive Elektrode aufgelöst. Auch diese Auflösung der positiven Elektrode läßt sich technisch verwerten, nämlich zum Gravieren der Metalle. Wenn man nämlich einzelne Teile der positiven Elektrode mit einer isolierenden Substanz, z. B. mit Lack oder Wachs, bedeckt, so werden diese Teile während des Stromdurchgangs nicht aufgelöst. Von den übrigen nicht bedeckten Teilen wird das Metall allmählich fortgenommen, sie werden vertieft, während die bedeckten Teile in der ursprünglichen Höhe bleiben. Man kann also das Metall der positiven Elektrode z. B. ganz mit Wachs überziehen und nur eine Zeichnung in das Wachs kratzen, so daß dort das Metall frei liegt, dann ist nach dem Durchgang des Stromes diese Zeichnung vertieft in dem Metall. Oder man kann auch das Muster ganz mit Wachs bedeckt halten und nur die übrige Fläche der

Elektrode frei lassen, dann wird nach Durchgang des Stromes das Muster erhaben auf der Elektrode erscheinen. Die vertieften Muster kann man dann, nachdem sie dekapiert sind, galvanisch mit einem anderen Metall, Gold, Silber, Kupfer u. s. w., ausfüllen, so daß man eine vollständige Metallinkrustation erhält. Auf diese Weise werden häufig kunstgewerbliche Gegenstände hergestellt und oft auch Antiquitäten nachgemacht, wozu sich die Elektrizität eben auch hergeben muß.

13. Kapitel.

Die Telegraphie.

Zwei Eigenschaften waren es, welche in der Elektrizität schon sehr früh eine passende Kraft erkennen ließen, die zur Übertragung von Nachrichten auf weite Entfernungen geeignet wäre. Die erste dieser Eigenschaften ist die große Schnelligkeit, mit der sich der elektrische Zustand auf Leitern verbreitet. Die Geschwindigkeit, mit der die Elektrizität auf Leitern sich fortpflanzt, ist gleich der Lichtgeschwindigkeit, so daß alle Entfernungen, die wir auf der Erde haben, fast momentan von der Elektrizität durchflossen werden. Zu dieser ersten Eigenschaft kommt aber als zweite wichtige hinzu, daß der elektrische Strom sich in der Hauptsache nur auf vorgeschriebenen Wegen fortpflanzt. Der elektrische Strom fließt immer den Leitern entlang, die Elektrizität bleibt auf der Oberfläche von isolierten Leitern und nur bei ungenügender Isolation dringt sie in die isolierende Substanz ein. Das ist ein großer Vorzug, den der elektrische Strom vor dem Licht hat, welches sonst allein an Geschwindigkeit mit ihm konkurrieren kann. Das Licht verbreitet sich in der Luft und kann nicht durch Metalle gehen. Der elektrische Strom dagegen braucht zu seinem Wege leitende Körper, Metalle, und dringt nicht oder nur wenig in die begrenzende Luft ein. Daraus ergibt sich, daß man dem Licht, wenn man ihm seinen Weg vorschreiben will, vollkommen geradlinige Bahnen anweisen muß, während der elektrische Strom jeder Krümmung seiner Bahn folgt. Und nun übt die Elektrizität so verschiedenartige Wirkungen aus, läßt sie sich in so vielfacher Weise umwandeln, daß es leicht ist, an entfernten Stellen von einem Punkt aus durch sie gewisse Wirkungen hervorzubringen und dadurch verabredete Zeichen zu geben.

Jedoch die Bemühungen alle, die zuerst auf das telegraphische Senden von Nachrichten gerichtet waren, waren sehr unzweckmäßig, weil man für jeden Buchstaben, den man telegraphieren wollte, einen eigenen Draht anwenden wollte, so daß Napoleon I., als ihm der Plan eines derartigen Telegraphen vorgelegt wurde, ihn spöttisch als „idée germanique“ abwies. Erst seitdem man, durch Gauß angeregt, einsah, daß alle unsere Buchstaben durch zwei Zeichen sich bequem ausdrücken lassen, konnte die Telegraphie dem praktischen Bedürfnis im großen entsprechen.

Diejenigen Wirkungen der Elektrizität, welche jetzt fast allein

zum Telegraphieren benutzt werden, sind die elektromagnetischen, und zwar werden heute zum allgemeinen Verkehr nur solche telegraphischen Apparate benutzt, welche nicht vorübergehende, sondern bleibende Zeichen beim Telegraphieren geben, die Schreibtelegraphen. Sie beruhen auf der Anziehungswirkung, welche ein Elektromagnet auf seinen Anker ausübt. Doch ist bei diesen eine besondere Schrift nötig, welche erlernt und geübt werden muß, so daß zum Telegraphieren und zum Lesen der Depesche eine besondere Vorbildung gehört.

Dieses vermeiden die sich immer mehr einbürgernden Typendrucktelegraphen, welche die telegraphierten Worte direkt in gewöhnlicher Druckschrift aufzeichnen, welche also bleibende und sofort lesbare Zeichen geben.

Wir werden diese zwei Arten von Telegraphenapparaten allein besprechen.

Bei allen Telegrapheneinrichtungen, bei denen zwei Stationen miteinander verbunden sind, muß auf jeder Station eine Batterie und ein Apparat vorhanden sein, um die Depesche absenden zu können, also um Zeichen geben zu können; ferner muß ein Apparat vorhanden sein, welcher die Depeschen, die von der anderen Station kommen, aufnimmt, der sogenannte Rezeptor. Endlich muß eine Drahtleitung zwischen den beiden Stationen vorhanden sein, die eine bestimmte zweckmäßige Einrichtung haben muß. Ferner gehören zu jeder Station noch Apparate, welche aufmerksam machen, daß depeschiert werden soll, elektrische Klingeln oder andere Signalapparate und endlich Galvanometer, welche anzeigen, daß der benutzte Strom die richtige Stärke hat.

Nach vielen mehr oder weniger unpraktischen Vorschlägen waren es zum ersten Male zwei deutsche Professoren, Gauß und Weber, welche in Göttingen 1833 telegraphisch miteinander verkehrten, einer von den vielen Beweisen, daß die so häufig als unpraktisch verlachten Professoren doch recht praktische Dinge erfinden können. Sie verbanden das magnetische Observatorium und das physikalische Kabinett miteinander durch zwei Drähte, die zusammen etwa 3000 m lang waren, und konnten sich auf dieser Leitung elektromagnetisch dadurch verständigen, daß der eine einen Magneten in eine Rolle hineinsteckte oder aus ihr herauszog, welche mit der Drahtleitung in Verbindung war. Dadurch entstanden jedesmal kurzdauernde Induktionsströme nach der einen und der anderen Richtung, und auf der Empfangsstation wurde durch diese Ströme ein Magnetstab, der in einer Drahtrolle hing, nach der einen oder anderen Seite abgelenkt. Durch zweckmäßige Kombination der Ausschläge nach rechts oder links konnten sie so eine beliebige Menge Zeichen bilden. Durch Gauß angeregt, vervollkommnete dann Steinheil in München diesen elektromagnetischen Nadeltelegraphen, indem er die Manipulationen bei dem Geben der Zeichen sehr vereinfachte. Bei seinen Versuchen zwischen Nürnberg und Fürth kam nun Steinheil zufällig auf die Beobachtung, daß es gar nicht nötig sei, die beiden Stationen durch zwei Drähte, einen zur Hin- und einen zur Rückleitung, miteinander zu verbinden, sondern daß man die Erde selbst als Rückleitung benutzen könne. Man braucht

von jeder Station nur eine Platte in die Erde zu führen und sie dort einzugraben, dann fließt der Strom zwischen den beiden Stationen durch die Erde hindurch, welche ja ebenfalls ein Leiter der Elektrizität ist. Es ist dann also nur ein einziger Draht zwischen beiden Stationen nötig. Diese Anschauung, wie sie Steinheil von der Erdleitung hatte, daß die Erde eben direkt den Strom zurückleitet, ist sicher unrichtig. Die Erde ist vielmehr gewissermaßen ein Reservoir, in welches alle Elektrizität hineinfließt. Aber die von Steinheil entdeckte Tatsache bleibt deswegen ungeändert, und durch sie konnte die Telegraphie sich so rasch zu einem allgemein gebrauchten Verkehrsmittel erheben, weil durch die Ersparung der einen Hälfte der Drahtleitung natürlich auch die Kosten erheblich geringer wurden.

Die vielen verschiedenen Formen der Telegraphen sind in neuerer Zeit fast alle verdrängt durch den Morseschen Schreibetelegraphen und den Hughesschen Typendrucktelegraphen, mit denen wir uns daher vorzugsweise beschäftigen werden.

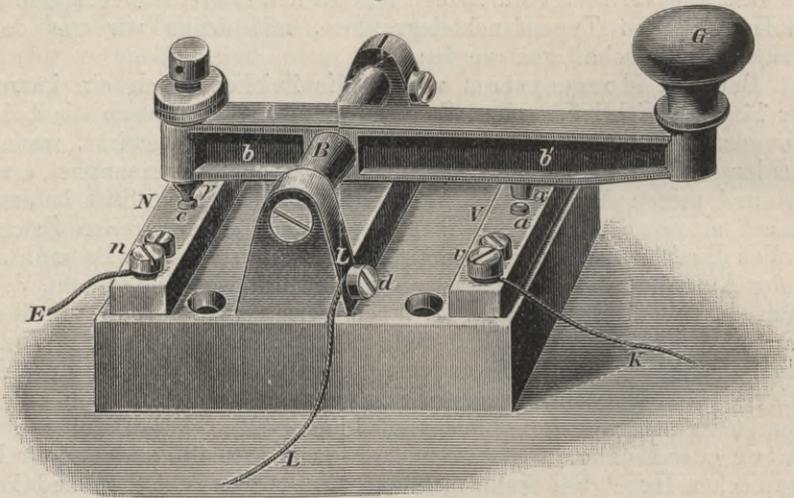
Bei dem Morsesystem werden die Zeichen durch ein kürzeres oder längeres Schließen eines Stromes gegeben, der durch die beiden verbundenen Stationen hindurchfließt. Dieser Strom bewirkt, wenn er geschlossen ist, daß an der Empfangsstation ein Elektromagnet erregt wird und seinen Anker anzieht. An dem Anker ist ein Stift befestigt, der auf einen an ihm sich vorbei bewegenden Papierstreifen Zeichen, nämlich Punkte oder Striche, eindrückt oder aufschreibt. Es muß also an der Aufgabestation eine galvanische Batterie vorhanden sein, deren Strom durch die Drahtleitung in die entfernte Station und um deren Elektromagneten herum fließt, und es muß ferner auf der Aufgabestation ein Apparat vorhanden sein, durch welchen der Strom dieser Batterie beliebig geöffnet und geschlossen werden kann. Ein solcher Apparat ist natürlich ganz leicht zu bilden. Man bezeichnet ihn als Taster oder Morseschlüssel und er ist in Fig. 480 abgebildet. Ein metallischer Hebel $b\ b'$ kann sich um seine Achse B drehen und kann daher durch den Kopf G niedergedrückt oder losgelassen werden. Ist er losgelassen, wie in der Figur, so ruht er mit seinem Ende γ auf einem Metallknopfe c , der auf einer Metallschiene N sitzt, während sein anderes Ende α frei in der Luft sich befindet. Wird er dagegen heruntergedrückt, so berührt der Stift α den Knopf a , der ebenfalls auf einer Metallschiene V sitzt, und γ ist von c getrennt. Der Leitungsdraht L zwischen beiden Stationen ist nun bei d an der Achse befestigt, während die vordere Schiene V bei v mit dem einen Pol K der Batterie verbunden ist (die hintere Schiene N ist bei n durch den Telegraphenapparat der eigenen Station hindurch zur Erde E abgeleitet, was uns erst später interessiert), der andere Pol der Batterie ist auch zur Erde abgeleitet.

Steht der Schlüssel in der Aufgabestation in der gezeichneten Position, so fließt kein Strom von ihm durch die Leitung, denn bei a ist der Strom unterbrochen. Wird dagegen der Schlüssel heruntergedrückt, so geht der Strom von dem einen Pol K des Elements durch v , a , α , b' , B , d an die Leitung L und kommt dadurch an die zweite Station. Dort steht aber natürlich auch ein solcher Schlüssel, da ja

beide Stationen ganz gleich eingerichtet sind, und daher kommt der Strom an das *d* des dortigen Schlüssels, der aber nicht heruntergedrückt ist, sondern in der gezeichneten Lage sich befindet. Folglich geht der Strom dort durch *d*, *B*, *b*, γ , *c*, *n* zum dortigen Apparat und von diesem zur Erde.

Auf diese Weise hat man es in der Hand, durch Herunterdrücken oder Nachlassen des Tasters den Strom von der einen Station nach der anderen zu schicken oder zu unterbrechen, und dieser Strom kann auf der Empfangsstation beliebige elektromagnetische Wirkungen hervorbringen. Soll also die Wirkung darin bestehen, wie es bei dem Morseschen Telegraphen der Fall ist, daß ein Elektromagnet durch den Strom erregt wird, so braucht man nur in die Leitung, welche in der

Fig. 480.

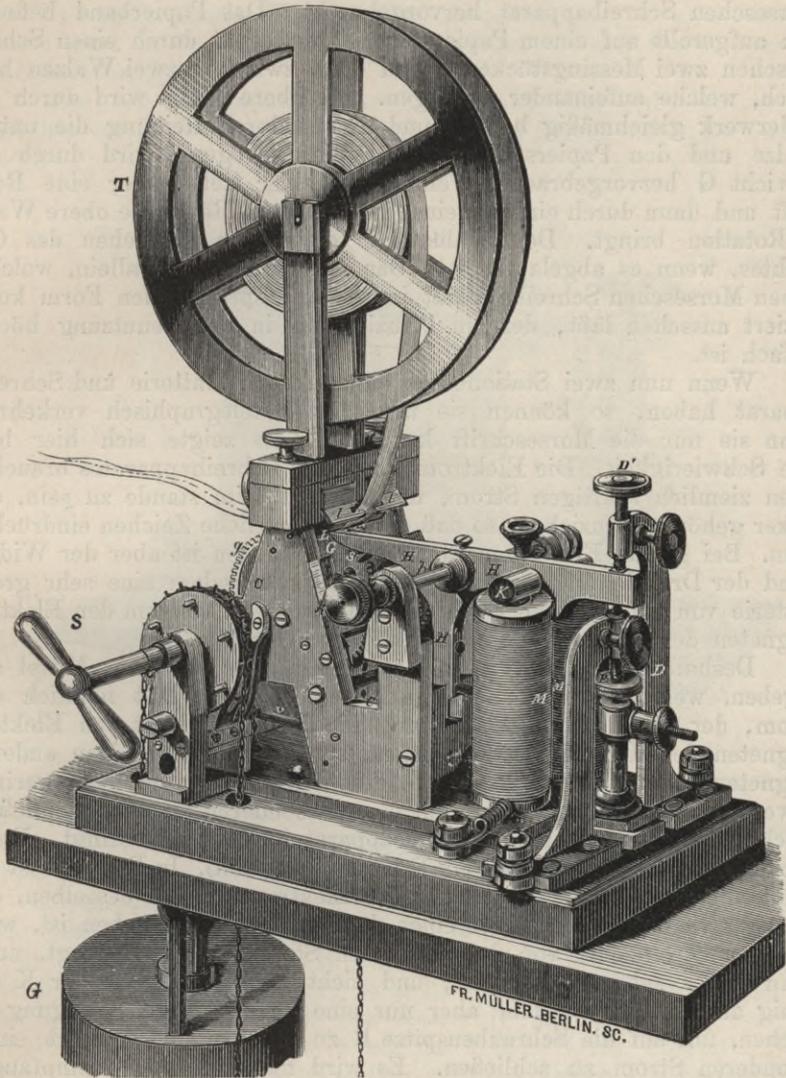


Empfangsstation von *n* zur Erde führt, noch diesen Elektromagneten einzuschalten, um sofort die nötige Verbindung zu haben. Denn wenn in Fig. 480 der Schlüssel *G* der ersten Station heruntergedrückt wird, also von der ersten Station aus depeſchirt wird, so geht der Strom durch die Leitung *L* nach dem Schlüssel der zweiten Station, dort durch *d*, *B*, *b*, γ , *c*, *n* um den Elektromagneten und dann zur Erdplatte. Es ist dann also durch diese Verbindung von der ersten Station aus der Elektromagnet in der zweiten erregt, während der der ersten Station, der auch zwischen *n* und der Erde sich befindet, selbst nicht von einem Strome durchflossen wird. Ebenso kann man von der zweiten Station aus durch Druck auf den Schlüssel den Elektromagneten der ersten erregen, ohne daß der eigene Elektromagnet beeinflusst wird.

An der Empfangsstation müssen also durch diese einzelnen Ströme, welche den Elektromagneten erregen, Zeichen gegeben werden. Dazu dient der eigentliche Morseapparat, welcher in einer älteren, aber übersichtlichen Form in Fig. 481 gezeichnet ist. Der Strom kommt

in die Drahtwindungen des Elektromagnets M M. Über dessen Polen befindet sich der eiserne Anker K an einem Hebel H H, welcher an seinem äußersten Ende L eine Spitze trägt. Bei jeder Abwärtsbewegung des Ankers wird die Spitze in die Höhe gehoben und drückt in einen

Fig. 481.



Papierstreifen, der sich an ihr vorbeibewegt, ein Zeichen ein. Ist der Strom nur ein ganz kurzer, so wird der Magnet nur momentan erregt, der Anker also nur momentan angezogen; dann macht die Spitze einen Punkt auf den Papierstreifen. Dauert der Strom etwas längere Zeit,

so bewegt sich ein größeres Stück des Papiers an dem Stift vorbei und es erscheint ein Strich auf demselben. Aus Punkten und Strichen ist aber das Morsesche Alphabet zusammengesetzt. Damit der Anker nicht bis zur Berührung mit dem Magneten angezogen wird, sind bei D und D' zwei Anschläge angebracht, welche die Bewegung des Hebels H begrenzen. In dieser einfachen Weise werden die Zeichen bei dem Morseschen Schreibapparat hervorgebracht. Das Papierband befindet sich aufgerollt auf einem Papierträger T und geht durch einen Schlitz zwischen zwei Messingstücken ll und dann zwischen zwei Walzen hindurch, welche aufeinander aufliegen. Die obere Walze wird durch ein Räderwerk gleichmäßig bewegt und nimmt durch Reibung die untere Walze und den Papierstreifen mit. Die Bewegung wird durch ein Gewicht G hervorgebracht, welches an einer Kette über eine Rolle läuft und dann durch einige ineinander greifende Räder die obere Walze in Rotation bringt. Der Schlüssel S dient zum Aufziehen des Gewichtes, wenn es abgelaufen ist. Das Räderwerk ist es allein, welches diesen Morseschen Schreibapparat in seiner ursprünglichen Form kompliziert aussehen läßt, der im Prinzip und in der Benutzung höchst einfach ist.

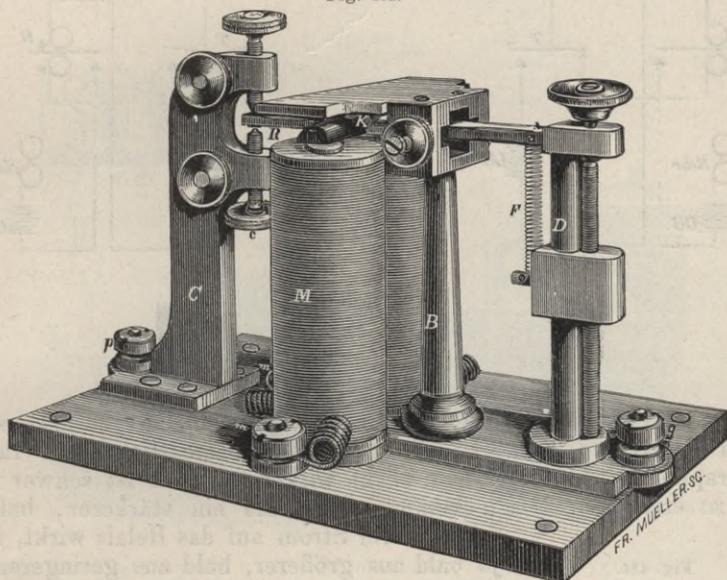
Wenn nun zwei Stationen je einen Taster, Batterie und Schreibapparat haben, so können sie miteinander telegraphisch verkehren, wenn sie nur die Morseschrift kennen. Indes zeigte sich hier bald eine Schwierigkeit. Die Elektromagnete des Schreibapparates brauchen einen ziemlich kräftigen Strom, um überhaupt im stande zu sein, den Anker gehörig anzuziehen, so daß der Stift deutliche Zeichen eindrücken kann. Bei großer Entfernung der beiden Stationen ist aber der Widerstand der Drahtleitung ein so großer, daß man schon eine sehr große Batterie von galvanischen Elementen anwenden müßte, um den Elektromagneten der entfernten Station kräftig zu erregen.

Deshalb hat Wheatstone zuerst ein sehr einfaches Mittel angegeben, welches diese Schwierigkeit beseitigt. Er läßt nämlich den Strom, der durch die ganze Leitung fließt, nicht direkt den Elektromagneten des Morseapparates erregen, sondern vielmehr einen anderen Magneten auf der Empfangsstation, dessen Anker nur eine ganz geringe Bewegung zu machen braucht, um einen besonderen Strom zu schließen, welcher dann seinerseits den Morseapparat in Tätigkeit bringt. Einen solchen Apparat nennt man ein Relais (Vorspann). In Fig. 482 ist die Abbildung eines solchen gegeben. Der Elektromagnet M desselben, der mit sehr vielen Umwindungen eines dünnen Drahtes umgeben ist, wird von dem Strom, der von der entfernten Station kommt, erregt, auch wenn dieser sehr schwach ist, und zieht dadurch den Anker K ein wenig an. Dieser braucht aber nur eine ganz geringe Bewegung zu machen, um auf die Schraubenspitze R zu drücken und dadurch einen besonderen Strom zu schließen. Es wird nämlich an der Empfangsstation ein Strom einer besonderen Batterie bei g eingeleitet, geht durch die Säule D und den Anker K und, wenn K auf R aufliegt, durch R und C zur Klemmschraube p und dann durch den Morseapparat und zur Batterie zurück. Auf diese Weise erregt der Strom von der entfernten Station gar nicht den Morseapparat selbst, sondern stellt

bloß einen Kontakt her, durch den eine besondere Batterie den Morsemagneten erregt. Hört der Linienstrom auf, so wird der Anker K durch eine Feder F von R wieder abgehoben. Durch diese Einrichtung des Relais ist also die große Schwierigkeit, die das Telegraphieren auf weite Entfernungen hat, beseitigt. Die schwächsten Ströme genügen schon, um den Anker des Relais in eine geringe Bewegung zu bringen, und eine ganz geringe Verschiebung desselben genügt schon, um den Strom einer kräftigen Batterie zu schließen, die den Morseapparat in Tätigkeit bringt.

Bei der Anwendung eines Relais muß aber jede Station zwei verschiedene Batterien haben, eine für den Strom nach der anderen

Fig. 482.

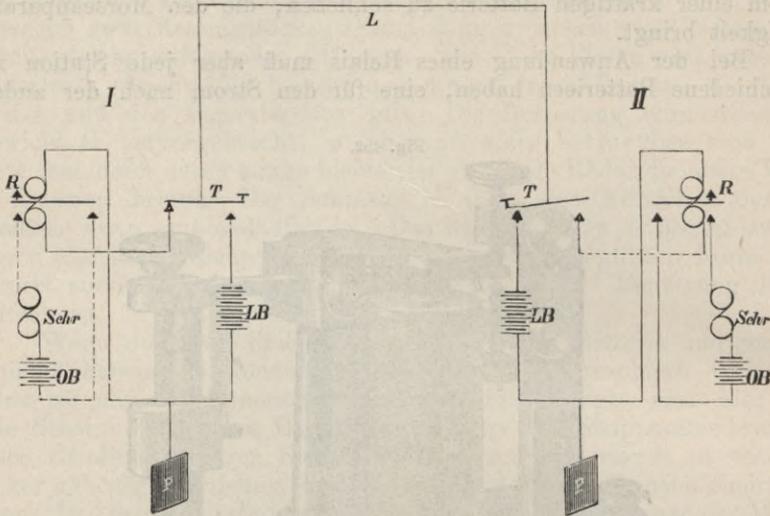


Station, die sogenannte Linienbatterie, und eine für den eigenen Morseapparat, die Ortsbatterie. Wie zwei Stationen mit diesen Apparaten eingerichtet und verbunden sein müssen, ist aus Fig. 483 zu ersehen. Darin bedeutet *LB* die Linienbatterie, *OB* die Ortsbatterie, *Schr* den Morseschen Schreibapparat, *R* das Relais, *T* den Taster und *P* die Erdplatte. Wird z. B. auf der Station II der Taster heruntergedrückt, also telegraphiert, so geht der Strom von dem einen Pol der Linienbatterie II durch den Taster II und die Leitung *L* zum Taster I. Von diesem geht er um das Relais *R* zur Erdplatte *P* und durch die Erde zur Aufgabestation zurück. Durch die Erregung des Relais wird aber der Anker desselben angezogen und dadurch der Stromkreis der Ortsbatterie geschlossen und der Schreibapparat in Tätigkeit versetzt.

Das Relais ist der empfindlichste Apparat beim Telegraphieren, denn die telegraphierten, also aus weiten Entfernungen kommenden

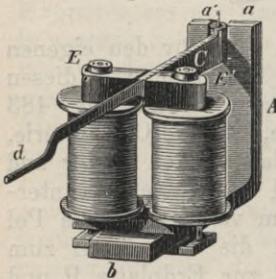
Ströme müssen, auch wenn sie sehr schwach sind, das Relais zum Funktionieren bringen. Es muß ferner im Moment, wo der Strom aufhört, auch der Anker des Relais losgelassen werden, damit die Zeichen am Morseapparat exakt entstehen. Darin besteht nun ein Mangel des eben beschriebenen Relais. Denn in diesem wird der Anker immer

Fig. 483.



durch eine Feder F wieder in seine Gleichgewichtslage zurückgezogen, sobald der Strom aufhört. Es muß also, namentlich beim raschen Telegraphieren, die Feder sehr exakt wirken und das ist schwer praktisch zu erreichen. Dazu kommt, daß bald ein stärkerer, bald ein schwächerer Strom auf das Relais wirkt, indem ja bald aus größerer, bald aus geringerer Entfernung telegraphiert wird, während die Feder immer die gleiche Spannung hat, also immer dieselbe Gegenkraft ausübt.

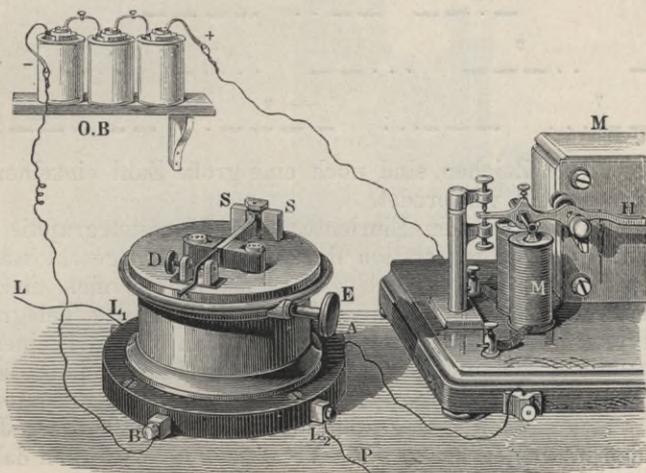
Fig. 484.



Diesem Mangel suchten verschiedene Konstrukteure auf verschiedene Weise abzuhelpfen. Radikal wird er dadurch beseitigt, daß man das Relais ganz ohne Feder konstruiert. Dies haben Siemens & Halske getan, indem sie durch den Linienstrom einen Magneten nicht erst erregen, sondern durch ihn nur schon vorhandene Magnetpole verstärken und schwächen ließen. Die nach diesem Prinzip konstruierten Relais nennt man polarisierte Relais. In Fig. 484 ist ein solches abgebildet. Ein permanenter Stahlmagnet A b ist rechtwinklig gebogen und hat bei a a' seinen Südpol, bei b seinen Nordpol. Auf dem Nordpol sitzen zwei Kerne aus weichem Eisen auf, welche also ebenfalls nordmagnetisch

werden. Diese Nordpole sind mit Draht umwickelt. An dem Südpol $a a'$ ist der Stahlmagnet etwas aufgeschnitten und in dem Zwischenräume befindet sich der lange Hebel $C d$ aus weichem Eisen, welcher um eine vertikale Achse etwas drehbar ist. Dieser Hebel ist also ebenfalls süd magnetisch wie der Pol, an dem er befestigt ist. Der Hebel befindet sich zwischen den beiden Nordpolen im Gleichgewicht, wenn kein Strom durch die Spiralen der Kerne läuft. Nun wird der Strom der Linienbatterie an der Empfangsstation zuerst durch eine primäre Spule gesendet, um welche eine sekundäre Spule gewickelt ist, die mit den Spulen des Relais verbunden ist. Sowie der Linienstrom zu fließen anfängt, wird in der sekundären Spule ein Induktionsstrom erregt, und dieser fließt einen Moment in solcher Richtung um

Fig. 485.



beide Magnetkerne, daß der eine, z. B. E , stärker nordmagnetisch, der andere E' schwächer nordmagnetisch oder vielleicht gar süd magnetisch wird. Dadurch wird der Hebel $C d$ an E herangezogen und seine Spitze d schließt dadurch den Lokalstrom. Sowie der Linienstrom aufhört, wird in der Induktionsspule ein umgekehrter Strom erzeugt und dieser fließt also umgekehrt durch die Windungen und macht nun E' stärker und E schwächer nordmagnetisch. Dadurch wird der Hebel sofort nach E' gezogen und der Lokalstrom geöffnet. Auf diese Weise erhält man die Relaiswirkung ganz ohne Feder, und mit vollkommener Sicherheit und Präzision folgt der Hebel $C d$ den Stromschließungen und Stromöffnungen. Die Verbindung des polarisierten Relais, welches zweckmäßig die Form einer Dose hat und daher auch Dosenrelais genannt wird, mit dem Schreibapparat M und der Ortsbatterie $O B$ ist in Fig. 485 gezeichnet. Sobald durch den Linienstrom, der bei L_1 eintritt und bei L_2 in die Erde geht, der Hebel des Relais gegen die Spitze D gezogen ist, ist die Ortsbatterie $O B$ ge-

geschlossen, von der der Strom bei B in das Relais eintritt und bei A zum Schreibapparat geht.

Durch Zuhilfenahme des Relais ist es nun möglich, auf weite Entfernungen ebenfalls sicher zu telegraphieren.

Das Buchstabensystem bei dem Morsetelegraphen wird aus den beiden Elementarzeichen Punkt und Strich zusammengesetzt, und zwar in folgender Weise:

a	ä	b	c	d	e	f	g	h	i

j	k	l	m	n	o	ö	p		

q	r	s	t	u	ü	v	w	x	

y			z		ch				

1	2		3		4		5		6

7		8		9		0			

Außer diesen Zeichen sind noch eine große Zahl einzelner Dienstzeichen international verabredet.

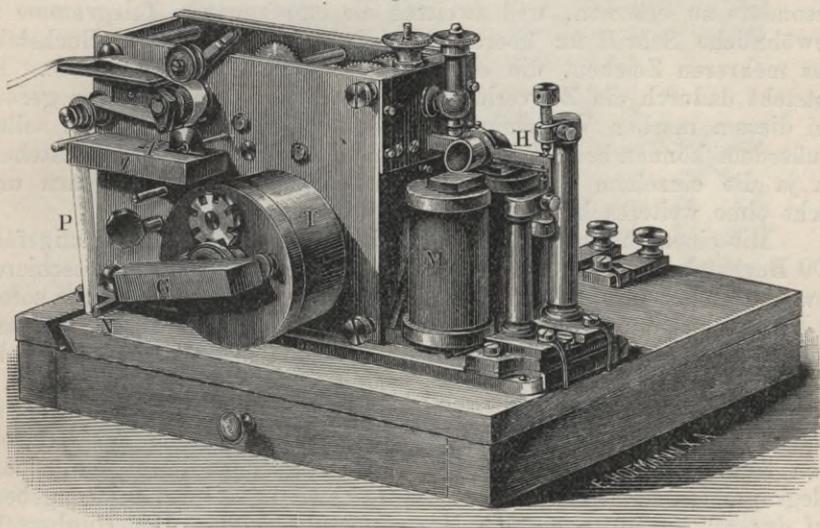
Bei der beschriebenen Einrichtung der Morsetelegraphie wird die Linienbatterie der Aufgabestation durch den Taster geschlossen, wenn ein Zeichen telegraphiert werden soll, sonst ist sie offen und es geht sonst kein Strom durch die Linie. Man nennt dies das Telegraphieren mit Arbeitsstrom. Häufig jedoch läßt man dauernd einen Strom durch die Linie gehen und das Telegraphieren besteht dann darin, daß dieser Strom in bestimmter Weise, länger oder kürzer, unterbrochen wird. Dies nennt man Telegraphieren mit Ruhestrom. Jede von diesen beiden Methoden hat gewisse Vorzüge und es werden daher auch beide gleich häufig angewendet.

Der Morsesche Schreibapparat, wie er oben beschrieben ist, gab die telegraphierten Buchstaben durch Punkte und Striche wieder, die durch den Stift in das Papier eingedrückt wurden. Es zeigte sich aber bald, daß diese Zeichen nicht deutlich genug werden, und man suchte deshalb die Buchstabenzeichen farbig zu schreiben. Danach nennt man den früher beschriebenen Apparat einen Stiftschreiber, während man die nun zu erwähnenden Farbschreiber nennt. Um die Schrift farbig zu erzeugen, läßt man durch den Anker des Morsemagneten an den Papierstreifen länger oder kürzer ein mit Farbe versehenes Rädchen drücken. Dadurch werden die Zeichen alle farbig erzeugt.

Nach vielen Veränderungen ist jetzt bei den Telegraphen in der deutschen Reichstelegraphie ein Morsefarbschreiber eingeführt, der in Fig. 486 abgebildet ist. Man sieht rechts an dem Apparat den Elektromagneten M mit seinem Anker H, welcher sich zwischen den verstellbaren Anschlägen auf und ab bewegen kann. Der Anker setzt sich nun im Innern des Kästchens fort und umfaßt dort mit einem Griffe die Achse des Farbrädchens f. Die Farbe befindet sich in einem Kästchen l,

in welches das Farbrad taucht. Das Farbrädchen wird also durch den Schreibhebel gehoben, wenn dieser angezogen wird, und daher an den Papierstreifen angedrückt, wenn ein Strom durch den Apparat geht. Dadurch macht es auf dem Papier blaue Striche oder Punkte. Die Papierrolle befindet sich in dem Kasten, welcher den Boden des Apparates bildet, und das Papier P wird durch die in der Figur sichtbare Art und Weise bei N herausgezogen. Die Triebkraft für das Uhrwerk, welches das Papier herauszieht, besteht in einer Feder, welche in dem großen Federhaus T sich befindet und durch den Schlüssel G aufgezogen wird. Der Elektromagnet dieses Apparates besteht aus hohlen Eisen-

Fig. 486.



röhren statt der massiven Eisenkerne, damit der Magnetismus durch den Strom rasch entsteht und verschwindet.

Auch bei den Morseapparaten haben Siemens & Halske in manchen Fällen dasselbe Prinzip angewendet, wie bei ihrem polarisierten Relais. Da nämlich für den Elektromagneten ähnliche Schwierigkeiten sich ergaben, wie für das Relais, daß nämlich die Feder den Anker nicht stets sofort genügend zurückzieht, wenn der Strom aufhört, daß also die Zeichen nicht exakt wurden, so brachten sie schon von vornherein permanente Magnete an den Morseapparat an. Solche Schreibapparate, die zugleich mit einer Färbvorrichtung versehen sind, nennt man polarisierte Farbschreiber.

Wenn eine Depesche ankommt und sich aufzeichnen soll, so muß das Triebwerk, welches den Papierstreifen bewegt, losgelassen werden, und es muß gehemmt werden, wenn die Depesche aufgenommen ist. Es wird dazu an passender Stelle ein Sperrhaken angebracht, welcher in eines der Räder des Uhrwerks eingreifen und dadurch die Bewegung hemmen kann, und welcher andererseits, sowie der Apparat in

Gang kommen soll, von dem Rade fortgedreht werden muß. Dieses Ingangsetzen des Apparates muß aber selbsttätig geschehen, so daß auch ohne die Anwesenheit eines Beamten die Depesche sich aufzeichnet. Man überträgt also am besten dem Schreibhebel selbst die Funktion, das Triebwerk auszulösen. Das kann leicht geschehen, da ja der Schreibhebel durch den Elektromagneten kräftig angezogen wird und daher auch bei seiner Bewegung einen solchen leichten Sperrraum fortbewegen kann. Man nennt eine solche Vorrichtung die Selbstauslösung.

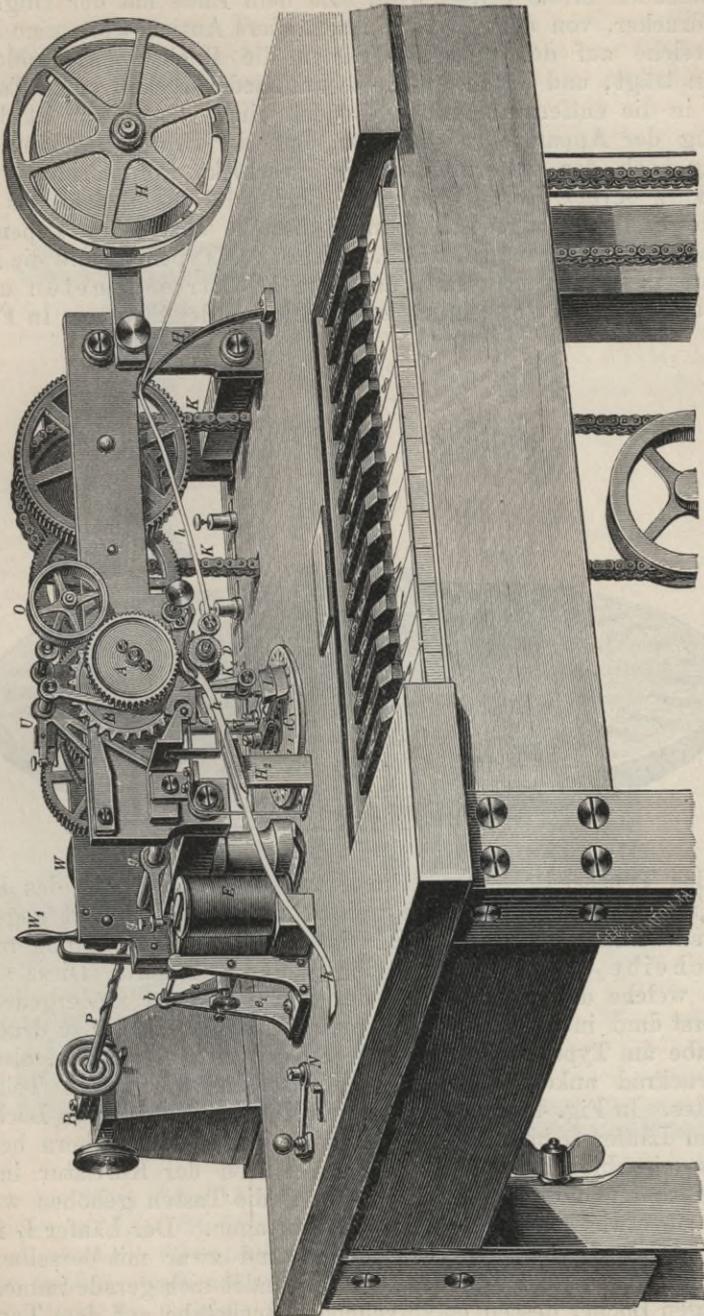
Der Morseapparat mit allen seinen Verbesserungen und Verfeinerungen ist im Grunde ein sehr einfacher Apparat. Aber das Mißliche ist bei ihm, daß er eine besondere Schrift nötig hat. Dadurch ist es erstens notwendig, das Telegraphieren und das Lesen der Telegramme besonders zu erlernen, und zweitens die empfangenen Telegramme in gewöhnliche Schrift zu übertragen. Ferner besteht jeder Buchstabe aus mehreren Zeichen, die einzeln telegraphiert werden müssen. Es entsteht dadurch ein Zeitverlust beim Telegraphieren, welcher gerade bei diesem raschen Verkehrsmittel möglichst vermieden werden sollte. Außerdem können beim Telegraphieren selbst leicht Irrtümer entstehen, da ja die einzelnen Drucke auf den Taster rasch vorübergehen und nicht ohne weiteres kontrolliert werden können.

Mit einem Morseapparat kann ein geübter Telegraphist ungefähr 100 Buchstaben in der Minute depeschieren. Um nun das Depeschieren sowohl rascher als bequemer zu machen, und um das Telegramm sofort in Druckschrift an der Empfangsstation aufzeichnen zu lassen, hat man sich oft bemüht, eigene Typendrucktelegraphen zu konstruieren, welche dies ermöglichen sollten.

Von diesen Apparaten hat sich bisher hauptsächlich der Typendrucktelegraph von Hughes lebensfähig erwiesen, mit welchem man trotz seines überaus komplizierten Aussehens leicht und sicher telegraphieren kann und welcher die Geschwindigkeit des Zeichengebens auf das Fünffache gegen den Morseapparat erhöht. Der Hughessche Telegraph hat aus diesem Grunde immer mehr Eingang an großen Telegraphenämtern gefunden, bei denen es auf Geschwindigkeit des Verkehrs ankommt. Hughes erlangte die ersten Patente auf seinen Typendrucker 1855 und sein Apparat wurde zuerst in Frankreich zwischen Paris und London 1866 in Gebrauch genommen.

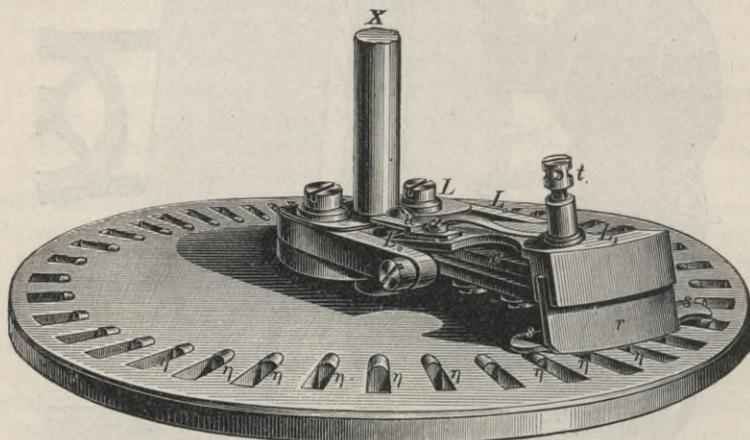
Das Prinzip des Hughesschen Telegraphen ist folgendes. Auf jedem Apparate befindet sich ein Rad, welches an seinem Umfange die Buchstaben, Zahlen und Interpunktionszeichen enthält, das sogenannte Typenrad. Dieses wird durch ein Räderwerk in fortlaufende, rasche Rotation versetzt, und zwar müssen die Typenräder an der Aufgabestation und an der Empfangsstation sich gleich rasch drehen und sich stets in gleicher Lage befinden, es muß Synchronismus der Bewegung an beiden Stationen stattfinden. Dieser Synchronismus wird durch einen besonderen Apparat, den Regulator, hervorgebracht, den wir hier nicht erörtern. Nun ist es bloß nötig, wenn der zu telegraphierende Buchstabe des Typenrades (in beiden Stationen) an die unterste Stelle gelangt ist, das Papier der entfernten Station zu heben, so daß sich dieser Buchstabe auf dem Papier abdrucken kann. Dies wird auf

Fig. 487.



der Empfangsstation durch den Elektromagneten erreicht, der von dem ankommenden Strom erregt wird. Zu dem Ende hat der Hughessche Typendrucker, von dem Fig. 487 die äußere Ansicht gibt, eine Klaviatur, welche auf den einzelnen Tasten die Buchstaben, Zahlen und Zeichen trägt, und durch welche beim Niederdrücken einer Taste ein Strom in die entfernte Station gesendet wird. Und zwar ist die Einrichtung der Apparate so getroffen, daß der Strom nur dann in die Leitung nach der entfernten Station geschickt werden kann, sobald (oder kurz bevor) der zu druckende Buchstabe des Typenrades an die unterste Stelle gelangt ist. Danach besteht also jeder Typendrucktelegraph aus einem Räderwerk, welches das Typenrad und die Nebenapparate in Bewegung setzt, aus dem Elektromagneten und der Klaviatur mit der Vorrichtung zum Schließen des Stromes. In Fig. 487

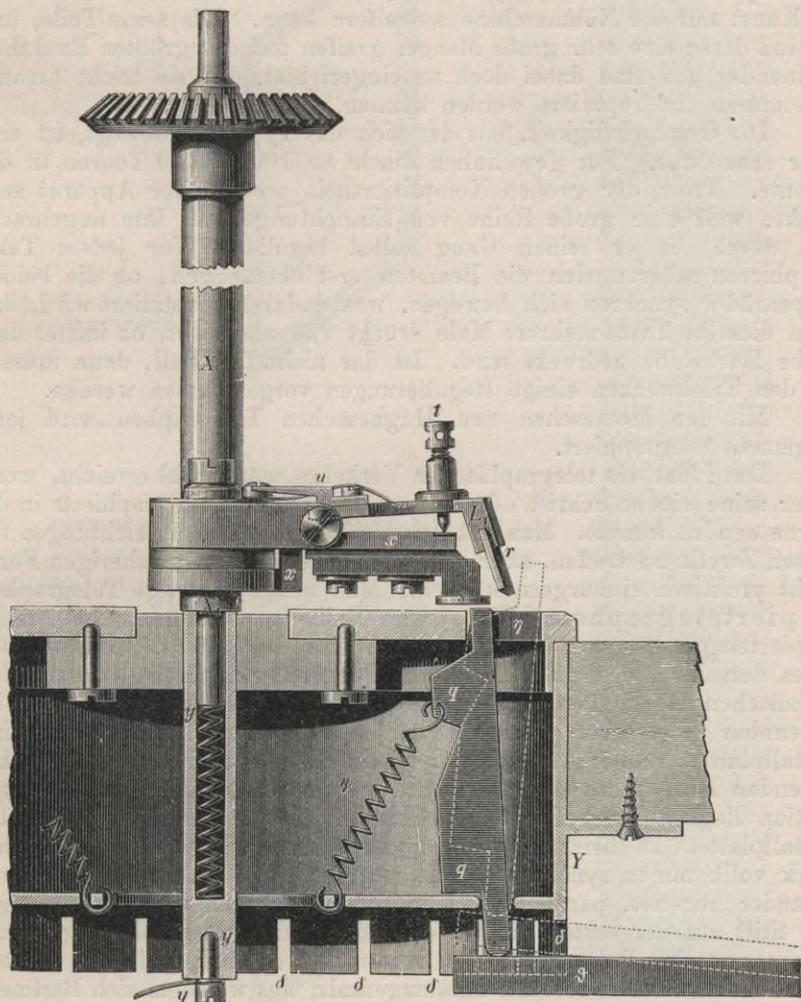
Fig. 488.



ist A das Typenrad, E der Elektromagnet, dessen Anker das Druckrad D und mit ihm den Papierstreifen zur geeigneten Zeit gegen das Typenrad schnellen läßt. Die Klaviatur steht in Verbindung mit der Stiftscheibe C, über welcher der Läufer L rotiert. Diese sind es gerade, welche dazu dienen, daß der Strom von der niedergedrückten Taste erst dann in den entfernten Apparat fließt, wenn der zu druckende Buchstabe am Typenrad dort gerade an der untersten Stelle, also über dem Druckrad ankommt, diese sind also die wichtigsten Teile des Apparates. In Fig. 488 ist daher diese Stiftscheibe mit ihren Löchern η und dem Läufer L besonders abgebildet. Unter den Löchern befinden sich die einzelnen Stifte, die mit den Tasten der Klaviatur in Verbindung sind und durch einen Druck auf die Tasten gehoben werden, so daß sie etwas aus den Löchern hervorragen. Der Läufer L rotiert nun fortwährend über der Stiftscheibe, und zwar mit derselben Geschwindigkeit, wie das Typenrad. Er befindet sich gerade immer über demjenigen Loche, dessen entsprechender Buchstabe auf dem Typenrad gerade die unterste Stelle einnimmt (und zwar wegen des Synchronismus

sowohl auf der einen wie auf der anderen Station). Sowie der Läufer nun an einen gehobenen Stift kommt, wird durch diesen Stift eine Trennung einzelner seiner Teile hervorgebracht, wie man aus Fig. 489 ersehen kann. Befindet sich der Stift *q*, welcher mit der Taste Φ in Verbindung ist, in gehobener Lage, wie sie punktiert gezeichnet ist,

Fig. 489.



so wird das Stück *r* des Läufers, die Reiberschiene, gehoben, sobald der Läufer an diese Stelle kommt, und es wird dadurch die Spitze *t* von *x* abgehoben. Dadurch geht aber ein Strom aus dem Stifte *q* (der mit der Batterie verbunden ist) durch *t* nach *X*, der Läuferachse, und von da aus in die Leitung zum anderen Apparat. Da die Bewegung des Läufers nun eine synchrone mit dem Typenrad ist, so kommt gerade,

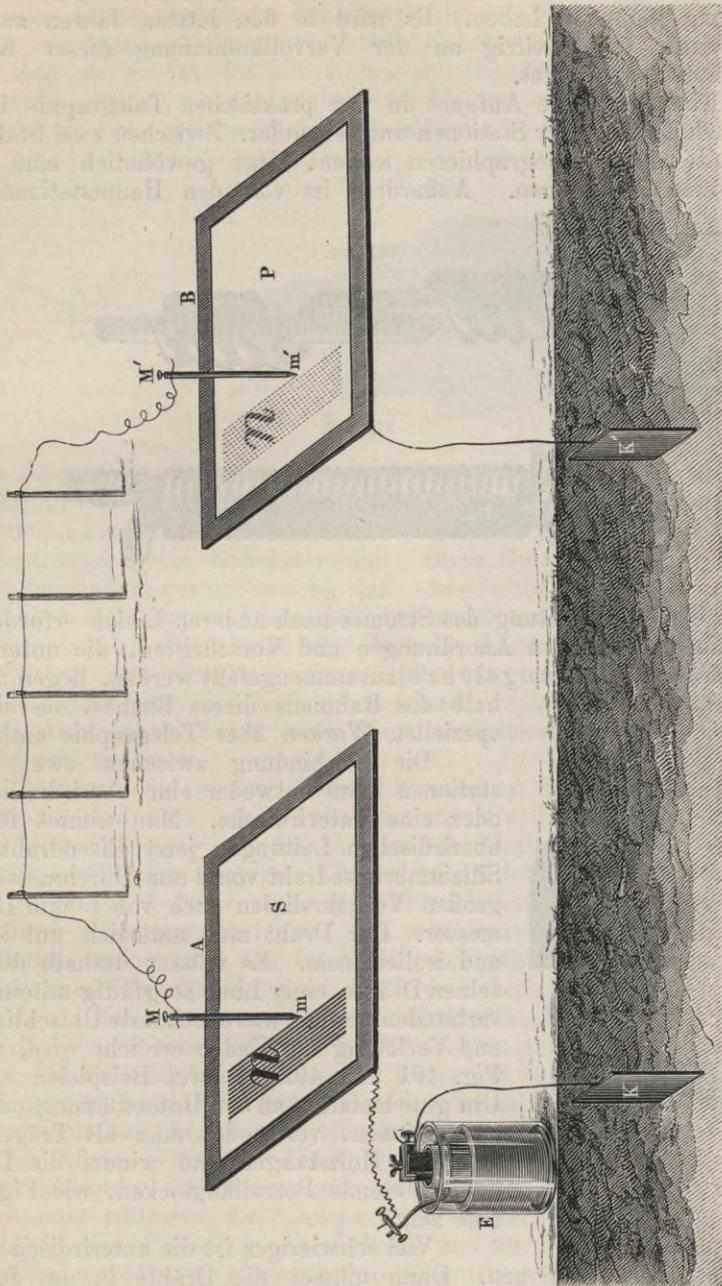
wenn der betreffende Buchstabe des Typenrades unten eingestellt ist, der Strom in die Leitung, und dadurch wird das Papier an der zweiten Station ein wenig gehoben und die Type abgedruckt. Dies ist im allgemeinen die Einrichtung des Hughesschen Telegraphen, bei dem im speziellen noch eine große Menge von einzelnen Feinheiten vorhanden ist, die jedoch hier nicht beschrieben werden können. Der Hughessche Apparat ist eines der größten mechanischen Kunstwerke, mit dem an Kunst nur die Nähmaschine wetteifern kann. Alle seine Teile, und es sind deren eine sehr große Menge, greifen mit der größten Exaktheit ineinander und sind dabei doch so eingerichtet, daß sie leicht herausgenommen und repariert werden können.

Die Geschwindigkeit, mit der sich das Typenrad bewegt, ist eine sehr erhebliche. Für gewöhnlich macht es 100 bis 120 Touren in der Minute. Trotz der großen Kompliziertheit arbeitet der Apparat sehr exakt, weil eine große Reihe von Einrichtungen an ihm angebracht ist, durch die er seinen Gang selbst reguliert. Vor jedem Telegraphieren müssen sich die Beamten erst überzeugen, ob die beiden Typenräder synchron sich bewegen, was dadurch konstatiert wird, daß man dieselbe Taste mehrere Male drückt und nachsieht, ob immer derselbe Buchstabe gedruckt wird. Ist das nicht der Fall, dann müssen an den Triebwerken einige Regulierungen vorgenommen werden.

Mit den Morseschen und Hughesschen Telegraphen wird jetzt allgemein telegraphiert.

Das Ideal des telegraphischen Verkehrs wäre wohl erreicht, wenn jeder seine eigene Schrift oder ganze Zeichnungen telegraphisch in die Ferne senden könnte. Man hat sich vielfach bemüht, Einrichtungen für diesen Zweck zu treffen, aber diese haben sich in der bisherigen Form nicht praktisch einbürgern können. Man nennt derartige Telegraphen Kopiertelegraphen. Eine ganze Reihe von Erfindern hat solche Kopiertelegraphen auf verschiedene Weise hergestellt. Das Wesen eines derselben, des Casellischen Pantelegraphen, der auf den chemischen Wirkungen des Stromes beruht, wird aus der Fig. 490 erkennbar sein. Auf jeder der beiden Stationen befindet sich eine Metallplatte. In der Aufgabestation wird die Depesche mit einer nichtleitenden Harzlösung auf die Platte geschrieben, auf der Empfangsstation liegt ein mit Blutlaugensalzlösung getränktes Papier auf der Metallplatte. In beiden Stationen werden zwei Stifte durch ein Uhrwerk vollkommen synchron in Bewegung gesetzt, so daß sie nahe aneinander liegende, parallele Striche auf den Platten machen. Solange der Stift auf der ersten Station das leitende Metall berührt, geht ein Strom von der Batterie durch die Leitung zu dem Stift der zweiten Station und zersetzt dort das Blutlaugensalz, aus welchem sich Berlinerblau bildet, so daß auf dem dortigen Papierblatte blaue Striche erscheinen. Sobald aber der Stift der ersten Station über den nichtleitenden Buchstaben sich bewegt, fließt kein Strom durch die Leitung und das Papier der zweiten Station bleibt infolgedessen weiß. Man erhält daher auf der Empfangsstation die Depeschen in weißer Schrift auf blauem Grunde. Die große Schwierigkeit bei diesem Telegraphen liegt in der Herstellung des übereinstimmenden Ganges beider Stifte,

Fig. 490.



welcher hier nicht durch den Strom selbst reguliert werden kann. Daher kommt es, daß diese Telegraphen, welche dem Endziel der

Telegraphie am nächsten kommen, bisher noch keine größere Verwendung gefunden haben. Es wird in den letzten Jahren auf verschiedenen Seiten eifrig an der Vervollkommnung dieser Kopier- telegraphen gearbeitet.

Eine besondere Aufgabe in der praktischen Telegraphie ist die Verbindung mehrerer Stationen untereinander. Zwischen zwei Stationen, die miteinander telegraphieren wollen, liegt gewöhnlich eine Reihe von Zwischenstationen. Außerdem ist von den Hauptstationen aus

Fig. 491.

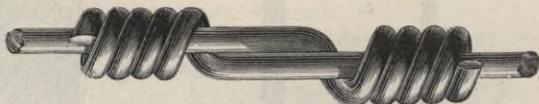


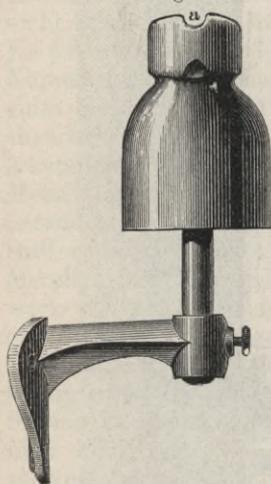
Fig. 492.



immer eine Umschaltung des Stromes nach anderen Linien erforderlich. Alle die dazu nötigen Anordnungen und Vorschriften, die unter dem Begriff der Schaltungslehre zusammengefaßt werden, liegen außerhalb des Rahmens dieses Buches, sie sind in speziellen Werken über Telegraphie enthalten.

Die Verbindung zwischen zwei Landstationen kann entweder eine oberirdische sein oder eine unterirdische. Man nimmt für die oberirdischen Leitungen jetzt Eisendraht oder Siliziumbronzedraht von 4 mm Durchmesser, bei großen Verkehrslinien auch von 5 mm Durchmesser. Der Draht muß natürlich gut leitend und isoliert sein. Es müssen deshalb die einzelnen Drähte einer Linie sorgfältig miteinander verbunden werden, was durch feste Umschlingung und Verlötung der Enden erreicht wird, wie es Fig. 491 und 492 in zwei Beispielen zeigen. Um gute Isolation an den Unterstützungspunkten zu erreichen, verwendet man als Träger gewöhnlich Holzstangen und windet die Drähte um isolierende Porzellanlocken, wie Fig. 493 eine zeigt.

Fig. 493.

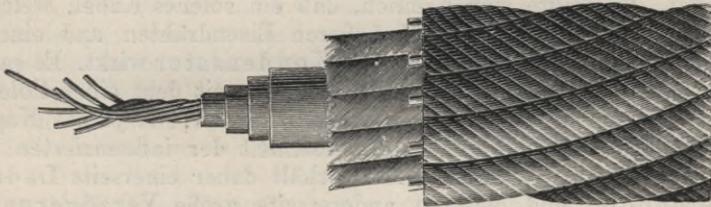


Viel schwieriger ist die unterirdische Verbindung zweier Stationen. Dann müssen die Drähte in das feuchte Erdreich oder in Flüsse gelegt werden, und um hier genügende Isolation zu erreichen und zugleich die Drähte vor Zerstörung durch Feuchtigkeit zu schützen, müssen sie mit isolierendem und widerstands-

fähigem Material umkleidet werden. Man benutzt also dazu Kabel. Es waren große technische Schwierigkeiten zu überwinden, bevor es gelang, genügend isolierte und sichere Kabel anzufertigen.

Man verwendet für die Kabel nur Kupferdrähte und benutzt statt eines dicken mehrere nebeneinander geschaltete dünne Drähte, wie in Fig. 494, welche die einzelnen Teile eines Kabels sehen läßt.

Fig. 494.



Diese dünnen Kupferdrähte, gewöhnlich von je 0,7 mm Durchmesser, werden in eine Guttaperchahülle eingepreßt, was die Aufgabe eines besonderen Fabrikationszweiges ist. Es werden immer mehrere Guttaperchastränge in ein Kabel vereinigt. Diese Guttaperchaadern werden nun umeinander gewunden, so daß etwa sechs im Kreise um eine siebente herumliegen. Diese Schicht nennt man dann die Kabelseele. Um die Seele wird eine doppelte Lage von geteertem Hanfgarn gelegt und diese mit einer Hülle von verzinkten Eisendrähthen umgeben oder jetzt gewöhnlich mit einem gepreßten Bleimantel versehen. Das ganze Kabel wird dann asphaltiert und nochmals mit Hanfgarn umspinnen.

Während die ersten Telegraphenanlagen in Deutschland 1830 entstanden und vom Jahre 1843 ab sich die Telegraphie allgemein rasch verbreitete, so daß in einigen Jahrzehnten sich ein Netz von Telegraphendrähten über alle Länder ausbreitete, ging der Gedanke, den 1843 Wheatstone zuerst gehabt zu haben scheint, unterseeische Telegraphenleitungen zu legen, erst sehr spät seiner Verwirklichung im großen entgegen. Auf kurze Strecken allerdings legte man bald unterseeische Kabel, so schon 1852 zwischen England und Irland. Aber erst 1866 gelang nach vielen mißglückten Versuchen die Legung eines Kabels zwischen Europa und Amerika durch den Atlantischen Ozean. Diese mißglückten Versuche begannen im Jahre 1857, wo man am 6. August anfang, ein Kabel zwischen Irland und Amerika zu legen. Aber bereits am 11. August riß dasselbe, etwa 70 deutsche Meilen von der Küste. Das Jahr 1858 brachte schon neue Versuche unter Berücksichtigung der gewonnenen Erfahrungen, aber wieder riß das eine Kabel, während das andere nach kurzer Zeit zerstört wurde. Erst 1864 war wieder ein Kabel fertig von an 600 deutschen Meilen Länge, es wurde auch glücklich durch den Great-Eastern gelegt, zerriß aber bald wieder (1865) mitten im Meere, etwa 250 Meilen von Irland entfernt. Endlich im folgenden Jahre, 1866, wurde ein neues Kabel gelegt, welches bis nun, trotz mancher Beschädigungen, ausgehalten hat.

Zugleich wurde das Kabel vom Jahre 1865 durch den Great-Eastern wieder aufgefischt und ausgebessert, und so waren sofort zwei telegraphische Verbindungen zwischen Europa und Amerika hergestellt. In kurzer Folge wurde dann noch eine Reihe von Kabeln durch den Atlantischen und Großen Ozean und andere Meere gelegt und so alle Teile der zivilisierten Welt miteinander verbunden.

Die Kabeltelegraphie fand zuerst sehr unerwartete Schwierigkeiten vor, auch abgesehen von den Schwierigkeiten bei der Legung der Kabel. Es zeigte sich nämlich, daß ein solches Kabel, welches ja aus inneren Kupferdrähten und äußeren Eisendrähten und einer isolierenden Zwischenschicht besteht, als Kondensator wirkt. Es sammelt sich also auf einem solchen Kabeldraht, der mit dem einen Pole einer Batterie verbunden ist, sehr viel Elektrizität an, da ja die Kapazität eines Kondensators (infolge der Anwesenheit der influenzierten Hülle) eine sehr große ist (s. S. 26). Man erhält daher einerseits Ladungserscheinungen und dadurch andererseits große Verzögerung des Stromes. Daraus ergeben sich nun sehr schwierige Verhältnisse für die Telegraphie. Denn wenn von der ersten Station aus ein Kabel geladen ist und dann die Batterie beim Telegraphieren von dem Kabel momentan entfernt wird, also das Kabel an der ersten Station mit der Erde in Verbindung gebracht wird, so fließt die angesammelte Elektrizität in entgegengesetzter Richtung durch die Apparate in die Erde. Es entsteht der sogenannte Entladungsstrom oder Rückstrom. Ist die zweite Station isoliert, so fließt die ganze Elektrizität durch die erste zur Erde ab. Es geht also durch die Apparate nach jedem Telegraphierstrom ein Strom in entgegengesetzter Richtung, und dadurch kommen alle die Apparate in unbeabsichtigte und schädliche Tätigkeit. Man hat diesen Rückstrom auf verschiedene Weise paralytisiert. Durch Anwendung der polarisierten Relais (S. 580) und der polarisierten Farbschreiber (S. 583), wird die Wirkung des Entladungsstromes unschädlich gemacht, da ja bei diesen eben nur ein Strom in einer bestimmten Richtung die beabsichtigte Wirkung hervorbringt. Bei der Submarinetelegraphie, die mit viel empfindlicheren Apparaten arbeitet, als es die Farbschreiber sind, hilft man sich zum Teil dadurch, daß man bei jeder Öffnung des Telegraphierstromes einen entgegengesetzten Strom vermittels einer besonderen Batterie durch die Leitung sendet und dadurch den Rückstrom paralytisiert. Bei großen unterseeischen Entfernungen wendet man jetzt fast allgemein Kondensatoren an, durch die derselbe Zweck erreicht wird. Man läßt nämlich an der Aufgabestation durch den Telegraphierstrom die eine Belegung eines großen Kondensators laden, dessen andere Belegung mit dem Kabel verbunden ist. Dadurch wird die gleichnamige Elektrizität in entsprechender Weise durch das Kabel gesendet. Beim Aufhören des Telegraphierstromes vereinigt sich die Entladungselektrizität des Kabels mit der entgegengesetzten Elektrizität der mit ihm verbundenen Kondensatorbelegung, während von der anderen Belegung der Strom einfach zur Erde abfließt.

Es erforderte also die submarine Telegraphie ganz neue Einrichtungen der Instrumente, Einrichtungen, die zum großen Teil von

Werner Siemens ausgingen. Bei der transatlantischen Telegraphie wird übrigens, um mit den schwächsten Strömen arbeiten zu können, zum Teil auf die zuerst von Gauß und Weber angewendete, aber allerdings bedeutend verfeinerte, Methode der Nadeltelegraphie zurückgegangen. Die Ströme werden durch die Windungen eines sehr empfindlichen Multiplikators gesendet und die Ausschläge des Magneten durch ein Fernrohr beobachtet. Man benutzt fast ausschließlich Spiegelgalvanometer von William Thomson, und es werden entweder die Ausschläge nach der einen und nach der anderen Seite als die beiden Elementarzeichen benutzt, aus welchen das Alphabet zusammengesetzt wird, oder es werden bloß Ausschläge nach der einen Seite, aber von verschiedener Größe (15° und 25°) gebraucht und aus diesen das Alphabet gebildet. Auf Kabeln kann man aus den angegebenen Gründen bloß 12 Buchstaben in der Minute telegraphieren, während der Morseapparat 100 Buchstaben zu telegraphieren gestattet.

Die große Schnelligkeit, mit welcher man auf telegraphischem Wege Signale fortpflanzen und Bewegungen auslösen kann, hat zu einer großen Reihe von Verwendungen der Telegraphen zu verschiedenen Zwecken geführt. Insbesondere hat der Eisenbahnbetrieb die Telegraphie zu den allerverschiedensten Leistungen benutzt, teilweise um Signale zu geben, teilweise aber auch, um zur bestimmten Zeit selbsttätig gewisse Vorrichtungen vornehmen zu lassen. Doch liegen diese unzähligen Anwendungen nicht im Rahmen dieses Werkes.

Daß die elektrischen Ströme sich nur auf Leitungsdrähten fortpflanzen, ist für die Übermittlung telegraphischer Nachrichten gewöhnlich ein Vorteil, da man infolgedessen zwei beliebige Stationen miteinander in Verbindung setzen kann. Eine derartige Verbindung ist aber in manchen Fällen nicht auszuführen, es ist nicht überall möglich, Drähte zwischen die Stationen zu legen. Wenn es sich z. B. darum handelt, auf dem Meere von einem Schiff zu einem anderen entfernten zu telegraphieren, oder von der Küste zu einem Schiff, oder von einem Ballon zu einem anderen, oder von einer Truppe zu den Vorposten und umgekehrt, oder vielleicht auch von einer niedrig gelegenen Bergstation zu einer hoch gelegenen Schutzhütte, wenn zwischen beiden sich ein Gletscher befindet, so ist es in allen diesen Fällen nicht oder nicht leicht möglich, eine Drahtverbindung der beiden Stationen herzustellen. Hier wäre es nun wünschenswert, ohne solche Verbindungen telegraphische Nachrichten geben zu können, also eine Telegraphie ohne Draht einzurichten.

Diese Telegraphie ohne Draht erregt seit einigen Jahren das Interesse des Publikums ganz besonders. Kann man doch gerade an diesem Beispiel deutlich den rapiden Fortschritt der Wissenschaft und Technik sehen, da alle jetzt lebenden Menschen von Jugend auf gewohnt waren, die Elektrizität an die Leitungsdrähte gebannt zu sehen und man nun eben anfängt, dieses scheinbar notwendigste Leitungsmittel für die Elektrizität zu eliminieren. Zwar in Fachkreisen wußte man natürlich schon lange, daß man von elektrischen Strömen aus auch Wirkungen in gewisser Entfernung ohne Vermittelung von Drähten erhalten könne, nämlich durch die Induktionserscheinungen, und es

wurden schon lange Versuche darüber angestellt, ob man nicht durch diese das Problem der drahtlosen Telegraphie lösen könne. Solange man dies jedoch mit langsam wechselnden Strömen auszuführen versuchte, hatte man keinen Erfolg. Stationäre Ströme und solche mit verhältnismäßig langsamen Wechseln, wie etwa die Induktionsströme unserer Induktionsapparate, sind im wesentlichen auf die Leiter beschränkt und bleiben in diesen. Die elektrischen Bewegungen, die sie in dem umgebenden Äther erzeugen, sind so schwach, daß nur in ihrer nächsten Nähe Induktionswirkungen erzeugt werden. Je rascher aber die elektrischen Bewegungen sind, die man etwa in Drähten erzeugt, desto mehr lösen sie sich von der Erzeugungsstelle ab und treten in das Äthermeer ein, um sich durch dieses ohne metallische Leitung fortzupflanzen. Daher konnte auch die drahtlose Telegraphie wirkliche Erfolge erst erzielen als man durch Hertz gelernt hatte, rasche elektrische Schwingungen zu erzeugen und es ist das große Verdienst von Marconi, einem italienischen Ingenieur, daß er mit dem Blick des technischen Erfinders die Anwendbarkeit der elektrischen Wellen für diese Zwecke einsah. In der Tat pflanzen sich ja elektrische Wellen von einem Funken aus durch den Äther fort und können, ohne jede Vermittelung von Drähten, an entfernten Stellen elektrische Wirkungen hervorbringen. Für diese elektrischen Wellen wurde nun in dem Kohärer, der von Branly entdeckt wurde und den wir S. 268 beschrieben haben, ein äußerst empfindliches Mittel gefunden, durch welches solche Wellen sich auch in großen Entfernungen von der Erzeugungsstelle anzeigen. Und dazu hat der Kohärer noch die bequeme Form, daß er direkt wie ein Relais wirkt. Denn da er in den Stromkreis einer Batterie, einer Lokalbatterie, eingeschaltet ist, so kann diese für sich sehr kräftige Wirkungen ausüben, auch wenn die ankommenden Wellen, durch welche der Kohärer angeregt wird, sehr schwach sind. Verbindet man, wie es oben S. 270 beschrieben wurde, die Lokalbatterie des Kohälers noch mit einer elektrischen Klingel, so kann man direkt jede ankommende Welle durch das Ertönen der Glocke hören. Man kann aber ebenso auch statt der Klingel oder parallel zu ihr einen Morseschen Schreibtelegraphen einschalten. Dann wird durch jede ankommende Welle der Kohärer leitend, wodurch der Kreis der Lokalbatterie geschlossen wird und der so entstehende Strom erregt den Elektromagneten des Morseapparats, und der Stift des Apparats schreibt auf dem Papierband die Zeichen. Schickt man also nur eine kurz dauernde Welle aus, indem man in der Aufgabestation bloß einen Funken erzeugt, so schreibt der Morseapparat einen Punkt. Schließt man aber in der Aufgabestation den Induktionsapparat längere Zeit, so entstehen eine Reihe von aufeinanderfolgenden Funken, deren Wellen auf den Kohärer fallen und dessen Klingel eine Zeitlang in Bewegung setzen, so daß auch durch den Morseapparat eine Reihe von nahe nebeneinander liegenden Punkten aufgeschrieben werden. So erhält man also an der entfernten Station Punkte oder Punktreihen (anstatt der Linien) und kann daher mit dem gewöhnlichen Morsealphabet ohne Draht telegraphieren.

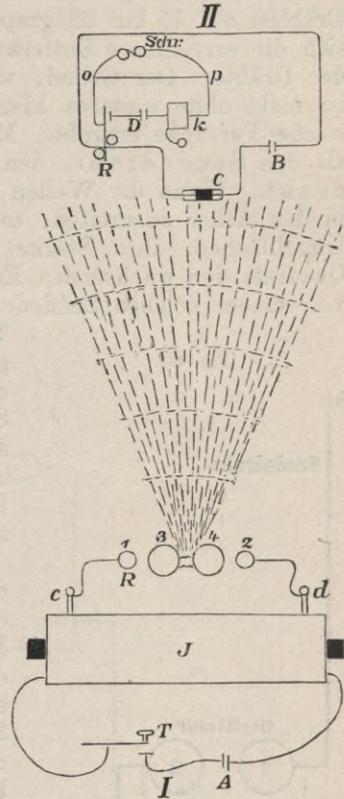
Die Anordnung für diese Versuche ist schematisch durch Fig. 495

gekennzeichnet. In der Station I sieht man eine Batterie A, die durch einen Morsetaster T mit den primären Klemmen eines Induktionsapparates J verbunden ist. Die sekundären Pole c und d desselben sind zu einem Righischen Oszillator R geführt, der, wie wir wissen, aus 4 Kugeln 1, 2, 3, 4 besteht. Die inneren Kugeln 3 und 4 befinden sich in Petroleum. Bei jedem Druck des Tasters entstehen Funken zwischen 1, 3 und 4 und 2 und zwischen 3 und 4, und diese letzteren sind die wirksamen. Durch diese Funken wird der umgebende Äther in Schwingungen versetzt, und diese Schwingungen pflanzen sich, wie es durch die punktierten Linien angedeutet ist, wellenförmig in kugelförmiger Ausbreitung immer weiter fort.

An der Station II ist nun ein Kohärer C vorhanden, der mit einem Element B und einem empfindlichen Relais R in einem Stromkreis liegt. Sobald der Kohärer leitend wird, geht der Strom von B durch das Relais, bewegt dessen Anker und das Relais schließt dadurch einen Lokalstromkreis, in welchem eine Batterie D, die Klingel K und der parallel dazu geschaltete Morseapparat Schr vorhanden ist. Der Morseapparat wird dadurch in Tätigkeit versetzt. Zugleich stößt die Klingel den Kohärer an, um ihn nach jeder Welle wieder gebrauchsfähig zu machen. Der Morseapparat gibt also bei jedem einmaligen Niederdrücken des Tasters in I einen Punkt, bei längerem Niederdrücken des Tasters eine Reihe von Punkten, die, wenn das Papier des Morseapparats mit passender Geschwindigkeit sich bewegt, zu einem Strich zusammenfließen.

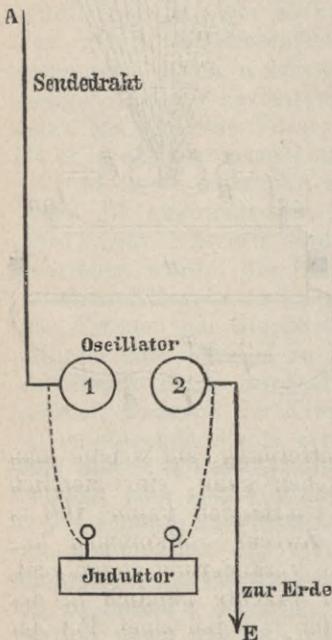
Dies ist das Prinzip der drahtlosen Telegraphie oder, wie man sie auch nennt, der Funkentelegraphie. Indes ist die Entfernung, auf welche man so direkt mittels dieser Apparate Zeichen geben kann, eine ziemlich unbedeutende, sie dürfte unter günstigen Umständen kaum 100 m übersteigen, was natürlich für praktische Zwecke vollkommen ungenügend wäre. Hier aber hat Marconi eine Veränderung angebracht, welche sich von großem Vorteil erwies. Er brachte nämlich in der ersten Station, wo die Funken erzeugt werden, an den einen Pol der Funkenstrecke (etwa an unserer Kugel 3) einen langen Draht an, der senkrecht nach oben geführt wurde. Seine Länge betrug bei verschiedenen Versuchen zwischen 20 und 50 m. Kugel 4 wurde zur Erde abgeleitet. Und ebenso brachte er an der entfernten Station, wo der Kohärer stand, an dessen einem Pol einen ebenso langen Draht

Fig. 495.



an und leitete auch den anderen Pol sowie den einen Pol des Elementes B zur Erde ab. Die Anbringung dieser Drähte vergrößerte nun die Entfernung, auf die man telegraphieren konnte, ganz erheblich. Die Übermittlung von Morseschrift gelang dadurch sofort auf viele Kilometer. Es zeigte sich, daß je länger diese Drähte sind, daß auch um so weiter die Wellen noch wirksam sind. Bei Versuchen zwischen der Küste und einem Schiff war die erreichbare Entfernung ca. das 300fache der Länge dieser Drähte, so daß man mit zwei 50 m langen Drähten auf 15 km telegraphieren konnte. Bei Landversuchen ergab sich die erreichbare Entfernung nur etwa 70mal so groß wie die Länge der Drähte. Der Grund, warum diese Drähte so vorteilhaft wirken, ist nicht ohne weiteres klar, aber ihre Wirksamkeit ist durch zahlreiche Versuche erprobt. Man bezeichnet den Draht in der Station I als den Sendedraht, den in der Station II als den Empfängerdraht. Wenn die Wellen sich von einer Funkenstrecke aus direkt in den Äther ausbreiten, so erfüllen sie immer größere und größere Kugelflächen, ihre Stärke muß also abnehmen im Verhältnis des Quadrats der wachsenden Entfernungen. Werden dagegen die Wellen von einem solchen Sendedraht ausgeschiedt, so breiten sie sich zum

Fig. 496.



Teil seitlich derartig aus, daß sie immer größere und größere Zylinder erfüllen, die den Sendedraht als Achse haben. Ihre Stärke muß dann zwar auch abnehmen, aber nur wie die wachsenden Entfernungen selbst, nicht wie die Quadrate derselben. Das dürfte der Hauptgrund für die Wirksamkeit der Drähte sein.

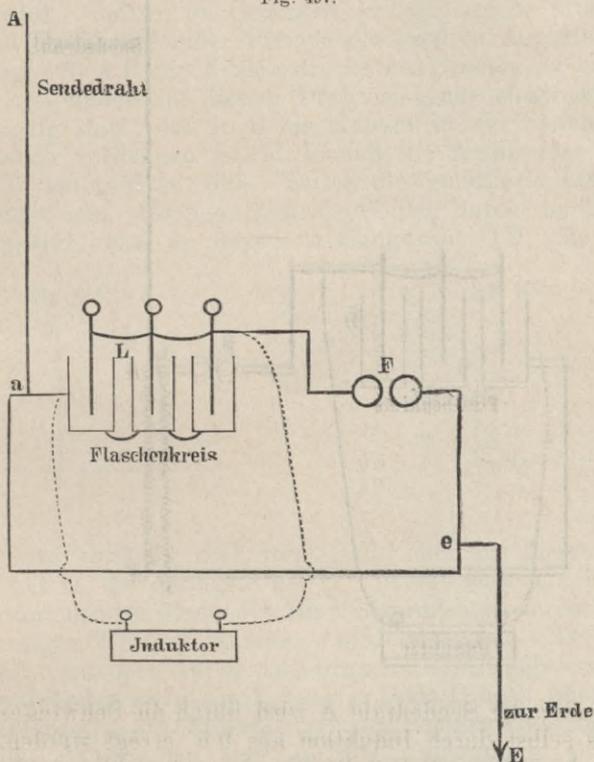
Der Draht an der Sendestation ist also derjenige Teil der ganzen Anordnung, welcher die elektrischen Wellen ausstrahlt. Bei Marconi wurde nun dieser Draht zugleich direkt durch die Funken zu Schwingungen erregt und es war schwierig, diese raschen Schwingungen mit solch großer Energie auszustatten, daß die Fernwirkung über 20 bis 30 km hinaus noch erkennbar war. Das Schema des ursprünglichen Marconisenders ist also durch Fig. 496 gekennzeichnet. Im Oszillator springen die Funken über, die von dem Induktionsapparat erregt werden und das Drahtsystem Sendedraht, Oszillator bis zur Erde E, also von A über 1, 2 nach E bestimmt die Länge der Wellen.

Der wesentlichste Fortschritt, der in der Entwicklung der Funkentelegraphie über Marconi gemacht wurde, rührt von Prof. Braun in Straßburg her. Dieser Fortschritt beruht auf folgendem. Wenn man auf große Entfernungen telegraphieren will, so muß man durch den Sendedraht möglichst viel Energie in Form elektrischer Wellen hinausenden

können. Es ist nun aber leichter, in langen elektrischen Wellen hohe Energie zu erzeugen, als in kurzen. Denn große elektrische Wellen werden erzeugt bei der Entladung von großen Leydener Flaschen und in diesen kann man auch große Energiemengen aufspeichern und zum Schwingen bringen.

Deswegen erzeugte Braun die elektrischen Schwingungen in einem Kreis, welcher große Leydener Flaschen enthielt, den von ihm so genannten Flaschenkreis und zweigte von diesem Kreis den Sendedraht und

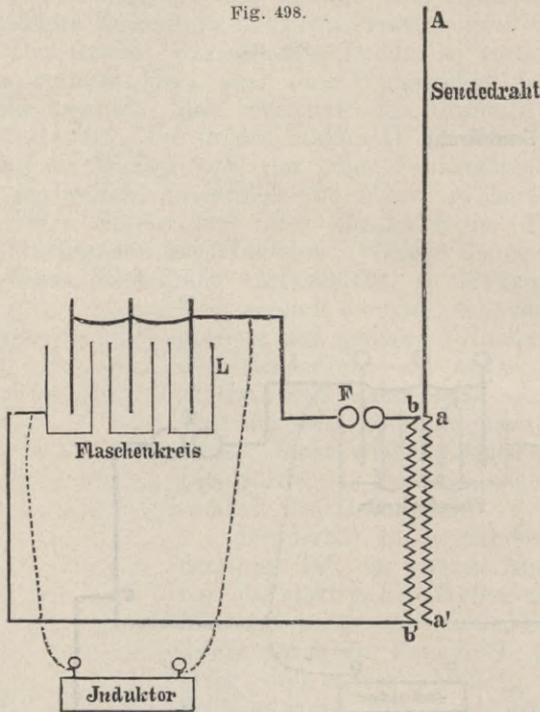
Fig. 497.



den Erddraht ab. Das Schema seiner Anordnung ist also durch Fig. 497 gegeben. Hierbei werden durch den Induktionsapparat die Leydener Flaschen L geladen und sie entladen sich durch die Funkenstrecke F, wobei sie in dem Flaschenkreis elektrische Schwingungen erzeugen, deren Wellenlänge eine viel größere ist, als bei der Marconischen Anordnung. Von einem Punkte a des Flaschenkreises geht nun der Sendedraht A aus, während ein anderer Punkt e mit der Erde E verbunden ist. Man kann diese Anordnung so auffassen, daß in dem Flaschenkreis fortwährend sehr intensive elektrische Schwingungen erzeugt werden, die nun immer dem Sendedraht nachgeliefert werden, während er sie in den Raum ausstrahlt.

Es ergibt sich übrigens auf diese Weise auch die Möglichkeit, den Sendedraht gar nicht direkt an den Flaschenkreis anzuschließen (was man jetzt direkte Kuppelung nennt), sondern vielmehr, wie bei dem Teslatransformator, die Schwingungen des Flaschenkreises durch Induktion auf eine Drahtrolle zu übertragen, an welche der Sender angeschlossen ist. Diese Schaltung, die von Braun auch benutzt wird, nennt man indirekte oder induktive Kuppelung. In Fig. 498 sieht man das

Fig. 498.



Schema für sie; der Sendedraht A wird durch die Schwingungen in a a' geladen, die selbst durch Induktion aus b b' erregt werden.

Diese Anordnungen von Braun, die auf richtigen physikalischen Prinzipien beruhen, sind auch von Marconi seit einigen Jahren zugegebenermaßen acceptiert worden und auch Slaby benutzt sie in seinem System der drahtlosen Telegraphie.

Eine weitere Vervollkommnung ist nun aber folgende. Die Länge des Sendedrahtes ist in Übereinstimmung (Resonanz) zu bringen, mit der Wellenlänge der im Flaschenkreis erregten Schwingungen, oder eigentlich ist die letztere nach der ersteren abzustimmen. Der Draht muß einem Viertel der Wellenlänge der Schwingungen entsprechen, also bei einem 60 m langen Sendedraht muß die Wellenlänge der Schwingungen 240 m betragen. Durch die Anwendung der Resonanzerscheinungen, die wir S. 278 besprochen haben, gelingt es alle Wirkungen sehr viel kräftiger hervortreten zu lassen und überhaupt in

vielen Fällen noch Wirkungen zu erzielen, in denen ohne die Anwendung der Resonanz die Wellen ganz unwirksam wären.

In Deutschland ist bisher das System, das Prof. Slaby und Graf Arco ausgebaut haben, auf Befehl des Kaisers bei der Marine eingeführt worden. Die Fortschritte, die Slaby und Arco gemacht haben, sind nicht am Sender, sondern im Gegenteil am Empfänger gemacht worden. Beim Sender benutzen sie auch den Braunschen Flaschenkreis. Beim Empfänger aber haben sie eine andere Anordnung angeführt.

Der Kohärer wird nämlich nicht an das untere Ende des Aufwindrahtes gebracht, wobei er nur von geringen Spannungsamplituden beeinflusst wird, sondern im Gegenteil an eine solche Stelle, wo die Spannungen im Verlauf einer Periode die größten Amplituden haben. Wenn in Fig. 499 A B die Funkenstrecke des Senders ist und B B' der Sendedraht, so finden auf diesem Draht stehende elektrische Schwingungen derartig statt, daß in B ein Knoten in der Spannung, in B' aber ein Bauch vorhanden ist, d. h. daß die Amplituden der Spannungen in B' am größten sind. Durch die punktierte Linie B β soll das angedeutet sein. Kommen nun die Wellen durch die Luft an den Empfangsapparat, also an dessen Aufwinddraht C D (das Stück C E

Fig. 499.

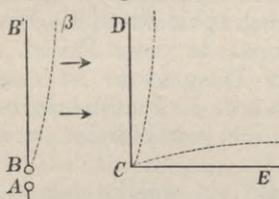
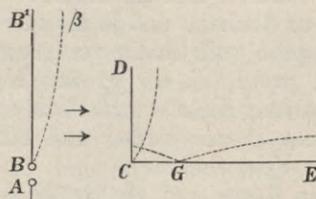


Fig. 500.



denken wir uns vorläufig noch fort), so ist auch bei diesem die größte Amplitude bei D, die geringste bei C. Bringt man nun den Kohärer bei C, also am unteren Ende des Empfängerdrahtes an, so wird dieser nur von geringen Wechselspannungen affiziert werden. Am günstigsten wäre es also, ihn oben bei D anzubringen. Das geht natürlich aus praktischen Gründen nicht, weil eben das Ende D hoch über die Häuser oder Schiffsverdecke auf Blitzableiter oder Schiffsmasten hinausgeführt werden muß. Wenn man aber an den Knotenpunkt C noch einen ebenso langen Draht CE horizontal legt, so daß er von den Induktionen nicht getroffen wird, so pflanzt sich die stehende Welle des Drahtes DC durch D hindurch auf DE fort, bringt auch in diesem stehende Wellen hervor und erzeugt an dessen Ende E einen Bauch ganz wie bei D. Dort kann man nun bequem den Kohärer anschließen, weil dieser Draht in der Höhe des Beobachtungsraumes geführt wird. In der Tat gelang es so den beiden Experimentatoren, die Sicherheit des Telegraphierens in überraschendem Maß zu erhöhen. Es ist dabei nicht einmal nötig, den Draht CE geradlinig zu führen, er kann auch auf große Spulen gewickelt sein. Der Punkt C aber muß mit der Erde verbunden werden. Ist wie in Fig. 500 der Draht CD kürzer als BB', aber CE so lang, daß DC und CE zusammen doppelt so lang wie BB' sind, so bildet

sich der Knoten bei G und eine Erdverbindung bei C schadet dann nach Angabe nicht sehr. Daraus aber sieht man, wie man von zwei verschiedenen Stationen ausgehende Funkentelegramme an einer Empfangstation aufnehmen und trennen kann. Die beiden Sendestationen haben verschieden lange Sendedrähte. In der Empfangstation ist ein Auffangdraht CD von bestimmter Länge vorhanden, ein Blitzableiter in Häusern, ein zur Mastspitze geführter Draht auf Schiffen. Es werden nun an C zwei Drähte CE angelegt, ein kürzerer für die eine Sendestation, ein längerer für die andere. Jeder hat einen Kohärer und jeder Kohärer reagiert nur auf diejenigen Funken, die aus der seiner Leitung entsprechenden Station angelangt sind. So wurden durch den Blitzableiter eines Hauses in Berlin (Schiffbauerdamm Nr. 1) gleichzeitig zwei Telegramme aufgenommen, von denen das eine von Charlottenburg aus 4 km, das andere von Schönweide aus 15 km Entfernung angekommen war und ganz Berlin durchquert hatte.

Ein Geheimnis läßt sich bisher bei Funkentelegrammen nicht bewahren. Jeder der in dem Ausstrahlungsbereich des Senders sich befindet, kann durch einen genügend empfindlichen Kohärer die Depeschen abfangen. Man sieht auch nicht wohl ein, wie dem völlig abzuhelpen wäre, da eben die telegraphischen Zeichen nicht an die Drähte gebunden sind, sondern frei im Raume vorhanden sind. Insofern ist gar nicht daran zu denken, daß je die gewöhnliche Telegraphie durch die Funkentelegraphie vollständig verdrängt werden wird. In vielen Fällen, allerdings, wohl bei der großen Mehrzahl aller Telegramme ist eine Geheimhaltung nicht erforderlich und für diese würde die Funkentelegraphie, wenn sie ebenso sicher und billiger ist als die gewöhnliche, wohl ein reiches Feld finden.

In Bezug auf die Größe der Entfernung, auf welche man so ohne Draht telegraphieren kann, sind bisher die von Marconi erreichten Resultate denen aller anderen Experimentatoren überlegen. Es lassen sich nach seinem System mit Sicherheit telegraphische Nachrichten auf 120 km und in einigen Fällen schon auf 300 km übertragen. Aber Marconi gab sich mit diesem erzielten Resultat nicht zufrieden. Er hoffte stets, daß es ihm möglich sein würde, ohne Draht über den Atlantischen Ozean zu telegraphieren und so die transatlantischen Kabel unnötig zu machen oder wenigstens ihnen einen Teil ihrer Depeschen abzunehmen. Ob ihm das gelingen werde, ob er die Energie der ausgesendeten Wellen und die Empfindlichkeit der Empfangsapparate genügend groß werde machen können, das erschien lange Zeit sehr zweifelhaft, obwohl man das Wort „unmöglich“, wie viele Erfahrungen gelehrt haben, in der Elektrotechnik nicht leicht aussprechen darf. Und in der Tat ist während der Drucklegung dieses Buches die, wie es scheint, sichere Nachricht eingelaufen, daß es Marconi gelungen ist, ohne Draht von Amerika nach England telegraphische Nachrichten zu geben. Wie die Apparate im einzelnen eingerichtet sind, mit denen er diesen großartigen Erfolg erzielt hat, das ist zwar vorläufig noch nicht bekannt, doch spielt die Abstimmung aller Apparate auf Resonanz jedenfalls dabei eine große Rolle. Die Leistung selbst aber ist der größten Bewunderung wert.

14. Kapitel.

Telephon und Mikrophon.

Konnte die Telegraphie auch lange das Bedürfnis des Verkehrs befriedigen, indem sie es gestattete, Mitteilungen jeder Art rasch zwischen zwei beliebig voneinander entfernten Personen zu übertragen, so brauchte sie dazu doch immer Vermittler, welche die Worte in telegraphische Zeichen und diese wieder in Worte umsetzten. Auch diese letzte Beschränkung fiel durch die Erfindung des Telephons, welches die Worte selbst in die Ferne zu tragen, also ein Fernsprechen und Fernhören gestattet.

Das Telephon in der Gestalt, wie es sich in kurzer Zeit einen Platz unter den wichtigsten Verkehrsmitteln der Menschheit erungen hat, ist einer der genialsten Apparate, den die Physik kennt, um so genialer, da er in überaus einfacher Weise konstruiert ist und Naturgesetze benutzt, die alle längst bekannt und angewendet waren. Es ist ein Amerikaner, Graham Bell, dem wir die Erfindung des Telephons verdanken. Zwar waren schon früher Versuche gemacht worden, Töne vermittelst der Elektrizität in die Ferne zu senden, insbesondere hat Philipp Reis 1860 ein Telephon konstruiert, durch welches auch bereits Worte und Töne elektrisch übermittelt werden konnten, aber einen praktischen Erfolg erlangte dieses Unternehmen erst durch die einfache Konstruktion von Bell.

Die Aufgabe war, Töne und Worte elektrisch auf größere Entfernungen zu übertragen. Töne sind ja nichts anderes als Schwingungen des tönenden Körpers, also eine bestimmte Art von Bewegung. Die Aufgabe, Töne zu übertragen, ist also ein spezieller Fall der Aufgabe, auf elektrischem Wege Bewegung zu übertragen. Es soll an einer Stelle, an einer Station ein Körper in schwingende Bewegung versetzt werden, diese Bewegung soll elektrische Ströme erzeugen, welche nach der anderen Station fortgepflanzt werden, und dort sollen diese Ströme wieder schwingende Bewegungen, Töne hervorbringen, die elektrische Energie soll sich wieder in Bewegungsenergie umsetzen.

Die Art und Weise, wie Bell dieses Problem mit den einfachsten Mitteln gelöst hat, haben wir bereits einmal auf S. 225 im Prinzip kennen gelernt. An jeder der beiden Stationen befindet sich ein mit einer Drahtspule umwickelter Stahlmagnet (Fig. 501). Die beiden Drahtspulen sind miteinander zu einem geschlossenen Kreis verbunden. Vor jedem dieser permanenten Magnete befindet sich in geringer Entfernung

eine dünne Platte aus weichem Eisen, welche an ihrem Rande befestigt ist. Diese Platten werden durch die Nähe des Magneten selbst temporär magnetisch. Sobald nun die eine Eisenplatte etwas zu ihrem

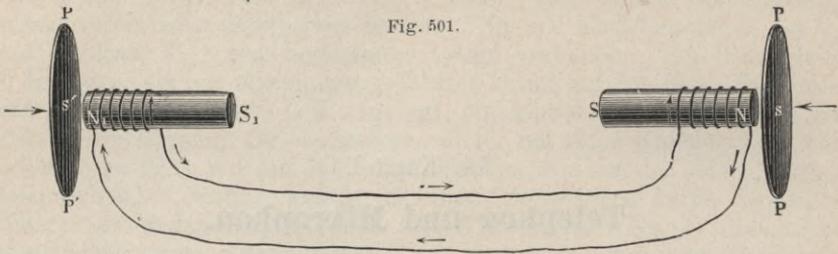
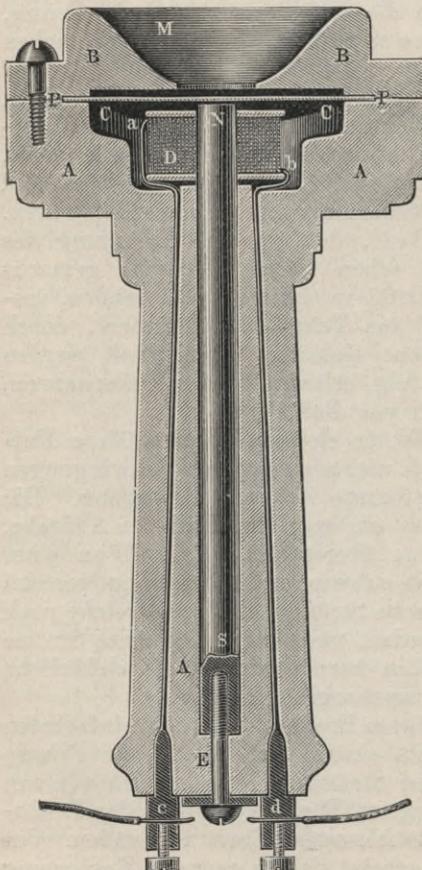


Fig. 501.

Magneten hingebogen wird, wirkt ihr Magnetismus auf die Umwindungsspule des Magneten und erzeugt in dieser einen Induktionsstrom in einer bestimmten Richtung. Dieser pflanzt sich durch die Leitung

fort bis zu dem Magneten der zweiten Station, umfließt diesen in passender Richtung und verstärkt dadurch dessen Magnetismus. Infolgedessen zieht der stärker gewordene Magnet dort die vor ihm stehende Eisenplatte an, diese biegt sich auch gegen den Magneten hin, macht also dieselbe Bewegung, wie die Platte der ersten Station. Dasselbe findet statt, wenn die erste Eisenplatte von ihrem Magneten etwas entfernt wird. Dann entfernt sich infolge des entstehenden Induktionsstromes auch die zweite Eisenplatte von ihrem Magneten. Macht also die erste Eisenplatte Schwingungen hin und her, so macht die zweite Eisenplatte genau dieselben Schwingungen.

Fig. 502.



Ganz nach diesem Schema ist das Telephon von Graham Bell eingerichtet, welches in Fig. 502 abgebildet ist. In einem Holzgehäuse befindet sich ein Magnetstab NS, dessen Nordpol von einer Drahtspirale D aus sehr feinem, dünnem Draht umgeben ist. Dicht über ihm, aber ohne ihn zu berühren, befindet sich die dünne Platte C aus weichem Eisen, welche mit ihren Rändern in dem Holzgehäuse bei PP befestigt ist. Der

Deckel hat eine Öffnung, durch welche die Mitte der Eisenplatte frei liegt, so daß man an sie heransprechen und -singen kann. Jeder Ton versetzt die Platte in schwingende Bewegung und diese pflanzt sich auf elektrischem Wege durch die Drahtleitung zur entfernten Station fort, wo sie dieselben Schwingungen, denselben Ton hervorbringt. Die äußere Ansicht des Telephon Bell gibt Fig. 503. Die Klemmschrauben unten nehmen die Leitungsdrähte auf, die zu dem Telephon der zweiten Station führen.

Bei einem jeden Ton haben wir drei Elemente zu unterscheiden: die Tonhöhe, die Tonstärke und die Klangfarbe. Die Höhe und die Stärke eines Tons müssen sich nun ohne weiteres durch das Telephon fortpflanzen lassen. Denn die Tonhöhe ist die Anzahl der hin und her gehenden Bewegungen der Platte in einer Sekunde. Eine jede solche Bewegung erzeugt einen entsprechenden Strom, und die Anzahl der Induktionsströme ist genau gleich der Anzahl der Schwingungen des Tons. Die Stärke des in das Telephon hineingesungenen oder hineingesprochenen Tones beeinflusst die Stärke der Durchbiegung der Eisenplatte. Durch einen stärkeren Ton wird die Eisenplatte kräftiger und weiter an den Magneten herangedrückt oder von ihm entfernt, und infolgedessen werden auch die Induktionsströme stärker. Das Telephon folgt daher auch genau jeder Veränderung in der Tonstärke der hineingesprochenen Töne. Ja, es leistet noch mehr. Das dritte Element, welches einen jeden Klang charakterisiert, ist seine Farbe, die Klangfarbe (Timbre). Die menschliche Stimme hat einen anderen Klang, eine andere Klangfarbe als eine Violine oder eine Trompete. Der Unterschied dieser Klangfarben beruht nach den berühmten Untersuchungen von Helmholtz darauf, daß in einem Klang nicht bloß eine einzige Art von Schwingungen vorhanden ist, nicht bloß eine Bewegung mit einer bestimmten Schwingungszahl, sondern daß in einem Klang außer einem Grundton zugleich noch eine ganze Reihe von anderen Schwingungen enthalten ist, deren Schwingungszahlen ganze Vielfache des Grundtons sind. Die Tonhöhe eines Klanges ist durch die Schwingungszahl des Grundtones bestimmt. Außerdem vollführt aber jedes Teilchen noch eine Menge von Schwingungen mit anderen Schwingungszahlen, die Helmholtz Obertöne nennt, und diese bringen eben die Farbe der Klänge hervor. Es können in einem Klang viele dieser Obertöne vorhanden sein, in einem anderen weniger, es können aus der Reihe der Obertöne einige fehlen, einige verhältnismäßig stärker sein als die anderen, alles dieses bringt die verschiedene Färbung der Klänge hervor. Alle diese Umstände müssen sich aber auch bei der telephonischen Übertragung des Schalles erhalten. Denn wenn ein Teilchen in komplizierter Weise hin und her schwingt, mit bald größerem, bald geringerem Ausschlag, bald rascher, bald langsamer, so werden ganz analog dieser Schwingungsart auch die elektrischen Ströme in gleicher Weise verändert und daher muß die Eisen-

Fig. 503.



platte des zweiten Telephons auf der Empfangsstation in ganz gleicher Weise komplizierte Schwingungen machen. Die Schwingungen dieser Eisenplatte teilen sich dann der umgebenden Luft mit, und so muß man an der Empfangsstation die Töne und Worte in gleicher Tonhöhe, gleicher Klangfarbe und entsprechender Stärke hören.

In entsprechender Stärke. Denn die Stärke des an der Empfangsstation wiedergegebenen Tones muß notwendigerweise eine viel geringere sein, als die Stärke des an der Aufgabestation hineingesprochenen Tones. Die Bewegungsenergie der Luftteilchen, welche in Schwingungen versetzt sind, muß sich ja zuerst der Eisenplatte mitteilen, wodurch schon ein großer Teil von ihr verloren geht. Durch die Umsetzung der mechanischen Energie in elektrische geht wieder ein Teil verloren und durch die Rückumsetzung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie tritt ein neuer Verlust ein. Daher ist es klar, daß der nach vielen Umsetzungen erzeugte Schall auf der zweiten Station viel geringere Stärke haben muß als der aufgegebenen, wenn man nicht besondere Hilfsmittel anwendet, um ihn zu verstärken.

Trotz dieser vielen Verluste läßt sich aber doch mit dem einfachen Bellschen Telephon Stimme und Sprache sehr vernehmlich übertragen. An der Aufgabe- und Empfangsstation sind dabei die Telephone ganz gleich eingerichtet. Ein jeder dient zugleich als Tonsender und als Tonempfänger. Je größer der Abstand zwischen beiden Stationen ist, desto größer ist der Widerstand der Drahtleitung, desto geringer wird also die Stromstärke und desto geringer die Wirkung des Telephons. Es läßt sich deshalb das Bellsche Verfahren nur für kurze Strecken, einige hundert Meter weit, benutzen. Nichtsdestoweniger hatte das Bellsche Telephon unwiderleglich die Möglichkeit bewiesen, den Schall auf elektrischem Wege zu übertragen, und es kam jetzt nur noch darauf an, die Wirkungen zu verstärken. Ein sehr nahe liegendes Mittel dazu besteht darin, daß man in dem Ge-

häuse des Telephons nicht einen Stabmagneten, sondern einen kräftigen Hufeisenmagneten anbringt, wie in Fig. 504. Die Pole desselben sind mit Polschuhen $a_1 a_1$ versehen, die ganz eng aneinander stehen und je mit einer Drahtspule bb so umwickelt werden, daß die in ihnen gleichzeitig erzeugten entgegen-

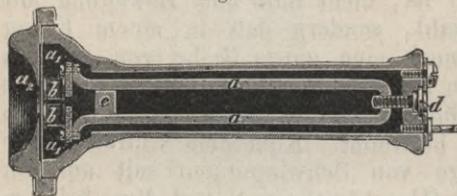


Fig. 504.

gesetzten Ströme sich gegenseitig verstärken. Der Hufeisenmagnet ist unten an einer feinen Schraube d befestigt, durch welche er der Eisenplatte genähert oder von ihr entfernt werden kann, damit man die möglichst größte Wirkung erhält. Die äußere Ansicht eines solchen Hufeisentelephons von Mix & Genest in Berlin zeigt Fig. 505.

Man kann dem Hufeisen zweckmäßig noch andere Formen geben, namentlich, um es bequem fassen zu können. So werden bei dem Löffeltelephon (Fig. 506) die Polschuhe mit den Drahtrollen senkrecht zum Hufeisen gesetzt, so daß die Membran und die Hörmuschel

parallel zum Griff sind. Bei dem Ringtelephon, das in Frankreich viel benutzt wird, ist der Hufeisenmagnet ringförmig gebogen, wie es Fig. 507 bei A zeigt, und dient direkt als Griff für das Telephon.

Fig. 505.

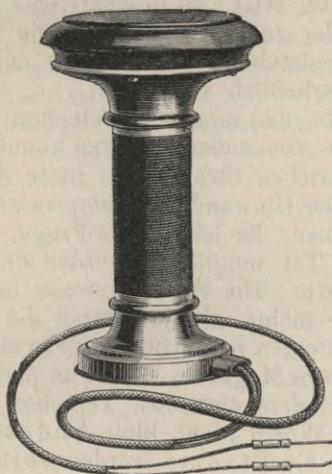
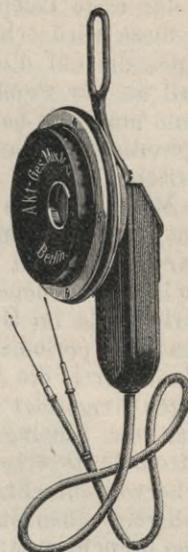


Fig. 506.



Seine Pole BB sind mit den Drahtspiralen umgeben und über ihnen befindet sich die Eisenmembran. Bei dem Dosentelephon (Fig. 508) ist der halbkreisförmige Hufeisenmagnet in einer Dose untergebracht

Fig. 507.

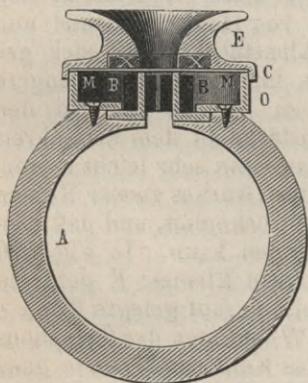


Fig. 508.

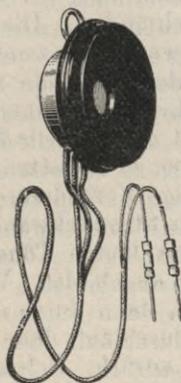
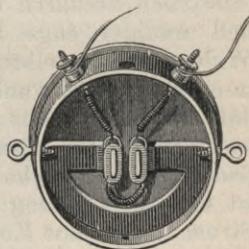


Fig. 509.



und seine Polschuhe stehen senkrecht auf ihm, gegen den Deckel der Dose zu, wie man aus Fig. 509 sieht, welche die Dose geöffnet zeigt.

Bei der ersten Einführung des Telephons geschah in der That das Sprechen sowohl wie das Hören durch zwei ganz gleich ein-

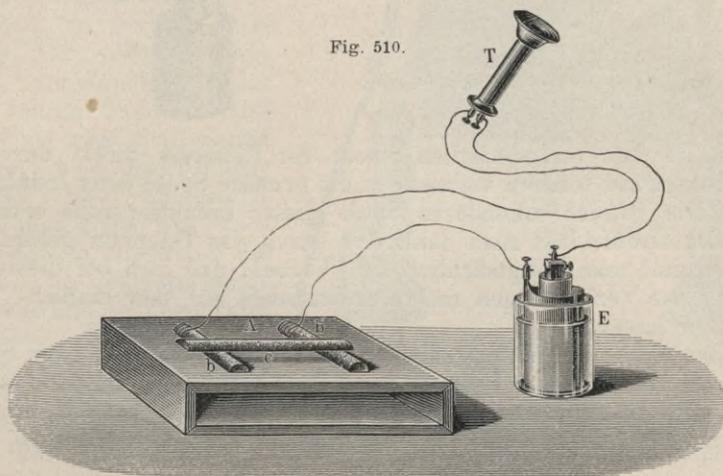
gerichtete Apparate. Die durch die Induktionswirkung in dem einen Telephon erzeugten Ströme dienen ganz direkt dazu, um das zweite Telephon in Tätigkeit zu setzen. Man braucht keine besondere Batterie, um mit solchen Telephonen zu sprechen, sondern man erzeugt die Ströme durch das Sprechen selbst. Die Schallenergie, die man dabei in das erste Telephon hineingibt, setzt sich in elektrische Energie um, und diese wird schließlich wieder zu Schallenergie. Die Verluste an Energie, die auf diesem Wege entstehen, müssen aber notwendig den Schall an der zweiten Station erheblich schwächen.

Wenn man nun bewirken könnte, daß man dem Telephon auf der Empfangsstation noch andere Energie von außen zuführen könnte, etwa die elektrische Energie eines galvanischen Stromes, so hätte man dadurch ein Mittel, um den Verlust bei der Umwandlung kompensieren oder wenigstens geringer machen zu können. Es ist nur die Frage, ob dies ausführbar ist. Es ist dies in der Tat möglich geworden durch das von Hughes erfundene Mikrophon. Die Wirkungsweise des Telephons verlangt ja im Grunde weiter nichts, als daß durch die hineingegebenen Töne periodische Schwankungen in der Stromstärke eintreten, welche dann durch die Anwendung von Magneten wieder in periodische Bewegungen umgesetzt werden. Bei dem einfachen Telephon werden aber durch die hineingesprochenen Worte nicht bloß Änderungen in der Stromstärke erzeugt, sondern die Ströme werden selbst erst dadurch hervorgebracht. Es ist das offenbar überflüssig. Wenn man von vornherein einen Strom hat, z. B. durch ein galvanisches Element erzeugt, so braucht man durch die Worte und Töne nur Schwankungen in der Stromstärke hervorzurufen, und kann dann diese durch ein Telephon wieder in Worte umsetzen. Diese periodischen Stromschwankungen nun hat Hughes durch Anwendung von variablen Kontakten an Kohlenstäben hervorgebracht.

Die Kohle hat, wie wir wissen, einen sehr erheblichen Leitungswiderstand. Wir wissen aber auch (S. 88), daß dieser Widerstand sich durch Druck sehr erheblich ändert. Die Idee von Hughes bestand nun darin, durch die Schallbewegungen zwei Kohlenstäbchen, die sich gerade eben berühren und durch die ein Strom hindurchgeht, in engere und weniger enge Berührung miteinander zu bringen und so den Widerstand derselben und dadurch die Stromstärke in dem Stromkreis in erhebliche Schwankungen zu versetzen. Man kann sehr leicht zeigen, daß man durch ganz geringe Veränderungen des Druckes zweier Kohlen aufeinander sehr erhebliche Stromschwankungen bekommt, und daß man dadurch ein Telephon zum lauten Tönen bringen kann. In Fig. 510 ist eine Vorrichtung dazu abgebildet. Von einem Element E geht ein Strom durch eine Kohle b, dann durch die leise darauf gelegte Kohle c zu der anderen Kohle b, durchläuft dann die Windungen des Telephons und kommt zum Element zurück. Solange das Kohlenstäbchen c ganz ruhig auf b liegt, hört man natürlich nichts, weil ja die Stromstärke unverändert bleibt. Die leiseste Bewegung von c aber, z. B. schon eine Bewegung, die dadurch hervorgebracht wird, daß eine Fliege auf dem Kästchen A geht, bringt sofort ganz erhebliche Stromschwankungen hervor, und infolgedessen wird der Magnet des Telephons verstärkt und

geschwächt und man hört im Telephon ein lautes Geräusch. Diesen Apparat, ein paar lose sich berührende Kohlen, auf einer Schallmembran befestigt, nennt man ein Mikrophon.

Hier hat man also ein einfaches Mittel, um in einem Telephon ganz erhebliche Stromschwankungen hervorzubringen. Man braucht eben nur einen galvanischen Strom von einem Element durch ein Telephon und ein Mikrophon zu senden und dann gegen das Mikrophon zu sprechen, um in dem Telephon die Töne in ganz erheblicher Stärke reproduziert zu erhalten. Natürlich kann dabei das Mikrophon in der einen Station, das Telephon in der anderen sein. Der Unterschied



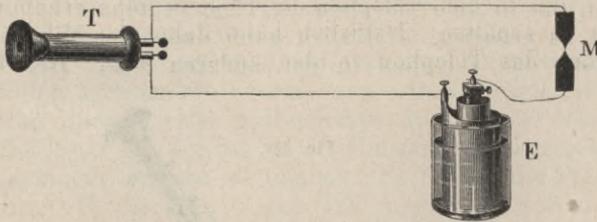
dieser Hughesschen Anordnung von der Bellschen ist also ein doppelter. Bei der Bellschen Telephoneinrichtung werden zwei gleiche Apparate zum Sprechen und Hören benutzt. Der Tonsender oder, wie man auch häufig sagt, der Transmitter und der Tonempfänger sind beide einfache Telephone. Bei der Hughesschen Anordnung dagegen ist der Transmitter nicht ein Telephon, sondern ein Mikrophon. Der zweite Unterschied ist der, daß man bei der Bellschen Anordnung kein galvanisches Element braucht. Durch das Sprechen werden im ersten Telephon Induktionsströme erregt und diese bringen das zweite Telephon in Tätigkeit. Bei der Hughesschen Anordnung dagegen muß das Mikrophon in einem Stromkreis liegen, durch den ein Strom von einem Element fließt. Das Sprechen dient nur dazu, die Stärke dieses schon vorhandenen Stromes in bestimmter Weise zu verstärken und zu schwächen.

Die Anordnung, wie sie bei dem Hughesschen Mikrophon nötig ist, wäre also eine solche, wie sie in Fig. 511 gezeichnet ist. Der Strom fließt vom Element E der Aufgabestation durch das Mikrophon M derselben Station, dann durch die Leitung zur zweiten Station und direkt durch die Spule des Telephons T dieser Station und von dort durch die Leitung zur ersten Station nach E zurück. Dabei wird

also das Telephon der zweiten Station stets von dem Strome durchflossen, der von dem Element E durch die Leitung gesendet wird.

Man kann aber das Telephon der Empfangsstation auch aus diesem Stromkreis entfernen, und diese Anordnung ist für die Schaltung von solchen Apparaten sehr vorteilhaft. Um das zu erreichen, sendet

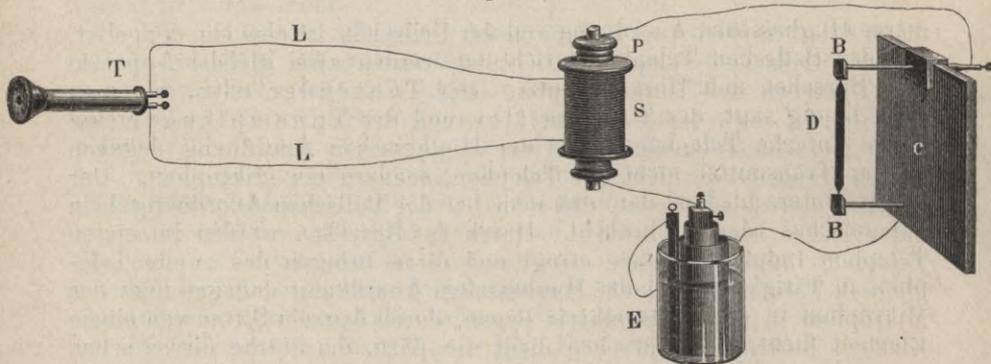
Fig. 511.



man nicht den veränderlichen Strom des Elements direkt durch die Telefonspirale, sondern vielmehr in die primäre Spule einer Induktionsrolle. Die in der sekundären Spule dieser Induktionsrolle erzeugten Induktionsströme läßt man dann erst durch das Telephon gehen. Dadurch erzielt man hauptsächlich den Vorteil, daß sich bei dieser Anordnung die Verbindungen mehrerer Stationen auf sehr einfache Weise herstellen lassen.

Bei dieser Einrichtung fließt also (Fig. 512) in der ersten Station der Strom vom Element E durch das Mikrophon BDB und dann einfach durch eine primäre Induktionsspule P in derselben Station hindurch und zum Element zurück. Um die primäre Induktionsspule ist dann,

Fig. 512.



getrennt, eine sekundäre Induktionsspule S gewunden, in welcher die Induktionsströme erregt werden, und diese ist durch eine Leitung L mit dem Telephon T der zweiten Station verbunden. Die in S induzierten Ströme verstärken oder schwächen den Magneten des Telefons und bringen es dadurch zum Tönen.

Da man auf jeder Station sprechen und hören können muß, so muß auf jeder Station ein Telephon und ein Mikrophon vorhanden

sein. Es sind dann auf jeder Station auch die beiden Induktionsspulen notwendig. Bevor wir jedoch die Verbindungen dieser Apparate, wie sie sich bei wirklichem Betrieb als zweckmäßig herausgestellt haben, untersuchen, wollen wir erst einige der verschiedenen Formen, welche man dem Mikrophon bisher gegeben hat, kennen lernen.

Das erste Mikrophon von Hughes bestand einfach aus einem Resonanzbrettchen, an welchem, wie in Fig. 512, zwei Kohlenstücke angebracht waren. Diese hatten kleine Vertiefungen an zwei Stellen und in diese war ein Kohlenstäbchen lose eingestellt. Sprach man gegen das Resonanzbrettchen, so kamen die Kohlen in entsprechende Vibrätion und in dem Telephon der zweiten Station wurden die Worte gehört. Man brauchte dabei die Stimme beim Sprechen gar nicht anzustrengen, sondern konnte mit gewöhnlicher Stärke aus einiger Entfernung an das Mikrophon heransprechen und doch auf einige Meilen mit Leichtigkeit den Schall übertragen.

Dieses einfache Kohlenmikrophon von Hughes wurde dann von anderen Konstrukteuren in verschiedenen anderen Formen hergestellt, und insbesondere wendete man, und wendet man jetzt, statt eines variablen Kohlenkontakts gern deren mehrere an. Solche Mikrophone kann man Stäbchenmikrophone nennen, zum Unterschied von den nachher zu beschreibenden Körnermikrophonen. Diese Mikrophone werden meistens in der Form konstruiert, welche ihnen zuerst von dem Franzosen Ader gegeben wurde. Bei diesem Mikrophon, dessen äußere Ansicht (mit angehängten Telephonen) Fig. 513 zeigt, ist das Mikrophon selbst in dem Kästchen enthalten, gegen dessen schräge Deckelplatte (aus Holz) man

Fig. 513.

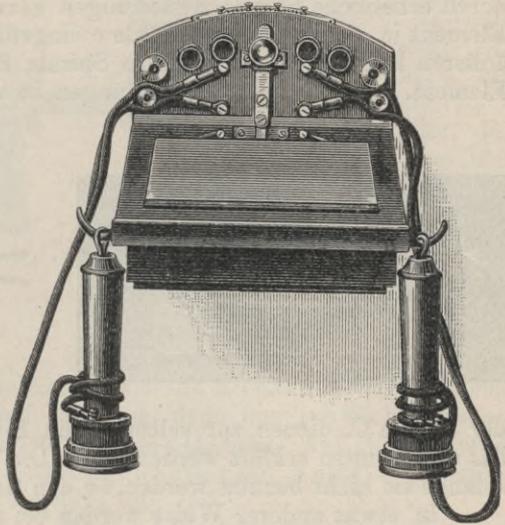
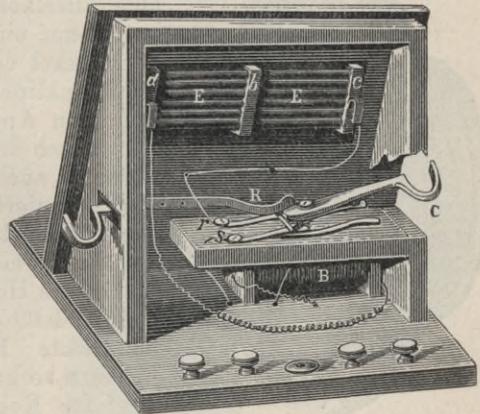


Fig. 514.



spricht. Fig. 514 zeigt das Mikrophon selbst geöffnet. In letzterer Figur sieht man, daß an dem Holzdeckel des Kastens drei dickere Kohlenstäbchen *a b c* befestigt sind, zwischen welchen je sechs Kohlenstäbchen *EE* lose aufliegen. Spricht man gegen den Deckel des Kastens, so kommen die Kohlenstäbchen alle in Schwingungen und bringen dadurch erhebliche Stromschwankungen hervor. Der Strom wird von dem Element in die eine äußere Kohle *c* eingeführt und geht von der anderen äußeren Kohle *d* in die primäre Spirale *B* und von dieser zurück zum Element. Die übrigen Vorrichtungen in der Figur, die Federn *R* und

Fig. 515.

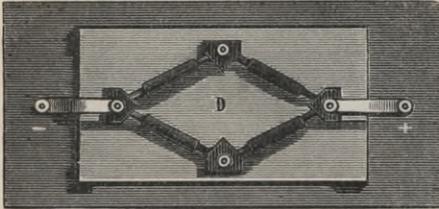
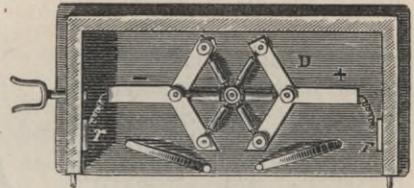


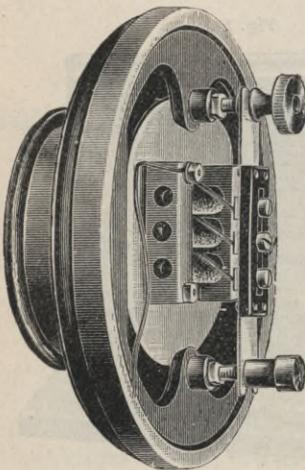
Fig. 516.



der Haken *C*, dienen zur selbsttätigen Einschaltung der Apparate, wie das weiter unten erklärt werden wird. Die Telephone zum Hören hängen, solange sie nicht benutzt werden, an den Haken des Mikrophonkästchens.

In etwas anderer Weise werden bei anderen Stäbchenmikrophonen die Kohlenstäbchen angeordnet, wie Fig. 515 und 516 in leichtverständlicher Weise zeigen. So befinden sich bei dem Mikrophon Fig. 515 vier Kohlenstäbchen schräg zwischen vier Kohlenklötzen lose eingelegt, bei dem Mikrophon Fig. 516 sechs Kohlenstücke radial in eine Mittelkohle eingelegt. Die Kohlen sind immer auf einer Holzplatte befestigt, welche den Deckel eines Kastens bildet, in welchem die Induktionsspiralen und die übrigen notwendigen Apparate liegen.

Fig. 517.

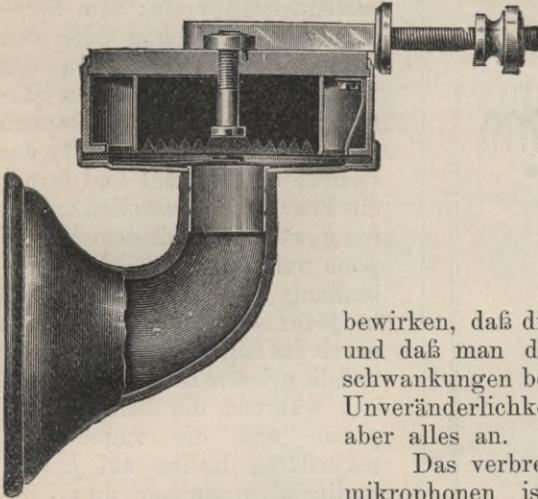


Nach dem Prinzip des Aderschen Mikrophons ist auch das von der deutschen Reichspost adoptierte eingerichtet, das in Fig. 517 von der Rückseite abgebildet ist. Dasselbe besteht aus einem runden Kästchen, das vorn durch eine Holzplatte geschlossen ist, auf der ein Mundstück befestigt ist. Innen sind zwei senkrechte Kohlenklötzchen mit je drei Löchern vorhanden, zwischen denen drei bewegliche Kohlenstäbchen liegen. Dieselben sind durch je eine dünne Feder an die Sprechplatte angeedrückt. In die beiden Kohlenklötze wird der Strom vom Element eingeführt.

Je mehr bewegliche Berührungspunkte zwischen den Kohlen vorhanden sind, desto größer sind die Stromschwankungen, die man durch

das Sprechen erzeugen kann, und desto lauter wird also der übertragene Ton sein, resp. auf desto größere Entfernungen wird man sprechen können. Von diesem Gedanken ausgehend, hat zuerst Hunnings 1878 ein Mikrophon konstruiert, welches aus einer großen Zahl von Kohlenkörnern und zwar aus Koks bestand. Solche Körnermikrophone

Fig. 518.



sind dann von verschiedenen Seiten hergestellt worden, wobei das Hauptaugenmerk darauf gerichtet war, die Übelstände derselben zu vermeiden. Es bilden sich nämlich an den Kontaktstellen der Kohlen allmählich infolge der Erwärmung durch den Strom Zusammenbackungen, die bewirken, daß die Kontakte sich verändern und daß man dann nur schwache Stromschwankungen bekommt. Auf die Güte und Unveränderlichkeit der Kontakte kommt aber alles an.

Das verbreitetste von diesen Körnermikrophonen ist der sogenannte Universaltransmitter von Berliner, der

sich durch vorzügliche Wirkung auszeichnet, indem er nicht nur laut, sondern auch deutlich die Sprache und ihre Modulationen wiedergibt. Dieses Mikrophon ist in Fig. 518 im Durchschnitt dargestellt. Die Kohlenkörner, aus besonders präparierter Kohle bestehend, befinden sich bei ihm in dem engen Zwischenraum zwischen der Schallmembran, die hier selbst aus Kohle besteht, und der ausgezackten unteren Fläche eines Kohlenblocks. Das ganze System, Kohlenblock und Zwischenraum mit Kohlenkörnern bis zur Membran ist von einem Ring aus weichem Stoff umgeben. Wichtig ist die Lagerung der Kohlenmembran nach unten. Um trotzdem bequem sprechen zu können und die Membran kräftig zu erregen, ist an ihr ein gebogener Schalltrichter aus lackierter Papiermasse befestigt. Dieser Universaltransmitter, dessen äußere Ansicht Fig. 519 zeigt, wird mit vier bis fünf Leclanché-Elementen getrieben

Fig. 519.

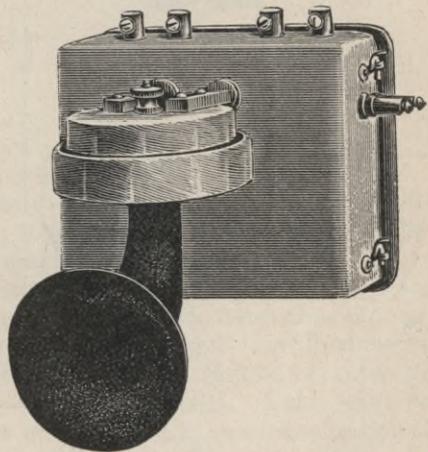
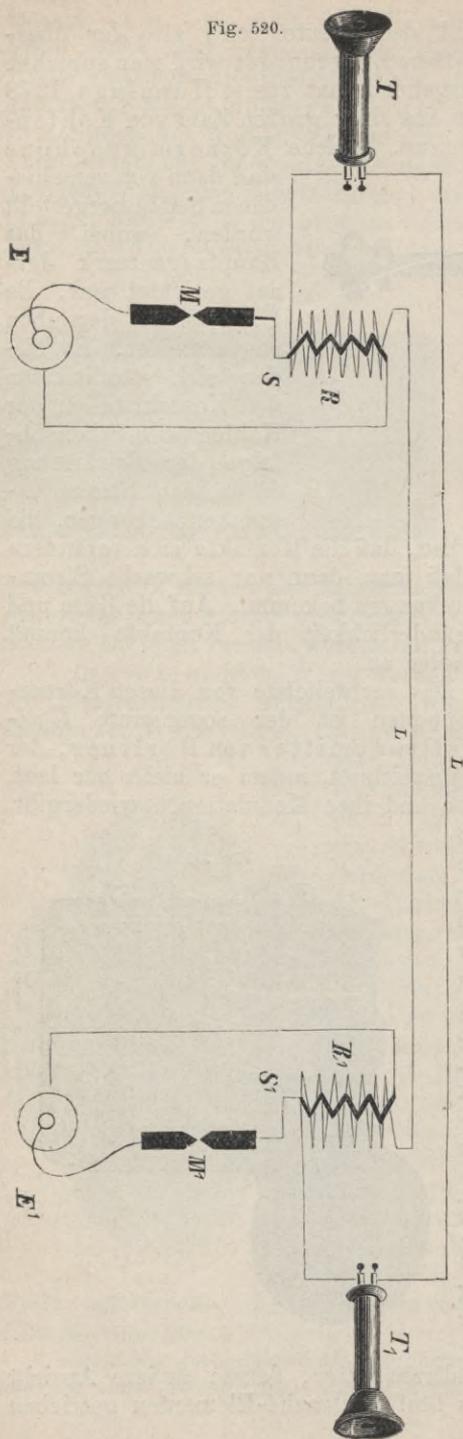


Fig. 520.



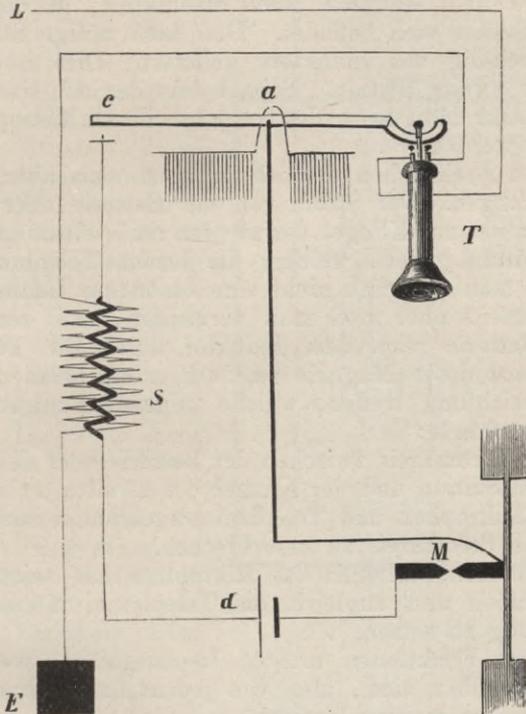
und gestattet die Sprache, insbesondere aber die Musik, laut und deutlich in einem großen Zimmer zu vernehmen.

Sobald man ein Mikrophon anwendet, hat man also zum Hören und Sprechen zwei verschiedene Apparate: zum Sprechen das Mikrophon oder den Transmitter, zum Hören das Telephon. Jede von beiden Stationen muß dann ein Telephon und ein Mikrophon und für das letztere ein Element und ferner ein Paar Induktionsrollen haben, die gewöhnlich mit dem Mikrophon vereinigt sind. Die Verbindung ist dann derart, daß in jeder Station das Element durch das zugehörige Mikrophon und die primäre Rolle geschlossen ist, während die beiden Telephone und die zugehörigen sekundären Rollen auf beiden Stationen zusammen durch die Leitung verbunden sind. In der Fig. 520 sind die primären Spiralen stark gezeichnet, die sekundären schwach. Die Verbindung ergibt sich dann aus der Figur einfach, in welcher M, M' die beiden Mikrophone, E, E' die zugehörigen Elemente, T, T' die beiden Telephone, S, S' und R, R' die primären und sekundären Induktionsspiralen sind, von denen die letzteren durch die Hin- und Rückleitung L miteinander verbunden sind. Die Rückleitung jedoch braucht nicht durch einen Draht zu geschehen. Nach der Entdeckung von Steinheil, die im vorigen Kapitel besprochen worden ist, ist es möglich, die Erde selbst als Rückleitung zu benutzen. Man verbindet das eine Ende jeder sekundären Spirale mit der Leitung, das andere mit

dem Telephon und durch dieses mit der Erde, und braucht dann nur einen Draht zwischen den beiden Stationen und erspart also an Material und Kosten der Einrichtung.

Als galvanische Elemente für die Mikrophonkreise nimmt man gewöhnlich Leclanché-Elemente, welche ausreichend stark und ausdauernd und billig sind. Wenn das Telephon und Mikrophon nicht benutzt werden, ist es natürlich angebracht, das Element zu öffnen, damit dasselbe weniger rasch verbraucht wird. Man hat dazu zweck-

Fig. 521.



mäßig eine automatische Einrichtung angebracht. Es wird nämlich das Telephon nach Beendigung des Gesprächs einfach an einen Haken gehängt und dadurch der Strom des Mikrophonkreises unterbrochen. Diese Einrichtung ist in Fig. 521 schematisch gezeichnet. Das Telephon *T* hängt an einem Haken und zieht durch sein Gewicht den Hebelarm *ac* in die Höhe und unterbricht dadurch die Verbindung bei *c*. Sowie das Telephon zum Hören von dem Haken hergenommen ist, wird die Verbindung bei *c* hergestellt. Dann geht der Strom von dem Element *d* durch die primäre (stark gezeichnete) Spirale zu *c*, dann durch *a* zum Mikrophon *M* und zum Element zurück. Die in der sekundären Spirale erzeugten Ströme gehen durch das Telephon *T* und durch die Leitung *L* zum Telephon der nächsten Station (welches

auch von seinem Haken abgenommen ist), von dort in die Erde und durch die Erde nach E in die erste Station zurück.

Als man begann, das Telephon praktisch in den Verkehr einzuführen, sah man bald, daß es notwendig sei, zunächst vor jedem Gespräch ein lautes Zeichen zu geben, um anzuzeigen, daß telephonierte werden soll. Man benutzt deswegen jetzt bei den meisten Telephon-einrichtungen mit Mikrophon noch eine elektrische Klingel, die zuweilen durch eine besondere Batterie, gewöhnlich aber durch eine kleine magnetelektrische Maschine, deren Anker man durch eine Kurbel dreht, betrieben wird. Man drückt an der Aufgabestation auf einen Knopf und schließt dadurch einen Stromkreis, in dem die Klingel der zweiten Station sich befindet. Der dazu nötige Strom wird eben durch die Drehung des Induktors geliefert. Dies ist das Anfangssignal für die zweite Station. Sobald dort der Angerufene sein Telephon an das Ohr hält, kann das Gespräch durch Mikrophon und Telephon geführt werden.

Für den praktischen Betrieb ergeben sich aber daraus sofort einige Forderungen. Der Strom von der Batterie oder dem Induktor der ersten Station zur Klingel der zweiten muß selbstverständlich durch den Leitungsdraht gehen, welcher die beiden Telephone miteinander verbindet, da man natürlich nicht eine besondere Leitung dafür legen will. Andererseits aber muß man vermeiden, daß der starke Strom von dieser Batterie resp. dem Induktor durch die Telephone selbst gehe, weil sonst deren Magnete zu stark erregt würden. Man mußte also eine Vorrichtung treffen, welche folgende Funktionen der Reihe nach leicht ausführte:

1. Einen Stromkreis zwischen der Batterie oder dem Induktor der ersten Station und der Klingel der zweiten zu schließen, ohne daß Mikrophon und Telephon eingeschaltet sind.
2. Diesen Stromkreis zu unterbrechen.
3. Auf beiden Stationen das Mikrophon mit seinem Element zu verbinden und zugleich die Telephone miteinander in Verbindung zu setzen.

Alle diese Funktionen mußten so ausgeführt werden, daß sie praktisch anwendbar sind, also von jedem Laien ohne physikalische Kenntnisse benutzt werden konnten.

Eine solche Einrichtung, wie sie bei vielen Telephonanlagen angebracht ist, zeigt Fig. 522. Es ist dabei angenommen, daß der Strom für die Klingeln durch eine Batterie, nicht durch einen Induktor geliefert wird. Für den letzteren Fall ergibt sich eine ganz ähnliche Schaltung. In der Figur ist das Telephon mit T, das Mikrophon mit M, die Klingel mit K bezeichnet. Die primäre Induktionsspule ist mit o, p , die sekundäre mit d, h bezeichnet. Alle diese Teile, sowie der Taster und der Telephonhaken mit den nötigen Verbindungen sind durch eine dick gezeichnete Einrahmung eingeschlossen. Unterhalb des Rahmens ist eine Batterie gezeichnet, deren positiver Pol (Kohle) mit der Erde verbunden ist, während das Zink des Endes und ein Zink aus der Mitte mit den Klemmen WZ und MZ oberhalb der Umrahmung verbunden sind. Zwei weitere Klemmen, mit E und L bezeichnet,

führen, die erste zur Erde, die zweite zur Leitung nach der entfernten Station.

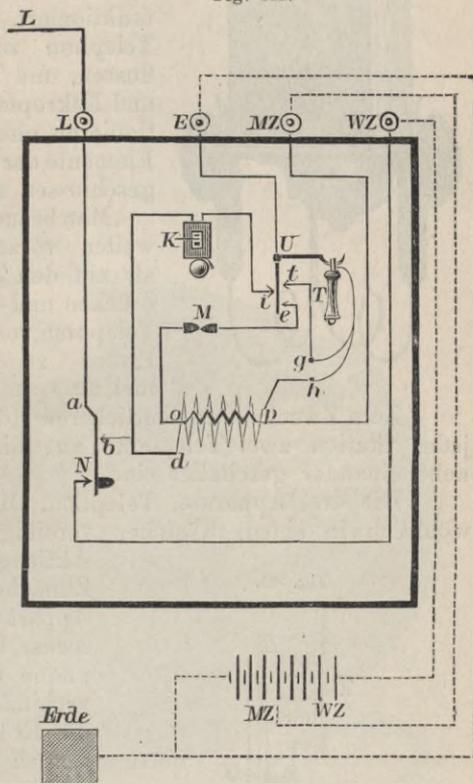
Das Telephon T hängt zuerst auf beiden Stationen an einem Winkelhebel, der um den Punkt U drehbar ist. Durch das Gewicht des Telephons wird dieser Hebel so gestellt, daß die Verbindungen mit t und e, welche zum Stromkreis des Mikrophons und Telephons gehören, unterbrochen sind. Dagegen wird durch den Hebel eine leitende Verbindung mit i hergestellt und von diesem aus durch die Klingel K mit b, welches an dem Druckknopf N, wenn er nicht gedrückt ist, anliegt. Wenn dieser aber gedrückt wird, so macht er mit N Verbindung. Sobald man also auf den Knopf drückt, geht ein Strom von dem Pol WZ der Batterie durch die obere Klemme WZ, dann durch N, a zur Leitung L. Von dieser zu dem L und a der nächsten Station (in welcher auch das Telephon an dem Haken hängt) und dort durch b (da ja dort der Druckknopf nicht gedrückt ist) zu der dortigen Klingel K, dann durch i, U, E zur Erde und durch die Erde zur ersten Station zurück.

Dadurch ertönt also die Klingel der zweiten Station und die erste Funktion ist dadurch erfüllt: die Klingel der entfernten Station ist in Tätigkeit, ohne daß durch die Telephone und Mikrophone ein Strom geht.

Nun werden auf beiden Stationen die Telephone von den Haken abgenommen. Dadurch wird die Verbindung mit i unterbrochen. Die Klingeln K sind also dadurch ausgeschaltet.

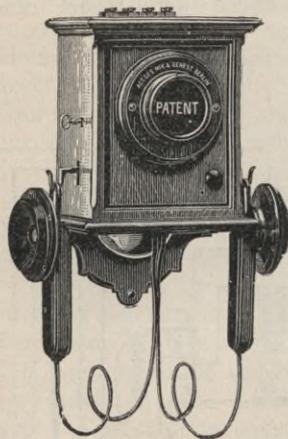
Dagegen werden nun t und e durch den Hebel miteinander und durch U mit der Erde verbunden. Dadurch ist jedes Mikrophon mit seiner Batterie in Verbindung gesetzt und zugleich sind die Telephone durch die Leitung L miteinander verbunden. Denn von dem Pol MZ der Batterie geht der Strom jetzt durch die obere Klemme MZ zur primären Spirale p o, von dort durch das Mikrophon M nach e und durch U, E zur Erde, zu welcher auch der andere Pol der Batterie abgeleitet ist. Zugleich gehen von der sekundären Spirale die induzierten Ströme durch h, d, b, a in die Leitung L zum Punkt b der

Fig. 522.



zweiten Station, und dort durch *d* zu der dortigen sekundären Spirale, dann durch *h* zu dem dortigen Telephon *T* und durch *g*, *t* zur Erde. Von der Erde kommt der Strom zur Erdplatte *E* der ersten Station zurück und geht dann aus dieser durch *t* in das Telephon *T* und dann zur sekundären Spirale *d* zurück.

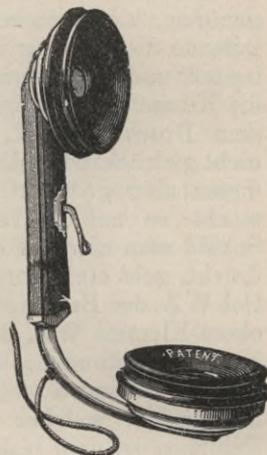
Fig. 523.



Damit ist also erreicht, was beabsichtigt war. Die Klingel funktioniert, ohne das Telephon zu beeinflussen, und Telephon und Mikrophon funktionieren, ohne daß die Elemente der Klingeln geschlossen sind.

Man braucht nichts weiter vorzunehmen, als auf den Taster zu drücken und dann das Telephon von seinem Haken zu nehmen und zu sprechen.

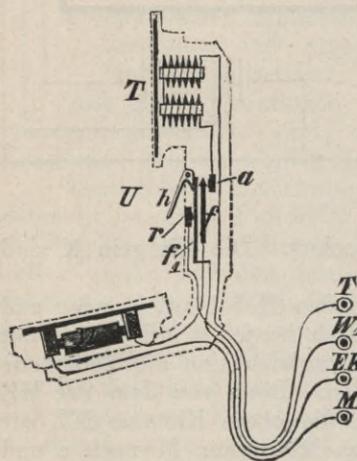
Fig. 524.



Zum Zwecke des deutlicheren Hörens bringt man gewöhnlich auf jeder Station zwei Telephone an, die entweder hintereinander oder nebeneinander geschaltet sind.

Die drei Apparate, Telephon, Mikrophon und Klingel, sind gewöhnlich in einem Kästchen vereinigt, wie Fig. 523 eines von der Aktiengesellschaft Mix & Genest zeigt. Zunächst braucht man für jeden der drei Apparate zwei Leitungen, im ganzen also sechs. Da aber die Leitung, die die Telephone verbindet, zugleich die Klingeln verbindet, und da die Rückleitung durch die Erde geschieht, so fallen zwei Leitungen fort und jedes solche Kästchen erhält nur vier Anschlußklemmen, die mit *WZ* (Weckerzink), *MZ* (Mikrophonzink), *EK* (Erdkohle) und *L* (Leitung) bezeichnet sind. Die Batterie für die Klingel braucht mehr Elemente als die für das Mikrophon, man nimmt daher für das letztere einige Elemente der ganzen Batterie, deren einer Pol (Kohle) zur Erde abgeleitet ist, wie es in Fig. 522 gezeichnet ist.

Fig. 525.



Um die Benutzung des Telephons mit Mikrophon bequem zu machen, ist man dazu übergegangen, Apparate zu konstruieren, bei welchen man das Telephon und Mikrophon zusammen

bewegen kann und welche man auf Schreibtischen, Nachttischen u. s. w. benutzen kann. Ein solches Mikrotelephon zeigt Fig. 524, und aus Fig. 525 ist die Schaltung zu erkennen. Dasselbe ist so eingerichtet, daß man zu gleicher Zeit das Telephon vor das Ohr und das Mikrophon vor den Mund halten kann. Dieselben werden als Tischtelephone, wie

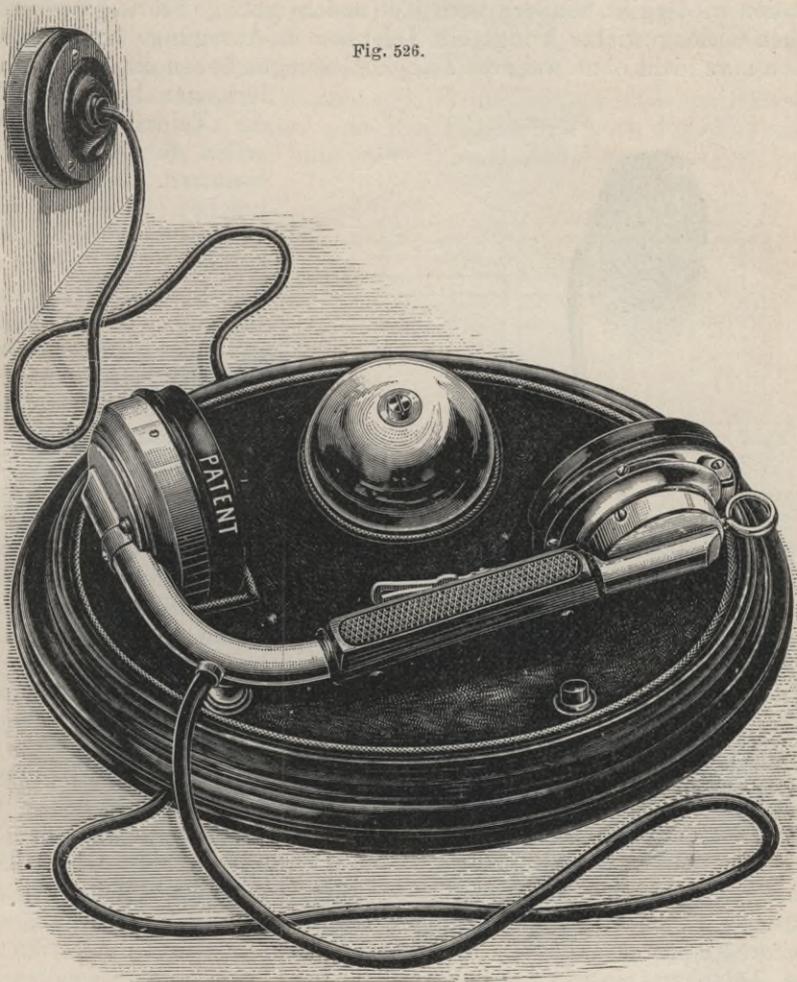


Fig. 526.

Fig. 526 zeigt, auf einen Untersatz gelegt, der noch eine Klingel und den zugehörigen Druckknopf enthält. Die vier Leitungsdrähte vom Mikrotelephon sind in einer Leitungsschnur vereinigt, die in den Untersatz führt, und die vier Leitungsdrähte von diesem sind wieder durch eine Schnur zu einer Rosette an der Wand geführt, an welcher die nötigen Verbindungen mit der Batterie, der Erde und der Fernleitung ausgeführt werden.

Das Telephon ist ein außerordentlich empfindliches Instrument. Sein Fehler ist nicht, daß es zu wenig von kleinen Wirkungen beeinflusst wird, sondern vielmehr, daß es auf sie zu viel reagiert. Nicht bloß die überaus kleinen Schwingungen, welche durch das Sprechen in der Membran erzeugt werden und welche so überaus schwache elektrische Ströme hervorbringen, erregen das Telephon, so daß es sie an der anderen Station wiedergibt, sondern auch jede andere geringe Störung des elektrischen Gleichgewichts bringt ein Telephon in Anregung. Infolgedessen kann man nicht ohne weiteres Telephonleitungen neben die Telegraphen-

Fig. 527.



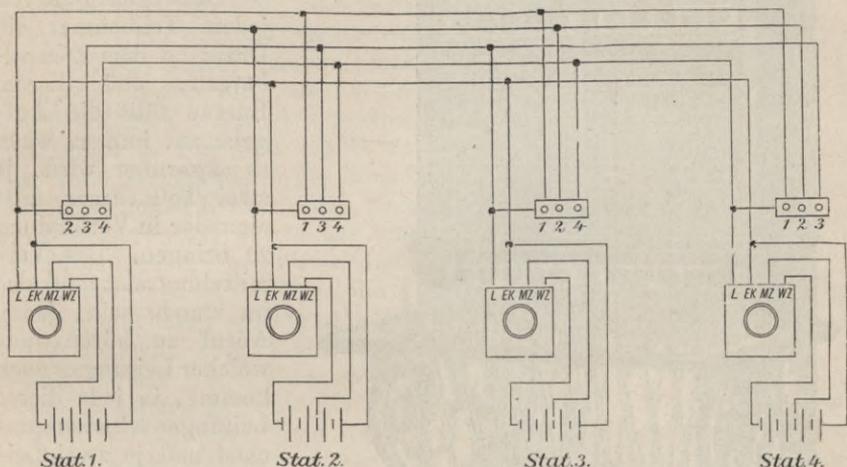
leitungen legen oder gar die Telegraphenleitungen selbst für das Telephon benutzen. Denn jede Depesche, die durch einen Telegraphendraht gesendet wird, und welche ja in aufeinanderfolgenden Öffnungen und Schließungen eines Stromes besteht, jede Depesche induziert in dem danebenliegenden Telephondraht eine Reihe von Strömen, und das Telephon kommt zum Tönen. Man kann, wenn man ein Telephon ans Ohr hält, dessen Leitung neben einer Telegraphenleitung liegt, genau hören, wie nebenbei telegraphiert wird, und wer die Bedeutung der einzelnen telegraphischen Stromöffnungen und -schließungen kennt, kann infolgedessen hören und verstehen, was daneben telegraphiert wird. Tele-

phonleitungen neben oder auf verkehrsreichen Telegraphenleitungen sind also viel zu bedeutenden Störungen ausgesetzt, als daß man sie ohne weiteres benutzen könnte. Deshalb fing man zuerst in Amerika an, das Telephon nicht als Konkurrenten des Telegraphen, sondern als Ergänzung desselben zu benutzen. Man wendete das Telephon an für den inneren persönlichen Verkehr in den einzelnen Städten selbst, und diese Anwendung hat sich von dem allergrößten Nutzen gezeigt. Nach amerikanischem Muster wurde bald auch in Deutschland das Telephon hauptsächlich in den großen Städten für den inneren Verkehr eingerichtet. Außerdem wurde es für die Vermittelung von Nachrichten nach kleinen Nebenstationen, die keine telegraphische Einrichtung haben, von der Reichspostverwaltung eingeführt. Erst all-

mählich gelang es, den Telephonverkehr auch auf weite Entfernungen zwischen verschiedenen Städten auszudehnen, und so beginnt allmählich das Ideal sich zu verwirklichen, das sich sanguinische Köpfe bei der Erfindung desselben ausmalten, daß man vermittels des Telephons mit beliebig weit entfernten Personen sich von Mund zu Mund unterhalten könne. Bevor dieses System des interurbanen Verkehrs erklärt werden soll, sollen zuerst die Einrichtungen besprochen werden, welche dem Telephonbetrieb für den Verkehr in einzelnen Gebäuden und für den inneren Stadtverkehr dienen.

Wenn eine Anzahl Telephone, z. B. in den verschiedenen Bureaus eines Amtes, aufgestellt sind und die Teilnehmer nach Belieben miteinander verkehren sollen, ohne Hilfe eines Umschaltebeamten, so muß

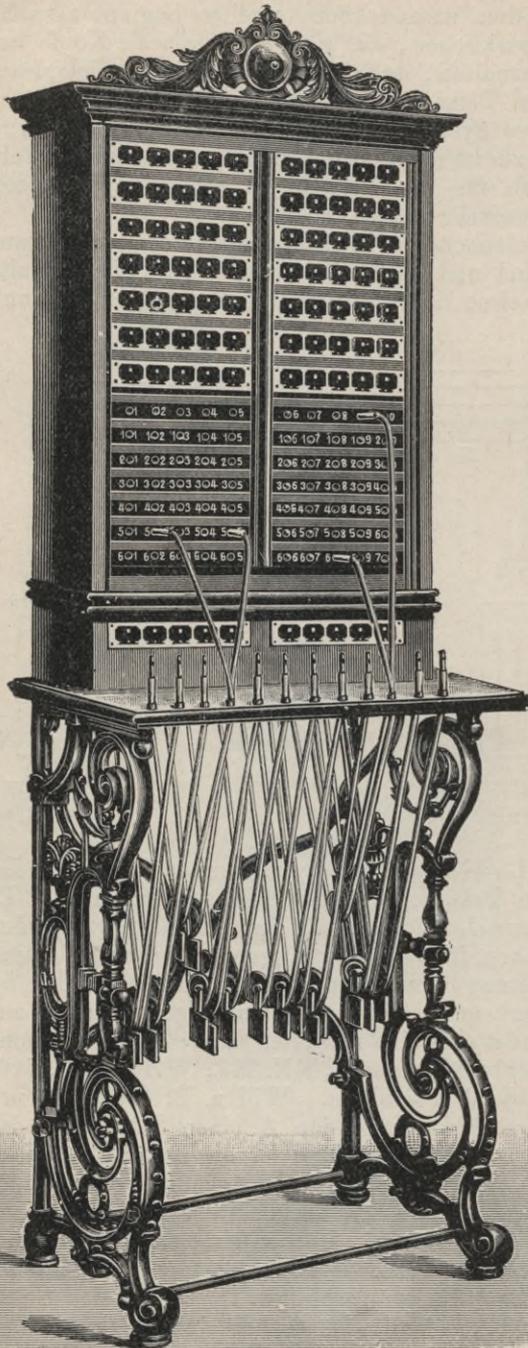
Fig. 528.



mit den Telephonen ein Linienwähler verbunden sein, wie ihn Fig. 527 zeigt. Bei jedem Telephon ist ein solcher vorhanden. Er enthält so viel Kontakte und Leitungen, als Sprechstellen vorhanden sind, mit denen das Telephon in Verbindung gebracht werden kann. Die Einrichtung und Schaltung von Telephonen mit Linienwähler ist deutlich aus Fig. 528 zu erkennen. In dieser sind vier Stationen angenommen. In jeder befindet sich eine Batterie, ferner ein Mikrophon-Telephonapparat mit 4 Anschlußklemmen L, EK, MZ, WZ (s. o. S. 616) und ein Linienwähler mit je 3 Kontakten. Will z. B. Station 3 mit Station 1 sprechen, so braucht nur Station 3 einen Stöpsel in das Loch 1 seines Linienwählers zu stecken, dann ist die Leitung zwischen 1 und 3 hergestellt. Zur Verbindung der 4 Stationen sind hier 5 Drähte angewendet. Man könnte mit 4 Drähten auskommen, wenn man jede Station mit der Erde verbinden würde. Ebenso sind für 10 Stationen 10 resp. 11, für 30 Stationen 30 resp. 31 Drähte erforderlich, um sie so durch Linienwähler miteinander zu verbinden.

Für den inneren Stadtverkehr ist es bei einer einigermaßen großen Zahl von Teilnehmern notwendig, ein Zentralbureau ein-

Fig. 529.



zurichten, durch welches der gesamte Verkehr vermittelt wird. Denn sonst müßte jeder Teilnehmer mit jedem anderen eine besondere

Verbindungsleitung haben, was, abgesehen von den Kosten, eine

Unmöglichkeit wäre wegen der vielen Drähte, die über und in die Häuser führen müßten.

Deswegen geht von jedem Teilnehmer ein Draht zu dem Zentralbureau, und diesem Bureau fällt die Aufgabe zu, immer, wenn es angerufen wird, je zwei Teilnehmer miteinander in Verbindung zu bringen. Das Vermittlungsamt muß also im stande sein, jeden Anruf zu hören, aus welcher Leitung er auch komme, in jede dieser Leitungselbstzusprechen und je zwei Leitungen miteinander zu verbinden.

Es lassen sich natürlich auf verschiedene Weise Einrichtungen angeben, welche diese Verbindungen in bequemer Weise zu machen gestatten. Ein sehr verbreitetes System für solche Zentralstationen ist das Klappensystem, welches wir mittels Fig. 529 und 530 beschreiben wollen.

In der Zentralstation ist nämlich eine Reihe Schränke von der Form der Fig. 529 aufgestellt.

Jeder dieser Schränke enthält die Apparate für 50 bis 150, in der Figur für 70 Teilnehmer am Telephonverkehr, und zwar befindet sich für jeden Teilnehmer in diesem Schrank ein Elektromagnet, der direkt mit der Linienleitung von dem betreffenden Abonnenten verbunden ist.

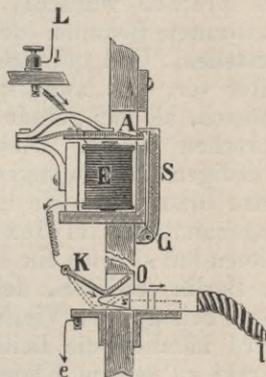
In Fig. 530 ist ein solcher Elektromagnet E gezeichnet, zu dem die Linienleitung L führt, und der andererseits durch den Winkelhebel K in der punktiert gezeichneten Lage mit der Erde e in Verbindung ist. Sobald der Abonnent seinen Taster drückt, also seine Klingelbatterie einschaltet, geht der Strom von L durch E hindurch zur Erde, der Anker A wird angezogen und läßt dabei eine Klappe S fallen, welche sich um G dreht. Hinter der Klappe ist die Nummer des Abonnenten angebracht, so daß man im Zentralbureau sofort weiß, welcher Abonnent sprechen will. Man sieht die Klappen in Fig. 529 im oberen Teil des Schrankes. Zu jeder Klappe gehört nun im unteren Teil des Klappenschrankes ein Loch, welche in Fig. 529 mit den Ziffern 1 bis 70 bezeichnet sind, während eines in Fig. 530 bei O dargestellt ist. Nun kann der Beamte in das Loch O, in welches der Winkelhebel K hineinragt, eine metallische Spitze s einführen, welche das eine Ende einer aus Metalldrähten gebildeten Leitungsschnur l ist. Dadurch hebt er K in die Höhe, unterbricht damit die Verbindung mit der Erde und stellt vielmehr eine Verbindung der Linienleitung L mit der Leitungsschnur her.

Mit dieser Leitungsschnur ist nun der Telephonapparat des Beamten verbunden, so daß dieser jetzt mit dem Anrufenden direkt verkehren und erfahren kann, mit wem dieser sprechen will. Hat er so die Nummer des Anzurufenden gehört, so klingelt er diesen an und nimmt dann eine von den an der Tischplatte des Apparates hängenden Leitungsschnüren, deren jedes Ende eine solche metallische Spitze hat, und steckt diese Spitzen in dasjenige Loch, das der anrufenden, und in dasjenige, das der angerufenen Nummer zugehört. Dadurch sind die beiden Abonnenten verbunden und können sich nun unterhalten.

Der Klappenschrank enthält daher in seinem oberen Teil 70 Elektromagnete mit den Klappen. Darunter sind 70 Löcher angebracht, für jeden Elektromagneten eins. Die Stöpsel hängen, durch Gewichte mit Rollen gespannt, an der Tischplatte des Schrankes. Die weiteren 10 Klappen unterhalb der Löcher dienen einem besonderen Zweck, den hier auseinanderzusetzen zu lang wäre. Jeder Klappenschrank kann mit dem nächsten durch Drähte verbunden werden, so daß die Verbindung zwischen beliebigen Teilnehmern hergestellt werden kann.

In dieser und ähnlicher Weise werden Vermittlungsstationen eingerichtet. Durch diese zweckmäßige und einfache Einrichtung hat sich das Telephon seit der kurzen Zeit seiner Einführung (seit Ende 1877) in Deutschland einen außerordentlich ausgedehnten und stetig wachsenden Anwendungskreis erobert und ist zu einem fast unentbehrlichen

Fig. 530.

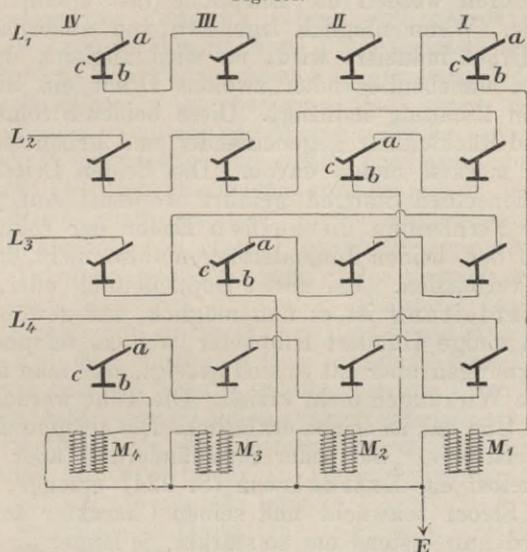


Verkehrsmittel geworden. Man hat schon mehrfach versucht, die menschliche Tätigkeit in einem Vermittlungsamt entbehrlich zu machen, indem man automatische, durch Elektrizität vermittelte, Verbindungen je zweier beliebiger Abonnenten herstellen wollte. Indes ist dieses schwierige Problem für eine größere Anzahl von Teilnehmern bisher noch nicht befriedigend gelöst.

Dieses einfache Klappenschranksystem wird aber sofort umständlich, sowie an das Zentralbureau sehr viele Teilnehmer angeschlossen sind. Sind z. B. 2000 Teilnehmer vorhanden, so braucht man 40 solche Schränke, zwischen denen eine Anzahl Leitungen zur Verbindung angebracht sein müssen. Wenn nun ein an den ersten Schrank angeschlossener Teilnehmer mit einem etwa an den 30ten angeschlossenen zu sprechen wünscht, so muß der Beamte des ersten Schranks dem entfernten Beamten den Auftrag geben, die dortige Verbindung herzustellen. Und offenbar kommt es bei großer Zahl der Teilnehmer viel öfter vor, daß zwei verschiedene Klappenschränke verbunden werden müssen, als daß gerade zwei Teilnehmer desselben Schranks miteinander sprechen wollen. Diesen Übelstand, daß nicht ein Beamter die notwendigen Verbindungen allein ausführen kann, sondern einen zweiten dazu braucht, suchte man zu vermeiden, und es gelingt das durch das sogenannte Multiplexsystem oder den Vielfachumschalter. Von diesen hat sich als ein sehr zweckmäßiger bisher der von Mix & Genest in Berlin erwiesen, der in Deutschland jetzt vielfach eingeführt wird. Das Prinzip der Vielfachumschalter ist eigentlich ganz einfach. Es wird nämlich die Leitung, die von einem Teilnehmer kommt, nicht direkt zu seinem Klappenschrank geführt, sondern sie wird zunächst bei allen anderen Klappenschränken vorbei oder eigentlich durch sie hindurchgeführt und gelangt erst zuletzt zu seinem eigenen Klappenschrank, wo sie in gewöhnlicher Weise mit dem Elektromagnet und der Klinke verbunden ist, wie vorher beschrieben. Dadurch nun, daß jede Leitung bei allen Klappenschränken vorbeigeführt wird, kann man nun leicht die Einrichtung so treffen, daß sie an jedem einzelnen Klappenschrank einen beweglichen Teil, eben wieder eine solche Klinke (aber keinen Elektromagnet) erhält, in die man einen Leitungsstößel einstecken kann. Jeder Beamte hat nun an seinem Klappenschrank 200 Elektromagnete mit ihren Klinken, die er zu bedienen hat, außerdem aber befinden sich an seinem Schrank (bei 2000 Teilnehmern) noch 1800 Löcher, die eben die Klinken (aber nicht Elektromagnete) für alle anderen Teilnehmer enthalten. Ein Amt für 2000 Abonnenten besteht daher aus 10 Schränken, von denen jeder 200 Elektromagnete (mit ihren Klappen) und $200 + 1800$ Löcher mit ihren Klinken besitzt. Die Leitungsführung ist schematisch in Fig. 531 gezeichnet. Die mit I, II, III, IV überschriebenen vertikalen Kolonnen stellen 4 Klappenschränke dar. Es bedeutet L_1 eine Leitung, die an den ersten Klappenschrank angeschlossen ist (also an eine Nummer zwischen 1 und 200). Diese Leitung führt aber, wie man sieht, erst zu der Klinke a b im Schranke IV, dann von dort aus zur Klinke in Schrank III, von dort zur Klinke in Schrank II, dann erst zur eigentlichen Klinke in Schrank I und von dort in ihren Elektromagneten M_1 und zur Erde E. Ebenso

führt die Leitung L_2 eines Abonnenten mit einer Nummer zwischen 201 und 400 erst zu einer Klinke in Schrank IV, dann zum Schrank III, dann zu I und dann endlich zu ihrer eigentlichen Klinke in Schrank II, von dort zum Elektromagneten M_2 und zur Erde. Und so fort. Nun sieht man, daß jeder Beamte an seinem Schrank alle beliebigen Verbindungen vornehmen kann. Wird z. B. der Beamte am Schrank IV gerufen (also von einem Abonnenten mit einer Nummer zwischen 601 und 800), so fällt die Klappe am Elektromagneten M_4 . Der Abonnent will mit einem bestimmten Teilnehmer sprechen, der an Schrank I angeschlossen sei (1—200, z. B. mit demjenigen, dessen Leitung L_1 grade gezeichnet ist. Nun steckt der Beamte die Stöpsel an seinem eigenen Schrank in die beiden Löcher mit der betreffenden Nummer

Fig. 531.



und die Verbindung ist fertig. Denn es geht der Strom von der Leitung L_4 zur Klinke b in der untersten Reihe des Schrankes IV, die durch den Stöpsel unterbrochen ist, durch den Stöpsel zur Klinke b in der obersten Reihe desselben Schrankes IV, die ebenfalls unterbrochen ist, und durch die Leitung L_1 zum gewünschten Abonnenten. So weit ist die Anordnung zwar umständlich (weil in unserem Beispiel von 2000 Abonnenten an jedem Schrank 2000 Klinken, im Ganzen also 10×2000 Klinken, bei 6000 Abonnenten sogar 30×6000 angebracht werden müssen), aber einfach zu verstehen. Es muß aber noch Vorsorge getroffen werden, daß ein Beamter sofort merkt, ob ein Abonnent, dessen Klappe er nicht an seinem Schrank hat, etwa schon spricht. Dies wird bei dem Vielfachumschalter von Mix & Genest dadurch erkannt, daß in diesem Fall, wenn also dessen Klappe gefallen ist, ein Strom durch die Leitung geschickt wird, der sich durch den Ausschlag eines Galvanometers anzeigt. Wir können aber auf diese Einzelheiten nicht eingehen.

Während so der telephonische Verkehr innerhalb der Städte sich sehr intensiv entwickelte, entstand naturgemäß bald das Verlangen, auch getrennte Städte miteinander so zu verbinden, daß jeder Telephoninhaber der einen Stadt mit jedem der anderen Stadt beliebig sprechen könnte, also einen interurbanen Telephonverkehr einzurichten. Diese Verbindung fand aber zuerst große Schwierigkeiten. Wenn die Leitung zwischen beiden Städten in der Nähe der Telegraphenleitungen geführt werden sollte, so wirkte die Induktion der Telegraphierströme auf das Telephon und machte jedes Verstehen unmöglich. Diesen Übelstand aber vermeidet man einfach und sicher dadurch — und die telephonischen Städteverbindungen werden jetzt allgemein so eingerichtet —, daß man die beiden Städte nicht durch einen einzigen Draht, sondern durch eine sogenannte Schleife, eine hin- und zurückführende Leitung verbindet. Dadurch werden die Telephone fast unempfindlich gegen äußere Einflüsse. Wenn nämlich irgendwo von außerhalb ein Strom in dem einen Draht induziert wird, so wird zugleich durch dieselbe Ursache in dem danebenliegenden zweiten Draht ein Strom in derselben absoluten Richtung induziert. Diese beiden Ströme fließen also in der Hin- und Rückleitung gegeneinander und heben sich daher auf. Die Telephone merken nichts davon. Die beiden Leitungen müssen natürlich auf denselben Stangen geführt werden. Auf jeder Station werden bei der Fernleitung die beiden Enden der sekundären Telephonspulen mit den beiden Linienleitungen (also nicht das eine Ende mit der Erde) verbunden. Bei dieser Doppelleitung oder, wie man es nennt, Schleifenleitung ist es nun möglich, auf gewöhnlichen Telegraphendrähten einige Hundert Kilometer weit zu telephonieren. Bei größeren Entfernungen aber hat es sich gezeigt, daß man mit Leitungen aus Eisen keine Wirkungen mehr erzielt. Die Töne werden geschwächt und verwischt. Und das ist leicht erklärlich. Die telephonischen Ströme sind ja Wechselströme. Bei jeder Stromänderung aber wird in der Leitungsbahn selbst ein Extrastrom (S. 224) erzeugt, welcher den ursprünglichen Strom schwächt und seinen Charakter ändert. Dieser Extrastrom wird nun erstens um so stärker, je länger die Stromleitung ist, und ist außerdem bei Eisendrähten ungefähr 300mal so stark als bei Kupferdrähten. Darauf beruht die Hauptschwächung des Stromes bei langen Telephonleitungen. Es ergibt sich aber daraus, daß man mit einer Leitung aus Kupfer oder Bronze viel weiter telephonieren können muß, als mit einer Eisenleitung. Und diese Folgerung hat sich in der Tat bestätigt gezeigt. Durch die Anwendung von Schleifenleitungen aus Kupfer oder Bronze ist es tatsächlich gelungen, schon auf sehr weite Entfernungen zu telephonieren. In Amerika ist die Verbindung von New York nach Chicago auf mehr als 1500 km ausgeführt. In Deutschland kann man von Breslau nach Hamburg, oder von München nach Berlin auf 650 km, in Österreich von Prag nach Budapest auf mehr als 600 km sprechen, und es besteht jetzt sogar eine telephonische Verbindung von London über Paris nach Marseille, welche bisher die längste Fernsprechverbindung in Europa ist.

Und dieses System der telephonischen Fernverbindungen breitet sich stets weiter aus. Große Industriebezirke, bedeutende Handelsstädte

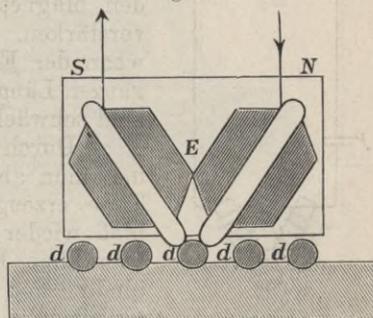
werden miteinander telephonisch verbunden, und es dürfte nicht zu viel behauptet sein, daß in absehbarer Zeit jeder Mensch aus irgend einer Groß- oder Mittelstadt Europas mit jedem anderen in derselben Lage sich telephonisch wird unterhalten können. In der letzten Zeit wird sogar ein Leitungssystem, das von einem Amerikaner Pupin ausgearbeitet ist, mit großem Erfolge der praktischen Erprobung unterworfen, welches die Länge der Leitung, auf welche man sicher telephonieren kann, bedeutend vergrößert, so daß man jetzt auch hoffen kann, einmal Telephonverbindungen über den Ozean erhalten zu können.

Die letzten Jahre haben aber zwei interessante Entdeckungen gebracht, welche dem Telephon noch einen weiteren Anwendungskreis in Aussicht stellen, nämlich das Telegraphon von Poulsen und die singende oder sprechende Bogenlampe von Simon.

Das Telegraphon des dänischen Ingenieurs Poulsen, welches auf der Ausstellung in Paris im Jahre 1900 berechtigtes Aufsehen machte, ist eine geniale Verbindung des Telephons mit dem Phonographen, zwar nicht des Phonographen in der bekannten Edisonschen Form mit Wachswalzen, wohl aber einer ganz neuen Art von Phonographen. Es erlaubt nämlich, die Worte, welche man in ein Mikrophon hineinspricht, selbsttätig auf einem phonographenähnlichen Apparat zu fixieren, also gewissermaßen aufzuschreiben, wenn auch nicht in leserlicher Schrift, und gestattet, die so aufgezeichneten Töne beliebig oft, Zehntausende von Malen, wieder zu reproduzieren, so daß sie durch ein Telephon gehört werden. Der phonographische Teil ist das Besondere und Neue des Apparates. Während bei dem gewöhnlichen Phonographen auf einem Wachszyylinder durch die Membran, in die man hineinspricht, einfach mittels einer an derselben befestigten Spitze Eindrücke gemacht werden, werden hier die Eindrücke unsichtbar auf einem Stahldraht erzeugt, indem dessen magnetische Eigenschaften dazu benutzt werden. Zu dem Zweck ist ein Stahldraht von 1 mm Dicke auf einem Messingzylinder in vielen Windungen aufgewickelt und ein kleiner Magnet umfaßt mit seinen beiden Polen diesen Draht, indem er bei der Drehung des Zylinders allmählich den ganzen Draht entlang gleitet. In Fig. 532 ist stark vergrößert der Durchschnitt durch eine Reihe dieser Drahtwindungen d, d, d, \dots zu sehen und zugleich der Elektromagnet E , der einen Strom durch die Leitungen S und N bekommt und dessen Pole den Draht berühren.

Der Elektromagnet wird von einem Element erregt, so daß der Draht auf der einen Seite seines Querschnitts nordmagnetisch wird, und wenn der Magnet längs des Drahtes sich vorbeischiebt, so wird der Draht auf seiner ganzen Länge in der Weise quermagnetisiert, d. h. die eine Seite des Drahtes wird nordmagnetisch, die andere süd magnetisch. Wir

Fig. 532.



können den Zustand des Drahtes dabei, wie in Fig. 533, durch eine Reihe von Pfeilen darstellen, die an jeder Stelle von der nordmagnetischen Seite des Drahtes D zur süd magnetischen gehen. Der Elektromagnet NS ist dabei von oben gesehen abgebildet. Dieser Magnetismus bleibt an den einzelnen Stellen des Drahtes wegen der Koerzitivkraft dauernd bestehen.

Fig. 533.

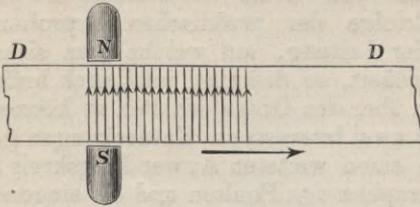
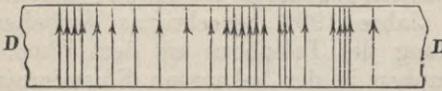


Fig. 534.

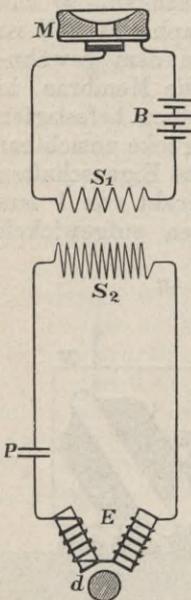


Wenn man aber nun den Elektromagneten, während er so an dem Draht vorbeigleitet, abwechselnd verstärkt und schwächt, so werden die einzelnen Teile des Drahtes verschieden stark magnetisiert sein, und wir können das in Fig. 534 dadurch darstellen, daß wir die Pfeile bald näher aneinander, bald weiter

voneinander einzeichnen. Auch diese Verteilung des Magnetismus bleibt auf dem Draht bestehen, wenn der Magnet auch weiterrückt.

Nun kann man aber solche Verstärkungen und Schwächungen des Elektromagneten dadurch leicht erzeugen, daß man in seinen Stromkreis außer dem Strom von dem Element noch Mikrophonströme hineinleitet, und zwar so, wie es in Fig. 535 gezeichnet ist. In dieser ist M ein Mikrophon und die von einer Batterie B erzeugten Ströme, die beim Hineinsprechen in das Mikrophon in ihrer Stärke verändert werden, gehen wie gewöhnlich durch die primäre Spule S_1 eines kleinen Induktionsapparates. In der sekundären Spule S_2 desselben entstehen Ströme von veränderlicher Stärke und Richtung, welche sich über die vom Element P erzeugten Ströme überlagern und den Magneten E des Telephons schwächen oder verstärken. Dadurch wird also der Stahldraht d, wenn der Elektromagnet bei ihm vorbeigeht, seiner ganzen Länge nach in bestimmter Weise bald stärker, bald schwächer magnetisch.

Fig. 535.



Durch diese wechselnde Magnetisierung kann man nun aber umgekehrt in einem Telephon wieder Töne erzeugen. Zu dem Zwecke braucht man nun bloß wieder, wie Fig. 536 zeigt, den Magneten E, aber ohne Element P, mit einem Telephon zu verbinden und ihn an dem magnetisierten Stahldraht vorbeizuziehen. Dann werden durch dessen Magnetismus in den Umwindungen des Magneten wechselnde Ströme induziert und diese erzeugen in dem Telephon T jetzt dieselben Töne, welche man vorher in das Mikrophon hineingesprochen oder gesungen hat.

Auf diese höchst interessante Weise kann man also die Töne be-

lieblich lange auf dem Stahldraht aufheben und zu beliebiger Zeit wieder hervorbringen und zwar beliebig oft. Und dabei hat sich gezeigt, daß die Reproduktion der Töne durch einen solchen Apparat außerordentlich rein, frei von all den störenden Nebengeräuschen ist, die man beim gewöhnlichen Telephon und beim gewöhnlichen Phonographen so unangenehm empfindet.

Die äußere Ansicht des ganzen Apparates zeigt Fig. 537. Man sieht die Trommel PP, auf welche der Stahldraht aufgewunden ist. Durch einen kleinen Elektromotor wird diese in Bewegung gesetzt. Der Elektromagnet E, der verschiebbar auf einer Stange sitzt, gleitet dabei, von den Drähten geführt, auf diesen von rechts nach links. Sowie er an dem linken Ende A ankommt, wird durch einen kleinen, einfachen Mechanismus bewirkt, daß er sofort wieder, ohne den Draht zu berühren, nach rechts an den Anfang hingeleitet, so daß man nun beim Weiterdrehen der Trommel durch das Telephon, das links zu sehen ist, die aufgezeichneten Töne abhören kann.

Wenn ein solcher Draht mit der Schrift versehen ist, so kann man dieselbe auch wieder auslöschen, zwar nicht durch Radiergummi, aber fast noch einfacher, nämlich wieder durch einen elektrischen Strom. Man schaltet zu dem Zweck bloß, wie Fig. 538 zeigt, eine stärkere Batterie G in den Kreis des

Fig. 536.

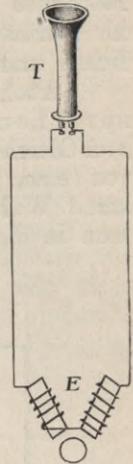
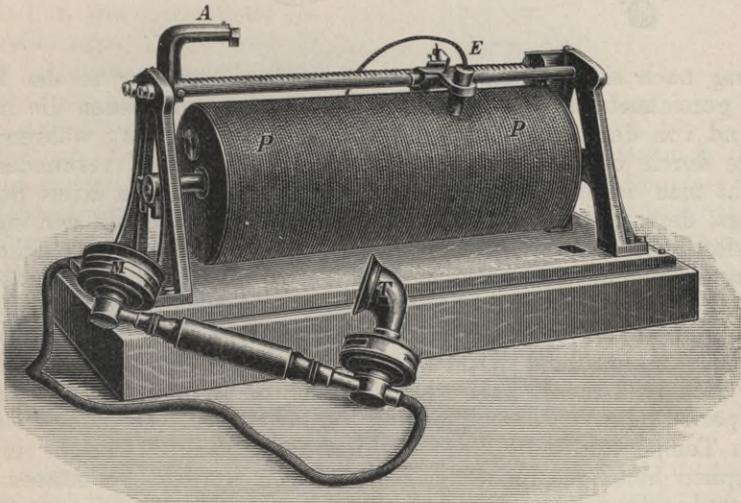


Fig. 537.



Elektromagneten ein und zwar umgekehrt, wie früher das Element P (Fig. 535) eingeschaltet war, und bewegt nun den Elektromagneten wieder den Draht entlang. Dadurch wird der ganze frühere Magnetismus

vollständig beseitigt und der Stahldraht ist wieder magnetisch rein und zur Aufnahme neuer Worte befähigt.

Die Durcharbeitung dieses interessanten Apparates für praktische Zwecke ist noch nicht abgeschlossen; aber die vortreffliche und überraschende Tonwiedergabe, die er zeigt, läßt erwarten, daß er nicht bloß als Kuriosum, sondern als brauchbares Instrument für den geschäftlichen und Zeitungsverkehr eine bedeutende Zukunft vor sich hat.

Auch die zweite telephonische Erfindung der letzten Jahre, die sprechende Bogenlampe, beruht auf der Übereinanderlagerung von Gleichströmen und wechselnden Strömen. Wenn man, in Fig. 539, von einer Akkumulatorenbatterie A aus durch einen Vorschaltwiderstand W hindurch den Strom zu einer Bogenlampe sendet, so erhält man in dieser den gewöhnlichen Lichtbogen. Man kann aber in diese

Fig. 538.

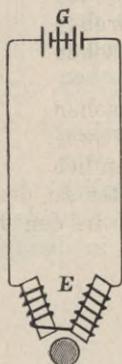
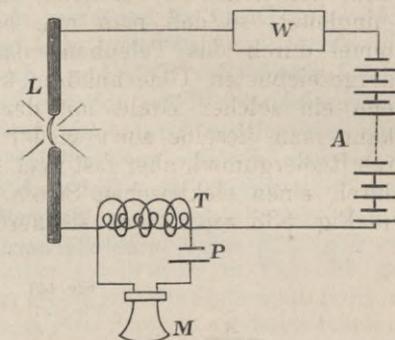


Fig. 539.

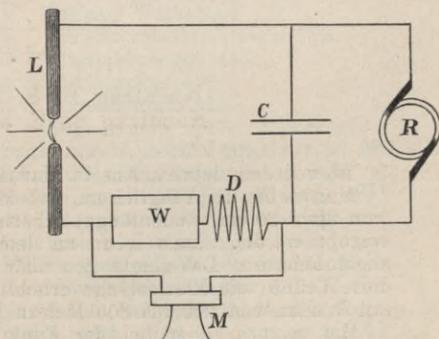


Leitung noch einen Transformator einschalten, wie er in der Figur bei T gezeichnet ist, zwei getrennte Drahtspulen, von denen die innere dauernd von dem Akkumulatorenstrom durchflossen ist, während die äußere durch ein Element P mit einem Mikrophon M verbunden ist. Spricht man in das Mikrophon, so werden in diesem Kreis Ströme erzeugt, deren Intensität schwankt, und diese erregen in der inneren Transformatorspule Induktionsströme, welche sich also dem Gleichstrom überlagern und dessen Intensität abwechselnd verstärken und schwächen. Dadurch wird aber auch die Joulesche Wärme, die in dem Lichtbogen auftritt, abwechselnd stärker und weniger stark, der Lichtbogen wird bald mehr, bald weniger heiß, die Luft, die denselben bildet, dehnt sich bald mehr, bald weniger aus und man erhält also in der Luft periodische Verdünnungen und Verdichtungen. Da diese in demselben Tempo stattfinden, wie die Luftschwingungen, welche in das Mikrophon hineingesprochen oder -gesungen wurden, so müssen also von dem Lichtbogen aus dieselben Töne herausgesprochen oder -gesungen werden. Denn periodische Verdünnungen und Verdichtungen der Luft zeigen sich unserem Ohr als Töne an. Man erhält daher das interessante Resultat, daß die Bogenlampe die Töne wiedergibt, die man in das Mikrophon hineingesprochen hat. Um dieses Experiment recht gut

auszuführen, muß erstens der Lichtbogen der Lampe sehr groß sein, statt der gewöhnlichen 2—3 mm vielmehr 5—10 cm, so daß man statt 40 Volt Spannung der Batterie am besten 100 Volt oder mehr zum Betreiben der Bogenlampe anwendet. Zweitens aber ist es auch notwendig, daß die Mikrophonströme selbst sehr stark seien. Man nimmt daher am besten Körnermikrophone, etwa das von Berliner. Den langen Lichtbogen erzeugt man dadurch, daß man die Kohlen mit leicht flüchtigen Salzen imprägniert.

Man kann die Apparate, die zu diesen Versuchen notwendig sind, in verschiedener Weise schalten. Am vorteilhaftesten macht man Gebrauch von den entgegengesetzten Eigenschaften der Drosselspulen und Kondensatoren. Die Drosselspulen (oben S. 252) lassen Wechselströme nur sehr geschwächt durch sich hindurch, während sie Gleichströme ohne Schwächung passieren lassen, weil ja ihr Widerstand sehr klein ist. Ein Kondensator dagegen läßt einen Gleichstrom nicht hindurch, Wechselströme aber passieren ihn, da sie ja von der einen Belegung des Kondensators auf die andere induzierend wirken. Man kann daher, wie in Fig. 540, von einer Dynamomaschine oder Akkumulatorenbatterie R aus den Lichtbogen speisen, das Mikrophon M aber, ohne besonderes Element, von dieser Leitung abzweigen, so daß man etwa 4 Volt an den Enden des Mikrophons hat, was man durch den eingeschalteten Widerstand W leicht erreichen kann. Man schaltet nun zum Mikrophon noch eine Drosselspule D und

Fig. 540.



parallel zur Lampe eine Leydener Flasche C ein. Dadurch haben sowohl der Gleichstrom wie die Wechselströme ihre bestimmten Wege. Der Gleichstrom geht von der Maschine aus direkt durch die Lampe und durch den Widerstand und die Drosselspule zur Maschine zurück. Die Wechselströme aber, die im Mikrophon erzeugt werden, können sich wegen der Drosselspule nicht durch den Mikrophonkreis selbst ausgleichen, sondern sie müssen durch die Lampe und die Leydener Flasche gehen. Durch die Dynamomaschine gehen sie auch nicht, weil diese hohe Selbstinduktion besitzt. Daher haben sie nur denjenigen Weg, auf welchem sie allein wirken sollen, nämlich durch den Lichtbogen, und werden nicht durch Selbstinduktion geschwächt.

Auf diese Weise kann man eine Bogenlampe so laut sprechen lassen, daß sie in einem großen Raume überall gehört wird, und zwar gibt sie das Sprechen, Pfeifen, Singen und die Töne verschiedener Musikinstrumente sehr gut wieder. Die Töne sind zwar sehr rein, weil es die Luft selber ist, die sie erzeugt, aber sie werden häufig durch das unbeabsichtigte Zischen des Lichtbogens gestört und verdeckt.

Möglicherweise kann die sprechende und singende Bogenlampe

noch manche Anwendung in der Zukunft finden, da sie eben die Töne recht laut wiedergibt. Bisher allerdings hat sie nur die Bedeutung eines interessanten wissenschaftlichen Experiments.

Wir sind am Schlusse unserer Betrachtungen angelangt. Wir haben gesehen, wie in den verschiedensten Gebieten die Elektrizität allmählich in den Dienst der Menschheit gezwungen worden ist. Sie beleuchtet unsere Städte und Wohnungen, sie treibt unsere Maschinen, sie schleppt unsere Bahnen, sie reinigt unsere Kleider, sie kocht unsere Speisen und heizt unsere Zimmer, sie übermittelt unsere Gedanken und Worte in die Ferne, sie erlaubt uns, in das Innere des Körpers zu schauen, im kleinen und im großen spüren wir überall die segensreichen Wirkungen dieser gewaltigen Naturkraft und wir dürfen zum Schluß sagen, da nur durch eifriges Studium der Natur alle diese Anwendungen möglich geworden sind, daß die vorurteilsfreie Erforschung der Natur uns Kräfte gibt und Einrichtungen zu schaffen gestattet, die früher nur für erstrebenswerte, aber unerreichbare Gebilde weit-schweifender Phantasie galten.

Nachtrag zu S. 596 und 597.

Seite 596 ist vor dem letzten Absatz einzuschieben:

Man nahm ursprünglich an, daß Marconi mit den äußerst raschen Wellen (von etwa 30 cm Wellenlänge) arbeite, wie sie in dem Righischen Oszillator erzeugt werden, auch wenn an demselben kein Sendedraht und Erddraht angebracht ist. Das zeigte sich aber nicht bestätigt. Vielmehr beeinflussen diese Drähte die Wellenlänge erheblich, und in der Tat arbeitete Marconi mit Wellen von 200 bis 300 Metern Länge.

Hat man es aber bei der Funkentelegraphie mit Wellen von solcher Länge zu tun, so kann man diese viel zweckmäßiger erzeugen als durch den Righischen Oszillator.

Seite 597 Zeile 7 von unten. Statt „als bei der Marconischen Anordnung“ ist zu setzen „als man früher bei der Marconischen Anordnung annahm“.

Register.

A.

Abdrücke, galvanoplastische 570.
Ableitung zur Erde 5. 25.
Abstoßung und Anziehung, elektrische 4.
Ader, Mikrophon 609.
A. E. G. 237. 299. 349. 359. 363. 374 f.
398. 413. 437. 450. 476. 496 f. 512 f.
523. 529.
Akkumulatorbahnen 401. 527 f.
Akkumulatoren 156. 382 ff. 528. 533.
Aktinium 305.
Aluminiumerzeugung 553 ff.
Aluminiumzellen 158. 418.
Ampère 201. 207.
— (Einheit) 62. 143. 179. 312.
Ampèremeter 358. 376.
Ampèresche Schwimmerregel 167. 178.
Ampèresches Gestell 182. 201.
Ampèrewindungen 171.
Amylacetatlampe 424.
Anion 134. 539.
Anker von Dynamomaschinen 321 ff.
Ankerwindungen 327.
Anode 133.
Ansammlungsapparate 26.
Anschlußdosen 452.
Antikathode 298.
Aperiodische Galvanometer 192.
Arago 226.
Arbeitsdynamometer 257.
Arbeitsleiter 518.
Arbeitsstrom 582.
Armatur 321.
Astasierungsmagnet 192.
Astatische Galvanometer 193.
Astatischer Stromkreis 202.
Astatisches Nadelpaar 39.
Asynchrone Motoren 478.
Außenpolmaschinen 346.
Ausschalter 454.

B.

Bad, elektrolytisches 541. 564.
Ballastwiderstände 92.
Ballistisches Galvanometer 199.

Batterie, galvanische 49.
— Leydener 28.
Becquerelstrahlen 305 ff.
Belegungen 28.
Bell, Graham 601.
Berlins Universaltransmitter 611.
Berührungselektrizität 46.
Beutelemente 56.
Biflare Wickelung 231.
Biot-Savartsches Gesetz 179.
Bleisicherungen 456.
Blitzableiter 499.
Bogenlampen 120.
Bogenlampe, sprechende 628 f.
Bogenlicht 118. 421 ff.
Branly 268. 594.
Braun, F. 596 f.
Braunschens Elektrometer 18.
Braunsteinelement 55.
Brechungsindex, optischer 43.
Bremerlampen 439.
Brennpunkt von Kathodenstrahlen 291.
298.
Büschellicht 34. 37.
Bunsensches Element 55.

C.

Casellischer Pantelegraph 588.
C. G. S.-System 309.
Clausius-Arrheniussche Theorie 136.
Compoundmaschinen 330. 356.
Coulomb (Einheit) 10. 312.
Coulombsches Gesetz 9.
Crookesche Röhren 290 f.

D.

Dampfdynamos 348. 350.
Dämpfung 192. 227.
Daniellsches Element 53.
Dauerbogenlampen 439.
Davy 118.
Dekadenwiderstände 91.
Deprez, Marcel 496. 505.

Deprez-Galvanometer 194.
 Deprez-Unterbrecher 236.
 Dichtigkeit der Elektrizität 21.
 Dielektrika 27.
 Dielektrizitätskonstante 28. 43 f. 200.
 Differentiallampen 430 f. 432.
 Disposition, magnetische, von Dynamomaschinen 340 f.
 Disruptive Entladung 37.
 Dissoziation 136.
 Doppelbrücke 100.
 Dosenrelais 581.
 Dosentelephon 605.
 Drehfeld, magnetisches 477.
 Drehspiegel 264.
 Drehströme 260. 362.
 Drehstrommaschinen 369 ff.
 Drehstrommotoren 476. 477. 483.
 Drehstromtransformatoren 413 f.
 Dreieckschaltung 260.
 Dreileitersystem 511.
 Drosselspule 231. 251. 252. 442. 629.
 Drosselzellen 158. 419.
 Druck, osmotischer 150.
 Dunkler Raum 290.
 Dynamomaschinen 328 ff.
 Dynamoprinzip 328.
 Dyne 310.

E.

Edelmann 101. 195.
 Edison 395. 445. 456.
 — -Akkumulator 395.
 — -Gewinde 448.
 Effekt 117. 339 f.
 — von Wechselströmen 254.
 — -kohlen 439.
 Eigenerregung 331.
 Einheiten 309 ff.
 Einphasenmotoren 481.
 Eisenbahnen, elektrische 517 ff.
 Eisenverlust in Transformatoren 408.
 Elektrischer Strom 57.
 Elektrisiermaschine 10.
 Elektrizitätsmenge 9.
 Elektrizitätszähler 508 ff.
 Elektrochemie 538 ff.
 Elektroden 98. 118. 133. 288.
 Elektrodynamik 201.
 Elektrodynamometer 206. 248 ff.
 Elektroinduktion 215.
 Elektrolyse 133 ff. 539. 563.
 Elektrolytischer Unterbrecher 238.
 Elektrolytkupfer 546.
 Elektromagnete 167 ff.
 Elektromagnetische Lichttheorie 277.
 Elektromagnetismus 159 ff.
 Elektrometer 39.
 Elektromobile 533.
 Elektromotoren 188. 472 ff.

Elektromotorische Kraft 48. 52. 63 f. 69. 101.
 Elektronen 294. 306.
 Elektroskope 6. 18.
 Elektrostatische Voltmeter 379.
 Elmoresches Verfahren 546.
 Empfängerdraht 596.
 Energie, elektrische 20.
 Entladung, oszillierende 263.
 Erdleitung 575.
 Erdmagnetismus 160. 182.
 Erhaltung der Energie 115 f. 336.
 Eßlingen, Maschinenfabrik 331.
 Exnersches Elektroskop 18.
 Extraströme 228. 262.

F.

Fahrschalter 523. 534.
 Farad 19. 314.
 Faraday 11. 12. 27. 43. 133. 136. 140. 163 f. 210 ff. 227. 321. 539.
 Faradaysche Gesetze 137 ff.
 Farbschreiber 582 f.
 Fassungen 447.
 Faure 386.
 Feddersen 264.
 Federgalvanometer 62.
 Federunterbrecher 235.
 Fein, C. u. E., Demonstrationsmaschinen 353.
 — — — Umformer 417.
 Feldintensität, magnetische 161. 312.
 Feldmagnete 321.
 Feld, magnetisches 161.
 Fernkräfte 42.
 Feuern von Dynamomaschinen 335.
 Fingerregel 185. 217.
 Fixpunktnebenschlusslampe 437.
 Fizeau 234.
 Flammenbogen 118. 421.
 Flaschenkreis 597.
 Flüssigkeitswiderstände 97.
 Fluoreszenzschirme 301.
 Fokusröhren 298.
 Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Bewegungen 267. 273.
 Foucaultscher Kommutator 82.
 Foucaultsche Ströme 227.
 Fremderregung 330. 354.
 Fünfleitersystem 512.
 Funke, elektrischer 37. 262. 286. 335.
 Funkeninduktoren 235 f.
 Funkenmikrometer 281. 286.
 Funkentelegraphie 595 f.

G.

Galvani 45.
 Galvanische Elemente 48.
 Galvanometer 188 ff. 190.
 Galvanoplastik 563 f.

Galvanoskope 58. 78 f. 178 ff.
 Galvanostegie 564.
 Ganz & Co. 363. 366. 409.
 Gauß 308. 573. 574.
 Gegenschaltung bei Drehstrommotoren 480.
 Geißleröhren 287. 289.
 Geschlossene Magnete 163.
 Gestell, Ampèresches 182. 201.
 Gleichgewicht der Elektrizität 11.
 Gleichströme 327 ff.
 Gleitbügel 521.
 Glockenmagnete 192.
 Glühlampen 115. 445 ff.
 Glühlicht, elektrisches 445 ff.
 Goldblattelektroskop 7.
 Grammäquivalent 140.
 Grammescher Ring 323 ff.
 Gravieren der Metalle 571.
 Gülchersche Thermosäule 131.
 Güteverhältnis, absolutes, von Dynamomaschinen 340. 356.

H.

Hartmann & Braun 62. 97. 129. 143.
 189. 191. 195. 206. 378.
 Hauptstromlampen 429. 432.
 Hauptstrommaschinen 329. 355.
 Hauptstrommotoren 473. 475. 522.
 Hebelausschalter 398.
 Hefner-Alteneck 332. 424. 427. 430.
 Hefnerkerze 424.
 Heizapparate 461 f.
 Heizkörper 465.
 Helios-Aktiengesellschaft 366. 409.
 Henry (Einheit) 230. 314.
 Hermitesches Bleichverfahren 557.
 Hertz, H. 266. 268. 274 f. 295. 594.
 Hittorf 290.
 Hitzdrahtmeßinstrumente 378.
 Hochplatten 571.
 Hochspannungsakkumulatoren 157.
 Hörnerblitzableiter 500.
 Holtz 31.
 Horizontalintensität 160. 162.
 Hughes 584. 606. 609.
 Hummel 377.
 Hysterisis 169. 365. 408.

I. J.

Impedanz 251.
 Indifferenzstellen 324. 327. 336.
 Induktion, magnetische 162.
 Induktionsapparate 232 ff.
 Induktionsfreie Widerstände 231.
 Induktionsmotoren 259. 478.
 Induktionsströme 210 ff.
 Induktive Widerstände 251.
 Induzierte Aktivität 306.

Influenz 22 ff.
 Influenzmaschinen 31 ff.
 Innenpolmaschinen 347.
 Innerer Widerstand 99.
 Interurbaner Telephonverkehr 619. 624 f.
 Ionen 134. 135. 136. 146. 544.
 Joulesches Gesetz 114.
 — Wärme 114. 445.
 Isolatoren 6. 87. 285.

K.

Kabel 507. 591.
 Kabeltelegraphie 591.
 Kadmiumelement 102.
 Kapazität 14. 19. 26. 41. 200. 263. 279.
 — von Akkumulatoren 386. 389.
 Karbide 556.
 Kathode 133.
 Kathodenstrahlen 290 ff.
 Kation 134. 539.
 Keiser & Schmidt 92. 193.
 Kelvin, Lord 39. 193. 287. 593.
 Kerntransformatoren 409.
 Kette, galvanische 49.
 Kilowatt 311.
 Klangfarbe 603.
 Klappenschränke 620 f.
 Kleinmotoren 475.
 Klemmenspannung 104. 338 f. 354 f.
 438. 454. 503.
 Klingeln, elektrische 187. 614.
 Kochapparate 461 f.
 Koeffizient der Selbstinduktion 229.
 Körnermikrophone 611.
 Koerzitivkraft 169.
 Kohärer 269 f. 594.
 Kohlrausch, F. 97. 143. 206.
 Kollektor 326.
 Kommutatoren 81.
 Kommutator von Dynamomaschinen 326.
 Kompensationsapparat 110 f.
 Kompensationsmethode 103.
 Kompensationsschaltung 108.
 Kondensatoren 26. 234. 263. 592.
 Kontaktelektrizität 50.
 Kontaktknöpfe 187.
 Kontroller 523. 534.
 Kopiertelegraphen 588.
 Korrespondenzschalter 456.
 Kraftlinien, magnetische 164. 171. 172.
 180. 218 ff.
 Kraftliniendichte 344.
 Kraftübertragung 489 ff.
 Kraftverteilung 487. 490.
 Krikische Stäbe 433.
 Kryptoskop 302.
 Kupfergewinnung 547.
 Kupferverlust in Transformatoren 408.
 Kupfervoltmeter 144.

Kuppelung, induktive, des Sendedrahtes 598.
 Kurbelrheostaten 92. 358.
 Kurzschluß 69. 99. 354. 388.

L.

Ladung 9.
 Lampen, elektrische 426 ff.
 Le Chatelier, Thermoelement von 129.
 Leclanché-Element 55.
 Leiter 6. 24. 51. 285.
 Leitungsblitzableiter 500.
 Leitungsfähigkeit, magnetische 172.
 — spezifische 83. 86.
 Leitungsverlust 493.
 Lenardsche Versuche 295.
 Lenz 122. 216.
 Lenzsches Gesetz 216. 336.
 Leuchtende Heizöfen 469.
 Leydener Flasche 28. 263.
 Lichtäther 43. 273.
 Lichtbogenheizung 470.
 Linienbatterie 579.
 Linienwähler 619.
 Linke-Hand-Regel 185.
 Lochanker 341.
 Löffeltelefon 604.
 Lösungsdruck 150.
 Lokomotiven, elektrische 529.
 Luftschiffahrt 536.

M.

Magnete 159 f.
 Magnetelektrische Maschinen 224. 321 f.
 Magnetisches Feld 161.
 Magnetisches Moment 161.
 Magnetisierungsspule 167.
 Magnetoinduktion 215. 320.
 Magnetomotorische Kraft 173.
 Manchestertypus 343. 352.
 Manteltransformatoren 409.
 Marconi 594. 595. 598. 600.
 Maschinensätze 416.
 Maxwell 43. 221.
 Maxwellsche Regel 221.
 Megohm 87.
 Mehrphasenströme 260. 476.
 Meidingersches Element 54.
 Metallinkrustationen 572.
 Metallisieren 570.
 Metallurgie, elektrische 538 f.
 Mikrofarad 19.
 Mikrohm 85.
 Mikrophon 88. 606 ff.
 Mikrotelefon 617.
 Milliampère 62.
 Mix & Genest 187. 604. 616. 622.
 Moissan 555.

Molekularströme 208.
 Moment, magnetisches 161. 311.
 Mordeymaschinen 373.
 Morseapparat 576 f.
 Morseschlüssel 575.
 Morseschrift 582.
 Motorunterbrecher 235.
 Multiplexsystem, telephonisches 622.
 Multiplikatoren 39. 79. 190.
 Multipolare Maschinen 343.

N.

Nadeltelegraphen 574.
 Nebenschluß 197.
 — magnetischer 196.
 Nebenschlußlampen 429. 432.
 Nebenschlußmaschinen 330. 354. 357.
 396. 454. 568.
 Nebenschlußmotoren 473 f.
 Nebenschlußregulator 357 f.
 Neefscher Hammer 186.
 Nernstlampe 458 f.
 Neutrale Zone 324. 327. 336.
 Nickeldarstellung 551.
 Normalelemente 101 f.
 Nutzenanker 341.
 Nutzeffekt von Akkumulatoren 389.

O.

Obertöne 603.
 Öffnungsfunken 232.
 Öffnungsströme 231.
 Öltransformatoren 414. 497.
 Oerlikon, Maschinenfabrik 363. 373. 476.
 481. 497.
 Oerstedt 178.
 Ohm (Einheit) 66. 313.
 Ohmsches Gesetz 64.
 — — für den Magnetismus 173.
 Ortsbatterie 579.
 Osmiumlampe 460.
 Osmotischer Druck 150.
 Oszillationen, elektrische 262 ff.
 Oszillator, Righischer 271. 595.
 Ozonbleichverfahren 560 f.
 Ozonröhren 558 f.

P.

Pacinotti 323.
 Pantelegraph, Casellischer 588.
 Parallelschaltung 504 ff. 515.
 Peltiersche Wärme 122.
 Periode elektrischer Schwingungen 264.
 — von Wechselströmen 252.
 Permanente Magnete 163.
 Permeabilität, magnetische 172.
 Pferdekraft 311.
 Phasen 246.

Phasenfaktor 256.
 Phasenunterschied 253.
 Phosphoreszenz 292.
 Photometer von Lummer und Brodhun 423.
 Pixii 321.
 Planté 384.
 Pohlscher Kommutator 81.
 Polarisation 153. 382. 541.
 Polarisierter Farbschreiber 583. 592.
 — Relais 580. 592.
 Pollak-Akkumulatoren 393.
 Polonium 305.
 Positives Licht 289.
 Potential 13.
 Poulsen 625.
 Präzisionsmeßinstrumente 197. 360.
 Profilinstrumente 379.
 Prometheus, Heizapparate 466. 469.
 Pupin 625.
 Pyrometer 129.

Q.

Quadrantelektrometer 39 f.
 Quecksilberbogenlampe 121.
 Quecksilberunterbrecher 235.

R.

Radiatoren 469.
 Radioaktive Substanzen 305.
 Radium 305.
 Rechte-Hand-Regel 217.
 Reduktionsfaktor 189. 196. 199.
 Reflektorlampen 452.
 Regulierung von Wechselstrommaschinen 376.
 Reibzeug 10.
 Reis, Philipp 601.
 Relais 578 f. 594.
 Resonanz 278 f. 598 f.
 Reversierwalze 525.
 Rieß, P. 15.
 Righischer Oszillator 271. 595.
 Ringmaschinen 344.
 Ringtelefon 605.
 Röntgenstrahlen 296 f.
 Rotationen, elektrodynamische 205.
 — elektromagnetische 183 ff.
 Rotierende Umformer 418.
 Ruhestrom 582.
 Ruhmkorff 235.

S.

Saugwirkung der Spitzen 30.
 Schaltbrett 398. 507.
 Schaltungslehre 590.
 Schaltung von Elementen 67 f.
 Scheidungskraft, elektrische 50.
 Schichtungen 288.
 Schlagweite 241. 287.

Schleifenleitung 624.
 Schleifenwicklung 364.
 Schleppschiffahrt 535.
 Schmelzöfen, elektrische 554 f.
 Schneiden der Kraftlinien 219.
 Schuckert, E. G. 350. 369. 411 f. 434. 443. 551.
 Schwimmerregel, Ampèresche 167. 178.
 Schwingungen, elektrische 262 ff.
 Secohm 314.
 Seebeck 124.
 Seillampe 435.
 Sekundäre Elemente 152 ff. 156. 382.
 — Prozesse 135. 563.
 Sekundärgeneratoren 407.
 Selbstausslösung 584.
 Selbsterregende Wechselstrommaschinen 365.
 Selbstinduktion 227 ff. 263. 279. 283.
 Selbstpotential 229.
 Selenzellen 88.
 Sendedraht 596.
 Serienmaschine 355.
 Serienschalter 455.
 Sicherheitsschalter 457.
 Siemensfassung 447.
 Siemensprozeß 552.
 Siemens & Halske 56. 57. 79. 108. 130. 196. 197. 248. 250. 257. 300. 344. 346. 347. 360. 368 ff. 399. 413. 430. 435. 450. 474. 517. 521. 547. 551. 552. 580. 583.
 Siemens, Werner 89. 192. 328. 593.
 Silbervoltmeter 144.
 Slaby 598 f.
 Solenoid 171.
 Spannung 13. 17. 25.
 Spannungsdynamometer 250.
 Spannungsmesser 17.
 Spannungsreihe, thermoelektrische 123. 124.
 Spannungsteiler 512.
 Spannungsunterschied 15. 16. 38. 70. 71. 104.
 Spannungsverlust 71. 117.
 Speiseleitung 520.
 Spezifischer Widerstand 83 f.
 Spiegelgalvanometer 191.
 Spitzen 21. 30.
 Spulengalvanometer 195.
 Stadtverkehr, telephonischer 619.
 Stäbchenmikrophone 609.
 Sternschaltung 260.
 Stiftscheibe beim Typendrucktelegraph 586.
 Stiftschreiber 582.
 Stöpselrheostaten 89 f.
 Strahlen, elektrische 275 f.
 Streuung, magnetische 164.
 Stromdichtigkeit 545.
 Stromkreis 61.

Stromstärke 62. 63. 106.
Stufenschalter 474.

T.

Tangentenbussole 188.
Taster 575.
Telegraphenelement 54.
Telegraphie ohne Draht 593 ff.
Telephon 625 f.
Telephon 225 f. 601 ff.
Telpherage 531.
Temporäre Magnete 163.
Tesla 280 f. 482.
Teslasche Versuche 280 ff.
Thermoelektrische Spannungsreihe 123.
124.
Thermoströme 124 f.
Thomsonbrücke 100.
Thomsongalvanometer 193. 593.
Thomson-Houston-Zähler 509.
Thomson, Sir W. s. Kelvin, Lord.
Töpler 31.
Tonempfänger 607.
Tonsender 607.
Transformationskoeffizient 406.
Transformatoren 232 ff. 403 ff. 443. 514.
Transmitter 607.
Transversalwellen 276.
Trockenelemente 56.
Trolleydraht 518.
Trommelanker 332 ff.
Trommelmaschinen 344.
Tudorakkumulatoren 390 f.
Turbinenunterbrecher 237.
Typendrucktelegraph 584 f.

U.

Übergangswiderstand 158.
Umformer 416.
Union, E. G. 412. 509. 522.
Universalgalvanometer 80. 95. 106.
Universalmeßbrücke 97.
Universaltransmitter 611.
Unterbrecher 232 ff.
Unterirdische Stromzuführung bei elektrischen Trambahnen 527.

V.

Ventilzellen 158.
Verbindungskästen 507.
Verkettete Drehströme 260.

Vertikalgalvanoskop 78.
Verzweigte Leiter 72.
Vielfachumschalter, telephonischer 622.
Vielpolige Maschinen 343.
Voigt & Häffner 398. 439. 455.
Volt 16. 313.
Volta 45.
Voltmeter 143.
Voltaschen Element 47.
Voltmeter 105. 358. 376.

W.

Wärmetönung 146. 543.
Wage, magnetische 176.
Wanderung der Ionen 137.
Wasservoltmeter 143.
Watt (Einheit) 117. 310.
Wattlose Ströme 256.
Wattstunden 339.
Wattstundenzähler 508 f.
Weber, Wilhelm 205. 308. 574.
Wechselströme 97. 206. 212. 214. 223.
242. 244 ff. 403 ff. 422.
Wechselstrombogenlampen 440.
Wechselstrommaschinen 366 ff.
Wehneltunterbrecher 238.
Wellen, elektrische 594.
Wellenlänge 268. 272. 278.
Wellenwicklung 364.
Wheatstone 578. 591.
Wheatstonesche Brücke 74. 93. 94.
Widerstand 64. 68. 83 ff.
— magnetischer 173. 340.
Widerstandskasten 89 f.
Widerstandskoeffizient 85 f.
Wimshurstmaschine 34 f.
Wind, elektrischer 21.
Wirbelströme 227. 334. 354.
Wirkungsgrad, elektrischer, von Dynamomaschinen 356.
— von Transformatoren 408.

Z.

Zahnanker 341.
Zellschalter 397.
Zentimeterwürfel 85.
Zentralbureau, telephonisches 619 ff.
Zersetzungszellen 140.
Zerteilung des Eisens 335.
Zinkgewinnung 551.
Zweileitersystem 511.

Im gleichen Verlag wird im Frühjahr 1903 erscheinen:

Kurzer Abriss

DER

ELEKTRIZITÄT.

VON

Dr. L. GRAETZ,

Professor an der Universität München.

Mit ca. 150 Abbildungen.

Dritte verbesserte Auflage.

Preis elegant gebunden 3 Mark.

In diesem **kurzgefaßten Buch** hat der Verfasser eine zusammenhängende **Übersicht der Haupttatsachen** auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre und ihrer **wichtigsten Anwendungen** gegeben. Es ist nicht jedermanns Sache, aus einem so umfangreichen Gebiet das Wichtigste von dem weniger Wichtigen zu sondern. Deswegen hat der Verfasser, vielfachen Wünschen, die namentlich aus Lehrerkreisen an ihn gerichtet waren, entsprochen und in diesem kurzen Buch eine **Darstellung des Wesentlichsten** gegeben. Daß er es verstanden hat, auch in diesem kleinen Werke ein volles Verständnis der behandelten Gegenstände zu erreichen, wird von der Kritik einstimmig betont und besonders warm wird dieses Buch **von Lehrern an mittleren Unterrichtsanstalten** öffentlich und privatim ihren Schülern empfohlen.

In diesem Werke, welches **kein bloßer Auszug** aus dem größeren ist, sondern sich auch durch den Gang und die Darstellung von jenem unterscheidet, werden die Erörterungen der technischen Anwendungen gleich an die Behandlung der wissenschaftlichen Lehren angeschlossen, wodurch insbesondere trotz des reichen Inhalts die große Kürze ermöglicht wurde.

Aus den vielen anerkennenden Besprechungen der Fach- und Tagespresse über die 1. und 2. Auflage seien hier nur die nachfolgenden angeführt:

Die Natur, Halle. (1. Auflage.)

Das lebhaftes Interesse, das man gegenwärtig allen Erscheinungen auf dem Gebiete der Elektrizität zuwendet, ruft auch ein allgemeines Bedürfnis nach guter und zuverlässiger Aufklärung über das Wesen dieser Naturkraft hervor. Zahlreiche Lehrbücher suchen dasselbe zu befriedigen; allein oft bieten sie im Übereifer zu viel dem Laien, der sich nur über die wichtigsten Gesetze und Erscheinungen der Elektrizität unterrichten will. Da ist denn das vorliegende Werk aufrichtig mit Freude zu begrüßen. Sein Verfasser ist vielen bekannt durch ein früheres größeres Lehrbuch „Die Elektrizität und ihre Anwendungen“, das allgemein gute Aufnahme gefunden hat. Graetz kam bei der Neubearbeitung dieses größeren Lehrbuches selbst zu der Erkenntnis, daß es allmählich zu umfangreich und zu eingehend für viele Leser geworden war. Es wurden wiederholte Wünsche laut, die dahin gingen, neben seinem Lehrbuch noch einen kürzeren Abriss herauszugeben, der nur eine zusammenhängende Übersicht unserer hauptsächlichsten Kenntnisse und Anschauungen von der Elektrizität und ihren wichtigsten Anwendungen enthielte. Diese Wünsche dürfte Graetz mit dem vorliegenden Abriss wohl befriedigt haben. Er gibt in streng wissenschaftlicher Form Belehrung über die wunderbarste und rätselhafteste aller Naturkräfte. Der methodische Weg, den der Verfasser beschritten hat, erscheint uns sachgemäß und entspricht dem Stande unserer gegenwärtigen wissenschaftlichen Anschauung. Die Darstellung geht von den elektrischen Strömen aus und sucht die elektrischen Vorgänge immer als Bewegungs- oder Zustandserscheinungen des Äthers aufzufassen. Der Verfasser hofft dadurch eine größere Anschaulichkeit und bessere Verständlichkeit zu erreichen. *W. U.*

Monatshefte für Mathematik und Physik, Wien. (1. Auflage.)

Prof. Graetz bietet in dem vorliegenden gemeinverständlichen Buche „eine kurze aber zusammenhängende Übersicht unserer hauptsächlichsten Kenntnisse und Anschauungen von der Elektrizität und von ihren wichtigsten Anwendungen“. Von dem rühmlichst bekannten Werke des Verfassers „Die Elektrizität und ihre Anwendung“ unterscheidet sich dasselbe nicht nur durch den weit geringeren Umfang sowie die völlig elementare Art der Darstellung des behandelten Stoffes, sondern auch durch die Anordnung desselben. Während nämlich in dem großen Werke die elektrostatischen Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen den Ausgangspunkt der Darstellung bilden, wird in dem „Kurzen Abriss“ mit den elektrischen Strömen begonnen. Ein zweiter Unterschied zwischen beiden Büchern besteht darin, daß in dem vorliegenden die elektrischen Erscheinungen immer als Bewegungs- oder Zustandsänderungen des Äthers aufgefaßt werden. Endlich weichen beide Werke noch dadurch voneinander ab, daß in dem ersteren die wissenschaftlichen Lehren von den Anwendungen getrennt behandelt werden, während in dem zweiten an die gesetzmäßig erkannten Tatsachen gleich die Anwendungen angeschlossen werden, die man von jenen machen kann. Selbst denjenigen, welche das größere Werk gelesen haben, wird der „Kurze Abriss“ nicht unwillkommen sein.

Natur und Offenbarung, Münster i. W. (2. Auflage.)

Das Buch soll, wie der Herr Verfasser ausdrücklich betont, eine kurze, aber zusammenhängende Übersicht unserer hauptsächlichsten Kenntnisse und Anschauungen von der Elektrizität und von ihren wichtigsten Anwendungen geben. Wenn man das Buch durchliest, so muß man gestehen, daß der Verfasser seine Aufgabe

in ganz vorzüglicher Weise gelöst hat. Rezensent weiß kein Buch, das in so einfacher elementarer Form und doch so streng wissenschaftlicher Weise uns mit den Resultaten und Anwendungen der Elektrizitätslehre bekannt macht. Der Herr Verfasser geht bei seinen Ausführungen vom Begriff des elektrischen Stromes aus. Induktionsströme, Gleichströme und Wechselströme, die Gesetze der elektrischen Ströme, die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes, die elektrischen Spannungserscheinungen, die Umwandlung großer Energiemengen in elektrische Ströme und umgekehrt, die Wärme- und Lichtwirkungen des elektrischen Stromes, die elektrochemischen Erscheinungen, der Durchgang der Elektrizität durch Gase, Kathoden- und Röntgenstrahlen, und endlich die elektrischen Schwingungen werden behandelt. Dabei hat der Herr Verfasser überall versucht, die elektrischen Erscheinungen als Bewegungs- oder Zustandserscheinungen des Äthers aufzufassen. Es ist ja dies das Bestreben der modernen Physik seit Faraday und Maxwell. Die Abbildungen sind alle ausnahmslos sehr gut. Das Buch kann allen, welche sich mit den Resultaten der modernen Elektrizitätslehre vertraut machen wollen, aber auch den Fachmännern nur bestens empfohlen werden.

Dr. M. Maier, Schauflingen.

Neueste Erfindungen und Erfahrungen, Wien. (2. Auflage.)

- Das vorangezeigte Buch bietet eine kurze, aber zusammenhängende Übersicht unserer hauptsächlichsten Kenntnisse und Anschauungen von der Elektrizität und von ihren wichtigsten Anwendungen. Der Verfasser hat zuerst die elektrischen Ströme angeführt; die Entwicklung der Begriffe von diesem Ausgangspunkte aus erscheint überaus klar. Die elektrischen Erscheinungen werden immer als Bewegungs- oder Zustandserscheinungen des Äthers aufgefaßt. An die gesetzmäßig erkannten Tatsachen sind gleich die Anwendungen angeschlossen, die man von jenen machen kann. Die Darstellung der elektrotechnischen Errungenschaften mußte sich natürlich, dem Umfange des Werkes entsprechend, immer auf das Wesentlichste und Verbreitetste beschränken, erfahrungsgemäß aber ordnen sich Details in das Wissen viel leichter ein, wenn das Prinzipielle, das Grundlegende genügend aufgefaßt ist. Die zweite Auflage ist sehr sorgfältig in allen Teilen dem neuesten Standpunkt der Wissenschaft und Technik angepaßt worden. Das größere Werk desselben Verfassers über den gleichen Gegenstand haben wir im Jahrgang 1900, Seite 185 eingehend besprochen. Das vorangezeigte Werk, bei dem niemals die Strenge der Begriffe und Ableitungen außer Acht gelassen sind, verdient vollste Anerkennung, da es zur Verbreitung gründlichen Wissens über die umfassendste und rätselvollste unserer Naturkräfte beiträgt und so leichtverständlich und klar geschrieben ist, daß jedermann daraus reichen praktischen Nutzen zu schöpfen vermag.

D. R.

Dinglers polytechnisches Journal, Stuttgart. (1. Auflage.)

Das vorliegende Werk ist kein bloßer Auszug aus dem größeren, es beruht auf durchaus anderem und wie uns scheint für den Zweck der kürzeren Einführung in die Lehren der Elektrotechnik sehr förderlichem Wege. Dieser Abriss vermeidet glücklich eine Reihe ermüdender Betrachtungen, indem er sofort zum Wesen der Sache selbst, der Lehre von den Strömen, übergeht. Die Fassung des Werkes ist durchaus korrekt und zeugt von großem pädagogischen Takte. Wir wünschen dem Werke einen ebensolchen Erfolg, wie er dem größeren desselben Verfassers zu teil geworden ist.

Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin. (2. Auflage.)

Der Verfasser, der durch sein größeres Werk: „Die Elektrizität und ihre Anwendungen“ bestens bekannt ist, will mit diesem kurzen Abriss der Elektrizität den Wünschen nach einer gedrängten Zusammenstellung entgegenkommen. Die Behandlung des Stoffes ist jedoch eine völlig andere als in dem größeren Werke. Den neueren Anschauungen entsprechend sind die elektrischen Ströme als erstes eingeführt, der Begriff der elektrischen Ladung aber, der in dem anderen Werke den Ausgangspunkt bildet, findet seine naturgemäße Angliederung an den Begriff der elektrischen Spannung. Die elektrischen Erscheinungen sind stets als Zustands- und Bewegungserscheinungen des Äthers dargestellt, soweit dies ohne allzu spezielle Hypothesen möglich war. Die Anwendungen in der Praxis sind stets im Anschluß an die physikalischen Erscheinungen und Gesetze erläutert, und ist auf diese Weise bei aller Kürze doch große Verständlichkeit erreicht worden.

Das Buch wird allen gebildeten Laien wie auch Schülern der humanistischen Gymnasien, die sich Belehrung über dieses Gebiet verschaffen wollen, ein nützliches und interessantes Lehr- und Lesebuch sein.

J. Wg.

Zeitschrift für Realschulwesen, Wien. (2. Auflage.)

Die erste, im Jahre 1897 erschienene Auflage wurde in dieser Zeitschrift eingehend besprochen, und es kann daher der Plan des Werkes als bekannt angesehen werden. Die neue Auflage wurde sorgfältig in allen Teilen dem neuesten Standpunkte der Wissenschaft und Technik angepaßt.

Die starke Berücksichtigung der neueren Errungenschaften, die anregende Schreibweise und die prächtige Ausstattung machen das Buch in ganz besonderer Weise geeignet, Freude an dem Gegenstande zu erwecken und zu erhalten. Es sei daher neuerlich den Schülerbibliotheken der höheren Schulen wärmstens empfohlen.

Konrad Kraus, Wien.

Neue Pädagogische Zeitung, Magdeburg. (2. Auflage.)

Wer sich eingehend über das Wesen der Elektrizität und ihre Anwendung unterrichten will, der greife zu diesem Buche. Wir haben seiner Zeit die erste Auflage warm empfohlen; die neue Auflage findet noch mehr unseren Beifall, da sie „sorgfältig in allen Teilen dem neuesten Standpunkt der Wissenschaft und Technik angepaßt worden ist“. Es ist nicht leicht für den Laien, einzudringen in die Geheimnisse der Elektrizität, hier wird die Schwierigkeit schnell überwunden, dafür sorgen gediegene Gründlichkeit, klare Darstellungsweise und anschauliche Illustrationen. — C —

Magazin für Pädagogik, Spaichingen. (2. Auflage.)

Auch der „kleine Graetz“ ist rasch zu einem der beliebtesten Bücher über Elektrizität und Elektrotechnik geworden. Sein Verfasser hat es unter allen Physikern wohl am besten verstanden, für den gebildeten Laien zu schreiben, d. h. ein Werk zu schaffen, das ihn in klarer und anschaulicher Sprache, unter Verzicht auf die Hilfsmittel der Mathematik in die Grundlehren der Elektrizität einführt und ihn mit den wichtigsten Anwendungen dieser geheimnisvollen Kraft bekannt und vertraut macht. Das splendid ausgestattete Buch eignet sich auch zu Festgeschenken als zeitgemäße Gabe für die wissensdurstige Jugend.

Prof. Baur.

Stuttgart.

J. Engelhorn,
Verlagsbuchhandlung.



S. 61

Bhs





Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299272