

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

L. inw.

~~369~~

391

reisteswelt

A. Rottth  
Grundlagen  
der Elektrotechnik

Dritte Auflage

*BS*

*H. Mann*

B. G. Teubner · Leipzig · Berlin

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000295877

T 369

Aus Natur und Geisteswelt  
Sammlung wissenschaftlich-gemeinverständlicher Darstellungen

---

391. Bändchen

# Grundlagen der Elektrotechnik

Von

A. Rotth

Dritte Auflage

13.-18. Tausend

Mit 70 Abbildungen



Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin 1920

134/41





I 301557

## Vorwort zur dritten Auflage.

Die dritte Auflage hat wieder in manchen Einzelheiten Verbesserungen erfahren, die von sachkundiger Seite angeregt waren. Außerdem sind aus wirtschaftlichen Gründen vielfach Kürzungen eingetreten, wo sie zulässig schienen, ohne das Verständnis zu stören.

Die Darstellungsweise ist sonst unverändert geblieben. Sie hat das Ziel, den Anfänger auf dem Wege der physikalischen Anschauung mit den Grundgesetzen in ihrer Entwicklung vertraut zu machen, deren Verwendung bei der Durchbildung elektrischer Maschinen und Geräte zu erläutern und die gegenseitig befruchtende Wirkung zwischen physikalischer Forschung und technischer Erfahrung zu zeigen. Ausgedehntere Gelegenheit, die Grundlehren auf die Wirklichkeit zu übertragen, bieten das bisher in der gleichen Sammlung erschienene Bändchen: P. Köhn, „Die elektrische Kraftübertragung“ (424), und das demnächst erscheinende Bändchen: M. Lwischitz, „Die elektrischen Maschinen“ (774). Besonders mit Rücksicht auf die beschreibende Darstellung sei auch auf das größere Buch von R. Rinkel, „Einführung in die Elektrotechnik“ (B. G. Teubner) hingewiesen.

Berlin, Februar 1920.

Der Verfasser.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA  
KRAKÓW

I 389

Schutzformel für die Vereinigten Staaten von Amerika:  
Copyright 1920 by B. G. Teubner in Leipzig

Alle Rechte, einschließlic des Übersetzungsrechts, vorbehalten

Druck von B. G. Teubner, Dresden

3PK-B-99/2017  
Akc. Nr. 259 150



# Inhaltsverzeichnis.

	Seite		Seite
<b>I. Wirkungen des elektrischen Stromes im allgemeinen.</b>		Wahl der Spannung . . .	48
Entdeckung des Galvanismus . . . . .	5	Sicherungen.	
Galvanis Versuch.		Induktion und magnetische Feldstärke . . . . .	52
Die Voltasche Säule . . . . .	7	Ballistische Messung. Einheit der Feldstärke.	
Elektrochemische Erscheinungen. Spannung. Vorzeichen. Widerstand.		Magnetische Felder bei verschiedenen Leiterformen . . . . .	58
Elektromagnetismus . . . . .	12	Stromring. Stromspule.	
Ablenkung der Magnetnadel. Stromzeiger. Bewegliche Leiter. Solenoide. Elektromagnet.		Magnetische Leitfähigkeit . . . . .	61
Die Induktion . . . . .	19	Analogie mit dem Ohmschen Gesetze. Einfluß der Temperatur. Bildliche Darstellung.	
Michael Faraday. Magnetisches und elektrisches Feld. Mechanische Analogien. Kraftlinienbilder.		Entwurf eines Elektromagneten . . . . .	65
Faradays Kraftlinien . . . . .	22	Magnetische Energie . . . . .	69
Induktionsregeln und Strommaschinen . . . . .	30	Analogie mit der Elastizität. Zugkraft.	
Stromrichtung. Induktionsmaschine. Wellenstrom.		Die Selbstinduktion . . . . .	72
<b>II. Gleichstrom.</b>		Anwendungen. Maß der Selbstinduktion. Einfluß des Eisens.	
Gesetz von Ohm mit Anwendungen . . . . .	35	Anwendung auf die Gleichstrommaschine . . . . .	78
Bildliche Darstellung. Wheatstonesche Brücke. Schaltung von Elementen.		Werner Siemens. Paccinottis Anker. Berechnung der Spannung. Feldverzerrung. Streuung. Generator und Motor. Mehrpolige Maschinen. Unipolarmaschinen.	
Maßeinheiten und Stromwärme . . . . .	41	Elektrochemische Sammler (Akkumulatoren) . . . . .	88
Elektrische Einheiten. Gesetz von Joule. Maßsystem.		Bleisammler.	

	Seite		Seite
<b>III. Wechselstrom.</b>			
Erste Anwendung des Wechselstromes . . . . .	91	nungslinien. Hysteresis und Wirbelströme.	
Geräte zum Untersuchen des Wechselstromes . . .	91	Induktiver Wechselstromkreis. Phasenverschiebung . . . . .	106
Oszillograph. Elektrodynamometer.		Wechselstrommagnet. Zeichnerische Behandlung der Wechselstromgrößen. Erweitertes Ohmsches Gesetz.	
Grundform der Wechselstrommaschine. Die Sinuslinie . . . . .	96	Der Transformator . . . .	112
Wirkliche Stromlinien.		Wechselstrommotoren. Mehrphasensysteme . .	115
Mittelwerte und Leistung des Wechselstromes . . .	100	Drehfeld. Zweiphasen- und Dreiphasensystem. Drehstrommotoren. Kommutatormotor. Repulsionsmotor.	
Effektiver und elektrodynamischer Mittelwert.		Ladungerscheinungen . .	123
Spannung der Wechselstrommaschine. Anwendungen auf wirkliche Maschinen . . . . .	103	Kapazität. Kondensator. Elektrische Festigkeit.	
Maschinenformen. Span-			



# I. Wirkungen des elektrischen Stromes im allgemeinen.

## Entdeckung des Galvanismus.

Der italienische Arzt Luigi Galvani machte im Jahre 1790 eine Beobachtung, die den Ausgangspunkt zum Erforschen einer neuen Erscheinungsform der Elektrizität bildete und damit zum Ausbau der Elektrizität überhaupt, zu ihrer Verbindung mit anderen physikalischen und chemischen Erscheinungen und zu ihrer praktischen Verwendung.

Vor Galvani kannte man die Elektrizität nur in einer Form, die man nach ihrer üblichsten Erzeugungsweise Reibungselektrizität nannte, die zuerst am Bernstein (*ήλεκτρον*) beobachtet wurde, der durch leichtes Reiben an Wolle, Seide u. dgl. die Eigenschaft erhält, leichte Körper, wie pendelnd aufgehängte Kügelchen von Holundermark, anzuziehen und nach Berührung abzustößen. Die Reibung als solche ist dabei freilich nicht wesentlich, sondern die innige Berührung der aufeinander gleitenden Körper. Jetzt bezeichnet man die dabei auftretenden Erscheinungen als Elektrostatik, weil man hier die Elektrizität vornehmlich im ruhenden Zustande, in den Ladungserscheinungen beobachtet. Die Elektrostatik befand sich schon auf einer erheblichen Höhe der Ausbildung. Hinsichtlich der Kenntnis und Deutung der Erscheinungen hatten namentlich Franklin (1706—1790) vieljährige Bemühungen anregend gewirkt, und durch Coulombs genauere Messungen der elektrostatischen Kräfte war seit kurzem ein gewisser Abschluß der bisherigen Entwicklung erreicht. Man hatte zwei verschiedene Arten der Elektrizität unterscheiden gelernt, die beispielsweise durch Reiben einerseits von Glas, andererseits von Harz erzeugt wurden und gesondert sich auf den geladenen Körpern erhielten, im Gegensatze zu den magnetischen Körpern, die immer gleiche Mengen von entgegengesetztem Magnetismus besitzen. Die beiden Elektrizitätsarten wurden als positive und negative bezeichnet, ganz willkürlich übrigens, denn es wurde damit nur eine ähnliche Gegensätzlichkeit angedeutet, wie zwischen den beiden Polen eines Magneten besteht. Von Aepinus war



in der Mitte des 18. Jahrhunderts der Begriff der elektrischen Influenz geschaffen, der schon hundert Jahre früher von dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke (1602—1686) vorbereitet war. Die neue Vorstellung, die das Scheiden der Elektrizitäten durch die gegenseitige abstoßende Wirkung gleichartiger und die anziehende Wirkung ungleichartiger Ladungen lehrte, brachte namentlich eine vollkommene Einsicht in das Wesen des elektrostatischen Sammlers, nämlich der Leidener (richtiger Kleistschen) Flasche und des Elektrophors. Die beiden Elektrizitätsarten dachte man sich dabei als äußerst feine unwägbarbare Stoffe, die sich auf Leitern von selbst ausbreiten können, während sie auf Nichtleitern an den elektrisierten Stellen haften. Doch hatte schon Aepinus auf die Unbestimmtheit der Bezeichnungen Leiter und Nichtleiter hingewiesen, wofür man richtiger je nach den besonderen Umständen zwischen mehr oder weniger guten und schlechten Leitern zu unterscheiden habe. Als Gerät zum Erkennen und Untersuchen des elektrischen Zustandes besaß man das Elektroskop in verschiedenen Formen, meist pendelartig, also sehr leicht beweglich nebeneinander aufgehängte leitende Körperchen, beispielsweise Goldblattstreifen, die bei gleichartigen Ladungen je nach deren Stärke auseinandergetrieben wurden. Ein eigentliches Meßgerät hatte Coulomb in seiner Drehwaage geschaffen und damit nachgewiesen, daß Anziehen oder Abstoßen zwischen isolierten elektrischen Mengen umgekehrt proportional dem Quadrate ihres Abstandes ist.

Bei elektrostatischen Versuchen drängen sich besonders die physiologischen Wirkungen der Beobachtung auf, die ja auch meist die erste Anziehung für die mit der Elektrisiermaschine spielenden Anfänger bilden. Das leichte Stechen oder die stärkeren Erschütterungen, die der Beobachter beim Übergange von Ladungen in den eigenen Körper empfindet, gaben aber auch bald Anlaß zu ernsteren Studien, und namentlich fesselte die Aufmerksamkeit das Zusammenziehen des Lebenden und ausgeschnittenen tierischen Muskels beim Einleiten von Elektrizität. Mit solchen Versuchen beschäftigte sich auch der Arzt Galvani (1737—1798), und dabei bemerkte er zufällig, daß Froschschenkel, wenn deren Enden mit verschiedenen, unter sich leitend verbundenen Metallen in Berührung waren, ähnliche Zuckungen ausführten, wie vorher unter Wirkung der Elektrisiermaschine.

Ein freundlicher Zufall hat also eine Anregung nach gewisser Richtung gebracht, wie so oft, aber er hat nicht etwa die Grunderscheinung

der neuen Elektrizitätsform ohne weiteres gegeben, so daß nur noch ein verhältnismäßig müheloser Ausbau der zufälligen Entdeckung nötig gewesen wäre, wie der Unkundige hier und in anderen Fällen so gern sich vorstellt, es bedurfte vielmehr des Genies eines Physikers, der sich ohnehin schon seit langem erfolgreich mit elektrischen Studien befaßt hatte, um die in wissenschaftlichen Kreisen gerechtes Aufsehen erregende Beobachtung Galvanis richtig zu deuten, sie von den besonderen Umständen, unter denen sie gemacht wurde, loszulösen und planmäßig den Kern der Erscheinung zu enthüllen. Und das gelang nicht Galvani selbst, sondern seinem jüngeren Landsmanne Alessandro Volta (1745 bis 1827), damals Professor der Physik an der Universität Padua. Denn Galvani sah in seiner Entdeckung nur eine Äußerung tierischer Elektrizität, in der man zu jener Zeit und noch lange danach mehr oder weniger das Wesen der Lebenserscheinungen erblickte, und bei dieser Auffassung ist Galvani immer verblieben. Auch Voltas Gedanken bewegten sich zunächst in dieser Richtung, und erst im Laufe von Jahren verdichteten sich seine allmählich keimenden Zweifel zu der Überzeugung, daß nicht der tierische Muskel als solcher Elektrizität erzeuge, die durch die anschließenden Leiter abgeführt werde. Volta sah vielmehr schließlich in dem Muskel mit dem metallischen Schließungsbogen ein „galvanisches Element“, das er mit unorganischen Stoffen in seiner berühmten „Säule“ nachbildete.

### Die Volta'sche Säule.

Die Entstehungsgeschichte des Galvanismus ist sehr lehrreich. Schon die vorstehenden Andeutungen können eine Vorstellung davon geben, welcher geistigen Leistung es bedurfte, sich von den zufälligen Umständen der ersten Erscheinung frei zu machen und entgegen der herrschenden Auffassung eine analoge Erscheinung mit scheinbar ganz fremdartigen Mitteln hervorzurufen. Volta gab aber auch ein Zeichen seiner Charaktergröße, denn die Benennung des von ihm erschlossenen Gebietes nach dem Namen Galvanis ist wesentlich auf ihn zurückzuführen.

Voltas Element bestand aus einer Zinkplatte und einer Kupferplatte, die durch eine mit angesäuertem Wasser getränkte Tuchscheibe getrennt aufeinander lagen. Die Tuchscheibe, der feuchte Leiter, vertrat also die Stelle des tierischen Muskels. Bei dieser Zusammenstellung wird das Zink negativ, das Kupfer positiv elektrisch, was Volta allerdings nur mit einem die Wirkung verstärkenden Kunstgriffe be-







Säulen auffallend warm, stärkere Säulen steigerten die Temperatur, wenn die Drähte nicht zu dick waren, bis zum Glühen und Schmelzen. Dem Münchener Gelehrten Ritter, der schon 1810 in noch jungen Jahren starb, gelang aber noch weit darüber hinaus, die Wärme- und Lichtwirkungen der Säule zu steigern, indem er zwischen zwei Kohlestüden, die je mit einem Pole verbunden waren, einen Lichtbogen herstellte.

Ritter, der sich überhaupt in hervorragender Weise bei der Erforschung der Elektrizität betätigte, hat auch einen wesentlichen Anteil an der Begründung der Elektrochemie. Als die erste, schon frühzeitig von Volta gemachte Entdeckung auf diesem Gebiete ist das Erregen von eigentümlichen Geschmacksempfindungen des durch die Zunge geschlossenen Elementes anzusehen, in objektiver Form zeigte sich die elektrochemische Wirkung zuerst in der Zersetzung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff, und zwar soll Humboldt (1769—1859) der Entdecker gewesen sein. Der Sauerstoff erschien beim gleichzeitigen Eintauchen der beiden Poldrähte in die Flüssigkeit in feinen Bläschen an dem positiven Ende, der Wasserstoff am negativen. Die vielfache Anwesenheit von wässrigen Lösungen bei den galvanischen Versuchen, wie schon die wichtige Rolle, die der flüssige Leiter in der Säule selbst spielt, machen die verhältnismäßig frühzeitige Entdeckung erklärlich. Nach Humboldt sind besonders Carlisle, Pfaff und Ritter emsig der Spur nachgegangen, der Letztergenannte muß auch als der eigentliche Erfinder der Galvanoplastik angesehen werden, denn er zeigte, wie sich metallisches Kupfer mit Hilfe der Säule aus einer Lösung von Kupfervitriol niederschlagen läßt. Die Chemie war überhaupt die erste Schwesterwissenschaft, die von dem Galvanismus ausgiebig gefördert wurde. Durch den berühmten Davy (1778—1829) erhielt sie u. a. die mit Hilfe der Säule dargestellten neuen Grundstoffe Kalium, Natrium und Barium.

Die Aufgabe jeder Wissenschaft ist das Sammeln einzelner Erscheinungen, ihr Erklären aus allgemeinen Gesetzen und das Herbeiführen neuer Erscheinungen als Folgerungen dieser Gesetze. Nach den ersten tastenden Versuchen schon müssen sich gewisse Vorstellungen über das Wesen der Erscheinungen ausbilden, um für weitere Versuche Anhalt und Richtschnur zu geben. Die glückliche Eingebung begabter Forscher ist dabei maßgebend für das richtige Einsetzen aller Bemühungen, den Kreis der Erfahrungen im Hinblick auf ein bestimmtes Ziel zu erweitern.

So war in wenigen Jahren nach Voltas Erfindung der Säule eine Fülle von Tatsachen gewonnen, und aus ihnen hatten sich leitende Vorstellungen von den wirksamen Kräften ergeben.

Volta hatte, wie wir schon sahen, bald das Bedürfnis empfunden, die mehr oder weniger starke Wirkung der Säule durch ihre „Spannung“ zu erklären. Ausgehend von dem bestimmten Grundwerte der „elektromotorischen Kraft“ eines Elementes konnte man durch Aufeinander-schichten — Hintereinanderschalten sagte man später — beliebige Spannungen erreichen, und daß man dabei teilweise Spannungen erreichte, die den heute in städtischen Zentralen gebräuchlichen nahe kamen, zeigt schon die Erzeugung des Lichtbogens. Begriff und Bezeichnung der elektrischen Spannung ist auch bis heute geblieben.

An Stelle der heftigen Entladungen der Reibungselektrizität zeigte der Galvanismus ein mehr ruhiges Fließen der Elektrizität, das sich besonders in den elektrochemischen Untersuchungen offenbarte. Solange die Säule wirksam war, lösten sich an den in angesäuertes Wasser eintauchenden Poldrähnen oder Polplatten in gleichmäßiger Folge die Gasperlen ab, wuchs der Niederschlag von Metallen aus ihren Salzlösungen. Der Lichtbogen war nicht eine einzelne Entladung, sondern dauerte an. Ein die Pole verbindender Draht erhitzte sich nicht plötzlich, sondern erst allmählich. Diese und viele andere Tatsachen führten zu der Vorstellung einer elektrischen Strömung in den Leitern und einer bestimmten Stromstärke. Man dachte sich dabei den Strom als das gleichmäßige Fließen eines unwägbaren Stoffes im Leiter, und teils in verschwommener Vorstellung einer inneren Bedeutung des Plus- und Minuszeichens der Pole, teils nur in Anlehnung an den sonst üblichen Gebrauch dieser doch willkürlichen Zeichen, nahm man den Strom als vom positiven Pole nach dem negativen gerichtet an. Auch diese Bezeichnungen und in gewissem Sinne die damit verbundenen Begriffe haben sich erhalten. Wenn wir uns jetzt auch nicht mehr einfach eine wirkliche, wenn auch sehr feine Flüssigkeit in den Leitern bewegt denken, wenn auch später und bis in die Neuzeit jedes Wandern irgendeines Stofflichen in den Leitern unannehmbar, und im Anschluß an die Betrachtungsweise auf anderen physikalischen Gebieten alles durch fortpflanzende Schwingungen erklärbar schien, so ist doch die Stromstärke als passendes Denkbild immer in Gebrauch geblieben, und die jetzt in der Ausbildung begriffene Theorie der Elektronen schmiegte sich sogar einigermaßen der ursprünglichen naiven Erklärungsweise an.



Weniger scharf, aber doch in den Anfängen deutlich erkennbar, hatte sich das Empfinden für den Widerstand entwickelt, den der Strom auf seinem Wege durch die Leiter zu überwinden hat. Schon die Wahl der Drähte, die zum Verbinden der Säulenpole mit dem Orte etwa eines elektrolytischen Vorganges dienen, regt unwillkürlich die Frage nach dem Einflusse der Drahtdicke an, und einfache Beobachtungen zeigen die Steigerung der Wirkung bei Ersatz gelegentlich zu dünn gewählter Leiter durch dickere. Jedenfalls war schon lange, ehe Ohm den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen Spannung, Widerstand und Stromstärke nachwies, ein allgemeines Empfinden dafür rege.

Wie man sieht, sind die Vorstellungen von den drei Grundgrößen des elektrischen Stromes aus dem natürlichen Bedürfnisse entstanden, sich sinnlich greifbare Bilder der Erscheinungen zu schaffen. Solche anthropomorphen, d. h. den äußeren Sinnen sich anpassende Erklärungen behalten als Denkbilder auch dann ihren Wert, wenn sie beim Fortschreiten der Forschung nicht mehr wörtlich genommen werden, sofern sie nur eine anschauliche Darstellung der Erscheinungen bieten, und die Folgerungen aus ihnen sich zutreffend erweisen. Auf einer gewissen Höhe der Entwicklung hat dann das Bestreben volle Berechtigung, die Denkbilder zurückzudrängen oder wenigstens ihre Rolle einzuschränken. Ganz zu vermeiden sind sie aber nie, denn sie wurzeln in der menschlichen Natur. Und wie wir in der Mechanik immer noch den Begriff Kraft gebrauchen, nur selten seines anthropomorphen Ursprunges gedenkend, wie wir ferner von Lichtstrahlen sprechen, die sich geradlinig fortpflanzen, wiewohl der Vorgang im einzelnen keineswegs ein geradliniges Fortbewegen ist, so werden wir auch von der Stromstärke und anderen Größen grobsinnlicher Art sprechen, bis sich etwa die Notwendigkeit zeigt, zum besseren Beschreiben der elektrischen Erscheinungen vollkommenerere Denkbilder zu benutzen.

Die Voltasche Säule ist zwar keineswegs ein zuverlässiger Stromerzeuger, denn ihre Spannung läßt nach Schließen des Stromkreises sehr schnell nach, aus Gründen, die später erläutert werden. Auch die Umgestaltung der Säule zu dem Becherapparate von Wollaston brachte in dieser Hinsicht keine Änderung. (Die feuchten Tuchscheiben der Säule wurden dabei durch Becher mit angesäuertem Wasser ersetzt, die je eine mit der ungleichnamigen Platte des benachbarten Bechers verbundene Kupfer- und Zinkplatte enthielten.) Wir wollen aber aus Gründen der Anschaulichkeit die Säule vorläufig als einen unveränder-



lichen Stromerzeuger ansehen, der einen gleichmäßigen Strom abgibt, ohne uns um die bedeutenden Abweichungen von diesem Idealzustande zu kümmern.

### Elektromagnetismus.

Zwischen Elektrizität und Magnetismus war frühzeitig ein gewisser Zusammenhang geahnt. Schon die Unterscheidung von zwei verschiedenen Polaritäten bei beiden Naturkräften gab einen Wink in der Richtung, noch mehr das gleichartige Anziehen und Abstoßen elektrisierter wie magnetisierter Körper. Man hatte auch störende Einflüsse elektrischer Entladungen auf die Magnetnadel bemerkt und Stahlnadeln durch dieselbe Ursache magnetisch werden sehen. Das waren aber nur Zufallsergebnisse. Wie man die Erscheinungen zu leiten hat, um die Beobachtungen unter anderen Verhältnissen zu wiederholen, wußte man nicht. Auch als man im galvanischen Strome gewissermaßen eine dauernde Entladung zur Verfügung hatte, mit der sich so viel bequemer arbeiten ließ, dauerte es ziemlich lange, ehe der vermutete Zusammenhang festgestellt war. Allerdings fand der dänische Physiker Oersted (1777—1851) schon 1820 die ablenkende Kraft des Stromes auf die Magnetnadel, aber der gleiche Zeitraum seit Voltas grundlegender Erkenntnis hatte doch so viele überraschende Entdeckungen der Stromwirkung gebracht, daß es in der That auffallen muß, wie man gerade eine der einfachsten Erscheinungen nicht früher herzustellen vermochte, wozu man buchstäblich die Mittel in der Hand hielt. Auch Oersted ist keineswegs gleich, auch nicht zufällig, sondern erst nach langem Überlegen und Versuchen zu seiner Entdeckung gekommen. Was er fand, war aber auch ganz anders, als er erwarten konnte. Zwischen Magnetpolen und einem stromdurchflossenen Leiter findet nämlich keine Wirkung in der Verbindungslinie statt, wie sonst bei allen anderen Kräften, die man kannte, der Strom drückt vielmehr auf einen Magnetpol quer zu seiner eigenen Richtung, und da die Druckrichtung auf die beiden Pole entgegengesetzt ist, so lenkt der Strom eine Magnetnadel, zu der er tunlichst parallel geführt wird, aus ihrer ursprünglichen Richtung ab, wie Abb. 2 andeutet. Der Stromleiter ist dabei dicht über der Magnetnadel gedacht, annähernd von Süd nach Nord gerichtet, wie vor der Einwirkung des Stromes auch die Nadel lag. Die Nordspitze der Nadel — richtiger: die nordweisende Spitze — wird nach links abgelenkt, wenn



Abb. 2.



Abb. 3.

man sich im Stromleiter schwimmend denkt, mit dem Kopfe in der Stromrichtung voran, das Gesicht der Nadel zugewendet. Diese bald nach der Entdeckung Oerstedts von Ampère aufgestellte Gedächtnisregel ist nicht immer bequem anzuwenden, für besondere Fälle hat man sie deshalb verschiedentlich umgeformt, beispielsweise in die sogenannte Rechtehandregel, die sich aus Abb. 3 von selbst ergibt. Dieselbe Ablenkung der Nadel ergibt sich, wenn der Strom  $S$  unterhalb der Nadel, aber in entgegengesetzter Richtung geführt wird. Man kann daher die Leiter oberhalb und unterhalb der Nadel zu einem bis an die Stromanschlußstellen geschlossenen Rahmen

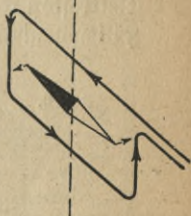


Abb. 4.

verbinden (Abb. 4) und sieht dann leicht, wie auch die senkrechten Leiterstücke eine ablenkende Wirkung auf die Nadelpole ausüben, in demselben Sinne wie die horizontalen. Überhaupt beeinflusst jeder Leiterteil die Pole ablenkend, der nicht in der geradlinigen Verbindung zu ihnen verläuft. Deshalb erhält man bei jeder Form des leitenden Rahmens eine Ablenkung, wenn auch deren Größe verschieden ausfällt. Wie bei einer Ablenkung die richtenden Kräfte des Erdmagnetismus sich mit den ablenkenden Kräften des Stromes ins Gleichgewicht setzen, also ein bestimmter Ablenkungswinkel entsteht, ist aus Abb. 2 zu ersehen. Ein langer gerader Stromleiter zwingt eine Magnetnadel, wenn man sich die Richtkraft des Erdmagnetismus ausgeschaltet denkt, in eine tangentiale Lage zu dem um den

Leiter und senkrecht zu ihm beschriebenen Kreise (Abb. 5).

Denn nach den mitgeteilten Regeln werden die beiden Nadelpole entgegengesetzt abgelenkt, und zwar, da sie gleich stark sind, mit derselben Kraft. Keine Bewegung der Nadel tritt aber ein, wenn der lange Stromleiter durch die Mitte der Nadel geht (in Abb. 4 punktiert), denn die beiden Pole wollen sich dann in entgegengesetzten Richtungen drehen.

Es handelt sich immer nur um sehr schwache Kräfte, die bei Versuchen der geschilderten Art ins Spiel treten, und deshalb beobachtet man bei ihnen nicht leicht die mechanische Rückwirkung, die natürlich der Leiter erfährt, wenn von

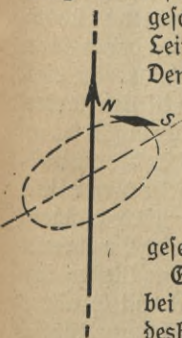
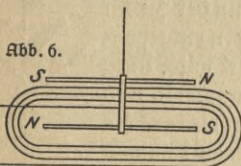


Abb. 5.



ihm eine Kraft auf die Magnetenpole ausgeht. Später wird das greifbarere hervortreten.

Von großer Bedeutung für den Fortschritt war nach Oersted's Entdeckung die Möglichkeit, mit einem einfachen Apparate einen Strom bequem zu erkennen, seine Richtung festzustellen und seine Stärke einigermaßen zu schätzen. Was für die Ladungsercheinungen das Elektroskop war, wurde für die Ströme das Galvanoskop. In vielen Fällen genügt schon eine Magnetnadel mit einer einzigen Stromwin-



dung nach dem Schema Abb. 4. Ersichtlich wird die Empfindlichkeit des Stromzeigers erhöht, wenn man den Strom nicht nur in einer Windung um die Nadel führt, sondern mehrfach. Kommt es dabei auf den Nachweis sehr schwacher Ströme an so, erhält das sehr verfeinerte

Meßgerät (Galvanometer) viele Windungen dünner, durch Umspinnung mit Seide gegeneinander isolierter Drähte, die möglichst dicht an der Nadel entlanggeführt sind, wie Abb. 6 schematisch zeigt. Man sieht hier auch eine zweite, etwas kürzere Nadel außerhalb der Spule, die mit der Hauptnadel in umgekehrter Polage fest verbunden ist und von den benachbarten Windungsteilen dieselbe, wenn auch schwächere Ablenkung erfährt. Der Zweck eines solchen „astatischen Nadelpaars“ ist außer Verstärkung der Stromwirkung die Schwächung der Richtkraft des Erdmagnetismus. Wären die beiden verbundenen Nadeln ganz gleich, so würde ihnen der Erdmagnetismus, da sie verkehrt stehen, gar keine bestimmte Richtung geben. Man läßt die eine Nadel etwas überwiegen, damit das Paar eine bestimmte Ruhelage hat, aus der es aber wegen des verminderten Einflusses des Erdmagnetismus von viel schwächeren Strömen abgelenkt wird. Zum eigentlichen Messen starker Ströme nimmt das Galvanometer andere Formen an. Es erhält dann nur eine oder wenige Stromwindungen von genauer Kreisform und von großem Durchmesser, meist mit verhältnismäßig sehr kurzer Nadel. Die Ausschläge der Nadel bei verschiedenen Stromstärken folgen dann einem einfachen, von vornherein bestimmbareren Gesetze, während Galvanometer der ersten Art, wenn sie überhaupt zum Messen im engeren Sinne verwendet werden, nur durch Vergleich mit Geräten bekannter Eigenschaften graduiert werden können. Diese ganze Klasse von Strommessern ist jetzt auf das Laboratorium beschränkt, für den ge-



wöhnlichen Gebrauch in der Elektrotechnik dienen derbere und bequemere zu handhabende Geräte.<sup>1)</sup>

Beim Auswerten der Oersted'schen Entdeckung hat sich namentlich der Franzose Ampère (1775—1830) hervorgetan, der weitgehende Folgerungen aus der Grunderscheinung zog und in umfassendem Sinne den Begriff des Strommagnetismus schuf. Wenn der Strom einen Magneten bewegen kann, dahin verdichteten sich allmählich Ampères Anschauungen, ähnlich wie das ein anderer Magnet vermag, so müssen von dem Strome gleichartige, also magnetische Kräfte ausgehen. Dann müssen aber auch Ströme auf Ströme magnetisch wirken. In der Tat zeigte Ampère, wie leicht bewegliche, parallel laufende Teile von Stromkreisen sich anziehen und abstoßen, je nach der Stromrichtung, und zwar findet das erstere statt, wenn die Ströme gleiche Richtung haben, was gegenüber dem Verhalten von gleichnamigen elektrischen Ladungen und Magnetpolen zuerst auffallend erscheinen mag. Alle hierher gehörenden Erscheinungen lassen sich an dem einfachen Versuchsgeräthe Abb. 7 erläutern.

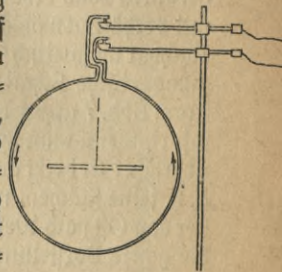


Abb. 7.

Der kreisförmige Leiterteil in der Abbildung taucht mit seinen nahe zusammengeführten, abwärts gerichteten Enden in kleine Quecksilbernapfe, die zum Stromanschlusse dienen, dabei aber das beliebige Drehen des Leiterkreises um die Spitzen gestatten. Solcher Drahtgestelle hat sich Ampère in den verschiedensten Formen bedient. Man denke sich nun zunächst den Drahtkreis in der Stellung Nord-Süd festgehalten, so wird er auf eine Magnetnadel in seiner Mitte (punktiert) bei der durch Pfeile gekennzeichneten Stromrichtung so wirken, daß der Nordpol aus der Windungsebene nach vorn, nach dem Beschauer hin, heraustritt, der Südpol dagegen von dem Beschauer fort hinter die Windungsebene zurückgeht. Das ist aber gerade so, als wenn die Fläche des Drahtringes auf der Vorderseite die Nordpolfläche eines Stahlmagneten wäre, die Rückseite entsprechend eine Südpolfläche. Denn solche wirklichen Polflächen würden die Nadelpole ebenso abstoßen wie die hier betrachtete Leiterfläche. Nun kann man sich bekanntlich einen Magnetstab zusammengesetzt denken aus beliebig vielen kürzeren Stäben, die mit immer abwechselnden Polen, also immer

1) Vgl. Köhn, Elektrische Kraftübertragung (ANuG Bd. 424) S. 15f.

Nordpol gegen Südpol, aneinandergereiht sind. Diese Vorstellung bleibt aber vollkommen zutreffend, wenn bei unverändertem Querschnitte des Magnetstabes die Unterteilung in kürzere Abschnitte immer weiter geht, so daß man schließlich einen aus dünnen Schichten aufgebauten Stab erhält, wobei jede Schicht einen sehr kurzen Magneten mit verhältnismäßig sehr großen Polflächen darstellt, der mit seinem Nachbar magnetisch zusammenklebt. Als eine solche magnetische Schicht, „magnetische Schale“ oder „magnetisches Blatt“ ist auch der Kreisstrom Abb. 7 anzusehen. Daß er sich wie ein Magnet verhält, zeigt sich sofort, wenn man ihn nunmehr nach Wegnahme der Nadel sich selbst überläßt: Er dreht sich durch den Erdmagnetismus so, daß seine „Pole“, d. h. seine Flächen, nach Norden bzw. Süden gefehrt sind, d. h. die bisher von Ost nach West liegende Achse weist wie eine Bussolennadel. Ist die ganze Vorstellung richtig, so müssen sich Kreisströme bei gleicher Stromrichtung anziehen. Das läßt sich sehr einfach an einem senkrecht hängenden, schraubenförmig gewundenen, dünnen Drahte zeigen, dessen unteres Ende in Quecksilber taucht. Bei zweckmäßig gewählten Verhältnissen verkürzt sich die Schraube während des Stromdurchganges in erheblichem Maße.

Parallele, gleichgerichtete Ströme ziehen sich also an, und zwar gleichgültig, ob sie gewunden oder gestreckt sind, wie sich mit genügend beweglichen Drähten leicht zeigen läßt, ebenso wie das gegenseitige Abstoßen ungleich gerichteter Ströme. Dabei ist natürlich nicht genauer Parallelismus der Leiter erforderlich, auch bei verschränkter Richtung wirken die Ströme aufeinander, und zwar immer so, daß sie sich gleichsinnig parallel zu stellen suchen. Man vergleiche damit die entsprechenden Verhältnisse zwischen einem Strome und einer Magnetenadel bei verschiedenen Lagen.

Der Begriff der magnetischen Schale, auf den oben die wichtigsten Ergebnisse Ampères zurückgeführt sind, stammt übrigens aus viel späterer Zeit und hat sich bei der feineren theoretischen Behandlung dieser und anderer Gegenstände als sehr nützlich erwiesen. Eine Erläuterung der magnetischen Stromwirkungen auf ganz anderem Wege bieten die Faradayschen Kraftlinien, die erst weiterhin Verwendung finden werden.

Das Aneinanderreihen von Stromwindungen oder magnetischen Stromschalen zu einer Stromröhre (Solenoid, von  $\sigma\omega\lambda\eta\nu$ ) ist in Abb. 8 dargestellt. Man sieht hier ein Drahtgestell ähnlich aufgehängt wie das in



Abb. 7, nur sind viele Windungen statt einer einzigen vorhanden, auf jede einzelne Windung bezieht sich aber das früher Gesagte unverändert. Die Achse der Röhre stellt sich beim Stromdurchgang in den magnetischen Meridian ein, die einzelne Windung senkrecht dazu, und da nunmehr die Hauptabmessung des Ganzen eine dem Magnetstabe entsprechende Richtung hat, so ist die Ähnlichkeit mit diesem viel anschaulicher als bei einer einzigen Windung: Stromröhre und Magnetstab sind wesentlich gleich. Die magnetische Polarität der Solenoidenden ergibt sich aus Abb. 7, ein Nordpol entsteht also an dem Ende, wo der Strom für den davorstehenden Beschauer entgegen dem Uhrzeiger fließt, links herum, wie man übereingekommen ist zu sagen.

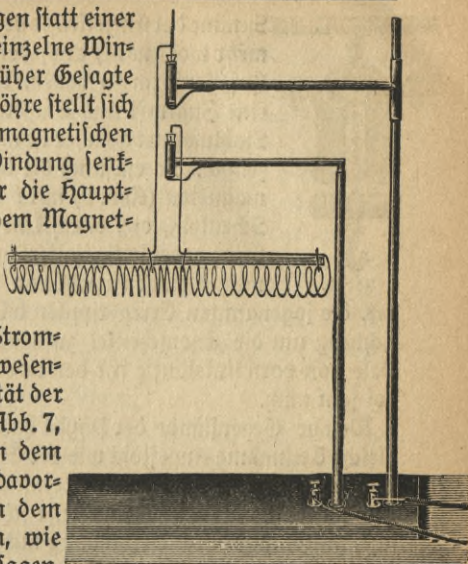


Abb. 8.

Mit mehreren Solenoiden nach Abb. 8 kann man hinsichtlich Anziehung und Abstoßung dieselben Versuche anstellen, wie mit mehreren Magneten. Das stromdurchflossene Solenoid ist demnach gewiß als Elektromagnet zu bezeichnen, nur sind seine Kraftäußerungen noch schwach, solange man sein Inneres nicht mit weichem Eisen ausfüllt. Auch dieser letzte Schritt, der das Grundelement der Elektrotechnik schuf, ist nur unter vielen Mühen getan, wie man an den zahlreichen Versuchen bedeutender Physiker sehen kann, unter denen der Franzose Arago und die Deutschen Seebeck und Erman zu nennen sind. Ein einzelner ist auch kaum als Erfinder des Elektromagneten im jetzigen Sinne zu bezeichnen. Bei den vielen Versuchen trat die ähnliche Wirkung von Dauermagneten und Stromspulen immer deutlicher hervor, und ein glücklicher Experimentator konnte gelegentlich beobachten, wie ein Eisenstab in das Solenoid hineingezogen wurde, in dieser Lage aber auf äußere Eisentkörper als Magnet von bislang ungekannter Kraft wirkte. Und da Magnete in Hufeisenform bei gleichzeitiger Wirkung der Pole auf den Anker eine viel größere Tragkraft haben, als der

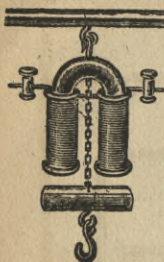


Abb. 9.

Summe der Einzelkräfte beider Pole entspricht, so lag nunmehr wohl nahe, auch dem neuen Elektromagneten die Hufeisenform zu geben, um, solange der Strom kreiste, eine Zugkraft und Tragkraft zu erhalten, die der beste Stahlmagnet gleicher Abmessungen bei weitem nicht erzeugte. So entstand die bekannteste Form des Elektromagneten (Abb. 9) mit vielen Drahtwindungen auf den Schenkeln, die, durch Überspinnen mit Baumwolle oder Seide gegenseitig isoliert und regelmäßig nebeneinander und in einer Anzahl von Lagen übereinander angeordnet, die sogenannten Erregerpulen bilden. Dabei ist nur die Stromrichtung um die Eisenschentel zu beachten, die beim Beschauen der Pole von vorn linksläufig für den Nordpol, rechtsläufig für den Südpol sein muß.

Wenige Gegenstände der Physik haben Sachleuten und Laien eine gleiche Teilnahme eingeflößt wie der Elektromagnet. Es hat etwas sinnlich Bestrickendes, durch einen einfachen Fingerdruck, der eine offengelassene Lücke in dem Stromkreise schließt, ohne beobachtbare Zwischenmittel, nur durch Verbindung mit losen, mechanisch gar nicht beanspruchten, beliebig langen Drähten vorübergehend Kräfte ins Spiel zu setzen. Als eine Nachwirkung des verführerischen Eindrucks solcher ernsthaften oder spielenden Versuche mit dem Elektromagneten kann man wohl die vielen vergeblichen Bemühungen ansehen, ihn zum Bau eines Elektromotors zu benutzen, der mit galvanischen Elementen gespeist wurde, auch dann noch, als die Aussichtslosigkeit für eine solche Maschine schon allgemein erkannt sein mußte. In dem Bestreben lag ein doppelter Fehler. Die bekannteste Form des damaligen Elektromotors bestand in zwei Elektromagneten, deren Anker an einer Wippe angeordnet waren. Ein mit dieser Wippe verbundenes Schwungrad hatte wie bei der Dampfmaschine den gleichmäßigen Gang der Maschine zu sichern, an der Schwungradwelle befanden sich isolierte metallene Halbringe mit Schleiffedern, die abwechselnd den Strom durch die Magnete schickten. Gelaufen sind solche Maschinen auch, aber nicht viel mehr. Die Zugkraft der Magnete läßt mit dem Abstände der Anker von den Polen ungemein schnell nach, der Ankerhub ist daher nur klein, die bei jedem Spiele gewonnene Arbeit entsprechend gering. Und dabei hoffte man unter anderem die Dampflokomotiven durch elektrische ersetzen zu können, noch zu einer Zeit, wo durch das Gesetz der Erhal-



tung der Energie die Frage nach der Quelle der zu erzeugenden Leistung nahe genug gelegt war. Denn diese Quelle ist bei Benutzung einer galvanischen Batterie die Oxydation des Zinkes. Die heutigen Elektromotoren sind auch nur in Gemeinschaft mit dem Generator als Übertrager der Leistung eigentlicher Motoren — Wärme-, Wasser-, Windmotoren — anzusehen, und in baulicher Hinsicht gleichen sie durch sehr große Geschwindigkeit ihrer beweglichen Organe die verhältnismäßig geringen Kräfte zwischen Magnet und Anker aus.

So unfruchtbar sich der Elektromagnet früher im Motor erwies, eine um so bedeutsamere Rolle hat er bekanntlich in der elektrischen Telegraphie entfaltet, wo es sich immer nur um kleine Kräfte handelt. Der Elektromagnet hat da erst den Bau einfacher und handlicher Apparate ermöglicht.

### Die Induktion.

Ein wichtiges Mittel der physikalischen Forschung ist die Umkehr der Erscheinungen. Ein Wasserrad kann in einem Gerinne von Wasser als Motor bewegt werden, es kann aber, wenn es von einem anderen Motor angetrieben wird, umgekehrt einen Wasserstrom erzeugen. Eine Kolbenmaschine kann durch Druckluft betrieben werden, sie stellt aber Druckluft her, wenn sie ihrerseits angetrieben wird. Eine galvanische Säule liefert elektrischen Strom unter Oxydation eines Metalles, der Strom vermag aber umgekehrt Metalle aus ihren Verbindungen zu fällen. Auch die einfache Wechselwirkung kann als ein hierher gehörendes Beispiel aufgefaßt werden, ein fester Stromleiter bewegt einen Magneten, ein fester Magnet einen nachgiebigen Stromleiter. Solche Beispiele lassen sich häufen, die Umkehrung ist oft nicht leicht zu finden, das Suchen danach ist aber unwillkürlich immer rege, und wenn sie gelungen ist, gibt sie neue Einblicke in das Wesen der Erscheinung.

So haben auch bald nach Bekanntwerden der glänzenden Versuche Ampères und der Folgerungen daraus Bestrebungen eingesetzt, statt durch einen Strom einen Magneten zu erzeugen, umgekehrt durch einen Magneten einen Strom in der umschließenden Spule zu erhalten. Damals war das Gesetz von der Erhaltung der Energie erst im Keimen, sonst würde man gleich erkannt haben, daß ein ruhender Magnet in einem ebenfalls ruhenden Leiter keinen Strom erzeugen kann, der doch eine gewisse mechanische oder chemische Arbeit zu leisten vermag. Diese hätte man also ohne jeden äquivalenten Aufwand ge-

wonnen. So geläufig uns jetzt eine solche Schlußweise ist, so standen doch damals die elektrischen Erscheinungen noch zu abseits von den anderen Energieformen, um ihren ursächlichen Zusammenhang in den einzelnen Fällen immer naheulegen. Hielt doch auch Volta seine Säule für eine unerschöpfliche Quelle von Elektrizität durch bloße Berührung der Metalle, also für eine Art Perpetuum mobile, während sie in Wirklichkeit nur chemische Energie in elektrische umsetzt. Das Problem der elektromagnetischen Umkehrung zu lösen gelang aber schließlich einem der größten Forscher aller Zeiten, Michael Faraday (1791—1867).

Davy, wie wir schon wissen, hatte mit großem Erfolge die Voltasche Säule in den Dienst der Chemie gestellt, Faraday, einem Schüler von Davy, war vorbehalten, die wichtigsten Gesetze der Elektrochemie zu ergründen. Auf dem rein elektrischen und magnetischen Gebiete brach er als Erster mit der bis dahin allein geltenden Vorstellung einer unvermittelten Fernwirkung, an deren Stelle er die Übertragung durch das Zwischenmittel setzte. Diese Anschauungsweise leitete ihn bei allen seinen Studien, ohne freilich schnellen Eingang bei den Sachgenossen zu finden. Um so größeres Aufsehen erregte gleich seine Entdeckung der elektrischen Induktion. In einem Notizbuche Faradays vom Jahre 1822 findet sich die Bemerkung: Verwandle Magnetismus in Elektrizität. Man sagt, er habe seitdem immer ein Stückchen Eisen mit einigen Drahtwindungen in der Tasche getragen, um an diesem fragwürdigen Modelle eines Elektromagneten einen Anhalt für sein bohrendes Forschen nach dem gesteckten Ziele zu haben. Er brauchte neun Jahre, um dahin zu gelangen! Er hat in der Zeit vieles andere geleistet, denn kein Schaffender ist während langer Zeit mit nur einem Gegenstande beschäftigt. Und was er schließlich fand, war wieder so einfach und scheinbar so naheliegend, wie etwa Oerstedts Entdeckung. Ist es doch auch eigentlich geradezu wunderbar, daß nicht schon Ampère bei seinen Versuchen zu der Lösung geleitet wurde.

Um „Magnetismus in Elektrizität zu verwandeln“, darf der Magnet in dem Solenoide nicht ruhen, sondern muß relativ zu ihm bewegt werden, so zeigte Faraday. Und nachdem er das erkannt, brauchte er nur wenige Wochen, um alle wichtigen Erscheinungen der Induktion zu erschließen. Alles war in den neun Jahren quälenden Grübelns unbewußt vorbereitet, der erste Blick hatte das ganze Gebiet erhellt, die Glieder fügten sich zur Kette. Wie sich zum Erfinden und



Entdecken Fleiß, Phantasie und kritischer Scharfsinn vereinigen muß, kann man nirgends besser verfolgen als bei Saraday, der in seinen Veröffentlichungen auch ein Muster der wahrheitsgetreuen Darstellung lieferte, genau den Entwicklungsgang beschrieb und über Fehlgeschlagenes ebenso berichtete wie über Gelungenes.

Eine der ersten Induktionswirkungen, die Saraday feststellte, läßt sich mit der Spule Abb. 8 und einem Stabmagneten zeigen. Schaltet man statt der Stromquelle zwischen die Spulenden ein mäßig empfindliches Galvanometer, so sieht man dieses nach einer Seite ausschlagen, sobald man ein Ende des Stabmagneten schnell in die Spule einführt. Bleibt der Magnet dann ruhig in der Spule, so geht das Galvanometer in seine Anfangslage zurück, es schlägt dagegen umgekehrt aus, wenn man den Magnetstab schnell aus der Spule herauszieht, aber immer nur, solange die Bewegung dauert. Dasselbe, aber in umgekehrter Folge der Ausschläge, tritt ein, wenn man den anderen Pol des Magneten zum Induzieren der Spule benutzt. Es ändert sich auch nichts, wenn der Magnet festgestellt und die Spule schnell über einen Pol geschoben und wieder abgestreift wird, es kommt nur auf die relative Bewegung der beiden Körper an.

Dem Anfänger kann nicht genug geraten werden, solche Grundversuche, die sich mit den bescheidensten Mitteln ausführen lassen, selbst anzustellen. Sie gewähren ihm eine lebendige Anschauung in der anfangs verwirrenden Menge der Tatsachen und gewöhnen ihn allmählich, verwickeltere Erscheinungen auf ihre Grundursache zurückzuführen. Jedes wirkliche Lernen ist ein Nachempfinden und Verstehen des Entwicklungsganges, der den Zusammenhang der Einzelheiten veranschaulicht, und nichts fördert mehr das Vorstellungsvermögen als das selbständige, zielbewußte Vorbereiten und Ausführen einzelner Versuche.

Es war also Saraday gelungen, den elektrischen Strom auf elektromagnetischem Wege herzustellen, durch relatives Bewegen von Magneten in der Nähe geschlossener leitender Bahnen. Saraday selbst fand auch gleich, wie schon angedeutet, eine Reihe von Umformungen der ersten Beobachtung. Er vermochte das, weil er schon lange eine Vorstellungsreihe von der Wirkung elektrischer und magnetischer Kräfte in sich trug, die eine gleichartige Erklärung der verschiedenen Formen ermöglicht und zu einem unentbehrlichen Werkzeuge in der Forschung und Technik geworden ist.

Saraday war die lebendige Verneinung alles Schulgerechten, und von der formalen Mathematik kannte er so gut wie nichts. Ein Mathematiker war er trotzdem, wie ihm auch seine berühmten Landsleute Clerk Maxwell und William Thomson bezeugt haben, nur wich seine mathematische Sprache von der üblichen ab. Wie schon erwähnt, befriedigte Saraday die einfache Annahme von der Fernwirkung nicht, weil sie unserem Empfinden zu wenig entspricht und weil sie auch manchen von Saraday beobachteten Tatsachen nicht wohl angepasst werden konnte. Im Gegensatz dazu nahm Saraday die Übertragung durch das Zwischenmittel an, als solches im leeren Raume den schon in der Optik zur Erklärung herangezogenen Äther. Das Zwischenmittel soll dabei durch die elektrisierten oder magnetisierten Körper in eigentümliche Spannungszustände versetzt werden, die man sich verschiedenartig vorstellen mag, deren Annahme aber dazu führt, nicht nur die Wirkung in einzelnen Punkten der Umgebung zu betrachten, sondern sich eine Vorstellung der Gesamtwirkung zu machen, ein Bild des ganzen elektrischen oder magnetischen „Feldes“ zu schaffen. Das ist der Ursprung der Saradayschen Kraftlinientheorie.

### Saradays Kraftlinien.

Die Richtung der resultierenden Kraft an einer beliebigen Stelle der Umgebung von Magneten oder Stromleitern kann man immer durch eine Magnetnadel feststellen, die mit ihrer Mitte an die betreffende Stelle gebracht wird. Bei einem sehr langen und sehr dünnen Stabmagneten kann man die Pole annähernd als weit voneinander entfernte magnetische Punkte ansehen und die von ihnen ausgehenden Kräfte in Ebenen senkrecht zur Stabachse für sich betrachten. Einen solchen, etwa nordmagnetischen Punkt zeigt Abb. 10. An jeder Stelle der durch ihn gelegten Ebene zeigt das Südende einer anderen Nadel nach ihm hin, bewegt man die Nadel in der von ihr selbst angegebenen Richtung, so beschreibt man gerade Linien, die von dem magnetischen Punkte strahlenförmig ausgehen. Diese Linien heißen Kraftlinien, sie stellen in ihrer Gesamtheit ein Bild des magnetischen Feldes in der betrachteten Ebene dar, und da keine Stelle gegenüber ähnlich gelegenen bevorzugt ist, so wird man schon aus Symmetriegründen das Kraftlinienbild aus einer Anzahl gleichmäßig verteilter Strahlen hergestellt ansehen. Die



Abb. 10.



Pfeile in den Strahlen deuten nach der getroffenen Vereinbarung die Richtung an, in der das Nordende der Prüfnadel von dem angenommenen Nordpole abgestoßen wird.

Wesentlich verwickelter wird das Bild für zwei einander nahe, entgegengesetzte Pole, die also nicht mehr einzeln betrachtet werden dürfen. Diese Pole können, unter vereinfachenden Annahmen, die Enden eines Hufeisenmagneten sein, oder auch verschiedenen Magneten angehören (Abb. 11). An jeder Stelle des Feldes stellt sich die Nadel unter der gleichzeitigen Wirkung der Zug- und Druckkraft ein, die jeder ihrer Pole von den Feldpolen erfährt. Nur in der Verbindungslinie und ihren Verlängerungen weist die Nadel genau auf die (immer punktförmig zu denkenden) Feldpole selbst, an allen anderen Stellen geht ihre Richtung mehr oder weniger weit

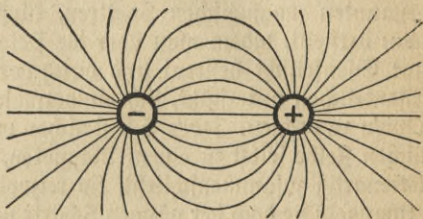


Abb. 11.

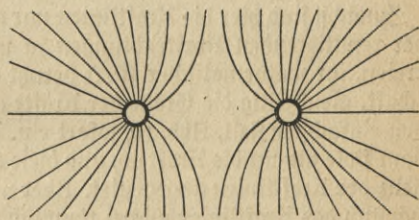


Abb. 12.

davon vorbei. Würde man nun von beliebiger Stelle ausgehend die Nadel so bewegen, daß man immer genau ihrer jeweiligen Richtung folgte, so erhielte man eine der gezeichneten Kurven als Kraftlinie, die durch die gewählte Stelle hindurch von Pol zu Pol geht. In dieser Weise kann man sich die ganze Kurvenschar hergestellt denken. Da, wo die von einem Pole ausgehenden bzw. in ihn eintretenden Kraftlinien ganz oder nahezu in den Verlängerungen der Verbindungslinie der Pole liegen, muß man sich für diese abirrenden „Streulinien“ einen in der Figur nicht sichtbaren Gegenpol vorstellen, als solchen teilweise auch einen der Erdpole.

Das Kraftlinienbild Abb. 11 gilt auch annähernd für einen Stabmagneten, wobei die kürzesten Linien in dem Stabe selbst verlaufen würden, ebenso auch für elektrostatische Kräfte, auf die wir hier aber nicht näher eingehen. Nach demselben Verfahren erzeugt zeigt Abb. 12

das Kraftlinienbild von zwei ebenfalls gleichstarken, aber gleichnamigen Polen. Die zunächst nur für eine bestimmte Ebene gezeichneten Bilder geben in den meisten Fällen schon einen genügenden Anhalt zur Beurteilung der räumlichen Verteilung der Kraftlinien. In weniger einfachen Fällen sind Bilder in mehreren Ebenen zu entwerfen.

Eine grobe Darstellung des Kraftlinienverlaufes gewähren die sogenannten magnetischen Spektren, künstliche Kraftlinienbilder, die man herstellt, indem man über die Pole ein Kartonblatt legt, dieses mit Eisenfeilicht bestreut und durch vorsichtiges Klopfen daran die Eisenteilchen unterstützt, sich einigermaßen in zusammenhängenden Linien zu ordnen. Jedes Eisenteilchen wird nämlich in dem magnetischen Felde selbst zu einem Magneten, der sich mit dem Nachbar kettenartig zusammenschließt. So reizvoll solche Gebilde oft sind, so ermangeln sie doch der nötigen Schärfe und tragen deshalb selten zur tieferen Einsicht bei.

Zunächst sind hier die Kraftlinien nur als übersichtliche Darstellung der resultierenden Kraftrichtungen in magnetischen Feldern aufgetreten, ihr mathematischer Wert beruht aber in der weiteren Eigenschaft, gleichzeitig die Größe der Kräfte anzuzeigen. Das leuchtet für den einfachsten Fall, Abb. 10, sofort ein. Mit zunehmendem Abstände vom Pole nimmt die Kraft ab, und diese Abnahme ist durch die Divergenz der Kraftlinien angedeutet. Aber nicht nur das. Stellt man sich nämlich das Kraftlinienbüschel räumlich vor, betrachtet man also den punktierten Kreis als Schnitt einer Kugel und die Kraftlinien als Radialen einer solchen, so erkennt man, daß durch einen bestimmten Teil der dem Pole umschriebenen Kugeloberfläche, etwa durch  $1 \text{ cm}^2$ , in demselben Maße weniger Kraftlinien hindurchgehen, wenn man den Kugelradius wachsen läßt, wie die magnetische Kraft in bekannter Weise abnimmt. Denn die Kugeloberfläche nimmt quadratisch mit dem Radius zu, die Kraft umgekehrt quadratisch mit der Entfernung vom Pole ab. Die Anzahl der durch die Flächeneinheit von Kugeln verschiedener Radien tretenden Kraftlinien gibt unmittelbar das Gesetz an, wie sich die Kräfte im Verlaufe der Kraftlinien ändern, und es bedarf deshalb nur der Wahl zweckmäßiger Einheiten, um aus dem Kraftlinienbilde für jede Stelle die Richtung und auch die Größe der dort herrschenden magnetischen Kraft zu entnehmen.

In dem betrachteten einfachsten Falle leistet nun allerdings die Kraftlinientheorie nicht mehr als die ältere Methode der Rechnung,



aber man kann aus der Betrachtung dieses Feldes richtige Grundgesetze für die Deutung von Kraftlinienbildern überhaupt entnehmen: Divergenz der Kraftlinien zeigt immer die Abnahme der magnetischen Kraft im Sinne der Divergenz an, parallele Kraftlinien sind der Ausdruck gleichmäßiger Kraft über die entsprechende Strecke, die Dichte der Kraftlinien an verschiedenen Stellen gibt Vergleichswerte für die dort herrschenden Kräfte.

Der Nutzen der Kraftlinienbilder, die alle Verhältnisse des Feldes mit einem Blicke übersehen lassen, leuchtet danach ein. Der immer rein physikalisch denkende Faraday würde die Methode kaum geschaffen haben, wenn sie sich nicht aus mechanischen Analogien entwickeln ließe. Gewisse mechanische Systeme zeigen nämlich ähnliche Gesetzmäßigkeiten in ihrem Wirkungsbereiche, wie die elektrischen und magnetischen Felder, und da die mechanischen Erscheinungen unserer Vorstellung am meisten zugänglich sind und überhaupt die Brücke zum Ordnen und Übersehen aller unseren Sinnen nicht faßbaren Erscheinungen bilden, so sind wir geneigt und berechtigt, Eigenschaften der mechanischen Systeme als analoge Eigenschaften ganz anderer Energieformen zu deuten. Faraday, wie wir wissen, sah in dem Zwischenmittel den Überträger oder richtiger den eigentlichen Ort der elektrischen und magnetischen Energie, und die Vorstellung von Spannungen des Zwischenmittels ließ ihn an die Spannungen elastischer Körper denken, immer natürlich nur als Analoga, die nicht das eigentliche Wesen der neuen Erscheinungen darstellen, wohl aber beim Ergründen ihrer verschiedenen Formen dienlich sein sollten. Als mechanisches Bildungsgesetz für die Kraftlinienscharen gab er an: Jede Kraftlinie sucht sich zu verkürzen, gleichgerichtete Kraftlinien stoßen sich ab. Stellt man sich daher die Kraftlinien etwa als elastische Gummischnüre vor, die von Pol zu Pol gespannt sind (Abb. 11), so wird das Bild mechanisch sofort verständlich: Die inneren Kraftlinien, die den gesamten Querdrucl der weiter nach außen liegenden erfahren, sind infolgedessen einander am nächsten gerückt, die äußeren haben wegen des geringeren Querdrucl'es mehr seitlichen Spielraum. Für die im Bilde sich nicht mehr schließenden Kraftlinien muß die zweite Haftstelle außerhalb des Systems angenommen werden. Mit Hilfe derselben Vorstellung kann man sich das Bild Abb. 12 entstanden denken, indem man zwei gleichnamige Pole nach Abb. 10 nahe zusammenbringt: Die von den gleichnamigen Polen ausgehenden (in diesem Sinne gleichgerichteten) Kraft-

linien stoßen sich ab, sie drängen sich gewissermaßen, um Platz zum Erreichen äußerer Anschlußpunkte zu gewinnen. Im Gegensatze zu Abb. 11, wo die dichtesten Kraftlinien nahe der Verbindungslinie der Pole sind, ist in Abb. 12 diese Stelle fast linienfrei und in der Mitte daher auch kraftfrei.

Die Versinnlichung der Kraftlinienbilder durch die Formen von Bündeln aus elastischen Schnüren zeigt doch eine Lücke, sie läßt nämlich den Pfeil der Kraftlinien nicht hervortreten, beide Richtungen von Pol zu Pol erscheinen gleichwertig, und der Versuch, in dem Bilde noch bestimmte Richtungen zum Ausdruck zu bringen, führt zu Verwicklungen. Es ist aber natürlich erwünscht, neben der handgreiflichsten, wenn auch nicht ganz zureichenden Vorstellung ein in jeder Hinsicht getreues Analogon zu haben, das in schwierigen Fällen auch zuverlässiger ist. Dazu hat Maxwell, der sich den mathematischen Ausbau der Kraftlinientheorie besonders hat angelegen sein lassen, die Bewegungsformen von Flüssigkeiten benutzt, wovon die folgenden Bemerkungen eine Andeutung geben mögen.

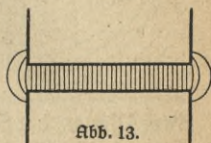
Wenn in Abb. 10 der Pol die Mündung eines dünnen Rohres wäre, die überall von feinem Sande umgeben sei, so würde unter mäßiger Geschwindigkeit (damit die Lagerung der Sandkörner nicht gestört werde) aus der Rohröffnung tretende Flüssigkeit sich gleichförmig in die Kapillaren des Sandes verteilen. Jedes Flüssigkeitsteilchen bewegt sich radial nach außen, aber mit abnehmender Geschwindigkeit, und mit der schon vorher in bezug auf Abb. 10 gebrauchten Schlußweise erkennt man wieder, daß die Geschwindigkeit umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes von der Rohrmündung ist. Die Geschwindigkeit der Flüssigkeit an bestimmten Stellen folgt also demselben Gesetze, wie die magnetischen Kräfte in dem analogen Felde. Man kann in diesem Beispiele die Vorgänge rein gedanklich verfolgen, es sind aber vielfach wirkliche Versuche angestellt, bei denen einzelne Stromfäden, die dann unmittelbar Kraftlinien darstellen, durch eingeführte kleine Mengen von Farblösungen in Schnitten des sandgefüllten Raumes sichtbar gemacht wurden. In schwierigeren Fällen kann dieses Verfahren sehr zum Verstehen der Einzelheiten beitragen.

Wie man das Analogon der Flüssigkeitsbewegung auf das Bild Abb. 11 zu übertragen hat, ist leicht zu erkennen. Man braucht sich nur den Nordpol als Quellpunkt vorzustellen, wie vorher, den Südpol dagegen als ansaugende Sinkstelle. In ähnlicher Weise würden in Abb. 12



beide Pole als Quellpunkte zu deuten sein (oder auch beide als Saugpunkte), in dem linienfreien Zwischenraume bleibt die Flüssigkeit in Ruhe, wie in dem analogen magnetischen Felde dort keine Kraft wirkt.

Die große Anschaulichkeit der Kraftlinientheorie und die Fähigkeit, die sie verleiht, sobald man sich etwas in sie eingelebt hat, bei jeder Aufgabe sich rein empfindungsmäßig schnell ein Bild von den Kraftwirkungen zu machen, zeigt sich schon in ihren ersten Elementen, auf die wir uns hier beschränken mußten. So wird der in Abb. 13 dargestellte, in der Elektrotechnik besonders häufige Fall gleich verständlich sein, wenn man sich die einander nahen großen Polflächen in kleine Teile zerlegt denkt und jeden davon als Ausgangs- bzw. Endpunkt einer bestimmten Zahl von Kraftlinien ansieht, als wenn man eine Reihe dicht nebeneinander gerückter Polpaare hätte, die einzeln ein Bild nach Abb. 11 ergäben. Die Kraftlinien haben dann keinen Platz mehr zum seitlichen Ausbreiten, sie werden in die Hauptrichtung zusammengedrängt, und das Feld zwischen den Polflächen kann in seiner größeren Ausdehnung als gleichförmig angesehen werden, weil die Kraftlinien parallel laufen. Nur an den Kanten der Polflächen buchten sich die Kraftlinien aus, um in mehr oder weniger weitem Bogen an den Seitenflächen der Pole anzuschließen. Will man hier das Analogon der Stromlinien anwenden, so kann man sich die Pole auch als Flüssigkeitsbehälter mit Überdruck bzw. Unterdruck vorstellen, die Begrenzungsflächen etwa als Siebe, die wieder von feinem Sande eingehüllt sind. Die Stromfäden bilden sich am dichtesten aus an den Stellen geringsten Widerstandes, also zwischen den einander nahen Polflächen, die Dichte nimmt an den Seiten wegen der steigenden Weglänge entsprechend schnell ab.



Die gleichen Überlegungen, die zu den Kraftbildern in der Nähe der Magnete führten, gelten auch für die magnetischen Felder der Stromleiter. Die Kraftlinien umschlingen den Leiter, wie Abb. 5 in der einzelnen kreisförmigen Kraftlinie für einen sehr langen Leiter andeutet. Die magnetische Kraft, also die Dichte der Kraftlinien, nimmt selbstverständlich mit der Entfernung vom Leiter ab, nach welchem Gesetze, werden wir später sehen. Ein System solcher Kraftlinien zeigt Abb. 14 in einer Ebene senkrecht zum Leiter. Dieser ist durch den innersten Kreis dargestellt, das Kreuz darin bedeutet das Gefieder

Die gleichen Überlegungen, die zu den Kraftbildern in der Nähe der Magnete führten, gelten auch für die magnetischen Felder der Stromleiter. Die Kraftlinien umschlingen den Leiter, wie Abb. 5 in der einzelnen kreisförmigen Kraftlinie für einen sehr langen Leiter andeutet. Die magnetische Kraft, also die Dichte der Kraftlinien, nimmt selbstverständlich mit der Entfernung vom Leiter ab, nach welchem Gesetze, werden wir später sehen. Ein System solcher Kraftlinien zeigt Abb. 14 in einer Ebene senkrecht zum Leiter. Dieser ist durch den innersten Kreis dargestellt, das Kreuz darin bedeutet das Gefieder

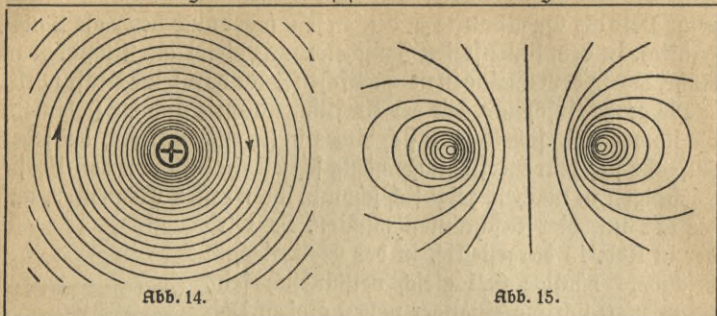


Abb. 14.

Abb. 15.

eines Pfeiles, der Strom ist also vom Beschauer fortfließend angenommen, die Kraftlinien haben die Richtung des Uhrzeigers. Mechanisch erläutert kann dieser einfachste Fall des Strommagnetismus wiederum durch elastische Schnüre werden, die mit gleicher Längsspannung übereinandergelegt sind.

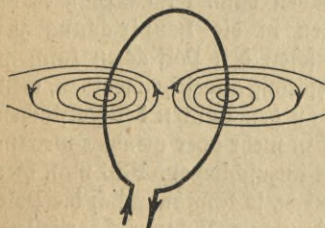


Abb. 16.

Wie Abb. 12 das Gegenstück zu Abb. 14 bildet, so entspricht Abb. 11 der Abb. 15. Diese gibt einen Schnitt durch einen kreisförmigen Leiter. Zu weiterer Verdeutlichung ist dieser wichtige Fall in Abb. 16 noch perspektivisch dargestellt. Aus welchem Grunde hier die Kraftlinien nicht mehr konzentrische Kreise um den

Leiter sind, erklärt sich leicht aus dem Früheren.

Um über die Kraftlinienbilder von Solenoiden Aufschluß zu erhalten, in denen Leiter mit gleichgerichteten Strömen parallel laufen, betrachtet man zweckmäßig zunächst zwei solcher Leiter im Schnitte Abb. 17. Die Leiter haben bei ihrem erheblichen Abstände voneinander jedenfalls gesonderte Systeme von umschlingenden Kraftlinien in ihrer nächsten Nähe, in der Abbildung nur durch je eine Linie angegeben. Wie man sieht, ist ihre Richtung in dem Raume zwischen den Leitern entgegengesetzt, die Kraftlinien suchen sich hier also gegenseitig aufzuheben, denn sie bedeuten ja entgegengesetzte Kräfte. Jedenfalls kann bei gleichstarken Strömen in der Mitte zwischen den Leitern keine Kraftlinie bestehen. Andererseits können die beiden Leiter in ihrer gemeinschaft-



Abb. 17.



lichen Wirkung auf die weitere Umgebung zusammen betrachtet werden, angedeutet durch gemeinschaftlich sie umschlingende Kraftlinien. Es gehört nur wenig Phantasie dazu, sich das Kraftbild zu vervollständigen. Die gemeinschaftlichen Kraftlinien werden um so mehr die Kreisform annehmen, je größeren Abstand sie von den Leitern haben, als Übergangsform zwischen diesen Kreisen und den engen Eigenkreisen der Leiter ist die in der Abbildung angegebene äußere Kurve anzusehen. Je näher die Leiter aneinanderrücken, um so mehr verschwindet für die Umgebung der Unterschied zwischen den drei Systemen von Kraftlinien, bis zuletzt die Leiter sich ganz vereinen und nur noch die gemeinschaftlichen Kraftlinien verbleiben. Das Bild ändert sich nicht wesentlich, wenn mehr als zwei parallele Leiter vorhanden sind, und man kann es deshalb unmittelbar übertragen auf ein Solenoid Abb. 18, dessen Längsschnitte zwei Reihen von Leiterquerschnitten darstellen. Die Ergänzung des Bildes für die Spule vollzieht sich fast von selbst, man sieht, wie sich ein Teil der Kraftlinien durch die Zwischenräume der Windungen schließt, wie aber die Hauptmasse längs des Solenoides streicht, gewissermaßen von den Windungen zusammengeschnürt ist, wie ferner durch dichtere Lage der Windungen die Nebenkraftlinien vermindert werden, so daß beim Zusammenführen der Windungen bis zur Berührung (wenn das zulässig wäre) nur ein großes gemeinschaftliches Kraftlinienbündel verbleiben würde.

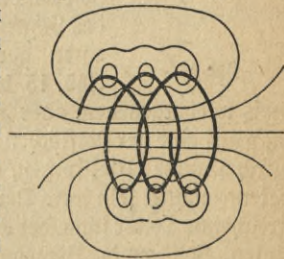


Abb. 18.

Aus den Eigenschaften der Kraftlinien erklärt sich auch die früher schon erwähnte, von Ampère festgestellte Tatsache der Anziehung gleichgerichteter Ströme. Das Solenoid erfährt durch das Kraftbündel ersichtlich einen resultierenden Druck im Sinne des Verkürzens der Achse. Wie für zwei einzelne Leiter sich die Anziehung erklärt, ist aus dem Verschwinden von Kraftlinien zwischen ihnen aus Abb. 17 leicht zu entnehmen. Ebenso einfach würde sich mit Hilfe der Kraftlinien das gegenseitige Abstoßen ungleich gerichteter Ströme ergeben.

### Induktionsregeln und Strommaschinen.

Ein erheblicher Nutzen der Faradayschen Kraftlinienbilder zeigt sich jetzt in der Möglichkeit, alle Induktionserscheinungen in einheitlicher Form zu beschreiben. Denn wie wir sehen werden, ist die vorläufig gegebene Regel, ein Leiter müsse in der Nähe von Magneten relativ bewegt werden oder, wie wir jetzt sagen können, in magnetischen Feldern, nur bedingungsweise richtig. Noch nicht vollständig hinreichend,

aber schon wesentlich weiterführend ist die Regel: Die Leiter müssen zum Induzieren so bewegt werden, daß Kraftlinien geschnitten werden. Ein solches Schneiden findet ersichtlich statt, wenn man, wie früher erwähnt, einen Magnetpol in das Solenoid hineinstößt. Denn dabei wurden die annähernd nach Abb. 10 geordneten Kraftlinien von den Solenoidwindungen geschnitten. Am deutlichsten tritt das Schneiden der Kraftlinien hervor, wenn man einen geraden Leiter quer durch ein Feld nach Abb. 13 bewegt. Dieses Feld ist in Abb. 19 noch-

mals wiedergegeben, aber in einer um  $90^\circ$  gedrehten Ansicht, so daß man auf eine der Polflächen sieht, und zwar auf die Nordpolfläche, was durch Punkte (Pfeilspitzen, die Richtung der Kraftlinien andeutend) gekennzeichnet sein soll. Der über die Polfläche von rechts nach links streichende Leiter schneidet auf seinem Wege nacheinander alle Kraftlinien. Solange die Bewegung dauert, wird in dem Leiter eine Spannung zwischen zwei durch das Feld getrennten Punkten geweckt, wie durch die chemischen Kräfte in der Voltaschen Säule, und wenn der Leiterkreis geschlossen ist, etwa durch ein Galvanometer oder ein anderes Gerät, so bildet sich nach Maßgabe der induzierten Spannung ein Strom aus. Die erste Frage dabei wird der Richtung der Spannung und des Stromes gelten. Darüber gibt ganz allgemein die von Lenz schon 1834 ausgesprochene Regel Auskunft, die unter Benutzung des Grundgedankens des Energiegesetzes sich folgendermaßen entwickeln läßt.

Wenn durch Bewegen von Leitern in magnetischen Feldern ein Strom erzeugt wird, der, wie Ströme anderer Herkunft, in dem Schließungskreise mit Hilfe von Elektromagneten mechanische Arbeit leisten kann oder irgendwelche andere Wirkungen äußert, so muß dafür beim Erzeugen des Stromes eine äquivalente Energiemenge aufgewendet

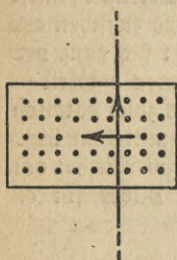


Abb. 19.



werden. Diese kann hier nur mechanischer Art sein, da außer der Verschiebung der beim Stromerzeugen ins Spiel tretenden Teile keine weiteren Änderungen nachzuweisen sind. Dem relativen Bewegen der Leiter im Felde muß sich also Widerstand entgegensetzen, der durch den mechanischen Antrieb des Leiters zu überwinden ist, und ein solcher Widerstand ist nur in der Kraft zu suchen, die das Feld auf den stromdurchflossenen Leiter ausübt. Das Lenzsche Gesetz lautet demnach: Beim Antriebe eines Leiters durch ein Feld hindurch unter Schneiden von Kraftlinien wird eine Spannung von solcher Richtung induziert, daß der ruhende Leiter in Folge eines durchgesandten Stromes gleicher Richtung sich nach der entgegengesetzten Seite zu bewegen sucht.

Bei der durch den Strompfeil in Abb. 19 angezeigten Stromrichtung würde sich der Nordpol unter dem Leiter nach der Schwimmerregel oder der Rechtenhandregel (Abb. 3) nach links zu bewegen suchen, der Leiter selbst (Wechselwirkung) nach rechts, also wird beim Antriebe des Leiters nach links (Bewegungspfeil) die induzierte Spannung die Richtung des Pfeiles im Leiter haben.

Die Grundlage für die Richtungsregel nach Lenz läßt sich auch so verdeutlichen: Würde der induzierte Strom eine solche Richtung haben, daß der Leiter seitens des magnetischen Feldes einen Antrieb in demselben Sinne erführe wie durch die äußere bewegende Kraft, so könnte diese ganz entfallen, und es würde Energie ohne ein Äquivalent entstehen. Die induzierte Stromrichtung muß also umgekehrt sein.

Die Handhabung der Richtungsregel nach Lenz ist meist sehr einfach. Wenn ein beweglicher Teil eines Leiterkreises einem festen stromführenden Leiter so genähert wird, daß er dessen zirkulare Kraftlinien schneidet, so muß der induzierte Strom dem induzierenden entgegengesetzt sein, denn gleichgerichtete Ströme würden sich anziehen. Umgekehrt wird aus demselben Grunde beim Entfernen der Leiter voneinander der induzierte Strom gleichsinnig dem induzierenden sein, denn nur durch Überwinden der Anziehung wird als Äquivalent für die beim Induzieren entstehende Stromenergie mechanische Arbeit aufgewendet. Hinsichtlich der Stromrichtung gilt daselbe, wenn das Nähern oder Entfernen der beiden Leiter nicht körperlich, sondern elektromagnetisch ausgeführt wird, wenn nämlich die Leiter fest nebeneinanderliegen und in dem induzierenden der Strom geschlossen und geöffnet wird. Die induzierenden Kraftlinien bilden sich bei Stromschluß um ihren Leiter so aus, als wenn der induzierte Leiter von

außen in das schon bestehende Feld eingeführt würde, dem Stromöffnen dagegen entspricht das Schneiden des induzierten Leiters durch die Kraftlinien des einschrumpfenden Feldes. Es macht dabei keinen Unterschied, ob die Leiter gestreckt oder gewunden sind, beispielsweise rahmenartig nach Abb. 7, schraubenförmig nach Abb. 18. In allen solchen Fällen der Induktion bei unbeweglichen Leitern wird allerdings keine mechanische Arbeit aufgewendet. Das Äquivalent für den induzierten Strom ist hier vielmehr in der Stromquelle des induzierenden Leiters zu suchen, die Induktionseinrichtung bildet dabei nur einen Übertrager der anderweitig erzeugten Energie.

In den bisherigen Beispielen wurde die in Frage kommende Leiterstrecke nur in einem Sinne induziert, es können aber verschiedene Stellen auch entgegengesetzte Spannungen erhalten, die sich unter Umständen ganz aufheben.

Stillschweigend sind bisher als Strombahnen immer verhältnismäßig dünne Drähte angenommen, die Induktion äußert sich aber natürlich auch in zusammenhängenden ausgedehnteren Metallmassen, und zwar meist in unliebsamer Weise. Ein Magnetpol, der senkrecht gegen eine Metallscheibe zu bewegt wird, induziert in dieser ebenfalls zirkulare Ströme, deren Bahnen in sich zurücklaufen. Die Ströme werden also nicht an eine Verbrauchsstelle zu zweckdienlicher Verwendung weitergeleitet, sondern erzeugen unnütz Wärme und stellen überhaupt schädliche Wirkungen dar. Ähnliches tritt ein, wenn der Strom in einem Leiter in der Nähe von Metallmassen Stärke und Richtung wechselt, das fortwährend innerhalb der Metallmassen sich ändernde Stromkraftfeld gibt wieder zu unbeabsichtigten induzierten Strömen Anlaß. Wenn statt eines linearen Leiters eine Metallplatte durch ein Magnetfeld gezogen wird, so werden sich meist einzelne Abschnitte der Platte in dichteren Feldteilen befinden als andere. Die induzierten Spannungen in der Platte selbst sind dann verschieden, zum Ausgleich bilden sich wieder in sich geschlossene Strombahnen mit schädlicher Wirkung. Das Streben, diese durch besondere Maßnahmen tunlichst zu vermeiden, hat einen wesentlichen Einfluß auf die Ausbildung der elektrischen Maschinen.

Induktion entsteht, wie wir sahen, nur während der Änderung des Feldes in der Umgebung eines Leiters, bei jeder relativen Bewegung zeigt ein eingeschaltetes Galvanometer immer nur einen einzelnen Stromstoß an. Hier lag nun in der Tat nahe, durch wiederholte Be-



wegungen eine Reihe von Stromstößen und damit eine Wirkung von beliebiger Dauer zu erzeugen, zum gleichmäßigen und bequemen Ausführen der Bewegungen das System auch zu einer vollständigen Maschine auszugestalten. Solche Maschinen entstanden auch bald nach Bekanntwerden der Faradayschen Entdeckungen. Gemeinsam waren ihnen allen Dauermagnete von hartem Stahle, die das magnetische Feld bildeten, und vor deren Polen sich in möglichst schneller Folge die induzierten Spulen drehten. Diese unter starker Übersetzung ins Schnelle von Hand bewegten Maschinen waren lange Zeit fast nur Gegenstände der physikalischen Sammlungen, bis sie 1856 Werner Siemens als Stromgeber in die Telegraphie einführte und ihnen dabei gleichzeitig eine in mechanischer wie elektrischer Hinsicht äußerst glückliche Form gab. Zwischen den an den Polen kreisförmig ausgesparten Stahlmagneten (Abb. 20) dreht sich der zylindrische Anker, bestehend aus einem Körper in Form eines Doppel-T von weichem Eisen, in der Längsrichtung zwischen den Köpfen mit vielen fortlaufenden Windungen isolierten Drahtes bewickelt. Die Enden des Drahtes sind an Schleifringe auf der Achse geführt, von denen feststehende Schleiffedern den Strom abnehmen. Die Rolle des weichen Eisentkörpers wird weiterhin klarwerden, jedenfalls erkennt man, daß bei jeder Umdrehung die von einem Feldpole zum andern gehenden Kraftlinien von den Leitern der Ankerwicklung unter Zusammentreten ihrer Wirkungen geschnitten werden. Die Richtung der Ströme ist bei bekannter Richtung des magnetischen Feldes und gegebenem Drehsinne des Ankers nach der früher entwickelten Regel zu bestimmen. Der Anker hatte immer ein Mehrfaches seines Durchmesser zur Länge, das Magnetsystem bestand aus einer entsprechend großen Zahl einzelner flacher, nebeneinander gereihter Hufeisen von Stahl. So ist die Maschine auch heute noch, ein seltenes Beispiel der unveränderten Dauer einer Maschine durch ein halbes Jahrhundert, denn sie dient in umfangreichem Maße den verschiedensten Gebieten der Signaltechnik und hat als Zündmaschine für die Benzinmotoren sogar noch eine erhöhte Bedeutung erlangt, dank ihrer gedrungnen Form und zuverlässigen Arbeit. Für größere Leistungen kam sie nach Erfindung der dynamoelektrischen Maschine nicht mehr in Frage, ihr Anker ist aber das Vorbild für den Trommelanker



Abb. 20.

der jetzigen elektrischen Maschine gewesen. Auch als Mittel zum Veranschaulichen haben die Handmaschinen einigen Wert. So kann man leicht feststellen, daß sich die Maschine sehr leicht bei offenem Stromkreise drehen läßt, viel schwerer aber, wenn die Klemmen durch einen Leiter verbunden sind, in dessen Temperaturerhöhung man das Äquivalent der mehr aufgewendeten mechanischen Arbeit beim Drehen erkennt.

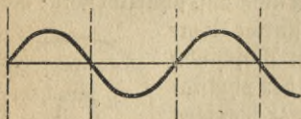


Abb. 21.

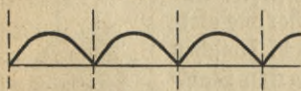


Abb. 22.

Die Voltasche Säule liefert Strom stets derselben Richtung, die sich aus der Reihenfolge der Platten ergibt. Bei der Maschine Abb. 20 wechselt mit jeder halben Umdrehung die Lage der induzierten Pole vor den festen Polen der Stahlmagneten, infolgedessen auch die Richtung des induzierten Stromes in der Wicklung. Bei jedesmaligem Wechsel

der Richtung muß also der Strom den Wert Null annehmen, und man erhält als Strombild eine Wellenlinie Abb. 21, in der die wagrechte Achse den zurückgelegten Weg der induzierten Pole oder auch die Zeit bedeutet, während die Ordinaten oberhalb und unterhalb der Wagrechten die wechselnde Stromrichtung anzeigen. Da der Wechsel sehr schnell vor sich geht, so kann man den Strom nicht mehr an einem Galvanometer mit schwingendem, permanentem Magneten erkennen, der wegen seiner Trägheit den Richtungsänderungen des Stromes nicht folgen kann und höchstens in ein unbestimmtes Zittern gerät. Versieht man aber die Maschine mit einem sogenannten Kommutator, zwei Paaren von Halbringen mit geeigneten Verbindungen unter sich, so kann man in dem äußeren Kreise, statt des Wechselstromes nach Abb. 21, pulsierenden Gleichstrom nach Abb. 22 erhalten, der ähnliche Schwankungen in der Stärke zeigt wie jener, nicht aber seine Richtung ändert, bei schneller Folge der einzelnen Stromstöße auch auf das Galvanometer annähernd so wirkt wie vollkommener Gleichstrom. Um auch für Wechselstrom geeignet zu sein, muß das Galvanometer umgestaltet werden, und davon kann man sich eine vorläufige Vorstellung machen, wenn man sich in Abb. 4 die Magnetnadel durch einen äquivalenten, also den festen kreuzenden Stromrahmen ersetzt denkt, der ebenfalls beweglich aufgehängt ist und bewegliche Stromzuleitung hat. Bilden dann die Stromrahmen einen



zusammenhängenden Leiterkreis, so wechselt der Strom in beiden gleichzeitig seine Richtung, und der Wechselstrom ergibt nun ebenfalls einen Ausschlag nach einer bestimmten Richtung, je nach der Verbindung der Stromrahmen unter sich.

## II. Gleichstrom.

### Gesetz von Ohm mit Anwendungen.

Das Ohmsche Gesetz gibt den Zusammenhang an zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand. Das Gesetz ist so einfach, daß man sich, will man die Leistung von Ohm (1787—1854) gebührend würdigen, vorhalten muß, wie verschwommen die Grundbegriffe z. B. der Entdeckung des Gesetzes (1826) noch waren. Das Ohmsche Gesetz war nicht eine einfache Folgerung aus klar erfaßten Vorstellungen, es brachte vielmehr erst die nötige Begriffstrenge, indem es, durch die Eingebung des Entdeckers den Erscheinungen untergelegt, sich dauernd in aller Schärfe bewährte. Die Bilder Spannung, Widerstand und Strom haben sich somit als zutreffend erwiesen und können für weitere Folgerungen verwendet werden, mögen die uns unbekannteren wirklichen Vorgänge noch so weit von den Bildern abweichen.

Den Grund für die magnetischen, thermischen und chemischen Wirkungen im Stromkreise sehen wir danach in der Stärke des umlaufenden Stromes, der entgegen einem gewissen Widerstande durch elektrische Spannung unterhalten wird. Um dieses Gleichnis aus der Hydraulik den elektrischen Vorgängen ganz anzupassen, stellt man sich am einfachsten zwei auf verschiedenen Höhen befindliche Gefäße vor, die durch ein Rohr verbunden sind. Dieses sei, um einen erheblichen Widerstand darzustellen, wieder mit Sand gefüllt. Der Unterschied der Flüssigkeitshöhe (der unveränderlich sein soll) in den beiden Gefäßen bewirkt einen gleichmäßigen Strom durch das Rohr. Ist dabei die Geschwindigkeit des Stromes so klein, daß seine Bewegungsenergie vernachlässigt werden darf, so wird der ganze Druckunterschied zum Überwinden des Widerstandes im Rohre verbraucht, und die Stromstärke, nämlich die Flüssigkeitsmenge, die in der Zeiteinheit durch einen beliebigen Querschnitt des Rohres geht, ist umgekehrt proportional dem Widerstande. Dem entspricht das Ohmsche Gesetz, das in Zeichen  $i = \frac{e}{w}$  lautet, wobei  $i$  die Stromstärke,  $e$  die Spannungsdifferenz und  $w$  den Widerstand bezeichnet. In diesem Ausdrucke müßte allerdings noch

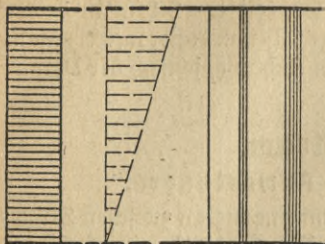


Abb. 23.

ein konstanter Faktor stehen, denn wir können bis jetzt nur von einer Proportionalität sprechen, nicht von einer Gleichheit, die erst eintritt, wenn die Einheiten der Größen entsprechend gewählt werden. Dieser Vorbehalt gilt zunächst auch für das Folgende.

Zum weiteren bildlichen Veranschaulichen des Ohmschen Gesetzes kann das Schema Abb. 23 dienen. Darin ist links

eine Voltasche Säule angedeutet, deren wagrechte Polanschlüsse einen zu vernachlässigenden kleinen Widerstand haben mögen und durch einzelne Leiter verbunden sind. Dann zeigt das gestrichelte Dreieck in seinen wagrechten Linien den allmählichen Abfall der Spannung in den Leitern von Pol zu Pol. Die Säule bildet mit den Leitern den Stromkreis. Da sie dabei selbst dem Stromdurchgange einen gewissen Widerstand entgegensetzt, also einen Teil ihrer Spannung selbst verbraucht, so muß als größte durch das gestrichelte Dreieck gegebene Spannung die beim Stromdurchgange an den Leiterenden gemessene angesehen werden, nicht die immer größere Spannung, die an den Polen der offenen Säule gemessen wird.

Das Schema gibt auch Auskunft über die Art, wie sich der Gesamtstrom auf die einzelnen parallel geschalteten Leiter verteilt. Um sich darüber ein Urteil zu verschaffen, kann man sich, wie rechts in der Abbildung angedeutet, eine größere Anzahl dünner, gleicher Leiter gruppenweise zusammengefaßt denken. Die einzelnen Leiter führen dann den gleichen Strom, und die Leitergruppen können nach Maßgabe der in ihnen enthaltenen gleichen Stromfäden als einheitliche Leiter mit verschiedener Stromstärke angesehen werden. Diese Betrachtung führt von selbst zu der Einsicht, daß der Widerstand eines Leiters umgekehrt proportional seinem Querschnitte ist. Das ist auch unmittelbar aus dem hydraulischen Gleichnisse zu entnehmen, ebenso wie der Einfluß der Leiterlänge auf den Widerstand, der im gleichen Verhältnisse mit der Länge wächst. Auch die schon vor Ohm beobachtete, aber von ihm genauer festgestellte Tatsache des ungleichen Widerstandes von Leitern derselben Abmessungen, aber verschiedenen Stoffes, findet sein Analogon in dem Bewegen der Flüssigkeit durch das Rohr, denn offenbar ändert sich dessen Widerstand mit der Form und Größe



der Sandkörnchen. Der Widerstand eines Leiters wächst also einfach mit der Länge, nimmt ebenso ab mit dem Querschnitte und ist noch abhängig von seiner stofflichen Natur, dem sogenannten spezifischen Widerstande.

Die Stromverteilung bei parallel geschalteten Leitern wird noch deutlicher, wenn man den Begriff des Widerstandes ersetzt durch den reziproken Begriff der Leitfähigkeit. Die ganze Leitfähigkeit einer Stromverzweigung ist zweifellos gleich der Summe der Leitfähigkeiten der einzelnen Leiter, oder, um wieder den Widerstand als maßgebende Größe einzuführen, der reziproke Wert des Gesamtwiderstandes ist gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelwiderstände.

Das Ohmsche Gesetz wird vielfach in der Form  $e = i \cdot w$  benutzt. Diese zunächst nur formale Umgestaltung des Ausdruckes hat ebenfalls einen sachlichen physikalischen Sinn. Während nämlich vorher gefragt wurde, welche Stromstärke in einem Leiter infolge einer gegebenen Spannung entsteht, sagt die neue Form, wie groß die Spannung bei einer verlangten Stromstärke sein muß, nämlich um so größer, je größer der Widerstand des Leiters ist. Diese Auffassung läßt besonders bequem übersehen, welchen Anteil an dem gesamten Spannungsverbrauche einzelne Leiterteile haben, wenn beispielsweise mehrere solcher von verschiedenem Widerstande hintereinander geschaltet sind. Der ganze Widerstand ist dann einfach der Summe der Einzelwiderstände gleich, der Spannungsabfall in einem bestimmten Teile ergibt sich als Produkt der Stromstärke und des betreffenden Teilwiderstandes.

Wenn man den geschlossenen Stromkreis im ganzen einschließlich der Stromquelle betrachtet, so ist das Bild mit den beiden durch ein Rohr verbundenen Gefäßen auf verschiedenen Höhen nicht vollständig. Man vertauscht es dann zweckmäßig mit dem Bilde eines in sich geschlossenen Rohres, in das an einer Stelle etwa eine Schleuderpumpe als Beweger der Flüssigkeit eingeschaltet ist. An dieser Stelle, wo die Pumpe von der einen Seite saugt und nach der anderen drückt, macht der Druck im Rohre einen Sprung, entsprechend einer eingeschalteten elektrischen Spannung in einem Leiterkreise. Man kann dieses Bild leicht vervollständigen durch Einschalten mehrerer Pumpen an verschiedenen Stellen, die alle in gleichem Sinne arbeiten, oder auch teilweise in entgegengesetztem. Für die Stromstärke, die natürlich überall dieselbe sein muß, ist dann die algebraische Summe der Druckkräfte maßgebend. Solche und ähnliche Bilder können bei Beurteilung neuer

schwierigerer Fälle sehr nützlich sein, um einen ersten Überblick zu geben. Verwicklungen treten namentlich ein, wenn beispielsweise bei städtischen Verteilungsnetzen Kreuzungen und Maschenbildungen der Leiter vorkommen. Dann können umfangreiche Rechnungen nötig werden, um die Stromstärken in den einzelnen Abschnitten unter verschiedenen Verhältnissen zu finden, und um die systematische Behandlung solcher Aufgaben haben sich die Mathematiker vielfach bemüht. G. Kirchhoff (1824—1887), der Mitbegründer der Spektralanalyse, hat als Ausgang für solche Rechnungen zwei einfache Grundgesetze aufgestellt, die als allgemeine Fassung des Ohmschen Gesetzes anzusehen sind und hier noch kurz erwähnt werden mögen. Nach dem ersten Satze ist in jedem Knotenpunkte die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der wegfließenden. Das ergibt sich einfach aus der Überlegung, daß in dem Knotenpunkte keine Anhäufung von Elektrizität stattfinden kann. Der zweite Satz entspricht in dem einfachsten Falle dem oben entwickelten hydraulischen Gleichnisse, unter Beachtung der S. 37 erwähnten Schreibweise des Ohmschen Gesetzes  $e = i \cdot w$ . Der Satz selbst lautet: In einem geschlossenen Stromkreise ist die Summe der in ihm wirksamen Spannungen gleich der Summe der Produkte aus der Stromstärke und dem Widerstande der Leiter. Bei der Summierung der Spannungen muß natürlich, wie in dem obigen Gleichnisse, beachtet werden, ob sie alle in demselben Sinne oder sich teilweise entgegenwirken. Übrigens bieten auch die städtischen Wasser- und Gasverteilungsnetze Gelegenheit zu ähnlichen Überlegungen wie die elektrischen, wenn auch bei den letzteren Verfeinerungen eintreten, die dort nicht nötig sind und in Folge der umständlicheren und ungenaueren Meßmethoden auch kaum durchführbar wären. Zu rein mathematischen Untersuchungen hat auch die Stromverteilung in Körpern von solchen Abmessungen und Formen Anlaß gegeben, daß man die Stromfäden nicht mehr einfach parallel verlaufend annehmen darf, wie bei den bisher vorausgesetzten verhältnismäßig dünnen Leitern. Untersuchungen dieser Art führen zu ähnlichen Betrachtungen wie bei den Kraftlinien.

Eine sehr hübsche einfache Anwendung des Ohmschen Gesetzes bildet die als Wheatstonesche Brücke bekannte Leiterverbindung, die ein genaues und schnelles Vergleichen von Widerständen ermöglicht. In der Leiterverzweigung Abb. 24 bedeutet die wagrechte Doppellinie den sogenannten Meßdraht. Ihm parallel und unter sich hintereinander sind



die beiden zu vergleichenden Widerstände geschaltet, zwischen ihnen ist ein Galvanometer angelegt, dessen andere Seite durch einen Gleitkontakt mit einem beliebigen Punkte des Meßdrahtes verbunden werden kann. Die Enden des Meßdrahtes werden auf einer schwachen

Spannungsdifferenz gehalten, etwa durch Verbinden mit den Polen eines oder mehrerer galvanischer Elemente. Ähnlich wie in Abb. 23 ist durch das gestrichelte Dreieck der gleichmäßige Abfall der Spannung längs des Meßdrahtes dargestellt. Derselbe Spannungsabfall vollzieht sich aber in dem von den beiden Widerständen gebildeten Zweige, also werden in diesem und dem Meßdrahte immer je zwei Punkte dieselbe Spannung haben, ein zwischen diese Punkte gelegtes Galvanometer wird keinen Ausschlag zeigen. Man kann nun schnell und sicher den Punkt des Meßdrahtes finden, der dem Anschlußpunkte des Galvanometers zwischen den beiden Widerständen elektrisch entspricht, indem man den Gleitkontakt suchend hin und her schiebt, bis das Galvanometer auf Null steht. Beide Zweige, der Meßdraht und die Widerstände, sind dann hinsichtlich der Widerstandswerte in demselben Verhältnisse unterteilt, denn in den sich entsprechenden Teilen herrscht derselbe Spannungsabfall und man kann einer Skala unter dem Meßdrahte das gesuchte Verhältnis entnehmen. Die Wheatstonesche Messbrücke ist schon bei einfacher Ausführung ein recht genau arbeitendes Gerät und wird wegen ihrer häufigen Verwendung in mancherlei Formen ausgeführt. So werden an Stelle des Meßdrahtes vielfach Widerstände benutzt, die ähnlich wie Gewichtssäbe abgestuft sind, da es ja nur darauf ankommt, in dem Meßzweige ein bestimmt angebbares Verhältnis der Widerstände herzustellen. Die Messmethode gehört zu den sogenannten Nullmethoden der Physik, da das Galvanometer keine bestimmten Werte anzugeben braucht, sondern nur empfindlich genug sein muß, um überhaupt einen Strom anzuzeigen, wenn der Gleitkontakt noch nicht genau auf dem gesuchten Punkte steht. Die eigentliche Messung ist dagegen an gröbere und leichter zu behandelnde Teile der Einrichtung verlegt, und darin besteht der Vorteil solcher Nullmethoden.

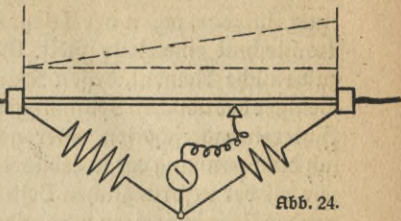


Abb. 24.

Eine weitere aufklärende Anwendung bietet das Ohmsche Gesetz in

einer Aufgabe, die in der Telegraphie und überhaupt in der Schwachstromtechnik eine Rolle spielt. Die wichtigste Stromquelle ist hier das galvanische Element, dessen Spannung nur etwa ein Hundertstel und weniger der üblichen Spannungen in Starkstromnetzen beträgt. Durch Hintereinanderschalten einer gegebenen Zahl von Elementen läßt sich die Spannung der so gebildeten Batterie entsprechend vergrößern, wie bei der ursprünglichen Voltaschen Säule, wie sich aber an dem folgenden Beispiele zeigen wird, gibt die einfache Hintereinanderschaltung

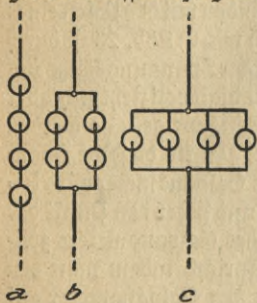


Abb. 25.

keineswegs immer die beste Wirkung, als welche hier die größte zu erzielende Stromstärke erscheint. Es seien, um ganz bescheidene Verhältnisse zu wählen, wie sie etwa die Haus- telegraphie bietet, vier Elemente gegeben. Diese können nach Abb. 25 a alle hintereinandergeschaltet werden, oder nach c parallel, oder nach b gemischt. Der Widerstand des Stromkreises setzt sich zusammen aus dem äußeren (Leitungen und Elektromagnete) und dem inneren der Batterie. Sind alle einzelnen Widerstände und die Spannung des

einzelnen Elementes bekannt, so läßt sich bei jeder Schaltung die Stromstärke leicht berechnen und die günstigste Schaltung auswählen. Allgemeiner aber ergibt sich: Bei a ist die Grundspannung vervierfacht, aber auch der Widerstand der Batterie viermal so groß wie der eines einzelnen Elementes, denn der Strom muß nacheinander durch sämtliche Elemente gehen. Ist der äußere Widerstand viel größer als der innere der ganzen Batterie, so hat dieser geringen Einfluß, und die Schaltung wird bei der größten Batteriespannung den stärksten Strom ergeben. Anders wenn der äußere Widerstand sehr klein wäre. Dann würde der Nutzen der höheren Spannung zurücktreten gegen den Nachteil des höheren inneren Widerstandes infolge der Hintereinanderschaltung, und es kann die reine Parallelschaltung c angemessener sein, bei der die Batterie zwar nur die Spannung eines einzelnen Elementes hat, ihr Widerstand aber nur ein Viertel eines solchen beträgt. Dazwischenliegende Verhältnisse können die Schaltung b bedingen, in der die Spannung der Batterie doppelt so groß, ihr Widerstand aber nur wie der eines einzelnen Elementes ist (zwei parallele Stromwege mit je doppeltem Widerstande). Eine ganz all-



gemeine Untersuchung zeigt, daß die Stromstärke ein Maximum wird, wenn man den inneren Widerstand der Batterie so nahe, wie die Umstände gestatten, dem äußeren Widerstande gleich macht. Jedenvfalls zeigt schon dieses einfachste Beispiel, nach welchen Gesichtspunkten beim Anordnen der Batterie zu verfahren ist.

### Maßeinheiten und Stromwärme.

Die schärfere Fassung der Grundbegriffe, die das Ohmsche Gesetz gewährte, machte auch immer notwendiger, für die in ihm auftretenden Stromgrößen bestimmte Vergleichswerte festzusetzen. Für die Stromstärke setzte sich nach dem Vorgange von Jacobi in Petersburg das elektrolytische Strommaß durch. Nach allen Erfahrungen ist die elektrolytische Wirkung der Zeit und der Stromstärke einfach proportional, und es kann deshalb als Einheit ein Strom gewählt werden, der in einer gewissen Zeit ein gewisses Volumen Knallgas entwickelt oder ein gewisses Gewicht eines Metalles ausscheidet. Namentlich die letztere Meßweise ist von großer Genauigkeit, denn sie arbeitet mit dem schärfsten physikalischen Meßgeräthe, der Wage, und deshalb hat sie sich auch zum beliebigen Wiederherstellen des Strommaßes erhalten, obgleich dafür, ähnlich wie für die anderen beiden Größen, später aus weiterhin folgenden Gründen eine Einheit festgesetzt ist, die mit der Natur der Elektrolyse nichts zu tun hat. Man kann danach Strommesser genau eichen, die ganz kleinen Widerstand haben und deshalb, in Reihe mit einem beliebigen Stromverbraucher geschaltet, nur einen geringfügigen Teil der gegebenen Spannung verzehren.

Als Vergleichsmaß der Spannung wählte man ein galvanisches Element, und zwar zunächst das von Daniell, das sich durch sehr gleichmäßige Wirkung auszeichnet, später noch zuverlässigere sogenannte Normalelemente, die bei peinlichem Einhalten der für ihren Aufbau gegebenen Vorschriften das Grundmaß sehr genau wiederherzustellen gestatten und ebenfalls zum Eichen praktisch benutzter Spannungsmesser dienen. Diese sind eigentlich auch galvanometerartige Strommesser, sie haben aber viele Windungen feinen Drahtes und deshalb sehr großen Widerstand, so daß sie beim Anlegen an zwei Punkte, deren Spannungsunterschied gemessen werden soll, nur einen ganz schwachen, den sonstigen Zusammenhang nicht störenden Strom erhalten, der diesem Spannungsunterschiede proportional ist. Deshalb kann die Skala nach den Spannungen selbst geeicht werden.

Besondere Schwierigkeiten hat das Herstellen eines Vergleichsmaßes für den Widerstand bereitet. Der Widerstand fester Körper schwankt bei den unvermeidlichen Verschiedenheiten ihres Gefüges und ihrer Zusammensetzung weit über die Grenzen hinaus, die bei einer genauen Grundmessung gezogen werden müssen. Die dadurch lange Zeit verbliebene große Unsicherheit beseitigte 1860 Werner Siemens, indem er nach umständlichen Vorarbeiten als Vergleichstoff das Quecksilber vorschlug. Dieses läßt sich immer auf einen hohen Grad der Reinheit bringen und stellt, in ein Glasrohr eingeschlossen, einen flüssigen Draht vor, der für praktische Zwecke durch verglichene Drähte aus für diesen Zweck geeigneten festen Metallegierungen ersetzt wird. In der Wheatstoneschen Meßbrücke haben wir schon ein Gerät zum bequemen Vergleichen von Widerständen kennengelernt.

Die erheblichsten Fortschritte in der Kenntniss vom Wesen und Verhalten des elektrischen Stromes wie der Elektrizität überhaupt brachte die Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie, das, schon lange geahnt, 1842 von Robert Mayer zunächst als Gleichwertigkeit von mechanischer Arbeit und Wärme ausgesprochen und einige Jahre danach von Helmholtz in allgemein gültiger Form dargelegt wurde. Danach entspricht die Wärmemenge, die durch Reibung zwischen Körpern entsteht, der Größe der aufgewendeten mechanischen Arbeit. Dieselbe Wärmemenge ist aber auch durch einen elektrischen Strom zu erzeugen, der durch einen Leiter fließt. Folglich muß wieder die Wirkung dieses elektrischen Stromes in mechanischem Maße anzugeben sein, und umgekehrt wird die auf mechanischem Wege erzeugte elektrische Wirkung der aufgewendeten Arbeit entsprechen. Damit entsteht der Begriff der elektrischen Arbeit oder Energie, und der bestimmte Zusammenhang zwischen der Elektrizität und den anderen physikalischen Erscheinungen wird erkennbar.

Schon vor dem entscheidenden Schritte, den das Gesetz der Erhaltung der Energie darstellt, war die Frage nach der Abhängigkeit der Wärmeentwicklung in einem Leiter von der Stromstärke aufgeworfen. Noch Ohm und andere Physiker glaubten, daß die während einer gewissen Zeit entstehende Wärmemenge einfach der Stromstärke entspräche. Dem setzte Joule in Birmingham etwa folgende Überlegung gegenüber. In einem Drahte von bestimmtem Widerstande entsteht durch einen Strom in einer gewissen Zeit eine bestimmte Wärmemenge, in einem gleichen Drahte unter denselben Verhältnissen wie-



derum die gleiche Wärmemenge. Saßt man nun beide Drähte zusammen, so entsteht die doppelte Wärmemenge wie in dem einfachen Drahte, bei doppelter Stromstärke und in einem Drahte von dem halben Widerstande. Dann ist aber nicht zu erwarten, daß bei doppelter Stromstärke in dem einfachen Drahte auch nur die doppelte Wärmemenge entsteht, der Begriff des größeren Widerstandes, der überwunden werden muß, läßt das Entstehen einer mehr als doppelt so großen Wärmemenge vermuten. Indem Joule diesen Gedankengang weiterspann, der unbewußt schon auf dem Boden des Energiegesetzes steht, kam er zu der Überzeugung, daß die in der Zeiteinheit entstehende Stromwärme von dem Quadrate der Stromstärke und einfach von dem Widerstande abhängt, und dieses Ergebnis der Überlegung bestätigte er 1841 durch genaue Versuche. Mit diesem nach Joule benannten Gesetze, dem allgemeinen Energiegesetze und dem Ohmschen Gesetze, die sich gegenseitig bestätigen und das Zutreffende der beim Entwickeln der elektrischen Begriffe untergelegten mechanischen Bilder zeigen, lassen sich die elektrischen Größen zahlenmäßig auf mechanische Maße zurückführen. Des Zusammenhanges wegen sei über diese das hier Notwendige kurz zusammengefaßt.

Unter der Kraft  $k$  versteht die Mechanik die Ursache, die einer Masse  $m$  in der Sekunde eine Beschleunigung  $p$  erteilt. Soll die damit gegebene Gleichung  $p = \frac{k}{m}$  ohne lästige Beizahlen zu den einzelnen Größen bestehen, so muß die Wahl der Einheiten für Kraft und Masse so getroffen werden, daß die Kraft 1 der Masse 1 die Beschleunigung 1 erteilt. In dem alten sogenannten terrestrischen Maßsysteme, das in der Maschinentechnik und dem Bauwesen allgemein üblich ist, geht man aus von der Krafteinheit, dargestellt durch die Anziehungskraft der Erde auf ein Kilogrammstück, und nimmt als Längeneinheit das Meter. Da alle Körper durch die Erdanziehung eine Beschleunigung von 9,81 m erfahren, so muß man in diesem Maßsysteme die Masseneinheit 9,81 mal so groß als die Masse eines Kilogrammstückes annehmen, denn nur dann wird unter der Wirkung einer Kilogrammkraft in der obigen Gleichung  $p = 1$ . Dem Kilogrammstücke müssen wir also die Masse  $\frac{1}{9,81}$  zuschreiben, und da wir ferner die Massen nach ihrem Gewichte schätzen, so erscheint in den Formeln der Mechanik für die Masse der Ausdruck  $\frac{G}{g}$ , nämlich Gewicht geteilt durch die Erdb-

beschleunigung. Die Einheit der Arbeit in diesem Systeme ist das Meterkilogramm (mkg), die der Leistung das mkg in 1 Sekunde.

Das terrestrische Maßsystem hat den bei sehr feinen Messungen merkbaren Übelstand, daß  $g$  nicht an allen Stellen der Erde genau den gleichen Wert hat, also Umrechnungen notwendig machen kann. Dieses Maßsystem ist aber sehr anschaulich, da uns die stete Wirkung der Schwerkraft ein lebhaftes Empfinden für den Kraftbegriff überhaupt anerzieht. Es wird deshalb auch dauernd in Gebrauch bleiben.

Strenger, aber weniger anschaulich ist das sogenannte absolute Maßsystem, das nach dem Vorgange von Gauß und Weber im besonderen den magnetischen und elektrischen Messungen untergelegt wurde. Dieses System geht von der Masse aus, als deren Einheit das Grammstück genommen wird. Als Einheit der Länge dient das Zentimeter. Die Einheit der Kraft erteilt danach dem Grammstücke die Beschleunigung von 1 cm. Sie hat den Namen das Dyn ( $\delta\upsilon\upsilon\alpha\mu\iota\varsigma$ ), die von ihm auf dem Wege von 1 cm gelieferte Arbeit heißt das Erg ( $\epsilon\rho\gamma\omicron\nu$ ). Wie man sieht, sind diese Einheiten sehr klein, sie waren ursprünglich ja auch nur für schwache physikalische Wirkungen bestimmt. Die Kraft, mit der die Erde (in mittleren Breiten) das Grammstück anzieht, ist 981 mal größer, denn sie erteilt dem Grammstücke eine Beschleunigung von 981 cm. Um nun für die Elektrotechnik handlichere Einheiten herzustellen und das Umrechnen in terrestrisches Maß zu erleichtern, faßt man  $10^7$  Erg zu der praktischen Arbeitseinheit 1 Joule zusammen, und wenn dieses in einer Sekunde entsteht, so hat man die Leistung von 1 Watt. Damit wird die Arbeitseinheit des terrestrischen Systems von 1 mkg gleich 9,81 Joule, gleich  $9,81 \cdot 10^7$  Erg, und die Leistung von 1 mkg in der Sekunde gleich 9,81 Watt. Die Maschinentchnik braucht bekanntlich für die Leistung noch eine größere Einheit, die Pferdestärke oder das Pferd (PS), gleich 75 mkg in der Sekunde, entsprechend  $75 \cdot 9,81 = 736$  Watt. Ein wichtiger Wert werde hier gleich noch umgerechnet: Um auf mechanischem Wege 1 Grammkalorie zu erzeugen, sind  $0,427$  mkg Arbeit erforderlich, das sind  $0,427 \cdot 9,81$  Joule. Oder 1 Joule entspricht  $\frac{1}{0,427 \cdot 9,81} = 0,24$  Grammkalorien, und ebensoviel Wärme entsteht in jeder Sekunde durch eine Leistung von 1 Watt.

Welches mechanische Maßsystem man nun wählen und welche Einheiten für die Stromgrößen man annehmen mag, immer wird man



durch das Gesetz von Joule die Beziehung der Stromleistung zur mechanischen Leistung herstellen können. Bei ganz willkürlicher Annahme der Stromgrößen würde man aber sehr unbequeme Beizahlen durch die Rechnung schleppen müssen, wogegen offenbar erwünscht ist, die Einheiten so zu bestimmen, daß sowohl das Ohmsche Gesetz wie das von Joule in ihrer einfachsten Form ohne alles Beiwerk die zahlenmäßigen Beziehungen richtig ausdrücken. Man gewinnt dann als Ausdruck für die Leistung  $i^2 w$  nach Joule gleich noch die andere Form  $ei$ , indem man aus dem Ohmschen Gesetze für  $i w$  die Spannung  $e$  einsetzt. Diese zunächst nur mathematische Umformung hat auch eine unmittelbare physikalische Bedeutung, denn wir stellten uns den Strom unter dem Bilde einer Flüssigkeit vor, der einem Widerstande entgegen unter einem Drucke durch eine Röhre fließt. Die Leistung dieses Flüssigkeitsstromes würde aber in der That gleich sein dem in der Sekunde durch einen Querschnitt gehenden Volumen der Flüssigkeit (Stromstärke) mal dem dazu erforderlichen Drucke. Wiederum eine Bestätigung der Zulässigkeit der benutzten Grundvorstellungen.

Um die gewünschte einfachste Form der Gesetze zu erhalten, geht man unter Verwendung des absoluten mechanischen Maßsystemes unmittelbar von der Kraftwirkung aus, die ein Strom auf einen Magneten ausübt, und gelangt so zu dem elektromagnetischen Maßsysteme, dessen Richtlinien und Aufbau hier wenigstens kurz angedeutet sein mögen. Zunächst ist eine Einheit für die Polstärke eines Magneten zu wählen. Eine solche hat ein punktförmig zu denkender Pol, der auf einen gleichen im Abstände von 1 cm die Kraft von einem Dyn ausübt. In derselben Weise wird die Stärke eines magnetischen Feldes festgelegt, ein Feld der Stärke 1 sucht den Einheitspol mit der Kraft von einem Dyn zu verschieben. In einem magnetischen Felde, beispielsweise dem Erdfelde, führt eine Magnetnadel, aus ihrer Ruhelage gebracht, Schwingungen aus, die von der Stärke des Feldes, der Masse und Form der Nadel und von ihrem magnetischen Momente (Polstärke mal Länge) abhängen. Nach einem bewundernswerten Verfahren gelang es nun Gauß, mit Hilfe von zwei Magnetnadeln und durch Vereinigung mehrerer Messungen über ihr Verhalten gegeneinander und im Erdfelde dieses selbst nach absolutem Maße zu bestimmen. Seine wagrechte Kraft (seine ganze Kraft ist gegen die Wagrechte stark geneigt) auf den nur gedachten, in Wirklichkeit aber nicht herstellbaren punktförmigen Einheitspol beträgt in unseren Brei-

ten etwa 0,21 Dyn. Erichtlich ist dieses Verfahren von Gauß, das mit dem Einheitspole zu rechnen erlaubt, ohne ihn selbst zu besitzen, entscheidend für die Durchführung des elektromagnetischen Maßsystemes. Denn die Wirkung des ausgedehnten und innerhalb des Versuchsraumes ganz gleichförmigen Erdfeldes auf eine Magnetnadel läßt sich unmittelbar messend vergleichen mit der Wirkung eines beliebigen Stromfeldes auf dieselbe Nadel, oder jedes Stromfeld ist ebenfalls in absolutem Maße bestimmbar. Nun ist ferner das Gesetz für die Abhängigkeit des magnetischen Feldes von der Stromstärke in Stromleitern von gewisser Form in bestimmten Punkten rechnerisch leicht zu ermitteln (Beispiele dafür folgen weiterhin), also auch der Zahlenwert für die Feldstärke in einem solchen Punkte bei der Stromstärke 1. Diese ist also festgelegt, sobald sie in dem betrachteten Punkte wirklich die errechnete Feldstärke ergibt. Dann läßt sich die Einheit der Spannung so festsetzen, daß sie mit der gewonnenen Stromstärke 1 die Leistung  $ei$  zu 1 macht. Daraus folgt von selbst als Einheit des Widerstandes ein solcher, der bei der Spannung 1 die Stromstärke 1 entstehen läßt.

Die Größe dieser Einheiten war für die Elektrotechnik nicht bequem, und deshalb legte die allgemeine Vereinbarung von Paris 1881 folgende praktische elektromagnetische Einheiten fest, bezeichnet wieder nach den Namen hervorragender Physiker: die Stromstärke, das Ampere (A), wurde zu 0,10 der absoluten Einheit genommen. Für die praktische Einheit der Spannung schien vor allem eine anschauliche Größe erwünscht, nämlich die eines der gebräuchlichen galvanischen Elemente, die absolute Einheit ist aber außerordentlich klein, man mußte  $10^8$  davon zusammenfassen, um nahezu auf die Spannung eines Daniell, das Volt (V), zu kommen. Nach Festsetzen dieser beiden Einheiten ist aber die dritte nicht mehr frei, wenn man die einfache Beziehung erhalten will, die das Ohm'sche Gesetz darstellt, und da nach diesem  $\frac{e}{i} = w$ , so ergab sich hier mit  $\frac{10^8}{10^{11}} = 10^9$  das Vielfache der absoluten Widerstandseinheit, die als praktische, das Ohm ( $\Omega$ ), dient. Durch sehr genaue umständliche Messungen sind diese Einheiten mit den Mitteln verglichen, mit denen sie sich nach dem Eingange dieses Abschnittes immer leicht wieder herstellen lassen. Danach ist:

das Ampere die Stromstärke, die in jeder Sekunde 1,118 Milligramm Silber ausscheidet,



das Ohm der Widerstand einer Säule Quecksilber von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 15°,

das Volt die Spannung eines Daniellelementes, ersetzt durch noch genauere Normalelemente.

Leider kommt unter den Namen für die praktischen Stromeinheiten der Name „Siemens“ nicht vor, obwohl Werner Siemens durch seinen Quecksilberwiderstand zuerst Ordnung in den damals herrschenden Wirrwarr gebracht hatte und das meiste dazu getan hat, daß überhaupt die praktischen Einheiten notwendig wurden. Es sollte eine Verwechslung mit der längere Zeit gebräuchlichen Siemensschen vorläufigen Widerstandseinheit von 100 cm Länge vermieden werden. Es ist deshalb nur eine Dankespflicht, wenn man jetzt beginnt, das Umgekehrte der Widerstandseinheit, also  $\frac{1}{\Omega}$ , die Einheit der Leitfähigkeit, mit Siemens (S) zu bezeichnen.

Die Stromwärme erhöht die Temperatur des Leiters so lange, bis dieser durch Leitung und Strahlung gleichmäßig so viel Wärme an die Umgebung verliert, wie in ihm in derselben Zeit durch den Strom erzeugt wird. Die bei dauerndem Stromdurchgange von dem Leiter erreichte Temperaturgrenze ist von der Größe und Art seiner Oberfläche und von seiner Umgebung abhängig. Bei den Glühlampen hat im Verhältnisse zu dem durchgehenden Strome der Kohle- oder Metallfaden so kleine Oberfläche, und die Wärmeabgabe ist durch Auspumpen der Luft aus der Birne so herabgesetzt, daß der Faden bei genügender Spannung zwischen den Enden in helles Glühen gerät. Ein dicker und langer Draht von demselben Widerstande in freier Luft erhöht dagegen bei derselben Spannung seine Temperatur nur unerheblich, wiewohl dabei die in derselben Zeit in ihm entstehende Wärmemenge ebenso groß wie in der Glühlampe ist.

Die technischen Angaben über den spezifischen Widerstand von Stoffen gelten der Anschaulichkeit wegen meist für Drähte von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Der wichtigste Leiter in der Starkstromtechnik ist das Kupfer, da es bei mäßigem Preise ein sehr hohes Leitvermögen hat und deshalb im allgemeinen am wirtschaftlichsten ist. Noch etwas besser leitet Silber, kommt aber seines Preises wegen nicht in Betracht. Schmiedeeisen hat einen etwa 7 mal so großen Widerstand wie Kupfer, wird aber für die oberirdischen Telegraphenleitungen verwendet, weil da nur ganz schwache Ströme zu führen sind, und die Leitungen aus Gründen der mechanischen Festigkeit verhältnismäßig starken Durch-

messer haben müssen. Bei dem sehr gesunkenen Preise des Aluminiums, dessen Widerstand etwa das 1,6fache von dem des Kupfers ist, tritt dieser Stoff namentlich für oberirdische Starkstromleitungen jetzt als wirtschaftlicher Mitbewerber auf. Der Kupfermangel während des Weltkrieges hat auch das Zink für Leitungen und Maschinen als Notbehelf zur Geltung gebracht. Sein Widerstand ist, auf Kupfer bezogen, etwa 3,5fach.

Der spezifische Widerstand des Kupfers beträgt bei  $0^{\circ} \frac{1}{60}$  Ohm. Wie bei allen reinen Metallen erhöht sich der Widerstand mit der Temperatur, und zwar um 0,4 Prozent für jeden Grad Temperaturzunahme. Für Wicklungen elektrischer Maschinen, deren Abkühlungsfläche infolge ihrer Form beschränkt ist, rechnet man daher gewöhnlich mit einem spezifischen Widerstande von  $\frac{1}{55}$  bis  $\frac{1}{50}$  Ohm. Manche Metallegierungen zeigen keine Zunahme des Widerstandes mit der Temperatur, was für Meßwiderstände erwünscht ist, bei Kohle und leitenden Flüssigkeiten nimmt sogar der Widerstand mit der Temperatur ab.

### Wahl der Spannung.

Die unvermeidliche Erwärmung aller stromführenden Leiter stellt einen Verlust dar, wenn nicht die Erhitzung wie in Leuchtkörpern, Kochapparaten usw. Selbstzweck ist. Durch genügend große Leiterquerschnitte läßt sich der Verlust durch die Erwärmung in beliebigem Maße vermindern, der Preis der Leiterstoffe, vornehmlich also des Kupfers und des Aluminiums, setzt dem aber bald eine wirtschaftliche Grenze, die hinauszuschieben deshalb noch auf anderem Wege angestrebt werden muß.

Ein Leiter ist der Übertrager einer gewissen Leistung nach der Verbrauchsstelle, etwa nach einem Motor oder einer Lampenreihe. Zu der Leistung, die den Verbrauchskörpern wirklich zugeführt wird, gegeben durch das Produkt aus der Stromstärke und der Spannung an den Klemmen der Verbrauchskörper selbst, ist noch die Verlustleistung hinzuzufügen, gegeben durch das Produkt aus der Stromstärke und der infolge dieser in den Zuleitungen verbrauchten Spannung, die natürlich tunlichst klein zu halten ist. Baut man nun die Verbrauchskörper für eine höhere Spannung, so sinkt bei gleicher Leistung in demselben Maße ihre Stromstärke, und für denselben Spannungsverlust in den Zuleitungen können diese schwächer gewählt und somit billiger hergestellt werden, oder anders: Die geforderte Leistung läßt sich durch



dieselben Leitungen mit um so geringerem Verluste übertragen, je höher die Netzspannung gewählt wird. Mit dieser wächst dagegen die Schwierigkeit der Isolierung. Einen Körper elektrisch gegen einen anderen isolieren, heißt, zwischen sie Nichtleiter von solcher Art und Dicke bringen, daß ein Übergang von Elektrizität in Folge der Spannung zwischen den Körpern mit Sicherheit vermieden wird. Als Körper anderer Spannung kommen dabei nicht nur die wirksamen Teile der Anlage in Betracht, sondern auch die wegen ihrer Feuchtigkeit und Ausdehnung gutleitende Erde und die mit ihr in Berührung stehenden tragenden Teile, Gestelle usw. (Wegen der praktisch unbeschränkten Aufnahmefähigkeit der Erde ist es vielfach zweckmäßig, die Spannungen auf sie als gemeinschaftlichen Nullpunkt zu beziehen. Die Spannung eines Körpers gegen die Erde hat den besonderen Namen Potential, die Spannung zweier Körper gegeneinander, die Spannung schlechthin in dem bisher gebrauchten Sinne, ist also die Differenz ihrer Potentiale.) Bei sehr hohen Spannungen verursacht daher die Isolierung erhebliche Umstände und Kosten und bildet ihrerseits eine Grenze gegen beliebige weitere Erhöhung der Spannung. Andererseits dürfen mit Rücksicht auf die Gefährdung des Lebens und genügende Isolierung im Inneren der möglichst gedrängt zu bauenden Maschinen und Apparate gewisse, nach jetzigen Begriffen oft ziemlich niedrige Spannungen nicht überschritten werden. Aus solchen und noch manchen anderen Gesichtspunkten haben sich für Verteilungsnetze zum allgemeinen Gebrauche die Spannungen von 65, 110 und 220 V als zweckmäßig eingeführt, die erste wird indessen nur noch für sehr wenig ausgedehnte Netze, etwa für einzelne Gebäude mit eigener elektrischer Zentrale, angewendet. Elektrische Bahnen und größere gewerbliche Anlagen gehen mit der Netzspannung erheblich höher, Straßenbahnen benutzen meist 500—700 V, während die Entwürfe für elektrische Fernbahnen mit Wechselstrom Spannungen von vielen tausend Volt in den Fahrleitungen vorsehen. Eigentliche Fernleitungen sind überhaupt nur bei sehr hohen Spannungen wirtschaftlich denkbar, Ausführungen in Deutschland benutzen schon 100000 V und darüber (Wechselstrom). Das sind Spannungen, von denen man eine gute Anschauung erhält durch die Influenzelektrifiziermaschinen. Die kleineren davon geben Spannungen von 10—20000 V, größere etwa 50000 V. Diese Maschinen zeigen, wie leicht so hochgespannte Elektrizität größere Zwischenräume überspringt. Trotzdem ist hier keine Gefahr, während

schon viel niedrigere Spannungen in technischen Anlagen unbedingt tödlich wirken, weil die Leistungen der kleinen Influenzmaschinen zu geringfügig sind, die in ihren Schließungskreis geratenden Körper also keine gefährliche Stromstärke erhalten können. Gefährlich ist überhaupt nicht die Spannung selbst, sondern die Stromstärke, die sie im menschlichen Körper erzeugt. Im allgemeinen gilt ein Strom von nur  $\frac{1}{10}$  Ampere schon als tödlich infolge von Herzlähmung. Ob dieser Strom im Körper entsteht, hängt ganz von dem Übergangswiderstande ab, den die Körperteile, Hände, Füße usw. beim Berühren der unter Spannung stehenden Leiter bieten. Eine Spannung von 200 V kann eine harmlose Erschütterung verursachen, wenn nur kleine Flächen einer trockenen Hand die Überleitung vermitteln, sie kann tödlich sein, wenn ausgedehntere Flächen der feuchten Hand wirksam sind.

Welche Temperatur die Leiter bei einer gewissen Strombelastung annehmen, hängt von ihrer Abkühlungsfähigkeit ab. Dünne, einzeln gestreckte Drähte bis 2 qmm Querschnitt können noch 8—10 Ampere für 1 mm<sup>2</sup> führen, ohne ihre Temperatur um mehr als einige 20° zu erhöhen. Mit zunehmender Dicke der Leiter dürfen sie aber verhältnismäßig viel weniger beansprucht werden, da ihre abkühlende Oberfläche im Verhältnisse zum Querschnitte kleiner wird. Ungünstig stehen in dieser Hinsicht besonders massige und eingeschlossene Wicklungen elektrischer Maschinen, bei denen oft die Rücksicht auf nicht zu starke Erwärmung im Vordergrund steht. Da die Zuleitungen immer nur einen kleinen Widerstand haben gegenüber den durch sie gespeisten Apparaten, so würden sie bis zum Glühen und Schmelzen erhitzt werden, wenn der große Widerstand der Apparate verschwindet und die Zuleitungen sich unmittelbar berühren, wenn also der sogenannte Kurzschluß eintritt. Bei aller Sorgfalt im Entwurf und Herstellung der Apparate liegt die Möglichkeit zu einer unbeabsichtigten leitenden Überbrückung von Punkten des Stromweges verschiedener Spannung immer nahe. Man beachte beispielsweise nur, durch welchen geringen Zwischenraum aus Gründen gedrängter Anordnung die beiden elektrischen Pole in Glühlampenfassungen voneinander getrennt sind, und wie leicht sie durch einen Fremdkörper leitend verbunden werden können. Um die dadurch entstehende Gefahr für die Leitungen und die Gebäude auszuschließen, hat man schon bei der ersten Entwicklung der Zentralen die Schmelzsicherungen angewendet, die als äußerst wichtige Glieder jeder elektrischen Anlage dauernd die Aufmerksamkeit von Sonderfachleuten



in Anspruch nehmen. Die Schmelzsicherungen, für die Verteilungsleitungen in Gebäuden in Form von gedrungenen Porzellantörpern ausgeführt, enthalten einen oder mehrere dünne Metallfäden von einigen Zentimetern Länge, absichtlich geschaffene schwache Stellen in den Leitungen, die für die bestimmungsmäßigen Stromstärken reichlich genügen, die aber sofort abschmelzen und die Leitungen unterbrechen, wenn die Stromstärke unzulässig groß wird. Für die Schmelzfäden wurde zuerst Blei verwendet, später Zinn und andere Metalle, als besonders zweckmäßig hat sich Silber erwiesen. Der Energieverlust durch die Sicherungen ist bei der Kürze der Schmelzleiter verschwindend klein. An diese unscheinbaren Glieder der elektrischen Anlagen werden hinsichtlich zuverlässiger Wirkung, Gefährlosigkeit und Handlichkeit sehr hohe Anforderungen gestellt, und der Laie ahnt schwerlich, wieviel Mühe und Scharfsinn an die Durchbildung der Schmelzsicherungen gewendet wird. An Stelle der kleinen „Sicherungspatronen“ werden an Verteilungspunkten mit größerer Stromstärke dickere Metallstreifen benutzt, und für sehr starke Ströme, oder wo es aus anderen Gründen die Betriebsverhältnisse erfordern, werden die Schmelzsicherungen ersetzt durch selbsttätige Sicherheitschalter, die sich durch Federkraft öffnen, wenn sie durch einen in die Leitung geschalteten Elektromagneten bei Überschreiten der zulässigen Stromstärke ausgelöst werden. Diese größeren Sicherheitsapparate dienen besonders auch zum Schutze der Maschinen, die durch Kurzschluß überlastet und beschädigt werden würden.

Für alle hier behandelten Fragen, die auf das Joulesche Gesetz von der Stromwärme zurückzuführen sind, lassen sich immer mechanische Bilder aufstellen, die man ohnehin unwillkürlich unterlegt. So läßt sich die hohe Betriebsspannung in elektrischen Netzen in ihrer Zweckmäßigkeit vergleichen mit dem hohen Drucke in Verteilungsnetzen für Luft und Wasser, wie sie für motorische Zwecke vor allgemeiner Einführung des Elektromotors versucht wurden. Auch hier handelte es sich darum, die Leistung in möglichst engen Röhren bei geringem Reibungsverluste den Verbrauchstellen zuzuführen, wobei die Höhe des zu wählenden Betriebsdruckes wesentlich durch die Rücksicht auf die sichere Abdichtung (Isolierung) der Maschinen und Röhren begrenzt war.

Um endlich den Zusammenhang des Jouleschen Gesetzes mit dem Ohmschen Gesetze noch in anderer Weise hervortreten zu lassen, möge

der Leser unter beliebig gewählten Bedingungen für eine Stromverzweigung nach dem Ohmschen Gesetze die Stromstärke in den Zweigen und nach dem Jouleschen Gesetze die in ihnen entstehende Stromwärme in Watt berechnen. Es zeigt sich dabei, daß die Summe der Stromwärme am kleinsten wird bei der Stromverteilung nach dem Ohmschen Gesetze, während jede willkürlich anders angenommene Stromverteilung eine größere Gesamtwärme liefern würde. Diese allgemein beweisbare Tatsache bildet ein Beispiel für das in das philosophische Gebiet hinüberspielende Grundgesetz, daß die Natur alle Umwandlungen mit dem geringsten Arbeitsaufwande vollzieht.

### Induktion und magnetische Feldstärke.

Den elektrischen Strom haben wir uns versinnlicht als Bewegung einer Flüssigkeit in einem Leiter. Unter allen Umständen sind aber mit dem elektrischen Strome magnetische Felder verbunden, und diese sind umgekehrt als eine andere Ausdrucksform des Stromes zu betrachten. Wie nun für Spannung, Widerstand und Strom feste Begriffe, Meßmethoden und Einheiten geschaffen sind, so müssen zum Beherrschen der elektromagnetischen Erscheinungen auch für das magnetische Feld genaue Maße und Einrichtungen zum Untersuchen hergestellt werden.

Das von Gauß und Weber durchgeführte Maßsystem bezog sich zunächst auf das magnetische Erdfeld und benutzte als Meßgerät die Magnetnadel. Es ging aus von der schon früher erwähnten, nur denkbaren, eben nicht zu verwirklichenden Einheit der Polstärke (Pol 1 wirkt auf einen gleichen im Abstände von 1 cm mit der Kraft von 1 Dyn) und nahm folgerichtig als Feldstärke die Kraft in Dyn an, die der Einheitspol im Felde erfährt. Die magnetischen Felder, die in elektrischen Maschinen auftreten, sind nun immer sehr viel stärker als das Erdfeld, oft 100 000 mal und mehr, und außerdem für Meßgeräte nach Art der Magnetnadel meist gar nicht zugänglich. Zum wirklichen Messen solcher Felder benutzt man vielmehr ihre induzierende Wirkung auf einen Stromkreis, und wie wir sehen werden, läßt sich darauf auch ein neuer Ausdruck für die Feldeinheit gründen. Damit ist praktisch zwar die ältere Form ausgeschieden, für den Zusammenhang aber keineswegs überflüssig gemacht, denn sie bildet die unmittelbare Anknüpfung an die mechanischen Größen und hat deshalb dauernden Wert, ähnlich wie die anderen absoluten elektrischen Einheiten.

Um die Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Feldstärke



zu erkennen, denken wir uns in Abb. 26 wieder ein Feld nach Art des in elektrischen Maschinen auftretenden, ähnlich wie in Abb. 19, also eine größere ebene Polfläche als Träger gleichmäßig verteilter Kraftlinien, über der man, um den senkrechten Verlauf der Kraftlinien anschaulicher zu machen, nach Abb. 13 einen Gegenpol annehmen mag. Ein gerader Leiter, durch biegsame Metallschnüre mit einem Galvanometer verbunden, kann parallel sich selbst quer über die Polfläche streichen. Die Punkte auf der Polfläche (Pfeilspitzen deuten wieder die Richtung der Kraftlinien an, die Fläche ist nordmagnetisch), die Richtung der induzierten Spannung und der dem Leiter entgegenwirkenden Kraft ergeben sich nach den früher mitgeteil-

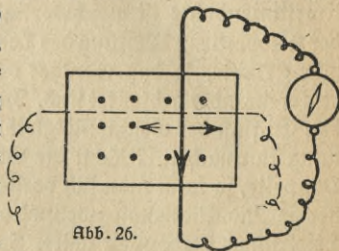


Abb. 26.

ten Regeln, die man zweckmäßig für solche Fälle folgendermaßen faßt: Blickt ein Beschauer, durch dessen Füße Kraftlinien nach dem Kopfe gehen (der hier also auf der Polfläche steht), in Richtung der Querbewegung des Leiters (starker Pfeil), so weist der rechte Arm des Beschauers in die Richtung der induzierten Spannung. Sieht der Beschauer, bei sonst gleicher Stellung, in die Richtung dieser Spannung, so sucht der bei geschlossenem Kreise entstehende Strom den Leiter in der Richtung des rechten Armes des Beschauers zu bewegen (schwacher Pfeil). Betrachtet man ferner den beweglichen Leiter nicht mehr für sich, sondern die ganze Stromschleife, so verkleinert sich offenbar das von ihr umschlungene Feld bei der Bewegung des Leiters im Sinne des starken Pfeiles, und für einen hinter der Papierebene befindlichen Beschauer, der somit in Richtung der Kraftlinien nach dem gedachten Südpole blickt, kreist der induzierte Strom im Uhrzeigersinne. Bei der umgekehrten Bewegung des Leiters, bei der Vergrößerung des von der Stromschleife umschlungenen Feldes, kehren sich die Richtungen des induzierten Stromes und des dem Leiter sich bietenden Bewegungswiderstandes um. Wie das Gesetz von Lenz verlangt, sucht der induzierte Strom die Änderung der umschlungenen Feldfläche zu verhindern.

Streicht nun der Leiter mit gleichförmiger Geschwindigkeit durch das Feld, so würde man einen bestimmten Ausschlag des Galvanometers beobachten — vorausgesetzt, daß die Polfläche groß genug wäre, und

die Geschwindigkeit klein genug, um dem Galvanometer Zeit zum Beruhigen, dem Beobachter zum sicheren Ablesen zu lassen. Würde unter sonst gleichen Umständen die Feldstärke vermindert werden, so würde in demselben Maße die induzierte Spannung sinken, angezeigt durch einen entsprechend kleineren Ausschlag des graduierten Galvanometers, und umgekehrt. Denn das Verkleinern oder Vergrößern der Kraftliniendichte ist gleichwertig mit einer Abnahme oder Zunahme der Feldbreite in Richtung des Leiters unter Beibehalten der ursprünglichen Dichte, so daß weniger oder mehr induzierte Leiterelemente hintereinander geschaltet sind. In ähnlicher Schlußweise kann man sich den Einfluß der Geschwindigkeit des Leiters auf die induzierte Spannung klarmachen. Wächst die Geschwindigkeit beispielsweise auf das Doppelte, so kann man sich vorstellen, daß in der Zeiteinheit der vorherige Induktionsstoß zweimal erfolgt, also wie wenn die wirksame Leiterlänge verdoppelt wäre. Solche und ähnliche Überlegungen führen zu der ausnahmslos bestätigten Überzeugung, daß die Größe der induzierten Spannung einfach proportional ist der wirksamen Länge des Leiters (oder der Feldbreite in Richtung des Leiters), der Kraftliniendichte und der Geschwindigkeit des Leiters. Danach erhält man dieselbe Spannung, ob man den Leiter mit einer gewissen Geschwindigkeit wie bisher nach rechts oder links durch das Feld führt, oder senkrecht zu dieser Richtung, wie in der Abbildung punktiert angedeutet, wenn in diesem Falle die Geschwindigkeit umgekehrt wie die wirksame Leiterlänge verändert wird. Da ferner die Dichte der Kraftlinien ihre Anzahl auf der Flächeneinheit bedeutet, so kann man auch sagen: Die induzierte Spannung ist proportional der in der Zeiteinheit geschnittenen Gesamtzahl der Kraftlinien. Diesen Betrachtungen sind allerdings sehr vereinfachende Bedingungen untergelegt (regelmäßig begrenztes Feld von gleichmäßiger Dichte, gerader Leiter usw.), doch zeigen die Ergebnisse immerhin die grundsätzliche Möglichkeit, durch die induzierte Spannung Felder zu vergleichen und zum Gewinnen einer Einheit ein Feld bestimmter Dichte herzustellen. Ein genügend bequemes Meßverfahren läßt sich aber auf diese nur gedachten Versuche nicht gründen, schon weil man viel zu ausgedehnte Felder haben müßte, um in einem mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durchzuführenden Leiter während einer zum Beobachten des Galvanometers genügenden Zeit eine gleichmäßige Spannung herzustellen. Sehr einfach und auf die kleinsten Felder anwendbar ist aber das Verfahren mit dem



„ballistischen“ Galvanometer, und die dabei sich ergebenden Anschauungen führen auch zu allgemeiner Fassung der Induktionsgesetze.

Für die ballistische Messung brauchbar wird ein Galvanometer, wenn sein beweglicher Teil recht langsam, was sonst meist unerwünscht ist, bei tunlichst geringen Bewegungshindernissen schwingt. Wie man schon an besseren Taschentcompassen beobachten kann, sind die Schwingungen von Magnetnadeln überhaupt ziemlich langsam, da das magnetische Moment, das die Nadel nach einem Ausschlage in die Gleichgewichtslage zurückführt, im Verhältnis zur Masse der Nadel sehr klein ist. Durch richtige Wahl der Verhältnisse, etwa bei einem teilweise astatischen Nadelpaare nach Abb. 6, dessen magnetisches Moment sich beliebig verkleinern läßt, kann man leicht Nadeln erhalten mit einfachen Schwingungen von etlichen Sekunden Dauer.

Es gibt in der Mechanik eine Einrichtung, nämlich das ballistische Pendel, das auf diesem Gebiete dieselbe Rolle spielt, wie das ballistische Galvanometer in der Elektrizität. In der einfachsten Form wird es gebildet durch eine genügend große Masse, die an einem längeren Faden hängt. Richtet man gegen die Pendelmasse einen gleichmäßigen Wasserstrahl, so erhält man einen dauernden bestimmten Ausschlag, ein im Verhältnisse zur Schwingungsdauer sehr kurzzeitig wirkender Wasserstrahl gibt ebenfalls einen bestimmten, aber vorübergehenden Ausschlag. Den einen kurzen Stoß kann man sich noch in eine Anzahl kürzerer Stöße von verschiedener Wucht unterteilt denken, dann wird der einmalige Ausschlag von der Summe aller Stöße abhängig sein.

Man erkennt an diesem mechanischen Beispiele anschaulich das Wesen der ballistischen Methode, bestehend in der Möglichkeit, schnell vorübergehende und dabei unter Umständen veränderliche Kraftäußerungen durch Übertragen auf ein langsam schwingendes System zu messen. Damit ist aber auch die Arbeitsweise des ballistischen Galvanometers erläutert, soweit hier nötig.

Grundbedingung für das Messen mit dem ballistischen Galvanometer also ist, den Leiter im Verhältnis zur Schwingungsdauer sehr schnell durch das Feld oder den zu messenden Feldteil zu führen. Unter Einhalten dieser Bedingung erhält man immer denselben ersten Ausschlag des Galvanometers, ob die Geschwindigkeit des Leiters dabei gleichmäßig oder ungleichmäßig ist, ob größer oder kleiner. Das kann zunächst auffallen, da doch die induzierte Spannung, wie wir sahen, von der Geschwindigkeit abhängt. Wenn aber, immer unter den balli-

stischen Bedingungen, der Leiter in Abb. 26 das vorläufig noch gleichmäßig gedachte Feld mit einer gewissen gleichförmigen Geschwindigkeit durchstreicht, so erhält er eine gleichmäßige Spannung während einer durch die Geschwindigkeit und Weglänge gegebenen Zeit. Dem entspricht ein bestimmter Ausschlag des Galvanometers. Wird die Geschwindigkeit verdoppelt, so verdoppelt sich auch die Spannung, die Zeit für denselben Weg sinkt aber auf die Hälfte, im Stromkreise herrscht also die doppelte Stromstärke, aber nur während der halben Zeit, die Summe der Stromstöße ist also dieselbe geblieben. Man kann auch so sagen: Beim Durchstreichen des Feldes wird immer dieselbe Elektrizitätsmenge bewegt, wobei als Einheit dieser Menge (Coulomb genannt) die von 1 A in 1 sec geführte verstanden wird. Diese Erkenntnis läßt sich ohne weiteres verallgemeinern. Der Leiter kann sich ganz ungleichförmig im Felde bewegen, dieses kann ganz ungleichmäßige Dichte haben, oder, was auf dasselbe herauskommt, unregelmäßig begrenzt sein, oder beides gleichzeitig. Sofern nur die mittlere Dichte und der Flächeninhalt des Feldes erhalten bleiben, oder, gleichbedeutend, wenn nur die Gesamtzahl der vom Leiter geschnittenen Kraftlinien dieselbe ist, immer zeigt das Galvanometer beim ballistischen Messen denselben Ausschlag. Darin liegt schon, daß auch die Form des Leiters gleichgültig ist, er kann gerade sein, wie bisher angenommen, oder beliebig gekrümmt. Wie endlich, beispielsweise zum Messen schwächerer Felder, statt eines einfachen Leiters deren mehrere zum Vielfachen der Wirkung hintereinander geschaltet werden können, zeigt Abb. 27.

Statt von dem Durchschneiden eines Feldes durch den Leiter zu sprechen, hatten wir schon die andere Vorstellung benutzt, wonach ein Leiterkreis durch die Änderungen eines von ihm umschlossenen Feldes induziert wird. Für die ballistische Methode und die daran anknüpfenden Erwägungen bedeutet das keinen Unterschied. Wurden dabei zunächst auch ganze Felder ins Auge gefaßt, so gelten die Darlegungen doch ebenso für beliebige Teile eines Feldes, sofern diese zugänglich sind. So zeigt Abb. 28 in einem größeren Felde kleinere Drahtschleifen, deren Enden unter genügender Isolierung stielartig zusammengedreht und mit dem Galvanometer verbunden sind. Solange sich eine solche Schleife in einem gleichmäßigen Felde so verschiebt,

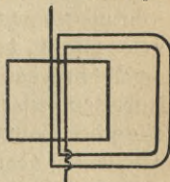


Abb. 27.



daß sich die von ihr umschlossene Kraftlinienzahl nicht ändert, so erfolgt keine Induktion. Das ist zum Überfluß noch an der rechteckigen Schleife unmittelbar gezeigt, bei deren Verschieben parallel sich selbst von rechts nach links die in den beiden wirksamen Seiten induzierten Spannungen sich aufheben, während die verbindenden Stücke parallel zur Bewegungsrichtung überhaupt keine Kraftlinien schneiden. Sobald eine Schleife aber bei ihrem Verschieben auf der Polfläche einen größeren oder kleineren Kraftfluß einzuschließen beginnt, zeigt sich das am Galvanometer, und ballistisch ist der Unterschied der Feldteile wie erläutert zu messen. In dieser Weise kann beispielsweise die magnetische Verteilung in den ausgedehnten Feldern der Dynamomaschinen festgestellt werden, indem man in den Luftspalt zwischen Pol und Anker nacheinander an verschiedene Stellen eine Meßschleife bringt und sie nach völliger Beruhigung des Galvanometers herauschnellen läßt. Eine andere Gebrauchsweise der Meßschleife ist in Abb. 29 angedeutet. Wenn man die Schleife aus der punktierten Lage senkrecht zu den Kraftlinien schnell um  $180^\circ$  umklappt, so erfährt sie bei dieser Bewegung verdoppelt die Induktion, wie beim vorherigen Fortschnellen aus dem Felde, denn bis zu der ausgezogenen Mittelstellung parallel zu den Kraftlinien nimmt der umfaßte Kraftfluß ab und dann wieder bis zum früheren Werte zu. Auf beiden Weghälften hat aber die induzierte Spannung dieselbe Richtung. Bei elektrischen Maschinen mit ihren engen Nutfeldern ist diese Meßweise seltener am Platze, wohl aber bei allseitig ausgedehnten Feldern, wie beim Erdfelde. In diesem Falle wird allerdings wegen der sehr geringen Stärke des Feldes eine sehr große Spule mit vielen Windungen angewendet.

Die Einheit des magnetischen Feldes ist nach Gauß gegeben (S. 45). In ihm erhält ein senkrecht zu den Kraftlinien und parallel sich selbst mit der Geschwindigkeit von 1 cm in der Sekunde bewegter Leiter für jedes cm seiner Länge die Spannung 1 oder  $10^{-8}$  V. Herrscht dabei die Stromstärke 1 oder 10 A, so entsteht für jedes cm die Leistung 1, wie nach S. 46 festzustellen. Dann muß der bei der Bewegung des Leiters zu überwindende mechanische Druck für jedes cm 1 Dyn sein, weil damit die der elektrischen gleichwertige

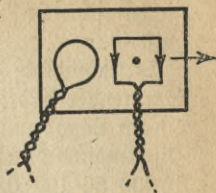


Abb. 28.

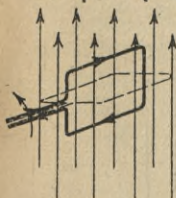


Abb. 29.

mechanische Leistung von 1 Erg in der Sekunde für jedes cm entsteht.

Es ist nützlich, sich an einfachen Beispielen die Größe praktisch vorkommender Kräfte vor Augen zu führen. Ein einzelner Leiter von 50 cm Länge würde in einem Felde von 10 000, welche Stärke in Dynamomaschinen auftritt, bei 100 A einen Querdruk erhalten von  $10\,000 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 0,10 = 5\,000\,000$  Dyn =  $\sim 5$  kg. Derselbe Leiter in demselben Felde ergibt bei 20 m Geschwindigkeit in der Sekunde  $10\,000 \cdot 50 \cdot 2000 \cdot 10^{-8} = 10$  V.

### Magnetische Felder bei verschiedenen Leiterformen.

Der Besitz einer Methode, die, den jeweiligen Umständen angepaßt, die schwächsten und stärksten vorkommenden magnetischen Felder zu messen gestattet, macht natürlich nicht das Bemühen überflüssig, die Verteilung der Feldstärke aus allgemeinen Gesetzen herzuleiten. In den praktisch wichtigsten Fällen ist das verhältnismäßig einfach möglich.

Ein sehr langer gerader Stromleiter bildet um sich ein Feld nach Abb. 14. Ein berühmter Versuch von Biot und Savart (1820) läßt das Gesetz der Kraftabnahme mit dem Abstände vom Leiter anschaulich erkennen. Wie S. 13 schon hervorgehoben, dreht der Stromleiter die Magnetnadel nicht, wenn er durch ihre Achse geht, weil sich die rechtsdrehenden und linksdrehenden Momente aufheben. Nach dem neuen Versuche tritt aber auch keine Bewegung ein, wenn der Leiter parallel seiner früheren Richtung die Nadel in einem Punkte seitlich der Achse durchsetzt. Da nun die Drehkräfte an ungleichen Hebelarmen wirken, können die Momente nur dann entgegengesetzt gleich sein, wenn die Feldstärke um den Leiter im einfachen Verhältnisse mit wachsendem Abstände von ihm abnimmt. Das so durch den Versuch festgestellte Gesetz ist im Einklange mit dem allgemeinen Biot-Savartschen Gesetze, wonach die von einem kurzen Leiterteile (Abb. 30) in einem Punkte  $p$  mit dem senkrechten Abstände  $r$  erzeugte Feldstärke gegeben ist durch den Ausdruck  $\frac{0,10 \cdot i \cdot \Delta s \sin \vartheta}{a^2}$ . Darin ist  $i$  die

Stromstärke in Ampere,  $a$  in cm der mittlere Abstand eines Leiterstückchens der Länge  $\Delta s$  von  $p$ . Durch Summieren der magnetischen Kräfte aller Leiterteile auf den Punkt  $p$  bis beiderseits ins Unendliche mittels höherer Rechnung gelangt man zu dem Werte  $\frac{0,2i}{r}$  für die ganze Kraft. Man

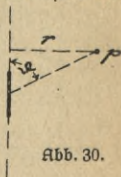


Abb. 30.



kommt diesem genauen Werte schon sehr nahe, wenn man die Kräfte einer größeren Zahl kurzer Leiterstücke berechnet und summiert. Durch solches schrittweises Vorgehen kann man auch in weniger einfachen Fällen genügend genaue Werte erhalten. In einem für die Meßtechnik wichtigen Falle läßt sich aber die Summierung mit elementaren Mitteln allgemein ausführen, nämlich für den Mittelpunkt eines Kreisstromes (Abb. 31). Die gesamte Länge aller Leiterstücke ist hier  $2\pi r$ , und da diese alle senkrecht auf den Radien  $r$  stehen, ihr  $\sin \vartheta$  also 1 ist, so folgt aus dem Biot-Savartschen Grundausdrucke als Feldstärke für den Mittelpunkt  $\frac{0,10 \cdot 2\pi i}{r}$ .



Abb. 31.

Besondere Wichtigkeit hat für die Elektrotechnik die Verteilung der Kraftlinien in einer Spule nach Art der Abb. 8. Daß sich die Kraftlinien in einer einzelnen Windung mit verschiedener Dichte ordnen, ist an den Abb. 15 und 16 erörtert, und in Abb. 18 ist gezeigt, wie bei mehreren parallelen Windungen in einigem Abstände voneinander teils örtliche Kraftfelder um die einzelnen Windungen auftreten, teils ein gemeinschaftliches, das die ganze Spule durchsetzt. Bei Vermehrung der Windungen wird dieses gemeinschaftliche Feld immer weitergeführt, jede neue Windung drängt die Kraftlinienbögen an den Stirnseiten gewissermaßen immer weiter nach außen, und wenn die Spule immer länger wird, so bestehen die gemeinschaftlichen Kraftlinien im wesentlichen aus zwei immer mehr der Geraden sich nähernden Strecken, durch die Spule hindurch und außen zurück, und den Verbindungsbögen an den Stirnseiten. Räden gleichzeitig die Windungen immer enger zusammen, so verschwinden mehr und mehr die örtlichen Kraftfelder, und bei ganz dichter Wicklung und unbeschränkt langer Spule erhält man schließlich ein einziges gemeinschaftliches Kraftfeld. Die Dichte der Wicklung ist zwar durch die nötige Isolierung der Drahtwindungen gegeneinander begrenzt, indessen kann man durch mehrere Lagen von Windungen übereinander der Forderung vollständig dichter Wicklung beliebig nahekommen.

Stellt man sich nun die vier Hauptrichtungen I, I und II, II (Abb. 32) einer geschlossenen Kraftlinie durch die lange Spule vor und denkt an das Bestreben der Kraftlinien, sich zu verkürzen, welche Eigenschaft wir ihnen zuschreiben mußten, um die Gesetze des durch

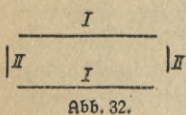


Abb. 32.

sie ausgedrückten Feldes zu versinnlichen, so erkennt man, daß der Verlauf der Strecken I, I im ganzen um so weniger von den Verbindungsstrecken II, II beeinflusst wird, je länger die Spule wird. Um so mehr wird also das Kraftlinienbündel in ihr einem eingeschnürten Bündel elastischer Schnüre entsprechen, für deren Anordnung der Querschnitt an den Stirnseiten der Spule mehr und mehr unbeachtet bleiben kann. Damit wird aber die Verteilung der Kraftlinien in der Spule im Grenzfall vollständig gleichmäßig, und dieselbe Überlegung zeigt auch, wie die Querschnittsform der Spule an Bedeutung verliert, wie statt der ursprünglichen Kreisform etwa eine rechteckige gewählt werden kann, ohne die gleichmäßige Kraftliniendichte zu stören. Voraussetzung dabei ist immer das Kreisen des Stromes auf der ganzen Länge der Spule. Die Feldstärke in der Spule, also die Anzahl der Kraftlinien für  $1 \text{ cm}^2$  des Querschnittes, ist offenbar einfach proportional der Stromstärke. Da man nun zwei gegebene Windungen durch eine einzige mit einer doppelten Stromstärke ersetzen kann usw., und da man es nicht mit einer Spule bestimmter Länge zu tun hat, wenn diese nur überhaupt groß genug ist, so nimmt man als Maß für die magnetisierende Wirkung der Stromwindungen an, wie oft die Stromeinheit die Längeneinheit der Spulennachse umkreist, d. h. die Zahl der Amperewindungen auf  $1 \text{ cm}$  Spulenlänge.

Die Eigenschaft der langen, enggewickelten Spule, ein gleichmäßiges Feld in ihrem Innern herzustellen, die wir hier nur empfindungsmäßig auf Grund allgemeiner Eigenschaften der Kraftlinien zur Anschauung gebracht haben, ist auch durch strenge Betrachtungen auf anderem Wege erwiesen. Diese ergeben auch den absoluten Wert der Feldstärke. Da wir aber jedenfalls imstande sind, diesen Wert zu messen, so genügt hier die durch viele genaue wirkliche Messungen bestätigte Angabe: Jede Amperewindung auf  $1 \text{ cm}$  Spulenlänge ergibt ein Feld, das (mit genügender Genauigkeit)  $\frac{5}{4}$  Kraftlinien für das  $\text{cm}^2$  entspricht.

Die Verwirklichung einer sehr langen Spule von nicht zu kleinem Querschnitte mit Rücksicht auf die Meßgenauigkeit würde sehr unständig sein. Man kann aber die bisher gerade angenommene Spule zu einem Kreise gebogen denken (Abb. 33), so daß ihre Enden zusammenfallen. Dann treten überhaupt keine Kraftlinien mehr aus, sie schließen sich in der Spule selbst, wobei nur statt der weitläufigen Windungen in der Abbildung wieder vollständig dichte Wicklung vor-



ausgesetzt werden muß. Sollen für diese Spule die früheren Überlegungen noch gültig sein, so muß allerdings ein großer Durchmesser des Achsenkreises gegenüber dem Durchmesser der Windungen vorausgesetzt werden. Denn ersichtlich dürfen die Längen der Kraftlinien in der Spule keine erheblichen Unterschiede zeigen, wenn sie gleichmäßig genug verteilt bleiben sollen. Immerhin erzielt die Kreisspule eine erhebliche Erleichterung der Versuche. Die Spule kann aber sogar verhältnismäßig eng sein, wenn sie mit Eisen gefüllt ist, ohne zu unzulässigen Ungenauigkeiten der Messung zu führen.



Abb. 33.

### Magnetische Leitfähigkeit.

Die hier mitgeteilten Gesetze über die magnetischen Stromfelder waren schon lange bekannt, sie galten aber zunächst nur für Luft als umgebendes Medium, und man hatte noch nicht verstanden, alle Erscheinungen bei verschiedenen Stoffen unter einheitlichen Gesichtspunkt zu bringen. Die Elektromagnete im üblichen Sinne, d. h. die meist hufeisenförmigen Eisenkerne mit Wicklung, wurden für sich betrachtet, und ihre Behandlung gipfelte vornehmlich in der wenig bedeutsamen Frage nach ihrer Tragkraft. Mit der Ausbildung der elektrischen Maschinen wurde aber das Bedürfnis immer dringender, einfache Gesetze für die induzierende Wirkung der großen Feldmagnete zu schaffen, und im Laufe der achtziger Jahre verdichteten sich die bisherigen Erfahrungen und Anschauungen zu einer neuen Auffassung des Magnetismus, die an Einfachheit und bequemer Benutzung wenig zu wünschen übrig läßt und von großer Bedeutung für die Entwicklung der elektrischen Maschinen geworden ist. Als Urheber dieses Fortschrittes ist wieder Werner Siemens anzusehen, der im Jahre 1881 darauf hinwies, daß magnetisierende Kraft, magnetischer Widerstand und magnetischer Kraftfluß in ähnlichem Zusammenhange stünden wie die drei Stromgrößen im Ohm'schen Gesetze. Für die weitere Entwicklung sind besonders die Namen von Rowland und Hopkinson zu nennen, während Kapp wohl am meisten zum schnellen Einführen in die elektrotechnische Praxis beigetragen hat.

Die neue Theorie stellt eine glänzende Anwendung der Faraday'schen Kraftlinien dar und läßt sich aus zwei Gruppen von Tatsachen herleiten. Einmal zeigen Versuche verschiedenster Form, wie sich durch weiches Eisen die magnetische Kraft eines Poles nach Punkten über-

tragen läßt, die ohne diese Brücke von dem Pole eine viel kleinere Kraft erfahren, und wie sich überhaupt die Kraftlinien eines Feldes durch das Eisen verdichtet ablenken lassen. Die Kraftlinien ziehen den Weg durch das Eisen vor, und man gelangt so zu der Vorstellung einer größeren Leitfähigkeit dieses Stoffes für den magnetischen Kraftfluß, ähnlich wie der elektrische Fluß auf seinem Wege dem besseren Leiter zu folgen sucht. Andererseits ergeben sich bei Versuchen nach Abb. 33 sehr viel stärkere magnetische Felder im Inneren der Spule, wenn man diese mit Eisen füllt, als wenn sie wie vorher nur Luft enthält. Oder richtiger gesagt: Wenn man durch die große Erregerspule einen Strom von gewisser Stärke schickt und ihn dann unterbricht, so wird der Induktionsstoß auf das an die kleine Meßspule angeschlossene ballistische Galvanometer unvergleichlich viel kräftiger bei einem Kerne aus Eisen in der Spule, genau so, als wenn nun die Kraftlinien, die sich durch den Erregerstrom der Spule gebildet hatten, in viel größerer Anzahl unter Schneiden der Meßspule nach außen träten. Bei derselben Amperewindungszahl für jedes Zentimeter Länge des magnetischen Kreises muß sich also infolge des Eisens ein stärkerer Kraftfluß in der Spule gebildet haben, wie wenn sich mehr von außen einströmende Kraftlinien innerhalb der Windungen verdichtet hätten. Streng genommen dürfen wir dann freilich nicht mehr von Kraftlinien der bisherigen Art reden, weil deren Anzahl in  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt die magnetische Kraft in der Luft darstellte, und die größere Dichte im Eisen bei derselben Ursache auf einen verringerten Querdruck der Kraftlinien und damit überhaupt auf ihren veränderten Wert schließen läßt. In der That wird deshalb in strengeren Untersuchungen auch zwischen Kraftlinien (für Luft) und Induktionslinien (für andere Stoffe) unterschieden. In der Elektrotechnik wird davon meist abgesehen, wie auch hier geschehen soll, da man sich die Induktion von Leitern in der praktischen Anwendung doch durch die Kraftlinien in der Luft erfolgend denkt, so in dem Luftspalte der Dynamomaschine, oder durch Eintreten und Austreten der Kraftlinien quer zu dem geschlossenen Eisengestelle, wie in den Transformatoren.

Die Vorstellung des verringerten Querdruckes der Kraftlinien im Eisen fällt offenbar zusammen mit dem oben benutzten Begriffe der höheren magnetischen Leitfähigkeit. Der Ausbildung und Lagerung der Kraftlinien nebeneinander setzt sich ein geringerer Widerstand entgegen, ähnlich wie sich in einem besseren elektrischen Leiter ein stärkerer



Strom einstellt. Und wie man als Ursache für diesen die elektrische Spannung ansieht, die man sich, soweit sie im Leiter selbst verbraucht wird, als Spannungsabfall auf die einzelnen Längeneinheiten verteilt denken kann, so wird der magnetische Kraftfluß durch die magnetomotorische Kraft hergestellt, für die Längeneinheit gegeben durch die Zahl der auf sie entfallenden Amperewindungen. Es besteht also ein dem Ohmschen Gesetze formal ähnliches Gesetz: Um in einem magnetischen Kreise einen Kraftfluß verlangter Größe zu erzeugen, muß eine gewisse Amperewindungszahl aufgewendet werden, die proportional ist der ganzen Länge des Kraftflusses, umgekehrt proportional dem Querschnitte und außerdem abhängig von dem spezifischen magnetischen Widerstande des Stoffes. Ist die formale Ähnlichkeit mit dem Ohmschen Gesetze so weit erkannt, so liegt auch nahe, nach dem entsprechenden Verhalten von hintereinander geschalteten Kraftflußabschnitten verschiedenen Widerstandes und von parallel geschalteten Zweigen zu fragen, und in der That erweist sich auch hier die Ähnlichkeit, so daß alle Überlegungen oder Versinnlichungen hier wie dort gelten, wenn sich auch in den Größenordnungen manche Unterschiede zwischen den beiden Erscheinungsformen zeigen.

Alle Stoffe können auf ihr magnetisches Verhalten mit Meßgeräten nach dem Schema Abb. 33 in Verbindung mit dem ballistischen Galvanometer geprüft werden. Für die besonderen Fälle hat man andere, namentlich schneller arbeitende Untersuchungsweisen ausgearbeitet, die mitgeteilt bleibt aber die grundlegende. Dabei haben sich vor allem die Unterschiede in der magnetischen Leitfähigkeit bei weitem nicht so groß erwiesen wie in der elektrischen. Trockene Luft kann praktisch als elektrischer Nichtleiter angesehen werden, einen magnetischen Nichtleiter kennt man dagegen nicht. Der beste magnetische Leiter ist weiches Eisen, ein sehr viel besserer als Luft, aber doch nicht in dem Maße, daß wir nicht, wie geschehen, Luft als Vergleichstoff nehmen können. Die meisten Stoffe verhalten sich ferner magnetisch ähnlich wie Luft, genauer gesagt wie das Vakuum oder der dieses erfüllende hypothetische Äther, die Unterschiede sind sehr geringfügig. Man kennt auch nur wenige Stoffe, die etwas schlechter als Luft leiten. Eisen in seinen verschiedenen Zusammensetzungen und Zuständen nimmt hinsichtlich der Größe seiner Leitfähigkeit einen besonderen Platz ein, ihm ähneln darin auch wieder nur wenige Stoffe, wie Nickel und Kobalt, bleiben aber doch weit hinter ihm zurück. Da gleichzeitig

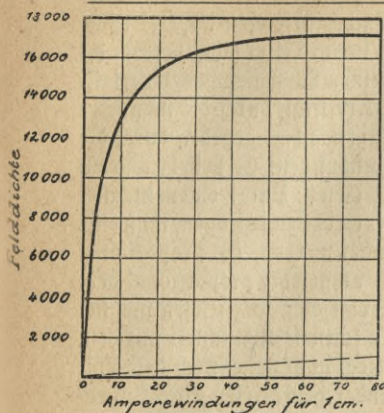


Abb. 34.

Widerstand nicht ändert, nimmt dieser für Eisen in hohem Grade und nach einem nicht allgemein angebbaren Gesetze zu. Man kann daher die in einer luftumschließenden langen Spule eintretende Kraftliniendichte immer aus der einfachen Beziehung  $\frac{5}{4} \times$  Amperewindungen für 1 cm Kraftweg berechnen, beim Eisen dagegen muß man den Wert aus einer für die besondere Sorte durch Versuche gefundenen Tabelle oder graphischen Darstellung entnehmen. Eine solche übliche Darstellung für magnetisch sehr gutes Eisen zeigt Abb. 34. Die Abszissen darin bedeuten die Amperewindungen, die auf 1 cm Kraftweg entfallen, die Ordinaten die Zahl der Kraftlinien für 1 cm<sup>2</sup> Querschnitt. Man sieht, wie die Dichte zunächst sehr stark mit den Amperewindungen wächst, dann allmählich weniger und von etwa 50 Amperewindungen an nur noch sehr langsam zunimmt. Den verbindenden Bogen zwischen den das anfängliche schnelle und spätere langsame Wachsen kennzeichnenden, nahezu geraden Linien nennt man das Knie der Magnetisierungskurve. Die vorliegende kann als Vertreter für Walzeisen und besondere Stahlgußorten gelten. Etwa nur halb so groß sind die Magnetisierungswerte für Gußeisen, noch viel kleiner für harten Stahl, der den induzierten Magnetismus zum großen Teile dauernd behält. Ein schwacher Rest von Magnetismus bleibt auch im weichsten Eisen zurück.

In Abb. 34 ist des Vergleiches wegen durch die gestrichelte Gerade nahe der Abszissenachse auch die Kraftliniendichte in Luft bei gleicher

das Eisen auch nach seinen mechanischen und wirtschaftlichen Eigenschaften als Baustoff hervorrage, so hat man es in der Elektrotechnik nur mit ihm und der Luft gleichwertigen Stoffen als magnetischen Leitern zu tun.

Die Temperatur hat auf die magnetische Leitfähigkeit der Luft keinen hier zu beachtenden Einfluß, auf Eisen einen geringen, der praktisch zu vernachlässigen ist, solange die Temperatur unter etwa 700° bleibt. Während aber die Luft, ähnlich den Metallen in elektrischer Hinsicht, bei steigender Kraftliniendichte ihren spezifischen



Amperewindungszahl angegeben, aber bei zehnfach vergrößerten Ordinaten, um die Linie von der Abszissenachse deutlich zu trennen. Denn 80 Amperewindungen für 1 cm geben in Luft nur 100 Kraftlinien auf 1 cm<sup>2</sup>, nicht 1000, wie die Abb. angibt. Man sieht jedenfalls aus dieser Zusammenstellung besonders deutlich den großen Unterschied zwischen der Magnetisierbarkeit von Eisen und Luft. Dieser Unterschied verkleinert sich bei dem Charakter der darstellenden Linien allerdings mit zunehmender Dichte allmählich, bleibt aber bei praktisch noch benutzbaren Amperewindungszahlen immer sehr erheblich. Statt wie in Abb. 34 die Dichte unmittelbar in Abhängigkeit von der Erregung darzustellen, benutzt man bei manchen Rechnungen auch eine Verhältniszahl ( $\mu$ ), die angibt, welches Vielfache die Dichte im Eisen gegenüber der Luft unter sonst gleichen Bedingungen beträgt. Die Werte von  $\mu$  können aus genügend genauen Schaulinien nach Abb. 34 oder Tabellen leicht gefunden werden.

### Entwurf eines Elektromagneten.

Es ist nützlich, die vorstehenden Regeln und Anschauungen auf ein bestimmtes Beispiel anzuwenden. Es soll ein Elektromagnet nach Abb. 9 entworfen werden, wie er etwa als sogenannter Bremsmagnet in einem elektrischen Aufzuge dienen könnte. Der Magnet hat die Hufeisenform, das Eisengestell bildet bei anliegendem Anker einen geschlossenen Weg für die Kraftlinien. Wir können jetzt zunächst leicht erkennen, warum die beiden Pole durch Vermittlung des Ankers gemeinsam viel mehr tragen als beide einzeln zusammengenommen. Denn bei anliegendem Anker ist der magnetische Widerstand am kleinsten, so daß die Erregung den stärksten Kraftfluß entstehen läßt. Die Wicklung ist ferner aus naheliegenden praktischen Gründen auf zwei Schenkelspulen zusammengedrängt und nicht gleichmäßig über das Eisengestell verteilt, was wir oben für eine eisenlose Spule als wichtig betonten. Da nämlich das Eisen soviel besser leitet als Luft, die Kraftlinien also viel williger dem Eisenpfade folgen, so kann ohne großen Nachteil zugunsten leichterer Herstellung und mechanisch zweckmäßigerer Magnetform von der genaueren Ausführungsweise abgesehen werden, wie im größeren auch die später zu besprechenden Transformatoren zeigen. Erhebliche magnetische Verluste verursachen aber die Luftspalten. Dieser Verlust, die sogenannte Streuung der Kraftlinien, ist einigermaßen auch durch Rechnung zu finden, meist be-

gnügt man sich aber mit Schätzungen nach Messungen an ähnlichen Apparaten.

Der zu entwerfende Magnet soll bei anliegendem Anker bis zu 250 kg tragen können, jeder Schenkel also die Hälfte. Wählt man den Schenkelquerschnitt kreisförmig von 5 cm Durchmesser (20 cm<sup>2</sup> Querschnitt, abgerundet wie alle hier auftretenden Zahlen), so muß 1 cm<sup>2</sup> jeder Polfläche etwas über 6 kg tragen können. Das trifft zu (wie wir weiterhin sehen werden), wenn die magnetische Dichte zwischen Pol und Anker 12500 beträgt. Den Anker läßt man nicht unmittelbar die Polflächen berühren, weil er sonst infolge des unvermeidlichen magnetischen Restes im Eisen auch nach Ausschalten des Erregerstromes zu leicht „klebt“, man wird im vorliegenden Falle einen kleinsten Abstand von 0,5 mm annehmen können, der etwa durch Messingscheiben auf den Polflächen erhalten bleibt. Sieht man nun einen voraussichtlich genügenden Raum für die Wicklung vor, indem man die Länge der Schenkel gleich ihrem dreifachen Durchmesser wählt und ebenso groß ihren mittleren Abstand voneinander, so wird man aus einer Maßskizze eine mittlere Länge der Kraftlinien im Eisengestelle von 66 cm entnehmen können. Wegen der Streuung, namentlich an den Luftspalten, und zur Sicherung der beabsichtigten Wirkung wird man ferner die erforderliche magnetische Dichte um  $\frac{1}{5}$  vergrößern, also auf 15000. Um diese herzustellen, müssen nach Abb. 34 18 Amperewindungen für 1 cm Weg vorhanden sein, für den ganzen Eisweg also  $66 \cdot 18 = 1188$ . Fast genau soviel A.=W. sind aber für die kleinen Luftspalten nötig, nämlich  $2 \cdot 0,05 \cdot 15000 \cdot \frac{4}{5} = 1200$ . Auf den Schenkeln müssen also rund 2400 A.=W. erzeugt werden. Die Wicklung bringt man nicht unmittelbar auf dem Eisen an, sondern verwendet als Träger dafür besondere abnehmbare Hülssen mit Stirnscheiben, wie Abb. 35 zeigt, aus Pappe oder beklebtem Bleche, damit die Drahtwindungen sich bequem und gleichmäßig herstellen lassen. Die Zahlen in Abb. 35 bedeuten in Millimetern für den betrachteten Fall den (kreuzschraffierten) verbleibenden Wickelraum einer Schenkelspule.

Es handelt sich nun um die Wahl der richtigen Drahtdicke für die Wicklung. Gegeben ist entweder die Spannung, die zum Erzeugen der A.=W. dient (Spannungs- oder Nebenschlußwicklung), oder die im wesentlichen durch andere Umstände bedingte Stromstärke (Serien- oder Hauptstromwick-

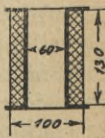


Abb. 35.



lung). Wir nehmen den ersten Fall an, und zwar eine Netzspannung von 110 V. Ein geübter Elektriker wird, wie die übrigen Verhältnisse, so auch die Drahtdicke versuchsweise gleich annähernd treffen und findet nach einigen schnellen Prüfrechnungen, deren Wesen weiterhin sich ergibt, an Hand einer Tabelle über die vorhandenen, angemessen abgestuften Drahtdicken am geeignetsten eine solche von 0,40 mm, mit einem Querschnitte von  $0,126 \text{ mm}^2$ . Es ist eine ziemliche Erwärmung der Wicklung zu erwarten, der spezifische Widerstand (von 1 m bei  $1 \text{ mm}^2$  Querschnitt) werde daher zu  $\frac{1}{50}$  angenommen. Dann haben 1000 m des gewählten Drahtes  $\frac{1000}{50} \cdot 0,126 = 160 \Omega$ . Der Draht ist doppelt mit Baumwolle besponnen, der äußere Durchmesser wird damit 0,55 mm. Nach den aus Abb. 35 zu entnehmenden Abmessungen kann jede Spule 8600 Windungen dieses Drahtes aufnehmen, und da die mittlere Länge einer Windung 25 cm ist, so enthalten die 17200 Windungen beider Spulen 4300 m mit einem Widerstande von  $688 \Omega$ . Die Spannung von 110 V erzeugt also eine Stromstärke von 0,16 A, die 17200 Windungen geben 2750 A.W., also etwas mehr als gefordert, weil die geeignetste Drahtstärke der Tabelle nicht ganz genau paßte.

Der Leistungsverlust in den Spulen  $i^2 w$  oder  $ei$  berechnet sich zu 17,6 Watt, und diese müssen als Wärme an der Oberfläche der Wicklung austreten. Die Mantelflächen der beiden Spulen sind 820 qcm groß, auf 1 Watt kommen also  $46 \text{ cm}^2$ . Eine so große Oberfläche würde erfahrungsgemäß reichlich genügen, die Temperaturerhöhung auch der inneren Wicklungslagen selbst bei dauernder Einschaltung in zulässigen Grenzen zu halten. (Die Abkühlung durch die Stirnseiten der Spulen ist wegen der meist ziemlich dicken Pappschichten dort nur unbedeutend.)

Wenn man die Spulen nur halb so lang wählte, so würden die Windungszahl und der Widerstand auf die Hälfte verkleinert, die Stromstärke aber verdoppelt. Die früheren A.W. blieben also bestehen, dagegen wäre der Leistungsverlust verdoppelt,  $(2i)^2 \frac{w}{2} = 2i^2 w$ , und die entsprechende doppelte Wärme müßte durch die jetzt nur halb so große Kühlfläche austreten. Unter solchen Verhältnissen dürfte der Elektromagnet nur vorübergehend benützt werden. Das Umgekehrte würde eintreten, wenn die Spulenlänge verdoppelt wäre, nur die Ampere-Windungszahl würde wieder ungeändert bleiben. Diese ist also all-

gemein von der Zahl der Drahtwindungen ganz unabhängig, bei demselben mittleren Durchmesser könnte man, wenn keine anderen Rücksichten zu nehmen wären, die Windungen auf wenige, sogar auf eine einzige vermindern, und so berechnet man auch die Drahtdicke, indem man bei gegebener Länge dieser gedachten einen Windung für sie einen solchen Querschnitt wählt, daß der Widerstand eine Stromstärke gleich der Amperewindungszahl zuläßt. Man sieht, wie bei einer bestimmten Spannung nur eine bestimmte Drahtdicke der Bedingung genügen kann, ein dünnerer Draht würde zu wenig A.=W. ergeben, ein dickerer zwar mehr, aber unter Verschwendung von Stromleistung. Die vielen Windungen haben danach nur den Zweck, einerseits der aufzuwendenden elektrischen Leistung eine den Umständen angemessene Größe zu geben, andererseits die Temperaturerhöhung der Wicklung innerhalb der zulässigen Grenzen zu halten. Mit der Wahl einer kürzeren oder längeren Spule ändern sich aber auch die Längen der Elektromagnetschenkel und die für die fortfallenden oder hinzutretenden Stücke erforderlichen A.=W., also auch die ganze Grundlage der Rechnung, die vielleicht mehrfach wiederholt werden muß. Ein so einfaches Gerät wie ein Elektromagnet erfordert somit schon eine Menge von Überlegungen und Erfahrungen, um allen Anforderungen technischer und wirtschaftlicher Natur gerecht zu werden. Der besondere Fall entscheidet darüber, ob etwa vornehmlich Wert auf möglichst kleines Gesamtgewicht zu legen ist, ob unter Verwendung eines größeren Eisenquerschnittes an dem teuren Wicklungskupfer gespart werden soll, ob die Betriebskosten ein gewisses Maß nicht überschreiten dürfen usw.

Wenn der Elektromagnet nicht für sich an die Netzspannung zu legen ist, sondern etwa mit einem Motor in Reihe geschaltet wird, der für die Stromstärke maßgebend ist, so bleiben gleichwohl die früheren Überlegungen für die Amperewindungen, die Größe des Wickelraumes, die Erwärmung und den zulässigen Leistungsverbrauch in Geltung. Diesen letzteren kann man auch so ausdrücken, daß für den Elektromagneten ein gewisser, meist sehr kleiner Teil der Netzspannung verbraucht werden darf, womit dieser Fall auf den vorigen zurückgeführt ist. Nur ergibt sich jetzt wegen der viel kleineren Spannung an den Wicklungsenden ein großer Drahtquerschnitt und eine kleine Windungszahl. Das ist aus Gründen leichter Herstellungs nur erwünscht, aber auch wegen der besseren Ausnutzung des Wickelraumes vorteilhaft.



Bei dünnen Drähten nimmt nämlich die isolierende Umspinnung einen sehr beträchtlichen Teil des verfügbaren Wickelraumes ein. In dem oben behandelten Beispiele beträgt infolgedessen der Kupferquerschnitt nur wenig über  $\frac{2}{5}$  des ganzen Spulenquerschnittes, wie man leicht berechnen kann. Dickeren Drähten gibt man nun zwar aus mechanischen Gründen auch eine etwas dickere Umspinnung, die aber doch einen viel kleineren Teil des Drahtdurchmessers beträgt. Die „Füllung“ des Spulenquerschnittes mit Kupfer wird deshalb günstiger, der Wickelraum darf kleiner genommen werden, oder es läßt sich dieselbe Amperewindungszahl bei geringerer Erwärmung in ihm unterbringen. Denn die größere Füllung hat ersichtlich denselben Erfolg wie in dem früheren Beispiele die Verlängerung der Spule. Um eine bessere Füllung zu erhalten, wendet man vielfach, namentlich für die Ankerleiter der Maschinen und bei Transformatoren, statt stärkerer Runddrähte Leiter aus Flachkupfer an, die durch Bewickeln mit gewebtem Bande und oft noch durch umgelegte Streifen von Preßspan oder anderen Stoffen isoliert werden. Den lästigen „toten“ Raum der Wicklungen mit dünneren Drähten sucht man jetzt auch durch einen Lachüberzug statt der dickeren Umspinnung zu vermindern, wovon besonders kleinere Elektromagnete Nutzen ziehen.

Das „Unterbringen der Wicklung“ und die damit zusammenhängenden Fragen spielen im Elektromaschinenbau eine große Rolle. Gründliches Durcharbeiten einzelner Fälle macht am besten mit den wichtigsten Gesichtspunkten vertraut und vertieft die Einsicht in die Abhängigkeit der bestimmenden Größen voneinander.

### Magnetische Energie.

Nach der Vorstellung von Faraday, die mit der alten Annahme der unvermittelten Fernübertragung brach, geschieht die Fortpflanzung der elektrischen wie der magnetischen Kräfte durch ein Zwischenmittel auch da, wo wir durch unsere Sinne etwas Stoffliches nicht feststellen können, durch den Äther, der ja auch zur Erklärung der Licht- und Wärmeerscheinungen herangezogen wird. Zu dieser Überzeugung wurde Faraday geführt durch die Eigenschaften des elektrischen und magnetischen Feldes, die als eine Auffpeicherung der Energie in der Umgebung von Leitern zu denken sind. Wie Faraday diese Auffpeicherung in elastischen Spannungen des Äthers sah, zeigen seine Kraftlinien, die ja eine unmittelbare Benutzung der Eigenschaften greifbarer elastischer Körper zum Versinnlichen bedeuten.

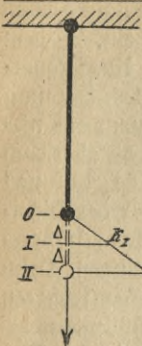


Abb. 36.

Das Gleichnis eines Systemes elastischer Schnüre gibt über die Anordnung von Kraftfeldern faßlichen Aufschluß und bewährt sich in allen Folgerungen. Wir sind daher berechtigt, auch die Frage der Feldenergie aus dem Verhalten elastischer Körper zu beantworten. Abb. 36 zeigt einen oben festgeknüpften elastischen Faden, der durch ein angehängtes Gewicht gedehnt wird. Um recht ausgiebige Dehnungen zu erhalten, denken wir uns den Faden aus Gummi, das deh nende Gewicht bestehe in einer sehr leichten Schale mit Füllung, die etwa als Flüssigkeit oder feines Bleischrot nach Bedarf allmählich zugebracht wird. Solange die Dehnungen ein gewisses Maß nicht überschreiten, sind sie nach einem von Hooke gefundenen Gesetze einfach der Belastung entsprechend. Ist daher das deh nende Gewicht bei allmählicher Füllung der Schale bis zu einem Werte  $k_I$  gestiegen und damit eine Dehnung des Fadens um die Länge  $\Delta$  eingetreten, so wird die Dehnung verdoppelt, wenn das Gewicht den doppelten Wert  $k_{II}$  erreicht usw. In der Abbildung sind die deh nenden Kräfte als wagrechte Strecken auf den dazu gehörenden Dehnungen abgetragen. Beim Sinken hat das allmählich anwachsende Gewicht von der Nullstellung nach I und dann nach II eine bestimmte Arbeit verrichtet, die als zurückgewinnbare Spannungsenergie in dem elastischen Faden aufgespeichert ist. Die Arbeit von Null bis I ist gleich dem Produkte aus dem Wege und der mittleren Kraft, also gleich  $\frac{\Delta k_I}{2}$ , dargestellt durch den Inhalt des oberen Dreieckes. Bei der doppelten Kraft  $k_{II}$  ist aber die Arbeit vervierfacht, wie der Inhalt des größeren Dreieckes im Verhältnisse zu dem des kleineren zeigt. Bei der dreifachen Kraft hätte man die neunfache Arbeit usw. Allgemein wächst also die Gewichtsarbeit oder die von dem Faden aufgenommene Energie quadratisch mit der deh nenden Kraft. Und wenn man so die von dem ganzen Faden aufgenommene Spannungsenergie bestimmt hat, so ist zum Vergleichen verschiedenartiger Fälle ohne weiteres anzugeben, wieviel davon auf jede Volumeinheit des Fadens entfällt.

In demselben Sinne ist auch die in  $1 \text{ cm}^3$  an einer Stelle des magnetischen Feldes durch die magnetische Kraft angehäufte Energie zu verstehen, und sie ist zu berechnen, sobald man sie für eine bestimmte Kraft



kennt. Die gesamte Energie für einen größeren Bezirk ergibt sich dann durch Summieren der Teile, was je nach dem besonderen Falle einfacher oder umständlicher auszuführen ist.

Ein und derselbe Leiter bildet bei derselben Stromstärke magnetische Felder der verschiedensten Art, je nach seiner Form, ob er etwa geradlinig gestreckt oder zu einer Spule gewunden ist. Deshalb wird auch die von ihm hergestellte Feldenergie sehr verschieden sein. Das scheint ein Widerspruch zu der früheren Angabe zu sein, wonach das Leiterfeld nur ein anderer Ausdruck für den Strom sein soll. Dieser scheinbare Widerspruch löst sich aber durch Betrachten eines elastischen Analogons. Wenn in Abb. 37a wieder ein Faden durch eine Kraft gedehnt wird, so ist wie in Abb. 36 die dabei erzeugte Spannungsenergie durch das Dreieck Kraft=Weg gegeben. Ein Faden von gleicher Länge, aber doppeltem Querschnitte (b), dehnt sich bei derselben Kraft nur halb soviel als vorher, das Energiedreieck ist nur halb so groß, trotzdem ist in beiden Fällen die Dehnung ein Maß für dieselbe Kraft.

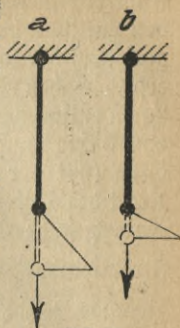


Abb. 37.

Im engsten Zusammenhange mit der Energie des Feldes steht die Zugkraft von Magneten. In Abb. 38 stehen sich zwei ungleichnamige Polenden gegenüber. Bei a sollen sich die Polenden fast berühren, bei b um 1 cm Abstand auseinandergezogen sein. Es soll aber die Felddichte, die bei a in der Teilfuge herrschte, auch bei deren Erweiterung um 1 cm bestehen bleiben. Dazu müssen die erregenden Amperewindungen nach Maßgabe des vergrößerten magnetischen Widerstandes vermehrt werden. Da die Felddichte beim Auseinanderziehen der Pole, also die magnetische Kraft, nach der Voraussetzung unverändert blieb, so ist dabei in jeder Säule von 1 cm<sup>3</sup> Inhalt über 1 cm<sup>2</sup> Polfläche eine bestimmte Energie entstanden, und aus der Analogie der elastischen Körper schließen wir, daß die Größe dieser Energie  $c \cdot \frac{H^2}{2}$  ist, unter

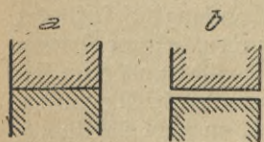


Abb. 38.

$H$  die Felddichte verstanden, unter  $c$  eine noch zu bestimmende Beizahl. Numerisch dieser Energie gleich ist die Zugkraft für 1 cm<sup>2</sup> Polfläche, da ja die Höhe jeder Säule 1 cm ist. Die beim Auseinanderziehen der Pole entstandene Energie stammt von den zusätzlichen

Amperewindungen. Denken wir uns diese A.-W. unmittelbar um den Luftspalt herum angebracht, so ist die von ihnen erzeugte Energie gleich der aufzuwendenden Arbeit, um die Windungen, von dem erforderlichen Strome durchflossen, quer durch ein Feld von der ihnen entsprechenden Dichte an ihren Ort zu bringen. Da nun 1 A.-W. eine Dichte von  $\frac{5}{4}$  Kraftlinien erzeugt und eine absolute Stromwindung (mit der wir jetzt rechnen müssen, da wir die mechanische Kraft des Leiterstromes mit der Felddichte in Beziehung bringen) die zehnfache Dichte gibt, so entspricht der Dichte 1 eine absolute Stromwindung von  $\frac{4}{5 \cdot 10} = \frac{1}{12,5}$ . Das ist also die mit  $\frac{H^2}{2}$  zu multiplizierende Beizahl, oder die Zugkraft für 1 cm<sup>2</sup> Polfläche ist gleich  $\frac{H^2}{25}$ . Hätte man somit eine Dichte von 5000, so wäre die Zugkraft für 1 cm<sup>2</sup>  $\frac{5000 \cdot 5000}{25} = 1000000$  Dyn, nahezu 1 kg. Das ist eine leicht zu merkende Zahl, von der man zu der Zugkraft bei einer anderen Felddichte einfach unter Beachtung des quadratischen Gesetzes gelangt. Bei dem früheren Beispiele wurde die wirksame Dichte zu 12500 genommen, also  $2\frac{1}{2}$  mal so groß, insofgedessen war die Zugkraft für 1 cm<sup>2</sup>  $(2,5)^2 \cdot 1$ , rund 6 kg.

Bei der Ableitung mit Hilfe der Abb. 38 hatten wir ein ganz gleichmäßiges Feld vorausgesetzt, ohne alle seitlich ausgebauchten Kraftlinien. Für die Zulässigkeit der Ableitung ist das ohne Bedeutung, die praktische Berechnung der Zugkraft müßte aber streng genommen darauf Rücksicht nehmen, und das um so mehr, je kleiner die Polflächen sind, da bei ihnen die seitlichen, an Dichte abnehmenden Felder einen größeren Teil des Ganzen bilden.

Da bei einer Dichte von 5000 die Zugkraft für 1 cm<sup>2</sup>  $10^6$  Dyn war, so ist der Energieinhalt von 1 cm<sup>2</sup> des Luftspaltes  $10^6$  Erg oder annähernd 0,01 mkg.

### Die Selbstinduktion.

In der Elektrotechnik finden Betrachtungen über die Energie des Feldes in der Form, wie sie oben unter Beschränkung auf Luft oder magnetisch gleichwertige Stoffe angestellt wurden, seltener Anwendung. Der Begriff der Feldenergie tritt gewöhnlich in anderem Zusammenhang auf, bei Untersuchung der sogenannten Selbstinduktion. Die vorhergehenden Betrachtungen sind trotzdem nicht überflüssig, weil sie den Begriff am unmittelbarsten geben und so den Einblick in



das Wesen der Energiewanderung beim Entstehen und Verschwinden magnetischer Felder erleichtern.

Wenn man einen größeren Elektromagneten einschaltet, etwa den Feldmagneten einer Dynamomaschine, so sieht man an einem Strommesser den Strom nicht sprunghaft mit seinem durch die angelegte Spannung und den Widerstand bestimmten Werte eintreten, vielmehr läßt sich deutlich ein allmähliches Anschwellen beobachten. Wir wissen jetzt, daß sich zuerst durch den Strom ein Feld von erheblicher Energie ausbilden muß, und dazu bedarf es nach Maßgabe der angelegten Spannung einer gewissen Zeit. Beim Ausschalten des Elektromagneten tritt ferner eine Erscheinung auf, die ohne alle Meßgeräte zu beobachten ist. An den Schalterkontakten zeigt sich nämlich starkes Zischen des Feuer, während das Einschalten ohne Feuer erfolgte, die angesammelte Feldenergie entlädt sich in dem Öffnungsfeuer. Der ganze Vorgang ist an der Hand der schematischen Abb. 39 nach früherem leicht zu übersehen. Die beim Einschalten an die Wicklung gelegte Spannung habe die durch Pfeile angedeutete Richtung, der entstehende Strom umkreist, von unten gesehen, den Magnetkern im Uhrzeigersinne, die Kraftlinien vermehren sich innerhalb der Windungen, sie induzieren also für den in ihrer Richtung Blickenden eine Spannung entgegen dem Uhrzeigersinne. Diese in jedem Augenblicke von der Geschwindigkeit der Feldzunahme abhängige Gegenspannung muß von der angelegten Spannung überwunden werden, daher die Verzögerung beim Anwachsen des Stromes. Wir sehen wieder, wie die induzierte Spannung die Änderung des Zustandes zu hindern sucht. Beim Ausschalten des Erregerstromes nimmt das Feld in den Windungen ab, die vorher durch die Stromwindungen gewissermaßen zusammengeknürten Kraftlinien treten unter Schneiden der Windungen wieder nach außen, es wird eine Spannung im Uhrzeigersinne induziert, das verschwindende Feld sucht den Erregerstrom und damit sich selbst aufrechtzuerhalten, die wieder ablaufende Energie unterhält das Feuer an den Kontakten, das bei großen Feldmagneten etliche Sekunden währen kann. Dieses Aufspeichern der Energie und ihr folgender Ablauf tritt besonders bei Wechselstrom als eine Art Trägheit hervor, mit der das Feld dem fortwährenden Wechsel der Spannung nach Größe und Richtung folgt.



Abb. 39.

Daß sich der Strom nicht plötzlich zu voller Stärke ausbildet, die dem

Widerstande der Wicklung entspricht, wird oft als Wirkung des scheinbaren Widerstandes bezeichnet, welcher Begriff in der Wechselstromtechnik einigen praktischen Wert hat. Zutreffender sagt man dafür induktiver Widerstand, denn wie wir sahen, wird er durch die induzierte Gegenspannung gebildet. Diese hängt offenbar ab von der Stärke des jeweiligen Kraftflusses in den Windungen, der Geschwindigkeit seiner Änderung und der Zahl der hintereinander geschalteten Windungen. Die Gegenspannung beim Entstehen des Stromes kann nie die angelegte Spannung übertreffen, denn sonst würde sich ja ein Gegenstrom ausbilden und damit Energie aus nichts entstehen können. Anders beim Verschwinden des Feldes. Würde der Strom plötzlich vollständig unterbrochen, was streng genommen allerdings nicht möglich ist, weil sich immer in dem Lichtbogen eine, wenn auch noch so kurz dauernde Brücke bildet, aber annähernd etwa durch ein die Leitung zerreißendes Geschloß zu verwirklichen wäre, so würde sich, da kein das gespannte Feld haltender Strom mehr bestände, die austretenden Kraftlinien also mit größter Geschwindigkeit die Windungen schneiden, eine sehr hohe Spannung in der Wicklung ergeben, die selbst zwischen benachbarten Windungen groß genug werden kann, um ihre isolierende Hülle zu durchschlagen. Tatsächlich kommt das schon vor, wenn der Schalter von Hand schnell geöffnet wird. Das Ausschalten großer Elektromagnete mit vielen Windungen erfordert daher immer besondere Vorsicht. Mindestens muß man den Schalter sehr langsam öffnen, damit der Lichtbogen an den Kontakten der ablaufenden Energie lange genug einen bequemen Weg bietet, auf dem sie sich erschöpft.

Der Name Selbstinduktion, dessen Zweckmäßigkeit freilich zweifelhaft ist, wurde im Hinblick auf die gegenseitige Induktion angenommen, die zwei mechanisch getrennte, durch ein magnetisches Feld verkettete Leiter aufeinander ausüben. Mit Selbstinduktion sollte die Vereinigung von induzierendem und induziertem Leiter ausgedrückt werden.

Den Ablauf- oder Entladestrom von Systemen mit Selbstinduktion nannte man früher Extrastrom, weil man ihn sich außer dem normalen Strome in der Wicklung fließend dachte. Er wird vielfach an kleinen Geräten benutzt, bei denen viele Windungen feinen Drahtes einen Eisenkern umschließen. Wird diese Wicklung an eine Spannung gelegt und dann geöffnet, so entsteht an der Öffnungstelle eine sehr viel höhere Spannung. Gewöhnlich wird das Schließen und Öffnen mit einer kleinen zusätzlichen Einrichtung (Wagner'scher Hammer) selbst-



tätig in schneller Folge ausgeführt. Solche Spannungserhöher können zum Entzünden von Gasflammen dienen, zum Anlassen von Quecksilberdampflampen, wozu die Zentralenspannung nicht ausreichen würde, auch zum Versinnlichen der physiologischen Stromwirkung in den bekannten Spielzeugen.

Die Vergleichswiderstände, die beispielweise beim Messen mit der Wheatstoneschen Brücke gebraucht werden, haben auch meist die Form von Drahtspulen, um sie auf kleinem Raume unterbringen zu können. In der gewöhnlichen Weise gewickelt würden sie also auch eine erhebliche Selbstinduktion haben, die beim Gebrauche störend wäre. Um in solchen Fällen die Selbstinduktion zu vermeiden, wickelt man die Drähte bifilar, so daß der Strom gleichlange Leiterstrecken in der einen wie in der anderen Richtung durchfließt. Die dicht nebeneinander verlaufenden Strecken suchen dabei gleiche, aber entgegengesetzte Felder herzustellen, die sich gegenseitig fast ganz aufheben. Allgemein spricht man von induktionsfreien Widerständen im Gegensatz zu induktiven, wenn ihre Selbstinduktion klein genug ist, um vernachlässigt werden zu können.

Es ist nunmehr ein Maß für die Selbstinduktion zu finden. Bei der Entwicklung des Begriffes waren wir ausgegangen von der Energie, die das magnetische System aufspeichert und abgibt. Der Anschaulichkeit wegen betrachten wir einen einfachen bestimmten Fall, und zwar den durch Abb. 33 dargestellten, wo eine Spule mit kreisförmiger Achse und dichten Windungen ein gleichförmiges Feld einschließt. Die Feldstärke ist einfach abhängig von der erregenden Stromstärke, solange die Spule kein Eisen oder diesem magnetisch ähnliche Stoffe enthält. Besteht eine gewisse Stromstärke mit einem ihr entsprechenden Felde, so kann man nach einer schon früher benutzten Vorstellung den Beitrag einer einzelnen Stromwindung zu der gesamten Energie sich so entstanden denken, als wenn diese Stromwindung, also eine Drahtwindung mit der betreffenden Stromstärke, von außen an ihren Ort in der Spule gebracht wäre. Würde sich dabei die Feldstärke nicht geändert haben, so wäre die zum Einschleiben der Stromwindung aufgewendete Arbeit dem Kraftflusse und der Stromstärke einfach entsprechend. Die eingeschobene Windung verstärkt aber ihrerseits den Kraftfluß nach Maßgabe der Stromstärke, die aufzuwendende Arbeit ist also größer. Statt die Windung körperlich einzuschleiben, könnte sie auch von vornherein stromlos an ihrem Orte in der Spule sein und nachträglich erst

mit dem Strome beschickt werden. Das gleiche gilt aber für alle Stromwindungen, die in ihrer Gesamtheit die stromdurchflossene Spule bilden und den schließlichen Kraftfluß erzeugen. Und statt endlich die Stromwindungen in Gedanken nacheinander in Tätigkeit zu setzen, können sie, ohne das Bild zu stören, gleichzeitig ihre Wirkung beginnen, indem man die Stromstärke in der Wicklung allmählich von 0 bis auf ihren Endwert steigert. Die Summe der Arbeit aller Stromwindungen in dem besprochenen Sinne ist die Energie des ganzen Feldes, also entsprechend dem Produkte der Stromwindungen und dem von ihnen umfaßten Kraftflusse, und da dieser selbst der Stromstärke entspricht und mit dem Werte 0 begann, so ergibt sich für die Energie des Feldes der Ausdruck  $\frac{1}{2} Li^2$ , wo  $L$  eine noch näher zu bestimmende Beizahl bedeutet, die Koeffizient der Selbstinduktion genannt wird.

Man kann  $L$  als die doppelte Feldenergie bezeichnen, die das System bei der Stromstärke 1 enthält. Formel ist mithin  $L$  gleich dem Produkte des Kraftflusses bei Stromstärke 1 und der Anzahl der Leiterwindungen und hängt lediglich von der Form der (zunächst immer noch eisenlos gedachten) Spule ab, d. h. von ihrem Querschnitte, ihrer Achsenlänge und Windungzahl. Eine weitere physikalische Bedeutung erhält  $L$ , wenn man die Spannung ins Auge faßt, die bei Änderung des Kraftflusses, Eintreten oder Austreten von Kraftlinien, in der Wicklung induziert wird. Um diese Spannung angeben zu können, muß außer dem Betrage der Änderung auch die Zeit gegeben sein, in der sie sich vollzieht. Da nun die Stromstärke ein Maß für den Kraftfluß, und die bei Änderung in einer gewissen Zeit induzierte Spannung der Windungzahl entspricht, so kann  $L$  auch als die Spannung bezeichnet werden, die in der Wicklung induziert wird, wenn die Stromstärke in 1 sec um 1 Einheit steigt oder fällt. Ersichtlich stimmt diese Auffassung von  $L$  mit der vorherigen formalen (Kraftfluß bei Stromstärke  $1 \times$  Windungzahl) dem Wesen nach überein, sie ist auch die in der Wechselstromtechnik meist anschaulichste.

Als Einheiten zum Berechnen von  $L$ , die wir bis jetzt noch unbestimmt gelassen haben, sind natürlich die üblichen praktischen zu wählen. Wenn in unserem Falle  $q$  den mittleren Querschnitt in  $\text{cm}^2$  der Windungen bedeutet,  $l$  die Achsenlänge der Spule in cm,  $W$  die ganze Windungzahl, so ist der Kraftfluß bei 1 A:  $\frac{5}{4} \frac{W}{l} q$ , dieser nochmals mit der Windungzahl multipliziert ergibt:  $L = \frac{5}{4} \frac{W^2}{l} q \cdot 10^{-8}$ , denn die



letzte Beizahl  $10^{-8}$  ist nach früherem einzuführen, weil  $L$  hier die Bedeutung einer Spannung hat. Eine Spule von solchen Abmessungen, daß die rechte Seite der Gleichung 1 wird, hat die Einheit von  $L$ , genannt 1 Henry. Der Ausdruck für die Energie  $\frac{1}{2}Li^2$  ist dann in Joule zu verstehen ( $1 \text{ J.} = 10^7 \text{ Erg}$ ).

Daß die Energie des Feldes dem Quadrate der Stromstärke entspricht, stimmt überein mit dem Gesetze, wonach die Energie für die Volumeinheit von dem Quadrate der Feldstärke abhängt. Früher hatten wir die Energie im einzelnen bestimmt, jetzt für das ganze Feld. Die erste ergibt sich aus der zweiten durch Division mit dem von der Spule eingeschlossenen Volumen in  $\text{cm}^3$ .

Der oben für die geschlossene Spule gefundene Wert für  $L$  gilt auch für offene Spulen, wenn sie so lang sind, daß sie ein gleichmäßiges Feld einschließen. Grundsätzlich die gleiche Bestimmungsweise von  $L$  ist aber für alle Leiterformen gültig, wenn auch die Berechnung des ganzen Kraftflusses für 1 A in keinem Falle so einfach ist wie in dem, allerdings wichtigsten, der geschlossenen oder langen Spule.

Im übrigen ist der Einfluß des Eisens auf die Selbstinduktion ganz nach den Gesichtspunkten zu beurteilen, die für die Elektromagnete maßgebend sind. Das Eisen vermindert den magnetischen Widerstand, ermöglicht die Ausbildung eines viel stärkeren Kraftflusses, erhöht also immer die Selbstinduktion. Bei eisengefüllten Spulen oder ganz in Eisen eingebetteten einzelnen Leitern wird die Selbstinduktion in demselben Maße erhöht, wie das Eisen magnetisch besser leitet als Luft. Man hat in diesen für Maschinen wichtigsten Fällen den für Luft berechneten Koeffizienten der Selbstinduktion noch mit der früher besprochenen Zahl  $\mu$  zu multiplizieren, die aus Abb. 37 als Verhältnis der magnetischen Dichte im Eisen zu der in Luft bei einer gegebenen Zahl Amperewindungen herzuleiten ist. Entsprechend den Eigenschaften des Eisens nach Abb. 34 ist dann  $L$  nicht mehr für alle Stromstärken konstant, wie in Luft, sondern von der Stromstärke abhängig. Für die Berechnung einzelner Werte von  $L$  selbst bedeutet das keine wesentliche Schwierigkeit, dagegen darf man nicht etwa für die Energie des Feldes im Eisen einfach einen Ausdruck  $\mu \cdot \frac{1}{2}Li^2$  benutzen, eben weil  $L$  mit dem magnetischen Zustande veränderlich ist. Man muß sich dann vielmehr den ganzen Magnetisierungsvorgang in eine Anzahl Stufen zerlegt denken, für deren einzelne, wenn sie genügend klein genommen

werden, ein mittlerer konstanter Wert von  $\mu$  gesetzt werden darf, und die Summe der Energie aller Stufen bilden.

Warum Spulen überhaupt und namentlich eisengefüllte besonders große Werte von  $L$  haben, erklärt sich aus der Entstehungsweise ihres Feldes. Daß endlich bei einem Eisengestelle zum Leiten des Kraftflusses die erregenden Windungen an einzelnen Stellen zusammengedrängt sein dürfen und nicht wie bei Luft gleichmäßig und dicht angeordnet sein müssen, ohne daß dadurch die Werte von  $L$  wesentlich beeinflusst werden, folgt aus dem für die Leitung des Kraftflusses früher Gesagten von selbst.

Wie für den eigentlichen Widerstand werden auch für Messungen von  $L$  körperliche Einheiten hergestellt in Form von Spulen, die, wenn sie allgemein brauchbar sein sollen, kein Eisen enthalten und deshalb ziemlich umfangreich ausfallen.

### Anwendung auf die Gleichstrommaschine.

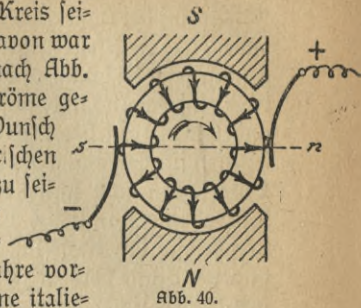
Als Erzeuger des Gleichstromes hatten wir bisher ohne Rücksicht auf die Wirklichkeit eine beliebig groß zu denkende Volta'sche Säule vorausgesetzt und nur kurz angedeutet (Abb. 20 u. 22), wie diese Stromart auf mechanischem Wege hergestellt werden kann. Wir gehen nun etwas mehr auf die jetzige Gleichstrommaschine ein, um die Anwendung der bisher behandelten Stromgesetze auf diese Maschinen in den Grundzügen vorzuführen, ohne alle Einzelheiten näher zu betrachten.

Eine Gleichstrommaschine der früher erwähnten Art gibt nur (Abb. 22) eine Reihe von Stromwellen. Daran wird auch nichts geändert, wenn man, der wirklichen Entwicklung entsprechend, statt der induzierenden ursprünglichen Dauermagnete von hartem Stahl Elektromagnete wegen ihrer viel kräftigeren Wirkung verwendet, wie es der Engländer Wilde tat (1865), der zum Erregen der Feldmagnete auch schon Strom aus einer kleinen Nebenmaschine benutzte. Die große Erfindung von Werner Siemens (1866) bestand darin, den eigenen Ankerstrom der Maschine über die Feldmagnete zu leiten, womit indessen der Kern dieser Erfindung keineswegs erschöpfend bezeichnet ist. Werner Siemens, der schon im vorhergehenden vielfach zu nennen war (geb. 13. Dezember 1816, gest. 6. Dezember 1892), der glänzendste Vertreter der wissenschaftlichen Technik, gleich ausgezeichnet als Gelehrter, Techniker und Geschäftsherr, hatte in zwei Jahrzehnten die Telegraphie zu einer ungeahnten Höhe entwickelt und zunächst für deren Zwecke auch



die mechanischen Stromerzeuger in den Kreis seiner Arbeiten gezogen. Eine Frucht davon war die in ihrer Art vollendete Maschine nach Abb. 20. Die Bemühungen, sie für stärkere Ströme geeignet zu machen, wozu besonders der Wunsch nach wirtschaftlicher Erzeugung des elektrischen Lichtes anregte, führte Werner Siemens zu seiner dynamoelektrischen Maschine, deren Bedeutung für die ganze Technik er weit-schauend sofort erkannte. Schon einige Jahre vorher (1860) hatte der erst 1912 verstorbene italienische Physiker Paccinotti als ganz junger Mann ein Element der Maschine geschaffen, den Ringanker, der nicht nur Strom von gleicher Richtung liefert, sondern auch von praktisch gleichbleibender Stärke, nicht Wellenstrom, sondern Gleichstrom, ähnlich wie die Volta'sche Säule.

Der Anker von Paccinotti, wie ihn Abb. 40 schematisch zeigt, besteht aus einem Ringe von weichem Eisen, der sich zwischen den Polen des Feldmagneten dreht. Er ist mit einer schraubenartig fortlaufenden, in sich geschlossenen Wicklung versehen, die man sich außen blank denken mag, so daß die Windungen von den beiden seitlichen feststehenden Schleiffedern leitend berührt werden können. Ursprünglich benutzte man in der Tat einfache Schleiffedern als Stromabnehmer, später, der besseren Berührung wegen, flache Drahtbündel, von denen die Bezeichnung Bürsten für die Stromabnehmer geblieben ist, wiewohl die jetzt üblichen einer Bürste nichts weniger als ähnlich sind. Der Kraftfluß geht, sich teilend, durch den Anker von Pol zu Pol, er steht im Raume still, den sich drehenden Anker dabei fortwährend ummagnetisierend. Bei der angenommenen Polarität und Drehrichtung werden die äußeren Leiter zwischen Pol und Anker in den durch die Pfeile angedeuteten Richtungen induziert, ganz nach der in Abb. 26 angegebenen Art, nur daß sich hier der Anker als Träger der Leiter und Vermittler des Kraftflusses mitbewegt. Um an die frühere Darstellung noch enger anzuschließen, könnte man sich auch vorstellen, daß der Anker feststände und die Wicklung um ihn herumgedreht würde. Die Leiterteile im Inneren des Ringes und an den Stirnseiten werden nicht induziert, denn sie schneiden bei ihrer Bewegung keine Kraftlinien, sie dienen nur zum Hintereinanderschalten der wirklichen Lei-



terteile auf der Außenseite des Ringes. Die induzierten Spannungen haben, wie die Pfeile zeigen, in den Ringhälften oben und unten entgegengesetzte Richtung, und wenn die Bürsten in einen äußeren Stromkreis eingeschaltet sind, so fließt der Strom von der einen Bürste zur anderen in zwei Stromzweigen durch den Anker. Dabei sorgen die Bürsten für Erhaltung des Schaltzustandes, immer werden gleich viel Leiter oben und unten induziert. Nur wechseln die Windungen fortwährend ihre Rolle, von der einen Bürste freigegeben, durchstreichen sie den Kraftfluß unter dem einen Pole, um dann von der anderen Bürste berührt zu werden und von hier während der folgenden halben Umdrehung zu der anderen Ringhälfte zu gehören usw. Immer ist dieselbe Gesamtlänge der wirksamen Leiterteile der Induktion unterworfen, und man erhält einen fast gleichmäßigen Strom. Allerdings würden bei einer so groben Wicklung, wie sie die schematische Abbildung der Deutlichkeit wegen aufweist, merkliche Schwankungen der Spannung auftreten, da während des Fortschreitens des Ankers um je eine Windung die Lage der Leiterteile in der Nähe der Polanten und damit der Gesamtwert der Induktion sich periodisch etwas ändert. In Wirklichkeit liegen die Windungen aber immer so dicht auf dem Anker, daß die Spannungsschwankungen praktisch verschwinden.

Die unmittelbare Berührung der Windungen durch die Bürsten, wie sie Abb. 40 veranschaulicht, hat man aufgegeben, wiewohl man auch sehr große Maschinen in dieser Weise ausgeführt hat. Man verbindet jetzt die Windungen immer durch kurze Abzweigungen mit besonderen Schleifstücken, die unter guter gegenseitiger Isolierung zu einem zylindrischen Körper (Kommutator) auf der einen Maschinenseite vereinigt sind. Aber auch der Paccinotti-Anker hat eine andere Form angenommen, der Ring wurde (1872) von v. Hefner-Alteneck durch die Trommel ersetzt. Bei dieser fallen die inneren Leiterstücke des Ringes fort, die ja nur zum Verbinden der äußeren wirksamen Stücke dienen, und man führt jeden Außenleiter quer über Stirnseite des Ankers nach dem gegenüberliegenden. Das ist, wie aus Abb. 40 einleuchtet, ohne jede Störung des Stromlaufes möglich, die Trommel ist dann wie ein Garnknäuel bewickelt, und der bisher nötige Hohlraum des Ringes kann nach Erfordernis zum besseren Leiten des Kraftflusses mehr oder weniger mit Eisen gefüllt werden. Anfängern ist sehr zu empfehlen, auf kleinen Zylindern von Holz oder Kork, deren Umfang nach der Zahl



der aufzulegenden Windungen eingeteilt wird, solche Trommelwicklungen im Modell auszuführen. Man wird dabei in sehr unterrichtender Weise auf gewisse Grundregeln geführt, die bei der Trommelwicklung zu beachten sind, und gewöhnt sich leichter an die zeichnerische Darstellung, die nicht immer einfach ist. Denn die Wicklungen der elektrischen Maschinen sind unter den vielen besonderen Bedingungen, die bald auftraten, ihrem Namen Ehre machend, sehr verwickelt geworden, der mathematischen Behandlung unterworfen und beinahe eine Wissenschaft für sich geworden. Um die gesetzmäßige Ausbildung der Wicklungen hat sich besonders Arnold verdient gemacht.

Der Trommelanker, der ersichtlich in der weitgehenden Unterteilung der Wicklung den Grundgedanken Paccinottis ebenfalls verwirklicht, baulich aber nach Anwendung der Zähne ein Dervielfachen des Doppel-T-Ankers von Werner Siemens darstellt, hat vor dem Ringanker große Vorzüge (kleinere Gesamtlänge der Leiter, leichtere Ausführung der Wicklung, größere Festigkeit usw.) und ist deshalb jetzt fast ausschließlich im Gebrauch. Die glückliche Grundform des Doppel-T-Ankers, ausgezeichnet durch ihre mechanische Zuverlässigkeit und durch die wirtschaftlich wichtige Eigenschaft der vollständigen Ausnutzung des wirksamen Raumes durch Eisen und Kupfer, hat vorbildlich auf den Bau der elektrischen Maschinen überhaupt gewirkt. Für schematische Darstellungen benutzt man aber vielfach die Ringform, da sich an ihr der Stromlauf meist übersichtlicher zeigen läßt.

Um nun die von einem Anker bei seiner Drehung zwischen den Polen erzeugte Spannung zu berechnen, hat man nur das früher für einen einzelnen Leiter gefundene Gesetz auf die Reihe der hintereinander geschalteten Leiter auszudehnen. Man kann sich auch einen einzelnen Leiter denken, dessen Länge gleich der Summe der jeweilig unter einem Pole befindlichen wirksamen Leiterstücke ist, und der ein Feld von der gegebenen Stärke mit bestimmter Geschwindigkeit durchstreicht. Die Berechnung braucht nur eine Ankerhälfte zu berücksichtigen, da ja die Spannungen in beiden Hälften gleich und parallel sind. Beim Ausführen der Berechnung könnte man gleich im Anfange zweifelhaft werden, welche lineare Geschwindigkeit man für die Leiter annehmen soll, da man es nicht mehr, wie bei der früheren vereinfachenden Annahme, mit ebenen induzierenden Flächen zu tun hat, die Leiter vielmehr Zylinderflächen bilden und in ihren einzelnen Fasern oder im ganzen verschiedenen Abstand von der Achse, somit auch verschiedene

Geschwindigkeit haben. Über diese Unsicherheit hilft eine einfache Überlegung hinweg. Jeder Leiter durchschneidet jedenfalls bei einer Drehung um  $180^\circ$  den ganzen Kraftfluß, ob er näher der Achse oder weiter von ihr abliegt. Im ersteren Falle ist die Geschwindigkeit kleiner, der Kraftfluß aber in demselben Maße dichter. Man erhält deshalb einen für alle Lagen der Leiter richtigen Wert der Spannung, wenn man die ganz dünn angenommenen Leiter auf dem äußeren Umfange des Ankerreißens liegend denkt, wo sie das noch unveränderte Feld des schmalen Luftspaltes durchschneiden. Wäre der Kraftfluß in der gegebenen Stärke über dem ganzen Umfange des Ankers vorhanden, so würde die induzierte Spannung dem Umfange (in cm) mal der Drehzahl in 1 sec entsprechen. Die Breite des Feldes gemessen auf dem Umfange ist aber nur ein Teil von diesem, deshalb trägt jeder Leiter zur Gesamtspannung nur nach Maßgabe der Feldbreite bei. Ist also die Feldbreite  $b$ , die sekundliche Drehzahl  $n$ , die Feldstärke  $H$ , die Länge eines Leiters  $l$ , so ist dessen Beitrag zur Spannung  $nblH \cdot 10^{-8}$ , die Gesamtspannung aller  $z$  Leiter:  $nblHz \cdot 10^{-8}$ . Die wirksame Länge eines Leiters ist aber gleich der axialen Ausdehnung des Feldes, daher ist  $blH$  der ganze Kraftfluß  $\Phi$ . Die Spannung an den Bürsten wird danach  $e = n\Phi z \cdot 10^{-8}$ . Es kommt also nur darauf an, wie oft in der Zeiteinheit sämtliche Leiter durch das Feld bewegt werden, und die Einfachheit dieses Gesetzes erleichtert in hohem Grade das Umrechnen beim Entwerfe einer Maschine, es erinnert auch lebhaft an das über die ballistische Messung Gesagte, nur daß hier noch durch den Faktor  $n$  die gleichmäßige Wiederholung des Vorganges zum Ausdruck kommt. Aber auch hier ist die besondere Form des Feldes gleichgültig, ob es überall gleiche Stärke hat oder nicht, maßgebend ist nur die Zahl der geschnittenen Kraftlinien.

Die Spannungsformel und das Gesetz der magnetischen Leitfähigkeit bilden in erster Linie die Mittel, um bei Ausbildung der Maschine schnell die Einzelheiten zu ändern und die wirtschaftlich besten Verhältnisse zu erreichen. Die wichtigsten Gesichtspunkte dabei sollen noch an der maßstabrichtigen Systemskizze (1:12), Abb. 41, einer kleinen Maschine von etwa 8 Kilowatt in Kürze erläutert werden. Außer der verlangten Spannung und Leistung ist noch die Drehzahl als gegeben zu betrachten, die im allgemeinen für Maschinen dieser Größe etwa bis 1200 in der Minute beträgt. Der ganz symmetrische Aufbau ist der jetzt allgemein übliche. Für das ringförmige Joch und für die Pol-



schentel möge Stahlguß oder magnetisch gleichwertiger Stoff gewählt sein. Der Anker besteht aus fest zusammengepreßten Eisenblechscheiben von meist 0,5 mm Dicke, die durch Zwischenlagen von Seidenpapier gegeneinander isoliert sind. Andernfalls würden die bei jeder Umdrehung wechselnden Wirbelströme in zeugen. Die Anwa 240 für 110V, auf dem Anker, penweise zu in Nuten, um Halt zu geben magnetischen des Luftspal nern. Einige sind in der Abbil ben. Der Kraft= Hälften durch die Punktieren der middle= angedeutet. Die Pol= schuhe Abb. 41. bedecken etwa  $\frac{2}{3}$  des Anker= umfanges, um einerseits die erforderliche magnetische Dichte im Luft= spalte niedrig zu halten, anderseits den Abstand der entgegengesetzten Polspitzen so groß voneinander, daß nur ein geringer Teil der Kraft= linien um den Anker herum unmittelbar von Pol zu Pol gehen kann. Die Polschentel sind dagegen eingeschnürt, wie bei dem gutleitenden Stoffe zulässig, so daß die mittlere Länge der Erregerwindungen klein ausfällt. Sind unter Annahme voraussichtlich zweckmäßiger magne= tischer Dichte in den einzelnen Teilen (bei gut leitendem Eisen wie hier zwischen 13 000 und 16 000, in den Ankerzähnen über 20 000, im Luftspalte zwischen 5 000 und 9 000) alle wesentlichen Abmessungen an= genommen, so ergeben sich mit einem gewissen Zuschlage die auf die beiden Feldspulen zu verteilenden Amperewindungen aus der Länge der Kraftlinienwege und der Dichte, wie bei Berechnung eines Magne= ten geschildert, und es handelt sich nur darum, ob der angenommene Platz für die Feldwicklung mit Rücksicht auf zulässige Erwärmung und Leistungsverlust genügt. Das gilt ebenso für eine Hauptstrommaschine, deren Feldpole bei entsprechend dicken Windungen vom Ankerstromerregt werden, wie für Nebenschlußmaschinen mit dünnadrätiger Wick=

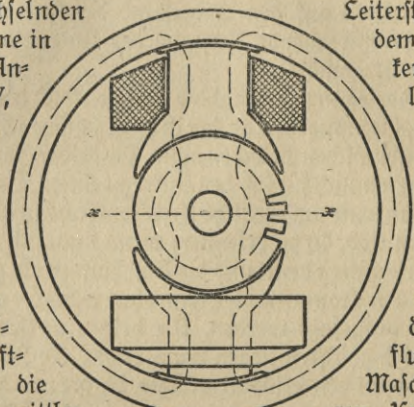


Abb. 41.

Leiterströme schädli= dem Ankereisen er= terdrähte, hier et= liegen nicht frei sondern grup= sammengefaßt ihnen sicheren und um den Widerstand tes zu verklei= dieser Nuten dung angege= fluß geht in zwei Maschine, wie durch ren Kraftlinienwege

lung, die an die volle Spannung der Maschine oder einer anderen Stromquelle gelegt ist. Andernfalls müssen die Abmessungen verändert werden, unter Umständen der ganzen Maschine, einschließlich der Leiterzahl, die doch von der Ankergröße abhängt. Denselben Einfluß hat die Rücksicht auf den Widerstand des Ankers zwischen den Bürsten und die hinreichende Kühlung des Ankers bei der größten vorkommenden Stromstärke.

Besondere Überlegung verlangt die richtige Wahl der radialen Dicke des Luftspaltes, die immer viel größer ist (hier zwischen 3 und 4 mm), als lediglich aus mechanischen Gründen nötig. Die beiden Zweige des Ankerstromes machen nämlich für sich den Anker zu einem Elektromagneten, und zwar so, daß seine magnetische Achse senkrecht zu der Feldpolachse steht. Das ist an Abb. 40 zu erkennen, wenn man sich den Ring nach der Linie *ns* zerschnitten denkt und die Ringhälften als gesonderte Magnete ansieht. Ein Trommelanker kann ohne weiteres als einheitlicher Elektromagnet aufgefaßt werden. Die beiden aneinanderstoßenden Nordpole der Ringhälften liegen dann rechts, die Südpole links, sie sind gleichsinnig mit den Feldpolen S bzw. N, die von den Bürsten aus gerechnet in der Drehrichtung folgen. Die in dieser Richtung nächstliegenden Spitzen der Feldpole werden daher in ihrer Stärke geschwächt, die Spitzen auf der anderen Seite dagegen verstärkt, die Felder unter den Polschuhen werden verzerrt, die Dichte wächst in der Drehrichtung und nimmt ab in der umgekehrten Richtung. Es ist, als wenn die Kraftlinien von tangential über den Anker verteilten Querkräften in der Drehrichtung zusammengedrückt würden. Diese nur rohe Vorstellung der Erscheinung genügt wohl, um den Einfluß des Luftspaltes auf die Feldverzerrung zu erkennen: Die durch den Ankerstrom bestimmten Querkräfte werden von um so geringerer Wirkung sein, je weiter der Luftspalt ist, denn um so größer ist der Widerstand der Kraftlinien gegen ihre Querverschiebung. (Dieselbe Überlegung gilt für einen Motor, der bei derselben Polarität der Feldmagnete und derselben Stromrichtung im Anker wie nach Abb. 40 im umgekehrten Sinne umlaufen würde.)

Eine tunlichst geringe Feldverzerrung ist aber namentlich für die sogenannte Stromwendung in den Ankerleitern erwünscht. Jeder dieser Leiter bildet beim Stromdurchgang um sich ein eigenes Feld, er ist, besonders beim Einbetten in eine Nut des Ankereisens, mit erheblicher Selbstinduktion behaftet, und in der äußerst kurzen Zeit, wo der Leiter



unter der Bürste durchgeht und sein Strom die entgegengesetzte Richtung annehmen soll, muß die Feldenergie des Leiters verschwinden und der neuen Stromrichtung entsprechend wiederhergestellt werden. Würden keine Maßnahmen dagegen getroffen, so würde starke Feuer an den Bürsten entstehen, das in kurzer Zeit die Gleitfläche des Kommutators anfriszt. Das ist nach dem über die Wirkung der Selbstinduktion Gesagten wohl verständlich. Das einfachste Mittel gegen das Bürstenfeuer ist das Vorschieben der Bürsten um eine kleinere oder größere Strecke in der Drehrichtung, um, nach der älteren, noch unreifen Anschauung die Ausbildung des entgegengesetzten Stromes durch die anlaufende Polspitze zu beschleunigen. Die feuerlose Stromwendung, von der natürlich in hohem Grade die Güte einer Gleichstrommaschine abhängt, hat von jeher die Elektriker beschäftigt, und die feinere Ausbildung der schwierigen Theorie ist noch heute nicht abgeschlossen. Wenn diese hier nur eben erwähnt werden konnte, so sieht man doch, daß die Rückwirkung der Ankerströme auf das induzierende Feld schon mit Rücksicht auf die Stromwendung mit steigender Stromstärke sich immer unliebsamer geltend macht. Das trifft aus verwandten und anderen Gründen auch dann noch zu, wenn besondere schmale, vom Ankerstrom erregte Wendemagnete in der neutralen Zone vorgesehen sind, wie sie jetzt umfangreich verwendet werden. Jedenfalls wird der Wert eines „steifen“ Feldes im Luftspalte einleuchten, zu erzielen durch dessen reichliche Bemessung, die andererseits nicht das Notwendige überschreiten darf, da der Luftspalt einen großen Teil der Felderregung beansprucht und deshalb von erheblichem Einflusse auf die Wirtschaftlichkeit der Maschine ist. Die günstige Wirkung des freien Luftspaltes wird noch in gewissem Grade unterstützt durch den verzahnten Teil des Ankers, da die Zähne meist eine sehr große magnetische Dichte erhalten.

Ungünstig ist der Luftspalt wieder hinsichtlich der Streuung der Kraftlinien. Diese werden gerade hier Neigung haben, abzuirren und nicht dem vorgeschriebenen Wege vom Pol zum Anker zu folgen, wo auf kurzer Strecke ein großer Teil des ganzen magnetischen Widerstandes zu überwinden ist. Der Kraftfluß durch Joch und Schenkel ist also immer etwas größer als der allein wirksame durch den Anker, und der Verlust, der infolge der Feldverzerrung mit der Stromstärke wächst, wird bei einer kleinen Maschine und voller Leistung kaum unter 25% betragen. Dieser und noch andere Umstände, deren Berücksichti-

gung hier zu weit führen würde, außerdem aber der Spannungsverlust durch den Anferwiderstand, der durch erhöhte Induktion auszugleichen ist, machen den oben erwähnten Zuschlag zur Erregung recht erheblich und nicht nur zu einem Sicherheitszuschlage gegen kleine Ungenauigkeiten der Rechnung.

(An dieser Stelle mag eine Meßweise der Streuung mitgeteilt werden, die wenig benutzt, aber sehr einfach und anschaulich ist und natürlich auch für andere Maschinen und Apparate brauchbar. Sie ist eine

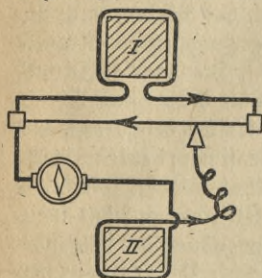


Abb. 42.

Nullmethode und verlangt an feinerem Gerät nur ein einigermaßen empfindliches Galvanoskop, das zudem meist durch einen technischen Spannungsmesser ersetzt werden kann. Um die beiden Stellen, zwischen denen die Streuung gemessen werden soll, beispielsweise um einen Schenkel dicht an der Spule und den Anfer in der neutralen Zone, ist je eine Meßwindung gelegt (oder mehrere). Die Enden der Windung des stärkeren Kraftflusses I (Abb. 42), hier des Schenkels, sind an

einen Meßdraht gelegt, das eine Ende der Windung von II ebenfalls, das andere an einen Laufkontakt. An einer Stelle dieses Stromkreises ist das Galvanoskop eingeschaltet. Wird Strom von der beabsichtigten Stärke in den ruhenden Anfer geleitet und der Erregerstrom der Maschine schnell verringert, so induziert der abnehmende Kraftfluß in beiden Windungen einen Stromstoß, etwa in Richtung der Pfeile. Man kann nun durch Versuch eine solche Stelle für den Gleitkontakt am Meßdrahte finden, daß der Strom im Kreise II verschwindet. Dann ist der Spannungsabfall längs des ganzen Meßdrahtes ein Maß für den verschwindenden Kraftfluß I, und der durch den Gleitkontakt abgegrenzte Teil des Meßdrahtes im Kreise II gibt an, welchem Teile jener Spannung der kleinere Kraftfluß das Gleichgewicht hält. Ist der Widerstand der Meßwindung I gegenüber dem des Meßdrahtes zu vernachlässigen, so geben die Länge des Meßdrahtes und seines Abschnittes unmittelbar das Verhältnis der Kraftflüsse, also die Streuung. Man mißt zweckmäßig in kleineren Stufen wegen der Veränderlichkeit der Streuung mit der Stromstärke.)

Weitere Überlegungen beim Entwurfe der Maschine gelten ihrem Verhalten bei Selbsterregung, der Änderung der Spannung mit der



Strombelastung des Ankers und dem Wirkungsgrade oder dem Teile der zugeführten mechanischen Leistung, der als Aufwand für die entwickelte Wärme (vergl. dazu auch S. 67) je nach der Größe der Maschine noch zulässig erscheint. In stetem Zusammenhange damit sind die Kühleinrichtungen auszubilden und die Forderungen nach genügender Festigkeit und gefälligen Formen zu erfüllen. — Man sieht, wieviel Kenntnisse elektrischer, thermischer und mechanischer Art mit baulichem Geschicke sich vereinigen müssen, um den wirtschaftlich-technischen Ansprüchen an eine gute Maschine zu genügen.

Die Gleichstrommaschine ist ebensowohl Generator, als welchen wir sie bisher betrachteten, wie Motor. Der Anker des Generators erfährt nach Maßgabe des von ihm gelieferten Stromes im Felde einen Widerstand gegen die Drehung, wird ihm Strom derselben Richtung zugeführt, und behält auch das Feld die frühere Richtung, so dreht sich der Anker im umgekehrten Sinne. Dabei erhalten die Leiter aber eine induzierte Spannung, die der angelegten Spannung aus der äußeren Stromquelle entgegengesetzt ist. Das ergibt sich aus den Stromregeln, aber schon aus dem energetischen Grundsatz, den wir für einzelne Leiterfrüheranwendeten: Wäre die induzierte Spannung mit dem Motorstrom, statt gegen ihn, so würde der Strom ohne Gegenwert immer weiter steigen, es bestände ein Perpetuum mobile. Die Gegenspannung kann natürlich nie die angelegte Spannung übertreffen, sonst würde derselbe Widerspruch eintreten, sie kommt aber der angelegten Spannung um so näher, je weniger von dieser in dem immer nur kleinen Ankerwiderstande verbraucht wird. Der Nebenschlußmotor, dessen Feld annähernd gleichbleibt, hat deshalb auch annähernd gleiche Geschwindigkeit, diese vermindert sich vom Leerlaufe bis zur vollen Belastung nur in geringem Maße. Daraus ergeben sich die Mittel zum Regeln der Geschwindigkeit des Nebenschlußmotors: Entweder wird bei unveränderter Erregung die Ankerspannung ermäßigt oder erhöht, um niedrigere bzw. höhere Geschwindigkeit einzustellen, oder bei unveränderter Ankerspannung wird mit demselben Erfolge das Feld verstärkt bzw. geschwächt. Immer stellt die angelegte Spannung mit wechselnder Belastung eine solche Stromstärke und Geschwindigkeit her, daß sie in dem schädlichen Widerstande des Ankers und in der einen Nutzwiderstand darstellenden Gegenspannung verbraucht wird. Diese bildet ein Maß für die Geschwindigkeit des Ankers in seinem Felde, multipliziert mit der Stromstärke gibt sie die wirklich in mechanische

Leistung umgekehrte elektrische Leistung. Das gilt auch für den Reihenschlußmotor, nur ändert sich bei ihm die Geschwindigkeit mit der Belastung, da das Feld von dem Ankerströme abhängig ist.

Zweipolig, wie die oben betrachtete, werden jetzt nur noch kleinere Maschinen ausgeführt. Größere erhalten mehr als ein Polpaar, und man kann sie sich entstanden denken durch gleichmäßige Verteilung einer Anzahl zweipoliger Maschinen im Kreise um den gemeinschaftlichen entsprechend großen Anker. Solche Maschinen werden kleiner und leichter als zweipolige gleicher Leistung, schon weil die Joch nicht mehr die Hälfte des gesamten Kraftflusses durch den Anker zu führen haben, sondern nur noch den durch ein einzelnes Polpaar bestimmten Teil. Aus demselben Grunde wird die erforderliche radiale Tiefe des wirksamen Ankereisens kleiner.

Die Höhe der mit Gleichstrommaschinen der üblichen Bauart zu erzielenden Spannung bleibt leider weit hinter den Wünschen zurück, namentlich infolge des Kommutators, zwischen dessen einzelnen, durch eine dünne Isolierschicht getrennten Segmenten nur eine geringe Spannung herrschen darf. Mehr als 1500 V Klemmenspannung kann man bei der nötigen Sicherheit nicht erreichen und auch das nur mit großen Maschinen.

### Elektrochemische Sammler (Akkumulatoren).

Mehrfach haben wir schon den Begriff des Aufspeicherns der Energie verwendet, so beim Besprechen der Selbstinduktion, die eine Umwandlung der elektrischen Energie in magnetische und umgekehrt darstellt. In der Elektrotechnik versteht man aber unter der Bezeichnung Sammler oder Akkumulator den elektrochemischen, der imstande ist, längere Zeit den eigentlichen Stromerzeuger zu ersetzen oder wenigstens bei stark schwankendem Strombedarfe ausgleichend zu wirken, ähnlich wie die Behälter der Gas- und Wasserwerke.

Aus dem großen Gebiete der Elektrochemie kommt für die praktisch benutzten Sammler zunächst die S. 9 erwähnte Erscheinung in Betracht, die Zersetzung säurehaltigen Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff, wie sie kurz zu benennen ist, wiewohl der Vorgang im einzelnen verwickelter ist. In der elektrolytischen Zelle scheidet sich beim Stromdurchgange an der Eintrittseite, der Anode, Sauerstoff aus, an der entgegengesetzten Kathode Wasserstoff. Die so getrennten beiden Elemente würden bei ihrer Wiedervereinigung (Verbrennung) eine bestimmte



Wärmemenge ergeben, sie stellen also einen bestimmten Energievorrat dar, der durch die vorherige Stromwirkung entstanden ist. Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie mußte daher der zersetzende Strom auch eine bestimmte Gegenspannung der Zelle überwinden, wie sie in der Tat ohne weiteres nachweisbar ist. Dabei können die beiden Gase als solche an den Elektroden, der Anode und Kathode, frei aufsteigen, wie an Platinelektroden, sie können aber auch mit den Elektroden chemische Verbindungen eingehen. Zellen dieser Art erweisen sich dann als umkehrbar, sie können vermöge der ungleichartigen chemischen Verbindungen an den Elektroden selbst als Stromerzeuger wirken und die bei der „Ladung“ aufgewendete Stromenergie in umgekehrter Stromrichtung zurückgeben. Als besonders geeignet für den Zweck sind hauptsächlich Sammler mit Elektroden aus Blei in verdünnter Schwefelsäure in Gebrauch.

Für die Wirkung der Zellen ist die Größe der Elektrodenfläche wesentlich, denn nur hier findet die elektrochemische Umsetzung statt. Für den störungsfreien Verlauf des Vorganges ist auch eine geringe Stromdichte in der Zelle Bedingung. Andererseits ist natürlich erwünscht, den Raumbedarf der Elektrodenplatten zu beschränken. Das führte zu tief gefurchten und gegitterten Platten, die sich in flachen Kästen aus Glas oder Hartgummi nahe gegenüberstehen. Um ferner die Oberflächenwirkung zu steigern und die Zellen für den regelmäßigen Gebrauch vorzubereiten, hatte schon Planté (um 1860) die Platten durch häufig wiederholtes Laden bei abwechselnder Stromrichtung „formiert“, wobei sich die Oberfläche mit einer porösen Schicht aus Bleisuperoxyd und Bleiteilchen bedeckt. Später ersetzte Saure dieses umständliche Verfahren durch Anwendung von fertigem Bleioxyd, das in Maschen und Winkeln der Elektroden gehalten wird. Beim Laden verwandelt sich das Bleioxyd an der Anode durch Aufnahme des hier entstehenden Sauerstoffes in Bleisuperoxyd, an der Kathode reduziert der Wasserstoff das Bleioxyd zu metallischem Blei. Die Aufnahmefähigkeit der Zelle ist erschöpft, die Ladung vollendet, wenn freie Bläschen von Wasserstoff und Sauerstoff aufsteigen. Bei der Entladung erfolgt die Rückbildung nach dem vorherigen gleichartigen Zustande der Elektroden hin.

Die genauere Theorie des elektrolytischen Vorganges in dem Sammler ist ziemlich verwickelt, die Herstellung der Platten erfordert viel Erfahrung, und der Gebrauch der Batterien große Aufmerksamkeit, da

bei Überanstrengung die Platten durch Abbröckeln der Füllmasse und Verwerfen des Bleigerippes unbrauchbar werden.

Die Gebrauchsspannung einer Sammlerzelle ist durchschnittlich 2 V, man muß also viele Zellen hintereinander schalten, um auf die üblichen Spannungen der elektrischen Zentralen zu kommen. Laden und Entladen bilden aber wegen mancher störenden Nebenerscheinungen keinen vollständig umkehrbaren Kreislauf, die Ladesspannung muß erheblich höher sein als die Entladespannung, man kann daher nur 70 bis 80% der zum Laden aufgewendeten elektrischen Energie in dem Entladestrome wiedergewinnen. Die Größe der Bleiplatten richtet sich nach der in Frage kommenden Stromstärke. Auf 1 dm<sup>2</sup> Plattenoberfläche dürfen nicht über 1,5 Ampere entfallen. Wenn auch die Formgebung der Platten eine möglichst große freie Oberfläche zu erzielen sucht, so wird doch der Raumbedarf der Zellen beträchtlich.

Trotz dieser Mängel ist die Sammlerbatterie in Gleichstromzentralen ein unübertreffliches Mittel, um bei dem schwankenden Tagesbedarfe an elektrischer Energie die Leistung der Maschinen einigermaßen gleichmäßig halten und so mit kleineren Maschinen auskommen zu können, als dem größten Bedarfe entspricht, oder auch bei Störungen an den Maschinen den Betrieb aufrecht zu erhalten. Freilich ist die Aufnahmefähigkeit für Energie auch bei dem besten elektrischen Sammler nur klein zu nennen, wenn man andere Energiespeicher in Vergleich zieht, besonders die Brennstoffe. Man gibt die Kapazität einer Sammlerzelle in Amperestunden an, das bedeutet, daß man ihr während einer Reihe von Stunden eine bestimmte Stromstärke entnehmen kann. Unter Berücksichtigung der mittleren Entladespannung von 2 V berechnet sich danach die Leistung der Zelle während dieser Zeit. Es hat sich nun ergeben, daß praktisch zum Speisen eines Elektromotors für jede Pferdestärke und Stunde eine Sammlerbatterie von etwa 50 kg Gewicht erforderlich ist. Ein elektrischer Wagen mit Batterie muß also schon ein sehr bedeutendes Gewicht mitschleppen, um für wenige Stunden mehrere Pferdestärken benutzen zu können. Dagegen verbraucht ein Benzinmotor höchstens 0,50 kg Brennstoff für eine stündliche Pferdestärke, hat also noch nicht den hundertsten Teil des Gewichtes für die gleiche Betriebsdauer mitzuführen. Das ist der Grund, weshalb der elektrische Sammler für Fahrzeuge nur in besonders geeigneten Fällen gebraucht wird.



### III. Wechselstrom.

#### Erste Anwendung des Wechselstromes.

Die ersten größeren elektrischen Maschinen waren Wechselstrommaschinen für starke Einzellichter, so die Maschinen von Nollet in den 60er Jahren, mit Stahlmagneten und nach jetzigen Begriffen verhältnismäßig sehr großen Maßen. Sie wurden bald durch die überraschend kleinen Gleichstrommaschinen von Werner Siemens verdrängt, traten aber mit der Entwicklung des Starkstromes wieder hervor. Ein grundsätzlicher Streit zwischen Gleichstrom und Wechselstrom besteht nicht mehr, beide Stromarten haben ihre Vorzüge. Der Gleichstrom ist vielseitiger und im ganzen einfacher benutzbar, eine weitere Stütze für ihn ist der Sammler. Der Wechselstrom erlaubt mit Hilfe des Transformators die wirtschaftliche Zuleitung bei hoher, an der Gebrauchsstelle beliebig und leicht zu ermäßigender Spannung.

#### Geräte zum Untersuchen des Wechselstromes.

Die Verjinnlichung des Wechselstromes durch die Wellenlinie Abb. 21 leuchtet gewiß ohne weiteres ein, denn wir sind auf den verschiedensten anderen Gebieten, so in der Akustik und Optik, daran gewöhnt, periodisch wiederkehrende Erscheinungen in ähnlicher Weise darzustellen, und das Bild des Wellenzuges ist uns durch bewegte Wasserflächen, das wogende Kornfeld und andere Schwingungsformen vertraut.

Das Wesen der Schwingung ist der stete Wechsel der Zustände zwischen Grenzwerten bei periodischer Wiederkehr der Wertreihe. Mit Periode bezeichnet man die Dauer einer vollständigen Schwingung. So bilden in Abb. 21 je zwei Abschnitte eine Periode, wobei die wagrechte Gerade die Zeit bedeutet, die senkrechten Ordinaten der Wellenlinie die Augenblickswerte des Stromes oder der Spannung, deren entgegengesetzte Richtungen durch die Stellung oberhalb oder unterhalb der Zeitlinie angedeutet sind. Es ist üblich, die oberen Ordinaten als positive Werte, die unteren als negative zu bezeichnen. Die Zahl der vollständigen Perioden in 1 sec nennt man die Frequenz.

Mit der Frequenz und den größten Werten der Ordinaten ist die Schwingung noch nicht vollständig bestimmt, denn das Gesetz, nach dem die Ordinaten innerhalb einer Halbperiode sich ändern, kann sehr verschieden sein, die Welle kann spitzer oder flacher verlaufen, innerhalb einer Halbperiode auch noch eine Anzahl kleinerer Oberwellen auf-

weisen. Wir haben diese Frage noch offen gelassen, aber sie mußte sich bei der genaueren Behandlung des Wechselstromes bald aufdrängen, um so mehr, als die schwingende Bewegung überhaupt mathematisch lange erforscht war, namentlich durch den französischen Mathematiker Fourier (1768—1830). Nun läßt sich zwar unter vereinfachenden Annahmen die Grundform der Wellen von Spannung und Strom von vornherein angeben, wie wir weiterhin sehen werden, ebenso sicher aber mußte man bei den wirklichen Maschinen Abweichungen voraussehen, wegen der veränderten Bedingungen, die sich rechnerisch nicht immer genau genug berücksichtigen lassen. Und da manche Nebenerscheinungen des Wechselstrombetriebes nur durch gewisse feinere Einzelheiten der Wellenform zu erklären waren, so bestand ein Bedürfnis nach einem Gerate, das die tatsächlichen periodischen Änderungen von Spannung und Strom zur Anschauung bringt.

Die Frequenz von Wechselstromanlagen ist bei uns gewöhnlich 50, in manchen Fällen 25 und noch weniger, immer aber so hoch, daß ein gewöhnliches Galvanometer mit Nadel nicht folgen kann, wie schon früher bemerkt, sondern zitternd in der Mittellage bleibt. Die Masse des schwingenden Systemes und der nötige Ausschlag sind zu groß, die bewegenden Kräfte zu klein. Von einem Verfolgen der Bewegungen mit dem Auge könnte natürlich ohnehin nicht die Rede sein. Man muß deshalb die Schwingungen sich selbst aufzeichnen lassen, ein Verfahren, das auf anderen Gebieten in den verschiedensten Formen geübt wird, beispielsweise in der Akustik, wo eine mit feiner Spitze versehene Stimmgabel auf einer quer zu ihren Schwingungen vorbeigeführten beruhten Tafel einen Wellenzug beschreibt. Es kam nun darauf an, ein äußerst leicht bewegliches schwingendes System zu schaffen, das von verhältnismäßig starken Kräften beeinflusst wird, nur sehr kleine Wege zurücklegt, diese aber durch starke Vergrößerung sichtbar oder allgemeiner wirksam werden läßt. Nach einem ersten Versuche von Grölich in dieser Richtung, der schon annehmbare Ergebnisse lieferte, begnügte man sich längere Zeit doch noch mit einem umständlichen und im Wesen unvollkommenen Verfahren anderer Art, indem man durch einen rotierenden Schaltapparat einzelne Augenblickswerte an verschiedenen Stellen der Periode bestimmte. Das allmählich immer dringender werdende Bedürfnis führte aber zu einem dem Grölich'schen verwandten Gerate von solcher Empfindlichkeit, daß auch noch viel schnellere Schwingungen als die Maschinenwechsel da-



mit untersucht werden können. Die schematische Einrichtung des sogenannten Oszillographen wird hier mitgeteilt, nicht weil wir auf die Feinheiten eingehen könnten, zu deren Untersuchung er dient, sondern nur um dem Leser eine Vorstellung zu geben, wie die den Wechselstrom versinnlichenden Wellenzüge wirklich hergestellt werden können, von denen in der Elektrotechnik mit solcher Sicherheit gesprochen wird. Außerdem wird uns das Wesen des Oszillographen auch bei gewissen grundsätzlichen Erörterungen dienlich sein.

Die Abb. 43 a und b zeigen als Beispiel die hier wichtigsten Teile in annähernd natürlicher Größe, a von der Seite gesehen, b in einem wagrechten Schnitte. Die keilförmigen Pole eines mit Gleichstrom erregten Elektromagneten bilden zwischen sich ein langes schmales Feld, dessen magnetische Dichte an der engsten Stelle etwa 10000 st. Längs durch dieses Feld ist ein ganz dünner (meist flacher)

Draht nach unten und wieder nach oben geführt, und die so gebildete Schleife ist am oberen offenen Ende an zwei feste Anschlußpunkte gelegt, unten durch eine Feder gespannt. In der Mitte des Feldes ist auf die beiden parallelen Seiten der Schleife ein Spiegelchen geklebt. Auf dieses fällt von vorn seitlich der durch eine Linse verdichtete Lichtstrahl einer Lampe, der geradeaus auf eine etwa 40 cm entfernte, in der Abbildung nicht angegebene Auffangfläche reflektiert wird. Dieser Lichtstrahl bildet den Zeiger.

Wenn nun durch die Anschlüsse Strom in die Drahtschleife geführt wird, so biegt sich in dem konstanten starken Felde die eine Seite der Schleife etwas nach vorn durch, die andere nach hinten, weil ja die Stromrichtungen in den parallelen Drähten entgegengesetzt sind. Die Folge davon ist eine Verdrehung des Spiegels, der seine Bewegung durch den abgelenkten Lichtstrahl auf der Auffangfläche anzeigt. Es ist

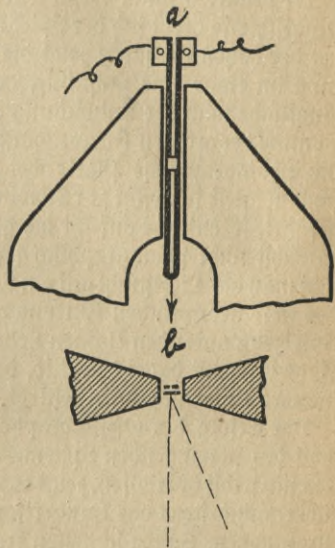


Abb. 43.

leicht einzusehen, wie bei den gewählten Verhältnissen die Ausbiegung der Schleifenseiten um kleine Bruchteile eines Millimeters Verschiebungen des Lichtpunktes auf der Auffangfläche um mehrere Zentimeter bewirken kann. Beim Durchgange von Wechselstrom durch die Drahtschleife dreht sich der Spiegel periodisch nach beiden Seiten, und bei der hohen Frequenz zeigt die Auffangfläche infolge der Nachwirkung im Auge eine Lichtlinie, eine photographische Platte als Auffangfläche nach der Entwicklung einen Strich, dessen Länge gleich der Summe der größten Ausweichungen nach beiden Seiten ist. Wird aber die photographische Platte bei der Aufnahme mit bestimmter Geschwindigkeit senkrecht zur Schwingungsebene des Lichtpunktes vorbeigeführt, so entsteht auf ihr die gesuchte Wellenlinie. Will man diese zunächst nicht photographisch festhalten, sondern nur beobachten, so läßt man den Lichtstrahl auf ein rotierendes spiegelndes Prisma fallen, das in seiner optischen Wirkung mit dem Stroboskop verwandt ist (als Spielzeug unter den Namen Lebensrad, Zoetrope u. a. bekannt). Im Auge erscheint dabei das Bild, das die photographische Platte für genauere Untersuchungen festlegt.

Der Erfolg des Oszillographen beruht auf der sehr geringen Trägheit des schwingenden Systemes. Einmal abgelenkt und dann stromlos sich selbst überlassen, zeigt es eine Eigenfrequenz von 6000 und darüber, mindestens das Hundertfache der üblichen Frequenz in Wechselstromnetzen. Solche schnellen freien Schwingungen können ersichtlich die durch den Wechselstrom erzwungenen Schwingungen nur wenig beeinflussen. Der feine Draht der Schleife kann natürlich nur einen schwachen Strom führen, etwa bis 0,10 A. Um beliebige Stromkurven aufzunehmen, muß man deshalb der Schleife einen induktionsfreien Leiter parallel schalten, der ihr den größten Teil des Stromes abnimmt. Zur Aufnahme von Spannungskurven wird dagegen der Schleife ein so großer (ebenfalls induktionsfreier) Widerstand vorgeschaltet, daß die Spannung keinen unzuträglichen Strom erzeugen kann. Bei aller Einfachheit der Grundlage wird der Oszillograph leider durch die vielen nötigen Ausrüstungsstücke recht umfangreich und teuer, auch erfordert bei der Feinheit aller Teile seine Handhabung viel Sorgfalt.

Die gewöhnlichen Meßgeräte für Wechselstrom geben ihrer Trägheit wegen nur mittlere Werte von Strom und Spannung. Sie müssen natürlich Wirkungen benutzen, die von der Stromrichtung unab-



hängig sind, die Wärmeentwicklung in einem Leiterstücke und dessen Dehnung dabei, die magnetische Zugkraft auf ein bewegliches weiches Eisenstück, oder die gegenseitige Wirkung von Stromteilen aufeinander, wie in dem zuverlässigsten, wenn auch weniger bequemen Geräte, dem Elektrodynamometer von Werner Siemens. In ihm sind zwei Drahtrahmen senkrecht zueinander angeordnet, ein fester und ein beweglicher, bei Strommessern mit einer oder wenigen starken Windungen, bei Spannungsmessern mit vielen feinen Windungen. Wie auch die Stromrichtung in den beiden hintereinander geschalteten Rahmen ist, immer ist sie in je zwei entsprechenden Seiten die gleiche, wie Abb. 44 (ohne Berücksichtigung der Zuleitungen) andeutet, diese Seiten wirken also anziehend aufeinander. Die durch einen Zeiger markierte senkrechte Lage der Rahmen bleibt bei der Messung erhalten, denn man läßt ihr eine, nach einer Skala jeweilig eingestellte Torsionsfeder entgegenwirken. Die Stellkraft entspricht, wie leicht zu erkennen, in jedem Augenblicke dem Produkte aus den beiden Stromstärken der Rahmen, bei der hier vorausgesetzten Hintereinanderschaltung also dem Quadrate der gemeinsamen Stromstärke. Diese ist nach der Eichung des Gerätes durch leichte Rechnung oder Tabellen zu finden.

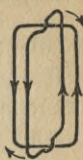


Abb. 44.

Ein besonderer Vorteil des beschriebenen Gerätes und aller auf demselben Grundsätze beruhenden ist noch die Möglichkeit, damit unmittelbar die Leistung zu messen. Um die Leistung für Gleichstrom zu erhalten, ist, wie wir wissen, die Stromstärke mit der Spannung zu multiplizieren. Führt man nun das Dynamometer halb als Strommesser, halb als Spannungsmesser aus, gibt man also etwa dem festen Rahmen eine oder einige starke Windungen und schaltet ihn in Reihe mit den Stromverbrauchern, erhält der bewegliche Rahmen dagegen viele feine Windungen für die Spannung, so bildet das so zum Wattmeter gewordene Gerät mechanisch das Produkt aus Strom und Spannung. Das ist für Gleichstrom von geringerer Bedeutung, da hier das gesuchte Produkt ohnehin einfach zu erhalten ist, bei der meist konstanten Spannung sogar durch eine bloße Strommessung. Um so wichtiger ist aber das Wattmeter für Wechselstrom, wie wir weiterhin noch näher sehen werden, da es den mittleren Wert aller Produkte aus den augenblicklichen Stromstärken und den zugehörigen Spannungen anzeigt.

### Grundform der Wechselstrommaschine. Die Sinuslinie.

Wie schon erwähnt, läßt sich bei bestimmten Voraussetzungen die Wellenform des Wechselstromes einfach und genau angeben. Das Schema einer dazu geeigneten idealen Maschine ist in Abb. 45 dar-

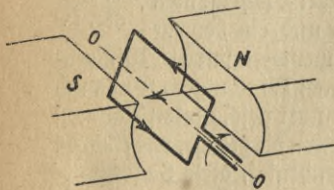


Abb. 45.

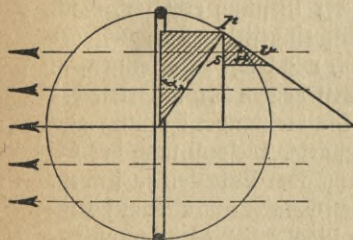


Abb. 46.

gestellt. Zwischen den Polen eines mit Gleichstrom erregten Elektromagneten dreht sich ein Drahtrahmen, dessen Enden in der Nähe der Achse mit isolierten Schleifringen verbunden zu denselben sind, um den Strom an ruhende Leitungen zu übertragen. Die Stromrichtungen bei der augenblicklichen Stellung des Rahmens, der angenommenen Polarität des induzierten Magneten und dem Drehinne sind in der Abbildung angegeben. Man findet sie entweder durch Betrachtung der einzelnen Rahmensseiten, welche die Kraftlinien in bestimmter Richtung schneiden, oder nach der Regel des in einer Leiterschleife zunehmenden oder abnehmenden Kraftflusses. Zwischen den

Magnetpolen soll ein ganz gleichmäßiges Feld herrschen, das bei dem großen Abstände der Pole praktisch freilich auch nicht annähernd zu verwirklichen wäre. Zum weiteren Verfolgen der Einzelheiten dient die noch einfachere Skizze 46, die nur die Richtung der Kraftlinien und einen Schnitt durch den induzierten Rahmen senkrecht zur Achse zeigt. In der gezeichneten Mittelstellung umfaßt der Rahmen so viel von dem Kraftflusse, wie er überhaupt aufnehmen kann. Bei einer Drehung des Rahmens um einen sehr kleinen Winkel aus dieser Stellung ändert sich der umfaßte Kraftfluß kaum merklich, oder anders gesagt, die wirksamen Rahmensseiten bewegen sich zunächst, ohne Kraftlinien zu schneiden. In der Mittellage findet also keine Induktion statt. Umgekehrt, wenn nach einer Drehung um  $90^\circ$  die Ebene des Rahmens selbst dem Kraftflusse parallel liegt. Dann haben die Seiten ihre größte Geschwindigkeit senkrecht zu den Kraftlinien, bei einer Drehung um einen gleich kleinen Winkel wie vorher wächst der den Rahmen durch-



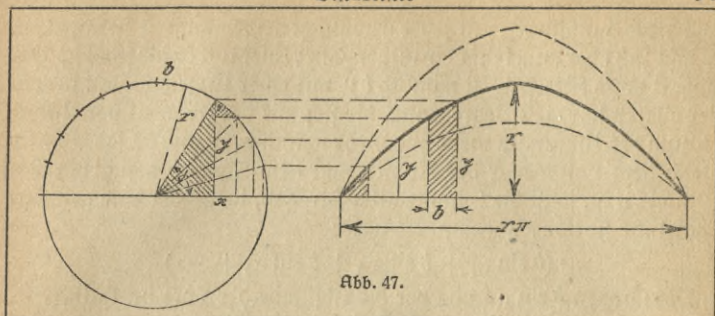


Abb. 47.

stehende Teil des Kraftflusses um ein solches Maß wie in keiner anderen Stellung, die Induktion ist ein Maximum. Die Größe der hier induzierten Spannung berechnet sich in bekannter Weise mit der gegebenen Umfangsgeschwindigkeit, wobei zu beachten ist, daß die Spannungen der Rahmenseiten hier hintereinandergeschaltet sind. Die Spannung in einer anderen Stellung verhält sich zu der maximalen wie die betreffende Komponente  $s$  der Umfangsgeschwindigkeit senkrecht zu den Kraftlinien zur ganzen Umfangsgeschwindigkeit  $v$ .

Wie aus der Abbildung zu entnehmen, ist  $s$  immer proportional dem Sinus des Stellungswinkels des Rahmens, gerechnet von der gezeichneten Nullstellung aus, und wenn man eine größere Zahl von Werten für  $s$  als Ordinaten in entsprechenden Abständen auf der Zeitlinie Abb. 21 aufträgt, so erhält man als Gesetz für die veränderliche Spannung eine Sinuslinie.

Eine solche Sinuslinie als Darstellung der periodisch wechselnden Spannung würde auch der Oszillograph beschreiben, die trägen Meßgeräte zeigen aber einen einzigen mittleren Wert, und es fragt sich nun, wie groß dieser Wert ist. Es knüpft sich daran eine für die Wechselstromtechnik wichtige Betrachtung, der wir folgen können, da sich die hier wesentlichen Eigenschaften der Sinuslinie ganz elementar entwickeln lassen.

Die Herstellung einer (halben) einfachen Sinuslinie ist aus Abb. 47 zu ersehen.

Kennt man nun den Flächeninhalt zwischen der halben Sinuslinie und der Wagrechten, so ergibt sich ein mittlerer Wert der Ordinaten  $y$  durch Division mit der Grundlinie  $r\pi$ . Dieser Inhalt ist durch Berechnen schmaler senkrechter Streifen, wie des schraffierten, und nach-

folgendes Summieren mit jeder gewünschten Genauigkeit zu erhalten, es läßt sich aber auch leicht ein allgemeiner Ausdruck dafür finden. Der Inhalt eines Streifens ist nämlich  $by$ , mit einer Ungenauigkeit wegen der oberen schrägen Begrenzung, die sich mit der Feinheit der Unterteilung des Umfanges mehr und mehr vermindert, und da jedes Lot  $y$  gleich dem Halbmesser des Kreises mal dem Sinus des zugehörigen Winkels  $\alpha$  ist, so ist die Summe aller Streifen, wenn der eine gemeinschaftliche Faktor  $r$  abgefordert wird:

$$r(b \sin \alpha_1 + b \sin \alpha_2 + b \sin \alpha_3 + \dots)$$

Die Größen  $b \sin \alpha$  sind aber die Abstände der Lote im Halbkreise, denn die beiden schraffierten Dreiecke sind ähnlich, und der durch einen Punkt markierte Winkel des kleinen Dreiecks deshalb ebenfalls  $\alpha$ . Demnach ist die Summe in Klammern gleich dem Durchmesser des Kreises, der ganze Ausdruck für die Sinusfläche gleich  $2r^2$ . Das gilt in aller Strenge, weil man die Abschnitte  $b$  sich unbeschränkt klein denken kann, im Grenzfalle also das Kreispolygon, das wir hier tatsächlich betrachteten, in einen wirklichen Kreis übergeht. Die gesuchte mittlere Ordinate der Sinusfläche ist also  $2r^2 : r\pi = \frac{2}{\pi}r$ , oder der 0,637. Teil der größten Ordinate  $r$ .

Der Charakter der gezeichneten Sinuslinie ändert sich nicht, wenn man sämtliche Ordinaten mit einer Zahl multipliziert kleiner oder größer als 1. Das wird an den punktierten Linien in Abb. 47 anschaulich, die durch Multiplikation der Ordinaten mit  $\frac{2}{3}$  bzw.  $1\frac{1}{2}$  entstanden sind. Auf einer Grundlinie können also Sinuslinien von sehr verschiedenen Höhen stehen. Die zu ihnen gehörenden Flächen verhalten sich dann wie die Ordinaten, die Fläche der niedrigeren punktierten Linie wäre also  $2r^2 \cdot \frac{2}{3}$ , die andere  $2r^2 \cdot 1\frac{1}{2}$ . Das ist aber daselbe, als wenn der eine Faktor  $r$  in  $2r^2$  mit der fraglichen Zahl multipliziert wäre. Allgemein ist also die Sinusfläche gleich  $2rf$ , worin  $r$  die bisherige Bedeutung hat (Grundlinie dividiert durch  $\pi$ ),  $f$  dagegen die größte Ordinate der Sinuslinie ist, während die mittlere Ordinate wieder  $0,637f$  ist, wie ja auch aus der angenommenen Entstehungsweise erhellt. Die Tangente im Scheitel der Sinuslinie ist immer parallel zur Grundlinie, die Tangenten in den Schnittpunkten mit der Grundlinie haben zu dieser aber verschiedene Neigung, je nach dem Verhältnisse der größten Ordinate zur Grundlinie. Bei der gezeichneten besonderen Sinuslinie ist der Tangentenwinkel oder der Winkel,



unter dem die Sinuslinie die Grundlinie schneidet,  $45^\circ$  bzw.  $135^\circ$ . Denn die schraffierte kleine Fläche links ist um so mehr als ein rechtwinkliges gleichschenkliges Dreieck anzusehen, je kleiner die Abschnitte  $b$  genommen werden. Der mehr oder weniger steile Verlauf der Linie an den Schnittpunkten mit der Grundlinie und in ihrem weiteren Gebiete ist, wie wir sehen werden, von Bedeutung für den Wechselstrom.

Genaue einfache Sinuslinien, wie wir hier betrachteten, kommen in der Elektrotechnik kaum vor. Ihre Erzeugung in einer idealen Maschine nach Abb. 45 würde ganz unwirtschaftlich sein, weil annähernd gleichmäßige Felder von der Ausdehnung riesige Magnete erfordern würden. Um Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen von geringen Abmessungen zu erhalten, muß man den Luftspalt tunlichst beschränken. Dieser Bedingung entspräche etwa eine Maschine, die man durch Umwandlung der Gleichstrommaschine nach Skizze 40 erhalten kann. Nimmt man hier nämlich die Bürsten fort und verbindet zwei gegenüberliegende Punkte der Ankerwicklung mit je einem Schleifringe, so hat man unter jedem Pole eine Anzahl hintereinandergeschalteter Windungen und wie bei der Gleichstrommaschine zwei parallele Ankerstromkreise, zum Unterschiede von der Maschine Abb. 45 mit nur einem Stromkreise. Befinden sich dann die beiden Anschlußpunkte an der Stelle der vorher vorhandenen Bürsten, so ist die induzierte Spannung ganz wie bei der Gleichstrommaschine. Dieser Zustand wird hier aber nicht durch die feststehenden Bürsten dauernd aufrechterhalten, denn die Anschlußpunkte bewegen sich mit dem Anker. Solange sie sich innerhalb der feldfreien Zone befinden, wird man daher annähernd gleichbleibende Spannung erhalten, treten sie aber unter die Pole, so heben sich die von den Windungen induzierten Spannungen teilweise auf, so daß bei der Mittellage der Anschlußpunkte unter den Polen die Spannung an ihnen ganz verschwindet. Man erhält so eine Spannungslinie von annähernder Trapezform (Abb. 48), mit kleinen Abrundungen infolge der unscharfen Begrenzung des Feldes, die sich

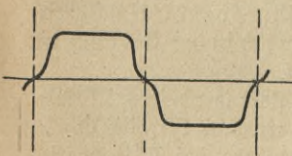


Abb. 48.

gewiß von der einfachen Sinuslinie stark unterscheidet. Solche und andere abweichende Sinuslinien, die nach Fourier als Sinuslinien höherer Ordnung darzustellen sind, sucht man aus vielen Gründen zu vermeiden und den einfachen Sinuslinien auch bei engem Luftspalte möglichst nahezucom-

men. Man erreicht das teils durch besondere Formgebung der Polschuhe, teils durch verschobene Lage zusammenarbeitender Windungen, deren Augenblickswerte sich addieren, eine praktische Erläuterung des Fourierschen Prinzipes, wonach alle Schwingungsformen durch Zusammensetzen aus anderen abzuleiten sind. Jedenfalls können wir uns danach für berechtigt halten, die mit Hilfe der einfachen Sinuslinie in einfachster Form zu erhaltenden Gesetze des Wechselstromes allgemeiner zu verwenden, mit dem Vorbehalte, Abweichungen, wenn nötig, besonders zu berücksichtigen.

### Mittelwerte und Leistung des Wechselstromes.

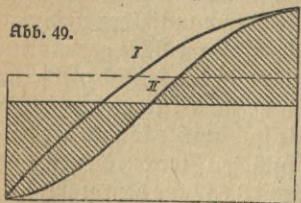
Die wechselnde Spannung wird in einem Leiterkreise selbstverständlich einen wechselnden Strom erzeugen. Um dessen Form zu bestimmen, können wir uns einen Augenblickswert der Spannung für sehr kurze Zeit als konstant denken, und für diese wird dann jedenfalls der zugehörige Augenblickswert des Stromes erhalten, indem man den Spannungswert durch den Widerstand dividiert. So kann man beliebig viele Werte des Stromes finden. Die Sinuslinie der Spannung, in der die Grundlinie wieder die Zeit bedeutet, erscheint dann einfach wie in Abb. 47 in eine solche mit größeren oder kleineren Ordinaten umgewandelt, die Stromlinie ist wieder eine Sinuslinie. Vorausgesetzt ist dabei das Fehlen jeder Selbstinduktion im Stromkreise. Genau ist ein solcher induktionsfreier Stromkreis nicht herzustellen, denn jeder stromdurchflossene Leiter bildet ein Feld um sich, sehr nahe kommt der Forderung ein bifilar gestreckter Leiter, wenn der von den Ankerleitern gebildete Teil des Stromkreises außer acht bleibt, und praktisch kann mit genügender Genauigkeit ein Stromkreis als induktionsfrei betrachtet werden, der Glühlampen speist. Um nun die Leistung eines solchen Wechselstromes zu finden, erscheint nach dem Vorbilde des Gleichstromes am einfachsten, die vom Amperemeter und Voltmeter angezeigte Stromstärke und Spannung zu multiplizieren, die ja mittlere Werte der veränderlichen Größen sind. Die Probe auf die Richtigkeit hat das Wattmeter zu liefern, dessen Angaben sich in der Tat auch in Übereinstimmung mit der Erwartung zeigen.

Nun könnten aber Strom und Spannung statt durch ihre Mittelwerte durch ihre größten Werte gegeben sein, etwa mit Hilfe des Oszillographen, und dann könnte man versucht sein, die Mittelwerte durch Multiplikation mit 0,637 zu bilden und die Leistung wieder wie



vorher zu finden. In diesem Falle würde aber das Wattmeter einen höheren Betrag anzeigen. Dieser scheinbare Widerspruch löst sich durch folgende Überlegung: Die Leistung ist durch die vom Gleichstrom bekannten gleichwertigen Formen  $ie$ ,  $i^2 w$ ,  $\frac{e^2}{w}$  gegeben, wobei hier nur für  $i$  und  $e$  angemessene Mittelwerte zu nehmen sind. Man kann diese Leistung zeichnerisch darstellen, indem man zusammengehörnde Augenblickswerte der beiden Sinuslinien ( $i$  und  $e$ , oder  $i$  und  $i w$ , oder  $e$  und  $\frac{e}{w}$ ) miteinander multipliziert und als Ordinaten einer neuen Linie an den betreffenden Stellen der gemeinsamen Grundlinie aufträgt. Die Leistung ist dann proportional der so gebildeten Fläche. Durch einen konstanten Faktor wie  $w$  oder  $\frac{1}{w}$  wird der Charakter der Sinuslinien nicht geändert. Um den Charakter der neuen Linie zu finden, kann man daher annehmen, daß die zu multiplizierenden zusammengehörnden Ordinaten gleich seien. Zeichnet man nun eine einfache Sinuslinie I (Abb. 49), bildet durch Quadrieren der Zahlenwerte der Ordinaten eine neue Linie und wandelt diese mit einem konstanten Faktor so um, daß die größten Ordinaten der beiden Linien gleich werden, so erhält man die Linie II, welche demnach den Verlauf der Quadrate der Ordinaten einer Sinuslinie darstellt. Der Charakter dieser Linie ist ersichtlich ganz verschieden von dem einer einfachen Sinuslinie, es kommt eben in dem erst langsameren, dann schnelleren Steigen der Einfluß des Quadrierens zum Ausdruck. Der Inhalt der Fläche ist hier ohne höhere Rechnung nur mit Hilfe eines Kunstgriffes zu finden, der hier unerörtert bleiben mag, indem wir uns hinsichtlich der Eigenschaften der neuen Linie auf die Zeichnung verlassen. Offenbar ist die Fläche etwas kleiner als die der einfachen Sinuslinie, und zwar gleich einem Rechtecke mit der halben Höhe der größten Ordinate, wie der Augenschein lehrt, und wie die genaue Ausmessung der Flächenteile bei größerem Maßstabe bestätigen würde.

Abb. 49.



Die Leistung des Wechselstromes ist danach  $\frac{EJ}{2}$ , also halb so groß als das Produkt aus den größten Werten der Spannung und Stromstärke, oder als

deren mittlere Werte sind  $\frac{E}{\sqrt{2}} = e$  und  $\frac{J}{\sqrt{2}} = i$  einzusehen ( $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{1,41} = 0,71$ ). Hätte man dagegen unrichtig als mittlere Werte 0,637 der größten genommen, so hätte man als Leistung nicht 0,50 des Produktes  $JE$  erhalten, wie oben, sondern nur etwas über 0,40. Das Wattmeter hat also richtig, indem es mechanisch nur zusammengehörende Ordinaten multiplizierte, den größeren Betrag angegeben.

Wenn anderseits das Voltmeter und das Amperemeter zutreffende mittlere Werte anzeigten, wie aus der Übereinstimmung mit den Angaben des Wattmeters zu schließen, so liegt das einfach an dem Wesen dieser Geräte, die gewissermaßen selbst Wattmeter sind, nur eine andere Skala haben. Denn die Hydraztgeräte sind vom Quadrate des Stromes bzw. der Spannung abhängig, die Weicheisengeräte ebenso, weil der Strom in ihrer Spule in dem angezogenen Eisen eine proportionale magnetische Kraft weckt, und so alle technischen Meßgeräte, in denen der eine Faktor von dem anderen abhängig ist. Darum zeigen sie auch unabhängig von der jeweiligen Richtung des Stromes, im Gegensatz zum Oszillographen, dessen einer Faktor, das Feld zwischen den Magnetpolen, konstant ist, dessen Ausschläge daher mit der Richtung des Stromes wechseln.

Die bei allen Leistungsmessungen in Frage kommenden mittleren Werte, nämlich 0,71 der größten, werden nach Übereinkommen effektive Werte genannt, früher auch, und wohl besser, virtuelle, d. h. wirkliche Werte. Sie gewinnen noch eine anschauliche Bedeutung, wenn man sie mit den Gleichstromwerten vergleicht: sie sind so bemessen, daß ein Gleichstrom gleicher Stärke in demselben Widerstande in gleicher Zeit eine gleiche Wärmeenergie erzeugt.

Der Oszillograph zeigt gleichwohl die wirklichen jeweiligen Augenblickswerte von Strom oder Spannung an, und wenn er und die einfache Sinuslinie uns hier auch hauptsächlich nur mittelbar und zum Vergleichen gedient haben, so hat doch die mit ihrer Hilfe gewonnene Zahl 0,637 auch eine selbständige Bedeutung in den freilich viel selteneren Fällen, wo es nicht auf die Leistung, sondern auf die durchgehende Elektrizitätsmenge ankommt. Beispielsweise könnte der pulsierende Gleichstrom nach Abb. 22 elektrolytischen Zwecken dienen, und dann würde in der Tat der mittlere Wert mit 0,637 aus dem größten zu berechnen sein. Daher auch der Name elektrolytischer Mittelwert.



## Spannung der Wechselstrommaschine. Anwendungen auf wirkliche Maschinen.

Die Untersuchung über die Mittelwerte ermöglicht nun unmittelbar die Berechnung der effektiven Spannung einer Wechselstrommaschine. Man hat nur die größte Spannung zu finden und sie mit  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$  zu multiplizieren. Wir beziehen uns dazu wieder auf

die ideale Maschine nach den Abb. 45 und 46. Gegeben ist die Feldstärke  $H$ , die Abmessungen des rotierenden Rahmens und seine Geschwindigkeit. Die größte Spannung herrscht, wenn die Ebene des Rahmens parallel zu den Kraftlinien liegt. Die tangentielle Geschwindigkeit einer Rahmenseite von der Länge  $l$  bei einem Abstände  $r$  von der Drehachse und bei der Drehzahl  $n$  in 1 sec ist  $2\pi rn$ , die in einer Seite induzierte größte Spannung mithin:  $2\pi rnlH$ . Ähnlich vorgehend wie bei der Gleichstrommaschine sehen wir darin durch  $2rIH$  den größten von dem Rahmen aufnehmbaren Kraftfluß  $\Phi$  ausgedrückt, und wenn wir noch statt des einen induzierten Leiters die ganze Leiterzahl  $z$  einführen (auf beiden Seiten des Rahmens gezählt), so erhalten wir als effektive Spannung in Volt  $\frac{\pi}{\sqrt{2}} n \Phi z 10^{-8} = 2,22 \Phi n z 10^{-8}$ .

Dieser Ausdruck unterscheidet sich von dem entsprechenden für die Gleichstrommaschine nur durch den Faktor 2,22. Beim Vergleichen muß man aber beachten, daß hier, dem gebräuchlichen Bau der Wechselstrommaschinen gemäß, sämtliche Leiter des Ankers hintereinandergeschaltet und nicht auf zwei parallele Stromkreise verteilt sind. Würde man eine ähnliche Wechselstrommaschine annehmen, wie wir sie aus der Gleichstrommaschine Abb. 40 entstehen ließen, so hätte man in der obigen Spannungsformel 2,22 durch 1,11 zu ersetzen. Die Wechselstrommaschine ist also um 11% leistungsfähiger. Darin drückt sich wieder der erhöhte Einfluß der größeren Augenblickswerte auf die Leistung aus.

Die Formel für die Spannung der Wechselstrommaschine gilt zunächst nur für eine zweipolige. Die Drehzahl einer solchen Maschine würde bei der üblichen Frequenz 50 sehr hoch sein, nämlich  $50 \cdot 60 = 3000$  in der Minute. Diese Geschwindigkeit ist zwar mit Dampfmaschinen zu erreichen, bietet aber wegen der außerordentlichen mechanischen Inanspruchnahme der rotierenden Teile durch die Zentrifugal-

kraft besondere Schwierigkeiten. Dagegen läßt sich die Drehzahl beliebig herabsetzen durch die mehrpolige oder vielpolige Ausführung der Maschine. Man vereinigt dazu gewissermaßen eine Anzahl Maschinen in einem Gestelle. Abb. 50 zeigt die Systemskizze einer sechspoligen Wechselstrommaschine, ihre Drehzahl braucht also für dieselbe Frequenz nur  $\frac{1}{3}$  der zweipoligen zu sein.

Im Gegensatz zur Gleichstrommaschine steht hier der Anker aus geblätterttem Eisen fest und umgibt ringförmig den sich drehenden

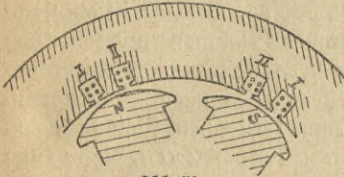


Abb. 50.

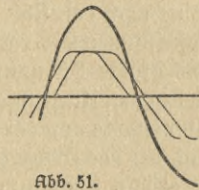


Abb. 51.

Seldmagneten, dem der erregende Gleichstrom durch Schleifringe zugeführt wird. Diese Anord-

nung erleichtert in hohem Grade die isolations sichere Lagerung der induzierten Spulen. Von diesen sind hier zwei angedeutet, I—I und II—II, sie liegen wieder zur Verminderung des Luftspaltes in Nuten des Ankers. Die einzelne Spule erhält dabei allerdings eine von der Sinuslinie erheblich abweichende Spannung, die Abb. 51 lehrt aber, wie durch Hintereinanderschaltung schon der zwei Spulen in verschobener Lage eine wesentliche Annäherung an die Sinusform erzielt werden kann. Die Störungen für den glatten Verlauf der Spannungslinie durch die Verzahnung müssen durch sorgfältige Ausbildung der Einzelheiten tunlichst abgeschwächt werden. Noch verbleibende Abweichungen von der reinen Sinusform sind durch angemessene Änderung des Beiwertes 2,22 in der Spannungsgleichung zu berücksichtigen. Da alle Spulen in Reihe geschaltet werden können, auf die einzelnen also nur ein kleinerer Teil der Gesamtspannung entfällt, so sind Wechselstrommaschinen jetzt ohne besondere Schwierigkeiten bis 15000 V auszuführen. Für ihren Wirkungsgrad, die zulässige Erwärmung usw. gelten dieselben Gesichtspunkte wie bei Gleichstrommaschinen. Es muß hier aber noch ein Leistungsverlust betrachtet werden, der zwar auch im Anker der Gleichstrommaschine auftritt, da aber nicht in dem Maße fühlbar ist wie bei allen Wechselstromgeräten. In Abb. 34 ist dargestellt, nach welchem Gesetze die Magnetisierung des Eisens von der magnetisierenden Stromstärke abhängig ist. Dem fortwährenden Ummagnetisieren durch den Wechselstrom folgt aber



das Eisen nur mit einem gewissen Widerstande, einer Art Zähigkeit, die sich darin kundgibt, daß beim Magnetisieren nach aufwärts eine etwas größere Stromstärke erforderlich ist, als die der Abb. 32 zu entnehmenden Werte anzeigen, während beim Zurückgehen des Stromes ein stärkerer Magnetismus im Eisen verbleibt, als nach der Abbildung zu erwarten wäre. Diese Eigenschaft des Eisens, die Hysteresis (von ὑστερέω, zurückbleiben), bringt Abb. 52 zur Anschauung, deren äußere, eine Schleife bildenden Linien einen vollständigen einmaligen Kreislauf der Magnetisierung andeuten, während die mittlere Linie der Abb. 34 entspricht. Die von der Schleife gebildete Fläche stellt, wie aus dem über die magnetische Energie Gesagten leicht erklärlich ist, eine verlorene, nämlich in Wärme umgesetzte Arbeit dar. Bezogen wird dieser Verlust gewöhnlich auf 1 kg des Eisens, er wird bei

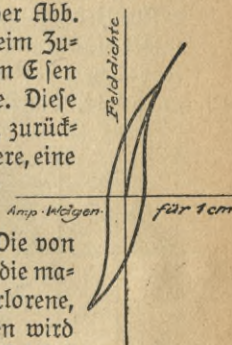


Abb. 52.

Wechselstrom so erheblich, weil er in jedem Eisenteile sich nach Maßgabe der Frequenz wiederholt, in 1 sec also beispielsweise 50 mal. Außerdem sind trotz der dünnen Bleche der Eisenkörper für Wechselstrom (0,3—0,5 mm) immer noch Wirbelströme vorhanden, die ebenfalls einen ungenützt als Wärme abgehenden Verlust bedeuten. Elektriker und Hüttenleute haben sich deshalb vielfach bemüht, diese Verluste im Eisen durch besondere Zusammensetzung und Behandlung zu vermindern, und in dem sogenannten legierten Eisenbleche, das

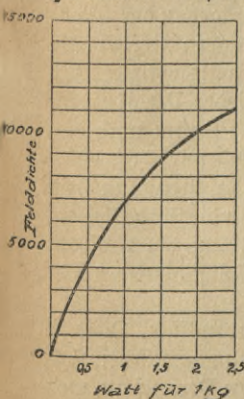


Abb. 53.

weniger Kohlenstoff und mehr Silizium enthält, ist ein Baustoff entstanden, der in der Tat bedeutende Vorzüge vor dem gewöhnlichen hat. Die beiden Verlustgrößen werden vielfach zusammengefaßt, und als Beispiel zeigt Abb. 53 eine Schaulinie, die den Gesamtverlust in Watt für 1 kg von 0,35 mm dickem Bleche bei der Frequenz 50 für verschiedene magnetische Dichten angibt. Man sieht, wie die Verluste mit der magnetischen Beanspruchung schnell steigen. Deshalb und wegen der größeren Zahl der Ummagnetisierungen in der Zeiteinheit verwendet man in der Wechselstromtechnik kleinere Kraftliniendichten als in der Gleichstromtechnik, etwa 7000—10000 in den Ankerferrnen.

### Der induktive Wechselstromkreis. Phasenverschiebung.

Als Bedingung für das Übereinstimmen der Angaben vom Voltmeter und Amperemeter einerseits und vom Wattmeter andererseits war oben ausdrücklich induktionsfreie Belastung des Stromkreises vorausgesetzt. Die für diesen Fall ohnehin leicht zu übersehenden Ver-

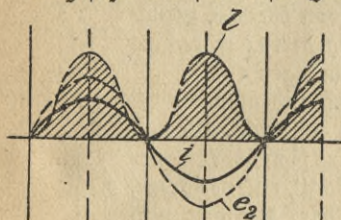


Abb. 54.

hältnisse sind wegen des Vergleiches mit dem folgenden in Abb. 54 auch zeichnerisch dargestellt. Darin bedeutet  $e_2$  die Spannungslinie,  $i$  die Stromlinie,  $l$  die Leistungslinie. Diese verläuft nur oberhalb der Grundlinie, da in beiden Halbperioden dieselbe Leistung erzeugt wird, beispielsweise Wärme in Glühlampen, oder formal zu re-

den, weil die Multiplikation der negativen Werte von Strom und Spannung ebenfalls positive Leistungswerte gibt.

Wenn sich aber in dem Stromkreise magnetische Wechselfelder von erheblicher Ausdehnung und Stärke ausbilden, wenn im besonderen zahlreiche Stromwindungen Eisen umschließen, wie schon in der Maschine selbst bei in Eisen eingebetteten Spulen, so zeigt das Wattmeter immer niedrigere Werte, als den Angaben von Volt- und Amperemeter entsprechen. Der Grund dafür ist die Selbstinduktion, von der wir ja wissen, daß sie das Entstehen des Stromes entgegen der angelegten Spannung zu hindern sucht, ihn aber auch länger unterhält als die verschwindende Spannung. Im Wechselstromkreise vollzieht sich nun Ansteigen und Abnehmen der Spannung in jeder Periode einmal in der einen, dann in der anderen Richtung, der Strom muß diesem periodischen Wechsel folgen, er wird das aber, wie wir schon empfinden, nur mit einer gewissen Verschiebung und Verschleppung tun. Um in dieser Hinsicht Klarheit zu erhalten, wollen wir die Frage stellen, wie die angelegte Spannung beschaffen sein muß, um einen Strom von vorgeschriebener Stärke in einem Kreise mit Selbstinduktion herzustellen.

In Abb. 55 bedeutet wieder  $i$  die geforderte Stromlinie. Diese ist gleichzeitig Vertreterin der vom Strome erzeugten magnetischen Felder. Wir nehmen für diese ebenfalls sinusförmigen Verlauf an, was bei geringen Felddichten im Eisen und bei Vernachlässigung der



Hysteresis zulässig ist. Das Wesen der Selbstinduktion besteht, wie wir wissen, in einer durch den Strom geweckten Gegenspannung in den Windungen. Die Größe dieser Spannung ist abhängig von dem Betrage der Änderung des Kraftflusses in der Zeiteinheit, die man hier immer als sehr kleinen Bruchteil einer Sekunde zu denken hat. Im Scheitel der Strom- $\Phi$ -Sinuslinie ist diese Änderung in einem Zeitteilchen gleich Null, am größten da, wo die Sinuslinie die Zeitlinie schneidet. Das zeigt deutlicher Abb. 47, wenn man beachtet, wie hier in dem schraffierten kleinen Dreiecke links an der Sinuslinie die Ordinaten wachsen, während sie im Scheitel für dasselbe Zeitteilchen unverändert bleiben, sobald man dieses nur klein genug nimmt. Also wird die Spannung der Selbstinduktion (Linie  $s$ ) ihre Maxima haben (auf beiden Seiten der Grundlinie), wenn die Stromlinie durch Null geht, und wird selbst Null sein in den Zeitpunkten, in denen die Maxima des Stromes auftreten. Damit ist der allgemeine Verlauf der Gegenspannung festgelegt, der sich bei näherer Untersuchung ebenfalls als eine Sinuslinie erweist. Die beiden Linien haben nicht gleiche Phase, d. h. ihre Nullwerte und Maxima treten nicht in denselben Zeitpunkten ein, die Linien sind um eine Viertelperiode gegeneinander verschoben, und da sie nach Abb. 47 durch Drehen der Halbmesser von Kreisen mit demselben Mittelpunkte zu erzeugen sind, so kann man auch sagen, der Strom und seine Gegenspannung seien um  $90^\circ$  verschoben, und zwar so, daß die Stromlinie sich in gleichen Zeitpunkten von der Grundlinie entfernt, während sich die Linie der Gegenspannung ihr nähert, und umgekehrt.

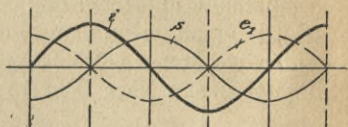


Abb. 55.

Die nach Abb. 54 bei einem induktionsfreien Stromkreise anzulegende Spannung genügt also allein nicht, um in dem induktiven Stromkreise denselben Strom zu erzeugen, denn es muß gleichzeitig die Gegenspannung der Selbstinduktion überwunden werden. Das könnte man erreichen, wenn man noch einen zweiten Generator in den Stromkreis schaltet, dessen Spannung so bemessen wird, daß sie nach Größe und Phase der Spannung  $s$  das Gleichgewicht hält, also nach der Linie  $e_1$  in Abb. 55 verläuft. Die beiden Generatoren müßten fest gekuppelt und so gegeneinander eingestellt sein, daß die größte Induktion bei dem einen zeitlich zusammenfällt mit dem Nullwerte bei dem

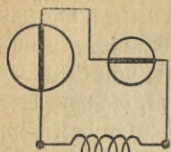


Abb. 56.

anderen, sie müßten elektrisch senkrecht zueinander stehen, oder bei zweipoligen Generatoren (Abb. 45), die wir der Anschaulichkeit wegen voraussetzen wollen, ständen die beiden rotierenden Rahmen auch geometrisch senkrecht zueinander. Das ist in dem Schema Abb. 56 angedeutet, wo die beiden Kreise die Generatoren, und die Durchmesser ihre augenblickliche elektrische Stellung andeuten. Der eine Generator würde dann die wirkliche Leistung liefern (Abb. 54), der andere nur die induktive Gegenspannung aufheben. Daß dieser keine Leistung nach außen abgibt, zeigt sich auch, wenn man nach Abb. 57 durch Multiplikation der zusammengehörenden Ordinaten in Abb. 55 die Leistungslinie  $l$  zeichnet. Infolge der in jeder Viertelperiode wechselnden Vorzeichen stehen

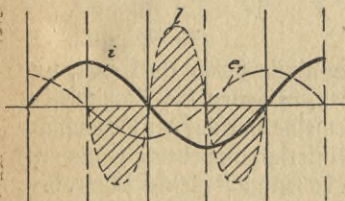


Abb. 57.

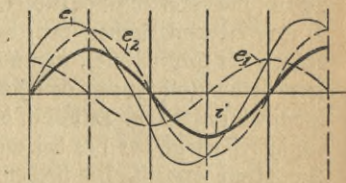


Abb. 58.

gleiche Teile der Leistungsfläche abwechselnd über und unter der Grundlinie, ein Zeichen, daß nur Energie hin und her wogt.

Dasselbe ist aber auch mit einem einzigen Generator zu erreichen. Bezieht man nämlich in Abb. 58 die Spannungen  $e_2$  und  $e_1$  (Abb. 54 und 55) der beiden Generatoren auf dieselbe Stromlinie und addiert unter Berücksichtigung der Vorzeichen (über und unter der Grundlinie) die Spannungsordinaten gleicher Zeitpunkte, so erhält man eine vereinigte Linie  $e$ . Diese drückt aus, welche Spannung der nunmehrige einzige Generator haben muß, um den verlangten Strom entgegen dem Nutzwidestande und dem nutzlosen Widerstande der Selbstinduktion zu erzeugen.

Die durch die Linie  $e$  dargestellte Spannung ist größer als die beiden Einzelspannungen, aus denen sie hervorging. Man kann deshalb auch sagen: Bei gegebener Spannung bildet sich in einem induktiven Stromkreise ein kleinerer Strom aus als in einem induktionsfreien, und zwar eilt dieser Strom der Spannung nach, denn auf der Zeitlinie von links nach rechts gehend, wie wir immer angenommen hatten, sieht der Be-



schauer die größten und Nullwerte des Stromes später als die der Spannung. Das darf nun aber nicht so aufgefaßt werden, als wenn sich der Strom von „seiner“ Spannung trennte, was widersinnig wäre, man muß sich vielmehr die angelegte Spannung zerlegt denken, wie wir sie zusammensetzten, und darf nur den einen Teil davon als wirklich zum Strome gehörend ansehen, um die Leistung zu erhalten.

Die Auswertung der Linie der Selbstinduktion läßt sich nun auf folgendem Wege erzielen, wobei der Einfachheit wegen immer ein sinusförmiger Verlauf angenommen wird.

Wenn an einen Elektromagneten (dessen Eisenkörper aus bekannten Gründen unterteilt sein muß) eine Wechselspannung gelegt wird, so tritt innerhalb der Wicklung ein magnetisches Wechselfeld auf. Dessen Rückwirkung auf die Wicklung ist nicht anders, als wenn sich diese wie bei einem Generator in einem konstanten Magnetfelde drehte. Deshalb können wir die effektive Spannung der Selbstinduktion wie die eines Generators berechnen, die Formel dafür erfährt nur eine kleine Umgestaltung insofern, als wir nicht mehr die Anzahl der einzelnen Leiter auf dem Umfange des Ankers, sondern die vollständigen Windungen einsetzen. Wir erhalten also für die effektive Spannung der Selbstinduktion:  $4,44 \Phi n W 10^{-8}$ , unter  $W$  die Windungszahl verstanden, unter  $n$  nicht mehr die Drehzahl einer zweipoligen Maschine, sondern die Periodenzahl in 1 sec, bei uns also meist 50. Wie dabei der größte Kraftfluß  $\Phi$ , der vorläufig noch unbestimmt erscheint, eine bestimmte Größe annimmt, zeigt sich am einfachsten an folgendem Beispiele.

Wir nehmen für das Eisengestell dieselben Verhältnisse an wie bei dem S. 66 ff. behandelten Gleichstrommagneten, das hier nur aus Blechscheiben zusammengesetzt ist, statt des runden also quadratischen Querschnitt bei derselben Größe (20 cm<sup>2</sup>) haben soll. Damit wird auch die mittlere Windungslänge etwas größer, statt 25 cm etwa 32 cm. In dem Wickelraume beider Schenkel sind bequem zusammen 200 Windungen eines Runddrahtes von 4,60 mm Durchmesser (ohne Isolation verstanden) unterzubringen. Die größte magnetische Felddichte soll des Vergleiches wegen auch hier 12500 sein, für Wechselstrom allerdings recht hoch. Dann ergibt sich aus der obigen Formel (bei der Frequenz 50) die Spannung zu 110 V. Damit die für die angenommene Felddichte erforderlichen Amperewindungen von 2400 entstehen, muß in den 200 Windungen eine größte Stromstärke von

12 A herrschen oder ein effektiver Strom von  $\frac{12}{\sqrt{2}} = 8,50$  A. Der

Widerstand der Wicklung hat hier den kleinen Wert von  $0,07 \Omega$ , und diesen Ohmschen Widerstand zu überwinden, wäre bei Gleichstrom nur die kleine Spannung von  $0,6$  V erforderlich. Man sieht also, wie bedeutend der induktive Widerstand ist. Der Leistungsverlust in der Wicklung ist  $5$  Watt. Dabei ist allerdings der Verlust durch Hysteresis und Wirbelströme nicht beachtet, der sich in einer mäßigen Erhöhung der Stromstärke kundgeben würde. Die angelegte Wechselspannung braucht also nur sehr wenig größer zu sein als  $110$  V, um den für das angenommene Feld erforderlichen Strom zu liefern. Würde die angelegte Spannung kleiner, so würde sich von selbst ein schwächeres Feld und damit eine niedrigere Gegenspannung einstellen und umgekehrt. Jeder angelegten Spannung entspricht ein bestimmtes Feld. Denkt man sich nun den Elektromagneten bei größerer Netzspannung, beispielsweise  $220$  V, in Reihe mit Lampen geschaltet, so erhalten diese nur etwa die halbe Netzspannung. Man kann so nach Bedarf einen Teil der Spannung durch sogenannte Drosselspulen ohne wesentliche Verluste aufheben, während das bei Gleichstrom nur unter Verschwendung eines entsprechenden Teiles der Leistung in Ohmschen Widerständen möglich ist.

Die effektive Spannung der Selbstinduktion ist oben aus der Spannung des zweipoligen Generators abgeleitet. Bei der Gleichheit der benutzten Anschauungen muß sich aber ein gleichwertiger Ausdruck auch unter Einführen des Koeffizienten der Selbstinduktion ergeben. Wir wollen diesen Ausdruck hier durch eine rein formale Umwandlung herstellen. Die ursprüngliche Form der Spannungsgleichung für den Generator war, wenn wir wieder  $2W$  statt  $z$  schreiben:

$$e = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} n \Phi W 10^{-8}. \text{ Nun ist } \Phi \text{ gleich dem Kraftflusse bei der größten}$$

Stromstärke  $\sqrt{2} i$ , demnach  $\Phi = \sqrt{2} i \frac{5}{4} \mu \frac{q}{l} W$ . Setzt man diesen Wert

für  $\Phi$  oben ein, so erhält man  $e = (2\pi n) i (\frac{5}{4} \mu \frac{q}{l} W^2 10^{-8})$ . Der Aus-

druck in der zweiten Klammer ist aber  $L$ , der in der ersten Klammer gleich der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  (der Umfang des Kreises vom Radius  $1$  wird  $n$  mal in der Sekunde durchlaufen), daher schließlich, wenn wieder die Spannung der Selbstinduktion mit  $s$  bezeichnet wird,  $s = \omega i L$ .



Eine kürzere und bei einiger Gewöhnung auch anschauliche Darstellung der Wechselstromgrößen ist aus Abb. 55 abzuleiten. Die Spannungen der beiden Generatoren wirken gleichzeitig in demselben Stromkreise, ihre Nullwerte sind aber um eine Viertelperiode verschoben, dem zeitlichen Unterschiede entspricht die jeweilige räumliche Stellung der induzierenden Teile zueinander. Man kann deshalb nach Abb. 59 Augenblickswerte oder die effektiven Werte wie Kräfte und andere physikalische Größen geometrisch vereinigen. Wie sich auch aus genauer Zeichnung der Wellenlinien und durch Rechnung ergibt, erhält man durch Drehung der resultierenden Spannung  $e$  als Fahrstrahl immer die Summe von  $e_1$  und  $e_2$  für jede Stellung. Die noch vereinfachte Abb. 60 zeigt unmittelbar, welcher Teil der Gesamtspannung auf die Nutzspannung  $e_2 = wi$  entfällt, im Gegensatz zu  $e_1 = \omega iL$ , die keinen Anteil an der Leistung hat. Bestimmend für deren Größe ist ersichtlich der Wert  $e \cdot \cos \varphi = e_2$ , und die Größe  $\cos \varphi$ , der Leistungsfaktor, ist zu bestimmen, indem man die durch das Wattmeter angegebene Nutzleistung dividiert durch das Produkt aus den gesonderten Angaben des Amperemeters und des Voltmeters. Je kleiner die Phasenverschiebung  $\varphi$ , um so größer die Nutzleistung. In derselben Weise kann man sich auch den Gesamtstrom in den Nutzstrom oder Wattstrom und den wattlosen Strom zerlegt denken, der dem hin und her wogenden, die Selbstinduktion verursachenden magnetischen Felde entspricht, daher auch Magnetisierungsstrom genannt wird.

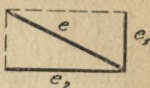


Abb. 59.

Aus Abb. 60 ist ferner zu entnehmen  $e = \sqrt{i^2 w^2 + i^2 \omega^2 L^2}$ , woraus folgt  $i = \frac{e}{\sqrt{w^2 + \omega^2 L^2}}$ . Das ist das Ohmsche Gesetz für den Wechselstromkreis mit Selbstinduktion. Verschwindet diese, so bleibt die einfache Form des Gesetzes  $i = \frac{e}{w}$ . Wird umgekehrt der Ohmsche Widerstand  $w$  sehr klein, so ist  $i$  fast ganz ein wattloser Strom. Wie früher erwähnt, ergibt in einer Stromverzweigung mit reinem Widerstande die nach dem Ohmschen Gesetze erfolgende Verteilung die geringste Wärmemenge von allen sonst denkbaren Verteilungen. In rein induktiven Wechselstromverzweigungen würde die kleinste Summe der Magnetisierungsarbeiten entstehen.

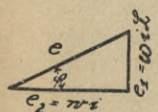


Abb. 60.

Man wird immer versuchen, die Phasenverschiebung

recht klein zu halten oder den Leistungsfaktor tunlichst nahe an 1 zu bringen, denn die wattlosen Ströme erzeugen unnütze Stromwärme in den Maschinen und Leitungen, und umgekehrt wird bei gleicher Erwärmung der Leiter um so mehr nützliche Leistung übertragen, je kleiner die Phasenverschiebung ist. Außerdem aber wirkt der nachbleibende Strom schwächend auf die Spannung des Stromerzeugers zurück. Wie nämlich schon an der Gleichstrommaschine Abb. 40 gezeigt, bewirken die induzierten Ströme die sogenannte Quermagnetisierung des Ankers. Bei Gleichstrommaschinen steht wegen der Bürsten die Achse dieses Ankerfeldes fest, bei Wechselstrommaschinen dagegen dreht sie sich mit dem Anker, indem gleichzeitig das Ankerfeld periodisch schwankt und seine Richtung wechselt. Verfolgt man nun an der schematischen Form der Wechselstrommaschine nach Abb. 45 oder 46 den Stromlauf in dem induzierten Rahmen bei verschiedenen Stellungen, so sieht man, wie das Ankerfeld mit einer mehr oder weniger großen Komponente das induzierende Hauptfeld verstärkt, solange sich der Rahmen nach dem Orte der stärksten Wirkung, hier der wagrechten Lage, hin bewegt, dagegen schwächt, wenn er sich von da fort bewegt. Bei induktionsfreiem Stromkreise, wenn also induzierte Spannung und Strom phasengleich sind, gleichen sich die beiden entgegengesetzten Vorgänge in ihrer Wirkung aus. Ist aber der Strom gegen die Spannung verzögert, so überwiegt der zweite Vorgang. Dieselbe Überlegung in etwas anderer Form läßt sich an der Maschine Abb. 50 anstellen. Die Folge ist ein viel größerer Spannungsabfall als bei der Gleichstrommaschine, wo durch zusätzliche Erregung vornehmlich der Ohmsche Spannungsverlust auszugleichen ist.

### Der Transformator.

Die kräftigste Stütze für den Wechselstrom ist der Transformator. Wir haben den Begriff des Transformators schon mehrfach gestreift: Von zwei Spulen auf demselben Eisenkerne (Abb. 61) wird die eine (I) von dem Generator gespeist, die andere (II) von demselben Kraftflusse durchsetzt, an ihren Klemmen entsteht wieder eine Wechselspannung. Die von da zu entnehmende Leistung entstammt somit mittelbar dem Generator. Die Windungszahl von I richtet sich bei gegebenem Eisenkörper nach der Spannung des Generators, die von der Widlung I bei noch offener Widlung II voll-

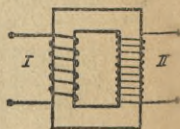


Abb. 61.



ständig aufgenommen werden muß (Sall Abb. 55). Für die Windungszahl II ist die gewünschte Spannung maßgebend, die größer oder kleiner als die erste sein kann. Da beide Wicklungen denselben Kraftfluß umschließen, so verhalten sich die Spannungen an ihren Klemmen wie die Windungszahlen. Es ergibt sich daher die Möglichkeit, die einem Netze zu entnehmende Leistung mit jeder beliebigen Spannung den Verbrauchskörpern zuzuführen, und im besonderen, die Leistung eines Generators mit Hilfe eines ersten Transformators unter erhöhter Spannung in eine Fernleitung zu schicken, mit geringem Verluste durch sie zu übertragen und an der Verbrauchsstelle wieder durch einen zweiten Transformator eine niedrigere ungefährliche Spannung herzustellen. Die vollständig ruhenden einfachen Wicklungen des Transformators erlauben eine viel vollkommene Isolierung der Windungen als bei Generatoren, so daß im Transformator sehr hohe Spannungen herzustellen sind. Darin besteht die große wirtschaftliche Bedeutung des Transformators.

Der Eisenkörper des Transformators wird gewöhnlich aus einzelnen Stücken zusammengebaut, die selbst aus Lagen dünnen Bleches gebildet (0,3—0,5 mm) und an den Stoßfugen sorgfältig zusammengepaßt sind, um Luftspalten tunlichst zu vermeiden, im Gegensatze zu den früher betrachteten Elektromagneten. Die beiden Wicklungen werden auch nicht an verschiedenen Stellen des Eisenkörpers angeordnet wie in der schematischen Abb. 61, sondern ineinandergeschachtelt, damit zwischen ihnen möglichst geringe Streuung der Kraftlinien entsteht.

Um die Arbeitsweise des Transformators näher zu erkennen, nehmen wir zunächst den praktisch freilich bedeutungslosen Fall gleicher Windungszahlen für die beiden Wicklungen an. Der Strom in der einen Wicklung muß in jedem Augenblicke entgegengesetzt sein dem in der anderen, denn die Wicklungen stellen parallele, sich induzierende Leiter dar. Würden die Stromrichtungen gleich sein, so würde der in der sekundären Wicklung entstehende Strom den durch die primäre erzeugten Kraftfluß verstärken, dieser würde eine größere Gegenspannung bieten, den primären Strom schwächen, auf der sekundären Seite würde Leistung abgegeben, die nicht aus dem Generator stammte. In Wirklichkeit dagegen sucht der entgegenwirkende sekundäre Strom den Kraftfluß zu schwächen, und da die angelegte primäre Spannung einen bestimmten Kraftfluß verlangt, so liefert der Generator um so mehr Strom, je stärker der sekundäre anwächst, ganz als wenn dieser

unmittelbar dem Generator entnommen würde. Der ursprüngliche Kraftfluß bleibt immer bestehen, und deshalb können die beiden Ströme auch nicht genau entgegengesetzt sein, in ihrem Zusammenwirken müssen sie den bei Transformatoren allerdings immer sehr kleinen Magnetisierungsstrom ergeben. Das vollständige Strombild des induktionsfrei belasteten Transformators besteht danach aus zwei, im wesentlichen entgegengesetzten gleichen Wellen, deren Nullwerte ein wenig gegeneinander verschoben sind. Die Zusammensetzung der beiden Wellen gibt dann als Darstellung des Magnetisierungsstromes eine dritte, viel niedrigere Welle.

Sind, wie dem Zwecke des Transformators entspricht, die Windungszahlen nicht gleich, so bleiben die geschilderten Verhältnisse trotzdem dieselben, denn infolge der gleichen Leistungen in beiden Wicklungen sind die Ströme umgekehrt proportional den Windungszahlen, die Amperewindungen auf beiden Seiten bleiben sich also gleich.

Die genaue Theorie des Transformators, die jetzt meist auf zeichnerischem Wege durchgeführt wird, wie in den ersten Anfängen die Abb. 59 und 60 andeuten, die aber durch die mit der Belastung steigende Streuung verwickelt wird, hat außer den Verlusten durch Widerstand, Wirbelströme und Hysterisis die Art der angeschlossenen, induktionsfreien oder induktiven Verbrauchskörper, genügende Kühlung der Wicklungen und viele andere technische und wirtschaftliche Einzelheiten zu berücksichtigen, damit der Transformator bei sicherer Isolierung nur wenige Prozente der hineingeschickten vollen Leistung verliert. Trotz der überaus einfachen Grundform ist deshalb der Transformatorbau jetzt zu einem Sonderfache geworden, das die ganze Kraft und Kunst des damit beschäftigten Technikers in Anspruch nimmt. Die Größe des für eine bestimmte durchgehende Leistung zu entwerfenden Transformators entwickelt sich wie die der Maschine aus der Forderung hinreichend geringer Verluste. Durch die vorgeschriebenen Spannungen ist das Verhältnis der primären und sekundären Windungszahlen, das Übersetzungsverhältnis, festgelegt, die Windungszahlen selbst, der Querschnitt der Wicklungen und der Eisenkörper sind so zueinander abzustimmen, daß bei wirtschaftlichster Gestaltung des Ganzen nur die zulässigen Verluste entstehen.



## Wechselstrommotoren. Mehrphasensysteme.

Ein großes Hindernis bei der Ausbildung des Wechselstromes war anfangs der Mangel eines allgemeiner brauchbaren Motors. — Allerdings ist ein Gleichstrommotor in Reihenschaltung ohne weiteres auch mit Wechselstrom zu betreiben, wenn nur der Feldmagnet aus bekannten Gründen ebenfalls aus Blechen zusammengesetzt ist. Denn der Wechselstrom ändert sowohl im Anker wie im Feldmagnet gleichzeitig seine Richtung, das Drehmoment wirkt also immer in demselben Sinne. Indessen ist eine genügend funkenfreie Stromwendung an den Bürsten bei einem solchen Motor viel schwerer zu erzielen als beim Betriebe mit Gleichstrom, und erst in neuerer Zeit hat man verstanden, unter Anwendung besonderer Mittel brauchbare Wechselstrom-Kollektormotoren zu bauen, die, ebenso regelungsfähig wie Gleichstrommotoren, namentlich für den Bahnbetrieb erwünscht waren. Vorher aber war das Bürstenfeuer so arg, daß es dauernden Betrieb ausschloß. — Andererseits ist in der Wechselstrommaschine, die wir bisher nur als Generator betrachtet haben, schon selbst ein Motor gegeben. Um das einzusehen, denke man sich eine Maschine so ausgeführt und so an ein Wechselstromnetz angeschlossen, daß sie bei Drehung und genau gleicher Frequenz und Phase eine dem Netze entgegengesetzt gleiche Spannung herstellt. Solange dieser Zustand aufrechterhalten wird, tritt keine Wirkung der Maschine ein, denn sie hält der Netzspannung in jeder Stellung gerade das Gleichgewicht. Überläßt man die Maschine dann aber sich selbst und sucht noch ihre Drehung durch Bremsen zu hindern, so muß notwendig der drehbare Teil etwas zurückbleiben, die Spannung der Maschine hält nicht mehr der Netzspannung taktmäßig das Gleichgewicht, bei jedem Wechsel tritt aus dem Netze Strom in die Maschine, entgegengesetzt dem Strome, den die Maschine als Generator liefern würde, der also treibend wirkt, die Maschine ist zum Motor geworden. Die Betrachtung im einzelnen ist ebenso leicht an dem Schema Abb. 45 wie an der Baufigur Abb. 50 durchzuführen. Sie zeigt auch, daß der Winkel zwischen den Polmitten des feststehenden und des umlaufenden Teiles um so größer werden muß, je größer die mechanische Belastung wird. Im übrigen aber läuft der Motor vollkommen synchron mit dem Generator des Netzes und würde bei einer gewissen Überlastung stehen bleiben. Er kann sich auch nicht vom Stillstande selbst in Bewegung versetzen, wie wieder

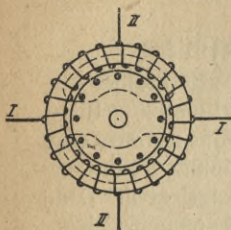


Abb. 62.

aus Abb. 45 und Abb. 46 leicht zu ersehen ist. Denn der drehbare Rahmen erfährt in der senkrechten Stellung durch eingeleiteten Wechselstrom gar keinen Antrieb, in einer anderen, beispielsweise der senkrechten, einen kurzen Stoß in der einen Richtung, unmittelbar darauf in der anderen, noch ehe die Trägheit seiner Masse merklich überwunden werden konnte. Ehe man also dem Motor Strom gibt, muß er durch äußeren Antrieb auf synchrone Drehzahl mit dem Netze gebracht werden, deren Größe, ganz entsprechend dem Generator, im umgekehrten Verhältnisse zur Zahl seiner Polpaare steht. Dieser mangelnde Selbstanlauf, die Notwendigkeit einer Gleichstromquelle zum Erregen der Feldpole und die Unmöglichkeit einer Regelung der Geschwindigkeit machen den sonst vorteilhaft arbeitenden Synchronmotor für allgemeinere Verwendung untauglich. Die Bemühungen um einen geeigneteren Wechselstrommotor führten nach mancherlei Vorarbeiten anderer endlich gegen Ende der achtziger Jahre den italienischen Physiker Ferraris († 1897) zur Begründung des Drehstromes.

Wie bei Besprechung des Gleichstromankers von Pacinotti sahen, wird ein bewickelter Ring (Abb. 62) beim Zuführen von Strom etwa an den gegenüberliegenden Punkten I I zu einem Magneten, dessen Pole in diesen Punkten liegen. Stellt man durch einen inneren Eisenzyylinder eine magnetisch leitende Verbindung zwischen diesen Polen her, so entstehen zwei magnetische Kreise durch die Ringhälften und den Kern, wie punktiert angedeutet. Ist der eingeführte Strom ein Wechselstrom, so wirkt das Ganze zunächst wie eine Art Drosselspule. Statt der Punkte I I könnte man auch die Punkte II II wählen, dann würde der Kraftfluß in dem Kerne nicht mehr wagrecht, sondern senkrecht hin und her schwingen. Wenn man ferner die beiden Punkt-paare an gesonderte Generatoren legt, die aber elektrisch senkrecht zueinander stehen, so wird der Kraftfluß bald wagrecht, bald senkrecht verlaufen. Denn wenn der eine Strom seinen größten Wert hat, ist der andere Null, und eine Viertelperiode später ist das Umgekehrte der Fall. Zeichnet man zwei um eine Viertelperiode verschobene Stromwellen, und achtet man bei der Folge der Werte auch auf ihr Vorzeichen (über oder unter der Zeitlinie), so sieht man, daß jeder der beiden Ströme dem Kraftflusse nach je einer halben Periode ent-



gegengesetzte Richtung gegeben hat. Die vier Haupt-  
richtungen des Kraftflusses haben deshalb etwa  
die in Abb. 63 durch die vier Strahlen angegebene  
Folge  $+ I, - II, - I, + II$ . Ob die Folge rechts=  
läufig ist, wie hier angenommen, oder linksläufig,  
hängt von der Wicklungsrichtung des Ringes und  
der Schaltung der Generatoren ab. Zwischen den  
Hauptrichtungen, in denen immer einer der  
Ströme Null ist, wirken die beiden Ströme gleich=  
zeitig mit entsprechend geringerer Stärke, wie man an den Strom=  
wellen verfolgen kann. Es leuchtet ein, daß man diese Stromwerte  
wieder nach Art des Kräfteparallelogrammes zusammensetzen hat,  
um ihre gemeinschaftliche Wirkung zu erhalten, und die wechselnde  
Richtung des Kraftflusses stellt sich dann etwa so dar, als wenn in Abb.  
63 der Strahl sich gleichmäßig um den mittleren Punkt drehte. Der  
Kraftfluß dreht sich somit in dem Ringe und Kerne in jeder Periode  
einmal herum. Dieses Drehen des Kraftflusses ist allerdings nur  
scheinbar, denn an jeder Stelle wogt der Magnetismus nur hin und  
her, wie auch Wasserwellen ein scheinbares Fortschreiten zeigen, wäh=  
rend die Wasserteilchen doch nur auf und ab schwingen. Für die  
Grunderscheinungen des Drehstromes darf man aber ein wirkliches  
Drehen des Kraftflusses annehmen, als wenn man dem Ringe an  
zwei Stellen Gleichstrom zuführte und den Ring selbst in Drehung  
versetzte. Denkt man sich endlich noch die beiden Generatoren zu  
einem vereinigt, indem man etwa in Abb. 50 eine zweite Wicklung  
mit den Spulenseiten in den freien Zwischenräumen der ersten an=  
bringt, so erhält man ein vollständiges Zweiphasensystem.

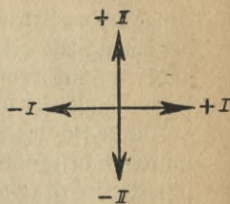


Abb. 63.

Auf den zylindrischen Kern ist das Drehfeld zunächst ohne Einfluß  
(von den Nebenerscheinungen durch Wirbelströme und Hysteresis sehen  
wir wieder ab). Isolierte Stäbe am Umfange des Kernes erhalten  
durch das sie schneidende Drehfeld eine induzierte Spannung, und  
zwar gegenüberliegende Stäbe in entgegengesetzter Richtung. Ein  
Strom kann sich in den Stäben erst ausbilden, wenn man je zwei gegen=  
überliegende auf den Stirnseiten des Kernes zu geschlossenen Strom=  
wegen verbindet. Dann aber suchen die Stäbe mit dem Drehfelde zu  
gehen, denn die induzierten Ströme verlaufen so, wie wir wissen, als  
wenn sie die Bewegung des Feldes hindern wollten. Ist nun der Kern  
in Lagern drehbar, so wird er von dem Drehfelde mitgenommen.

Statt die Stäbe paarweise zu verbinden, kann man sie durch leitende Ringe an den Stirnseiten des Kernes auch sämtlich vereinigen. Die auf der einen Seite des Drehfeldes induzierten Stäbe finden dann auf der anderen Seite immer ihre Rückleiter. Man erhält so den sogenannten Kurzschlußläufer oder Käfigläufer.

Würde sich der Läufer ebenso schnell drehen wie das Drehfeld, so würde in den Stäben kein Strom induziert, weil sie keine Kraftlinien schnitten. Erst durch das dauernde Zurückbleiben des Läufers gegen das Drehfeld entstehen Ströme und damit das Drehmoment. Den Widerstand der Stäbe wählt man tunlichst klein, um kleine Ohmsche Verluste zu erhalten, so daß schon bei geringem Unterschiede der Geschwindigkeit des Drehfeldes und des Läufers verhältnismäßig starke Ströme sich ausbilden können. Ihr Wert ist abhängig von dem mechanischen Widerstande des Läufers, also von dem Drehmomente, das dieser etwa durch eine Riemscheibe abzugeben hat, denn um so mehr bleibt er gegen das Drehfeld zurück. Es tritt also eine Selbstregelung der Stromstärke im Läufer ein, ähnlich wie bei dem Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Die Verhältnisse werden so gewählt, daß bei der größten dauernden Belastung die Geschwindigkeit des Läufers nur um wenige Prozente kleiner als die des Drehfeldes ist, etwas kleiner muß sie aber immer sein, der beschriebene Drehstrommotor läuft „asynchron“.

Welche Läuferstäbe von dem sie (verhältnismäßig langsam) stetig überholenden Drehfelde jeweilig am meisten induziert werden, welche somit den stärksten Strom führen, ist nach den früheren Regeln leicht zu bestimmen. Die Gesamtheit der stromdurchflossenen Stäbe mit ihren Stirnverbindungen bildet eine Erregerwicklung des Läufers und ergibt ein Feld nahezu senkrecht zum Drehfelde, ähnlich wie die Anferwicklung in dem feststehenden Felde der Gleichstrommaschine. Bei dieser wird der Zustand der gekreuzten Felder durch den Kommutator aufrecht erhalten, beim Drehstrommotor dreht sich das induzierende Feld selbst, und deshalb entfällt der Kommutator.

Das beschriebene zweiphasige Drehstromsystem ist das am leichtesten zu verstehende, aber nicht das übliche, weitaus häufiger ist vielmehr das Dreiphasensystem, das gewöhnlich allein unter Drehstrom verstanden wird. Wenn man auf den Generator Abb. 50 außer der ersten noch zwei gleiche Wicklungen in rich-

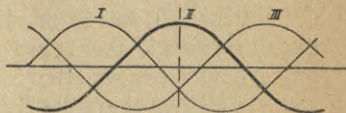


Abb. 64.



tigem Abstände voneinander aufbringt, so erhält man (Abb. 64) aus ihnen drei gesonderte Wechselströme I, II, III (einer davon ist durch stärkeren Strich hervor-gehoben), die um Drittelperioden verschoben sind. Schließt man die sechs Leitungen vom Generator wie-der an den bewickelten Ring an (in Abb. 65 durch einen einfachen Kreis angedeutet), und zwar an den Punkten I I, II II, III III, so ergibt sich dasselbe

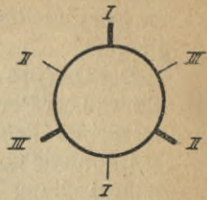


Abb. 65.

Drehfeld wie beim Zweiphasensysteme. Das läßt sich feststellen, indem man für beliebige Augenblicke aus Abb. 64 zusammengehörnde Stromwerte entnimmt und unter Berücksichtigung ihres Vorzeichens in den Ring einführt. Nun kann man noch weiter gehen. Wie Abb. 64 zeigt, ist die algebraische Summe aller Ströme in jedem Augenblicke gleich Null, oder jeder augenblickliche Stromwert ist entgegengesetzt gleich der Summe der beiden anderen. Daher findet immer ein Lei-ter vom Generator in zwei entsprechenden anderen seine Rückleiter, und man kann die Hälfte der sechs Leiter fortlassen, wenn man nur für das Schließen der Stromkreise sorgt. In dem Ringe Abb. 65 ist der Schluß von selbst gegeben, im Generator durch Verbinden der über-schießenden drei Wicklungsenden herzustellen. Schematisch bezeichnet man die erstere Verbindung als Dreieckschaltung (Abb. 66), die zweite als Sternschaltung (Abb. 67). Die Dreiecksseiten bzw. die Sternstrahlen bedeuten dabei die drei Wicklungen bzw. ihre Ströme oder Spannun-gen in ihrer gegenseitigen elektrischen Lage. Beide Schaltungen sind sowohl im Generator wie im Motor anwendbar. Bei der Dreieckschal-tung ist die Spannung in jeder Seite, also auch die Spannung zwischen zwei Zuleitungen, gleich der in einer Wicklung des Generators indu-zierten Spannung, die Ströme in den Zuleitungen setzen sich dagegen aus je zwei Seitenströmen zusammen. Eine einfache geometrische

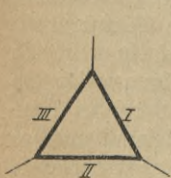


Abb. 66.

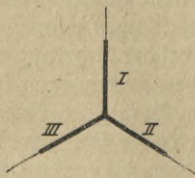


Abb. 67.

Betrachtung zeigt, daß die Stromsumme  $\sqrt{3}$  mal größer ist als der Einzelstrom. Bei der Stern-schaltung ist dagegen die Span-nung zwischen zwei Zuleitun-gen gleich der geometrischen Summe zweier Wicklungspan-nungen und ergibt sich in ähn-licher Weise zu  $\sqrt{3}$  der Einzel-spannung, während die Ströme

in den Zuleitungen hier den Strömen in den Wicklungen gleich sind.

Der Vorzug des Dreiphasensystems besteht offenbar in erster Linie in der Verminderung der Leitungen auf nur drei. Jeder Stromkreis eines Mehrphasensystemes ist im übrigen als ein einfacher Wechselstromkreis aufzufassen, und es gelten für ihn die früheren Gesetze, seine Leistung setzt sich zusammen aus der Leistung der einzelnen Phasen. Bei verketteten Systemen, wie nach Abb. 66 und 67, kann die Umwandlung sowohl mit gesonderten einfachen Transformatoren in jeder Phase, wie auch mit einem magnetisch verketteten, hier also dreischentligen Transformator erfolgen.

Die Regelung der Geschwindigkeit läßt sich beim Drehstrommotor mit einfachen Mitteln in jedem gewünschten Grade durchführen. Wir hatten oben für die induzierten Leiter des Motors möglichst geringen Widerstand vorausgesetzt, damit die für das geforderte Drehmoment nötige Stromstärke in den Leitern schon bei ganz geringem Zurückbleiben des Rotors gegen das Drehfeld — bei kleinem Schlupf — eintrete. Würde der Widerstand der Rotorwicklung absichtlich erhöht werden, so wäre ein größerer Schlupf notwendig, um die frühere Stromstärke zu erzeugen, der Rotor nähme von selbst eine entsprechend kleinere Geschwindigkeit an, die durch geeignete Wahl des Widerstandes bis auf jeden beliebigen Wert herabgesetzt werden könnte. Um das zu erreichen, führt man den Rotor nicht mit der einfachen Kurzschlußwicklung aus, sondern mit sogenannter Phasenwicklung, die ganz der Statorwicklung entspricht. Die Anschlußpunkte dieser Rotorwicklung sind über Schleifringe durch regelbare Widerstände außerhalb des Motors verbunden, mit deren Einstellung die Geschwindigkeitsänderung ermöglicht wird. Eine solche Einrichtung ist auch zum Anlassen des Motors immer erforderlich, wenn sein unmittelbares Einschalten einen zu starken Stromstoß auf das Netz verursachen würde. Leider ist dieses wirksame Mittel unwirtschaftlich für die dauernde Regelung, denn die in den Widerständen entwickelte Wärme ist für den Zweck des Motors verloren, bei der Regelung wird ein mehr oder weniger großer Teil der dem Netze entnommenen Leistung verschwendet. Induktive Widerstände zum Vermeiden dieses Verlustes anzuwenden ist aber nicht angängig, da sie Phasenverschiebung zwischen Drehfeld-Rotorströmen herbeiführen, die das Drehmoment schwächen.

Die Rotorströme entstehen aus den Statorströmen durch die magne-



tische Koppelung, in seinem Wesen ähnelt der Drehstrommotor also dem Transformator, und seine genauere Behandlung geht auch davon aus. Bei festgebremstem Rotor liefert seine Phasenwicklung Sekundärströme von der Netzfrequenz. Ein Gradunterschied besteht nur insofern gegen den Transformator, als die beiden Wicklungen durch den Luftspalt getrennt sind. Die magnetische Streuung zwischen ihnen ist deshalb viel größer, außer dem gemeinsamen Felde bilden die Wicklungen noch Sonderfelder um sich, im Sinne der Abb. 17, und dem durch den Luftspalt vergrößerten magnetischen Widerstande entspricht ein bedeutend größerer Magnetisierungsstrom. Man wählt deshalb den Luftspalt so eng, wie aus mechanischen Gründen nur möglich ist.

Statt mit der Ringwicklung der schematischen Abb. 62 führt man den Drehstrommotor ebenfalls mit Trommelwicklung zwischen Zähnen aus. In beiden Fällen gestaltet sich die Berechnung des Kraftflusses etwas umständlicher als beim gewöhnlichen Transformator, weil die Windungen nicht sämtlich den ganzen Kraftfluß umschließen, dieser vielmehr stufenweise zwischen den Leitern hindurchtritt.

Der bisher betrachtete, als zweipolig bezeichnete Drehstrommotor zeigt bei der üblichen Netzfrequenz von 50 nicht weniger als  $50 \times 60 = 3000$  Umläufe des Drehfeldes in der Minute, nahezu also dieselbe Geschwindigkeit des Rotors. Durch mehrpolige Ausführung kommt man aber wie beim Generator auf die meist erwünschten niedrigeren Geschwindigkeitstufen von 1500, 1000, 750 bei 4-, 6-, 8poliger Ausführung.

Trotz vieler Bemühungen ist es bisher nicht gelungen, dem Drehstrommotor zu seiner großen Einfachheit und Zuverlässigkeit auch noch die Eigenschaft beliebiger verlustloser Regelung zu geben. Mit der Jahrhundertwende kam aber die Frage der elektrischen Fernbahnen immer mehr in Fluß, und unter Wilhelm v. Siemens' Vorgänge begannen die Versuche, hochgespannten, also nur billige Leitungen erfordernden Wechselstrom unmittelbar dem Zuge zuzuführen und ihn hier durch Transformatoren auf die für Motoren geeignete niedrigere Spannung zu bringen. Weitgehende wirtschaftliche Regelbarkeit der Motoren wurde dabei zur notwendigen Bedingung, und da die kommutatorlosen Wechselstrommotoren in dieser Hinsicht versagt hatten, kam man auf den bis dahin vernachlässigten Kommutatormotor für Wechselstrom zurück. Seine Ausbildung hat wegen der verwickelteren Erschei-

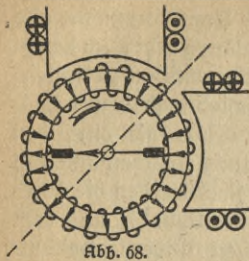


Abb. 68.

nungen bei der Stromwendung viele Mühe bereitet, doch ist man zu befriedigenden Ergebnissen gelangt, und es ist unter Benutzung der besonderen Eigenschaften des Wechselstromes eine ganze Reihe von Motoren entstanden. Des einfachen Reihenschlußmotors beim Betriebe durch Wechselstrom ist schon früher gedacht, hier sei nur noch kurz das Wesen eines Motors erläutert, des Repulsionsmotors, weil sein

Grundgedanke, den Strom auf den Kommutatoranker transformatorisch zu übertragen und die Geschwindigkeit durch einfache Bürstenverschiebung zu regeln, in verschiedenen Motorformen wiederkehrt.

Die Bezeichnung Repulsionsmotor stammt von der ursprünglichen Betrachtungsweise in den achtziger Jahren und hat keine Bedeutung mehr. Die Bauweise ist in Abb. 68 schematisch dargestellt. Dem Ringanker gegenüber stehen oben und rechts zwei Pole des Magnetgestelles, deren Wicklungen so hintereinandergeschaltet sind, daß beim Anschlusse an die Wechselstromquelle die Pole immer gleichsinnig erregt werden. Die Gegenpole unten bzw. links sind der Einfachheit halber fortgelassen. Auf dem Kommutator, hier vertreten durch die inneren Leiter des Ringes, schleifen die beiden kurzgeschlossenen Bürsten in wagrechter Lage. Die Stromrichtungen sind für einen gewissen Augenblick angegeben, sie wechseln natürlich periodisch ihr Zeichen. Betrachtet man den Pol rechts mit dem Anker für sich, so bildet der erstere den primären Teil eines Transformators, der letztere den sekundären. Die Ströme auf der wirksamen Außenseite des Ringes sind denen auf dem Pole (und seinem zu denkenden Gegenpole) so weit entgegengesetzt, wie der auch hier nicht unbedeutende Magnetisierungsstrom zuläßt, und die Ankerströme können sich ausbilden, weil an den Stellen unter diesen beiden Polen, wo die Ströme gegeneinandergerichtet sind, die kurzgeschlossenen Bürsten für Ausgleich der Spannungen sorgen. Ein Drehmoment des Ankers kann aber nicht eintreten, weil seine Ströme von der Polmitte aus entgegengesetzte Richtung haben. Dieselbe Betrachtung auf den oberen Pol (und seinen Gegenpol) für sich angewendet, ergibt keine transformatorische Wirkung auf den Anker, da eben die Bürsten vor den Polmitten fehlen und die wagrechten nur Punkte gleicher Spannung verbinden würden. In der Zusammenwirkung ergeben aber die von dem ersten Polpaare induzier-



ten Ströme unter dem zweiten Polpaare das durch den Pfeil angedeutete Drehmoment. Stellt man nun die Bürsten in die punktierte Schräglage, so ist wieder eine, und zwar entsprechend stärkere Transformatorwirkung vorhanden, aber kein Drehmoment, in der dazu senkrechten Schräglage fällt, wie vorher beim oberen Pole allein, die Transformatorwirkung aus. Ersichtlich kann man so das Drehmoment und damit die Geschwindigkeit bei einer gewissen Belastung einfach durch die Bürstenverschiebung beliebig regeln. Der Motor hat im wesentlichen die Eigenschaften des Reihenschlußmotors, seine Arbeitswicklung auf dem wagrechten Polpaare ersetzt die unmittelbare Stromzuführung zu den Bürsten, während die Wicklung auf dem senkrechten Polpaare die Erregerwicklung bildet. Die Ausführung erfolgt natürlich mit Trommelanker und mit verteilter Statorwicklung wie beim Drehstrommotor, auch kann man unter Fortfall der entsprechenden Leiter im Stator je zwei benachbarte gleichsinnige Pole zu einem zusammenfassen. Der Motor ist dann in seiner einfachsten Form ein zweipoliger, wie er ursprünglich auch war, dessen Bürsten um ein gewisses Stück unter die Pole verschoben werden.

### Ladungsercheinungen.

Die Vorstellung der elektrischen Ausgleichvorgänge unter dem Bilde eines Flüssigkeitstromes, der durch einen Druck unter Widerstand in einem Leiter bewegt wird, führt auch zu der Annahme, daß ein leitender Körper eine gewisse Menge Elektrizität enthält, mit ihr geladen ist. Doch hat sich die Kenntnis der Ladungsercheinungen lange vor dem Strombilde entwickelt, besonders nachdem 1745 der Domherr v. Kleist das als Leidener Flasche bekannte Gerät erfunden hatte, mit dem größere Mengen von Elektrizität bei entsprechender Wirkung angeammelt werden können. In der praktischen Elektrotechnik spielen die Ladungsercheinungen bei den verhältnismäßig niedrigen Spannungen an den Gebrauchsstellen im allgemeinen keine Rolle, sie kommen aber zur Geltung bei den für lange Linien verwendeten Hochspannungen, die den von den bekannten Influenzmaschinen erzeugten nicht nachstehen oder sie noch übertreffen.

Das Wesen des elektrostatischen Sammlers oder Kondensators ist in Abb. 69 dargestellt. Er besteht einfach aus zwei ausgedehnten Metallflächen, die durch einen isolierenden Träger getrennt sind. In der Leidener Flasche bildet das Glasgefäß den Träger, die Stanniol-



Abb. 69.

belegungen innen und außen die leitenden Flächen. Verbindet man diese, wie angedeutet, mit den Polen einer Gleichstromquelle, so ladet sich der Kondensator, indem sich nach der früheren und auch jetzt noch vielfach bequemen Vorstellung die entgegengesetzten Elektrizitäten auf den Belegungen durch die isolierende Schicht hindurch anziehen und festhalten. Schon diese einfache Betrachtung führt zu der Erkenntnis, daß die Menge der angesammelten Elektrizität um so größer ist, je ausgedehnter die leitenden Flächen sind, je stärker die Spannung und je dünner die isolierende Zwischenschicht. Trennt man nun den Kondensator von der ladenden Quelle und verbindet seine Belegungen durch einen Leiter, so vollzieht sich

durch diesen unter stetig abnehmender Spannung der meist sehr rasche Ausgleich mit allen Wirkungen des Stromes, dessen Stärke in jedem Zeitteilchen nach dem Ohmschen Gesetze von der augenblicklichen Spannung und dem Widerstande abhängt. Der Kondensator hatte also einen gewissen Energieinhalt, der durch den verbindenden Leiter frei wird. Die Mengen der unter verschiedenen Verhältnissen angesammelten Elektrizität lassen sich beispielsweise durch ein ballistisches Galvanometer vergleichen.

Saraday entdeckte nun, daß die Ladung eines Kondensators nicht nur von Form und Abmessungen bei gegebener Spannung abhängig ist, sondern in hohem Grade auch von der Art der isolierenden Zwischenschicht, dem Dielektrikum. Geht man von der Ladung bei Luft als Zwischenmittel aus, so wird sie durch die folgenden Stoffe im Verhältnisse der beigesezten Zahlen vergrößert: Glas 3—8, Paraffin 2—2,5, Schwefel 2,5—5, Hartgummi 2—3,5, Glimmer 4—7, Öle 2 bis 2,5. Saraday wurde dadurch zu der Anschauung geführt, wonach die isolierenden Stoffe ein verschiedenes Leitvermögen für die elektrischen Kraftlinien haben und der eigentliche Sitz der angesammelten elektrischen Energie sind. Damit gelangt man zu einer vollen Ähnlichkeit mit den elektromagnetischen Erscheinungen, die noch deutlicher hervortritt, wenn man nach Werner Siemens auch auf den Kondensator die Vorstellung des Ohmschen Gesetzes anwendet. Amperewindungszahl eines magnetischen Stromkreises und elektrische Spannung zwischen den Belegungen eines Kondensators, magnetische und dielektrische Leitfähigkeit entsprechen sich und ergeben in dem durch Quer-



schnitt und Länge bestimmten Körper den magnetischen bzw. elektrischen Kraftfluß von gewisser Dichte der Kraftlinien, und alle früher erörterten Versinnlichungen des magnetischen Feldes durch Gleichnisse an elastischen Körpern gelten auch für das elektrische Feld. Jeder an den einen Pol einer Elektrizitätsquelle angeschlossene Körper kann als Teil eines Kondensators aufgefaßt werden, denn er findet immer sein Gegenstück in der näheren oder weiteren Umgebung. Bei dem Kondensator im engeren Sinne stehen sich aber die leitenden Flächen sehr nahe gegenüber, und das elektrische Feld zwischen ihnen hat deshalb die in Abb. 13 angedeutete Form, die Kraftlinien verlaufen zum weitaus größten Teile parallel, oder die elektrische Kraft zwischen den Belegungen ist gleichmäßig, die Spannung von der einen zur anderen nimmt in gleichen Schritten ab. Bei derselben Spannung wird die Zwischenschicht elektrisch um so mehr beansprucht, je dünner sie ist, auf je kürzerem Wege also die Spannung abfällt.

Wird der Kondensator an eine Wechselstromquelle gelegt, so wird er ersichtlich wechselweise geladen und entladen, die Energie wogt in ihm hin und her. Um nun den Einfluß des Kondensators im Zusammenhange mit anderen Wechselstromgeräten eines Stromkreises zu erkennen, kann man wieder nach Abb. 55 von dem tatsächlich herrschenden Strome  $i$  ausgehen. Dann fließt offenbar Ladung eines Sinnes in den Kondensator, solange die Stromwerte oberhalb bzw. unterhalb der Mittellinien bleiben, und die von dem Kondensator dabei entwickelte Gegenspannung erreicht ihr unteres oder oberes Maximum immer beim Durchgange des Stromes durch Null, sie entspricht in ihrem Verlaufe der Linie  $e_1$  und wirkt der Linie  $s$  der Selbstinduktion entgegen. Der Einfluß der Selbstinduktion kann also durch einen Kondensator in mehr oder weniger hohem Grade aufgehoben werden, je nach der Aufnahmefähigkeit des Kondensators. Diese wird als Kapazität bezeichnet, deren Einheit ein Kondensator hat, wenn er bei der Einheit der ladenden Spannung die Einheit der Elektrizitätsmenge aufnimmt. Im praktischen Meßsysteme wird die Kapazitätseinheit Farad genannt und entspricht in ihrem gegensätzlichen Verhalten dem Henry der Selbstinduktion. Rechnungen mit Berücksichtigung der Kapazität liegen schon in schwierigeren Gebieten der Elektrotechnik, deshalb mag zum weiteren Einblicke hier nur noch darauf hingewiesen werden, daß man die Kapazität eines Kondensators bestimmen könnte,

indem man ihn in Hintereinanderschaltung mit Selbstinduktionen bekannter Werte vergleicht. Dann ist die Kapazität in Farad gegeben durch die Anzahl Henry, deren Wirkung hinsichtlich der Phasenverschiebung der Kondensator aufhebt.

Das scheinbar so einfache Mittel, mit dem Kondensator die meist unerwünschten Folgen der Selbstinduktion auszugleichen, ist leider nur in beschränktem Maße anwendbar, weil die Kondensatoren für größere Leistungen zu riesige Abmessungen annehmen würden. Der Grund dafür liegt in der geringen Elektrifizierbarkeit der dielektrischen Mittel gegenüber der hohen Magnetisierbarkeit des Eisens. Jene ist, wie die vorher angegebenen Zahlen zeigen, nur einige Male größer als die Luft, diese viele hundert Male. Der Kondensator kommt daher in der Starkstromtechnik nur für Nebenzwecke in Anwendung, eine um so größere Bedeutung hat er auf dem Gebiete der drahtlosen Telegraphie, wo die Kapazität im Verein mit der Selbstinduktion die Ausbildung der elektrischen Schwingungen ermöglicht. Mit diesen hat übrigens auch die Starkstromtechnik zu rechnen, und namentlich bilden hier die Kabel bei ihren großen Längen ungewollt Kondensatoren von erheblicher Kapazität, deren Einfluß sorgfältig zu berücksichtigen ist.

In nahem Zusammenhange mit den Ladungserscheinungen stehen die Maßnahmen, die bei elektrischen Maschinen und Geräten zu treffen sind, um unbeabsichtigten Ausgleich von Spannungsunterschieden zwischen nahen Leitern zu verhüten. Wir hatten von der elektrischen Isolierung spannungsführender Leiter bisher immer nur beiläufig gesprochen, weil ihre Isolierung bei den üblichen unmittelbaren Gebrauchsspannungen von nicht mehr als wenigen hundert Volt in physikalischer Hinsicht ziemlich einfach ist, soviel Mühe und Erfahrungen ihre wirtschaftliche Durchführung auch erfordert. Bei den niederen Spannungen tritt selbst in Abständen von nur kleinen Bruchteilen eines Millimeters ein Stromübergang zwischen den Leitern nicht von selbst ein, wenn auch ein Lichtbogen auf Abständen von mehreren Zentimetern Länge bestehen bleiben kann, wenn er durch Überbrückung einmal eingeleitet ist. Unter diesen Umständen ist die Isolierung mehr eine technologische und bauliche als eine physikalische Aufgabe, es gilt nur, die Leiter verschiedener Spannung vor gegenseitiger Berührung zu schützen und zufällige bogenbildende Überbrückungen tunlichst auszuschließen. Faserstoffe, namentlich Baum-



wolle, für dünne Überzüge der Leiter, dann Holz, Glas, Porzellan, verschiedene natürliche Gesteine, Harzmassen usw. als Halter der leitenden Körper, in Verbindung mit Gummi oder harzigen Hilfsstoffen und Kitten, geben immer die Möglichkeit einer leichten und ausreichenden Isolierung. Anders im Gebiete der hohen Spannungen. Jedem sind durch Anschauung die knisternden, sprühenden und leuchtenden Entladungen bekannt, die sich an den sogenannten Elektrifiziermaschinen auf größere Abstände vollziehen, in der Hochspannungstechnik gilt es nun, solchen Entladungen in möglichst einfacher und wirtschaftlicher Weise zu begegnen.



Abb. 70.

Es war oben schon von der elektrischen Beanspruchung des Dielektrikums im Kondensator die Rede, diese schließt aber auch eine mechanische Beanspruchung ein. Denn wenn die Spannung ein gewisses Maß überschreitet, so wird das Dielektrikum durchschlagen und der Ausgleich eingeleitet. Wesentlich dabei ist die Form der sich gegenüberstehenden Leiter. Bei dem einfachen Plattenkondensator Abb. 69 sind die Kraftlinien parallel, ein Durchschlag wird an der zufällig ungünstigsten Stelle strahlartig erfolgen. Bei einem fabelartigen Kondensator nach Abb. 70 sind dagegen die Kraftlinien, von denen einige punktiert angedeutet sind, an dem inneren Leiter dichter als an der äußeren Belegung, die inneren Schichten des Dielektrikums werden daher höher beansprucht als die äußeren, und für dieselbe Spannung muß die Isolierschicht stärker sein als beim Plattenkondensator. Allgemein ist die Beanspruchung der Isolierschicht um so größer, je weniger Oberfläche ein Leiter nach dem Gegenleiter hin bietet. Daher die bekannte Erscheinung, daß an Spitzen und Schneiden die Entladung am leichtesten erfolgt, bei festen Isolierstoffen unter Zerstörung der betroffenen Stellen. Im ganzen kann man den Widerstand fester Isolierstoffe als wachsend mit der Dielektrizitätskonstanten ansehen, doch ist noch keine gesetzmäßige Beziehung zwischen beiden bekannt. Bei der baulichen Ausbildung der Hochspannungsgeräte hat man ferner mit der Überschlagspannung zu rechnen, da sich beispielsweise die Spannungen an dem Kondensator Abb. 69 außer durch das Dielektrikum hindurch auch über seine Ränder hinweg auf der nie ganz rein zu erhaltenden Oberfläche ausgleichen können. Endlich sind die sogenannten stillen Entladungen ohne Funkenbildung zu beachten, die zwischen nahen Lei-

tern übergehen und durch Ozonbildung den Isolierstoff schädigen können. Diese wenigen Andeutungen mögen eine Vorstellung von den vielseitigen Aufgaben vermitteln, die der Hochspannungstechniker bei Durchbildung seiner Geräte unter zweckmäßiger Formgebung mit Hilfe von Porzellan, getränktem Papier, Harzmassen, Glimmer usw. zu lösen hat. Sie haben schon zu einem Sonderzweige geführt, der elektrischen Festigkeitslehre, deren weiterer Ausbau mit allen wissenschaftlichen Hilfsmitteln erfolgt.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA  
KRAKÓW



S - 96

S. 61





Biblioteka Politechniki Krakowskiej



I-301557



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000295877