

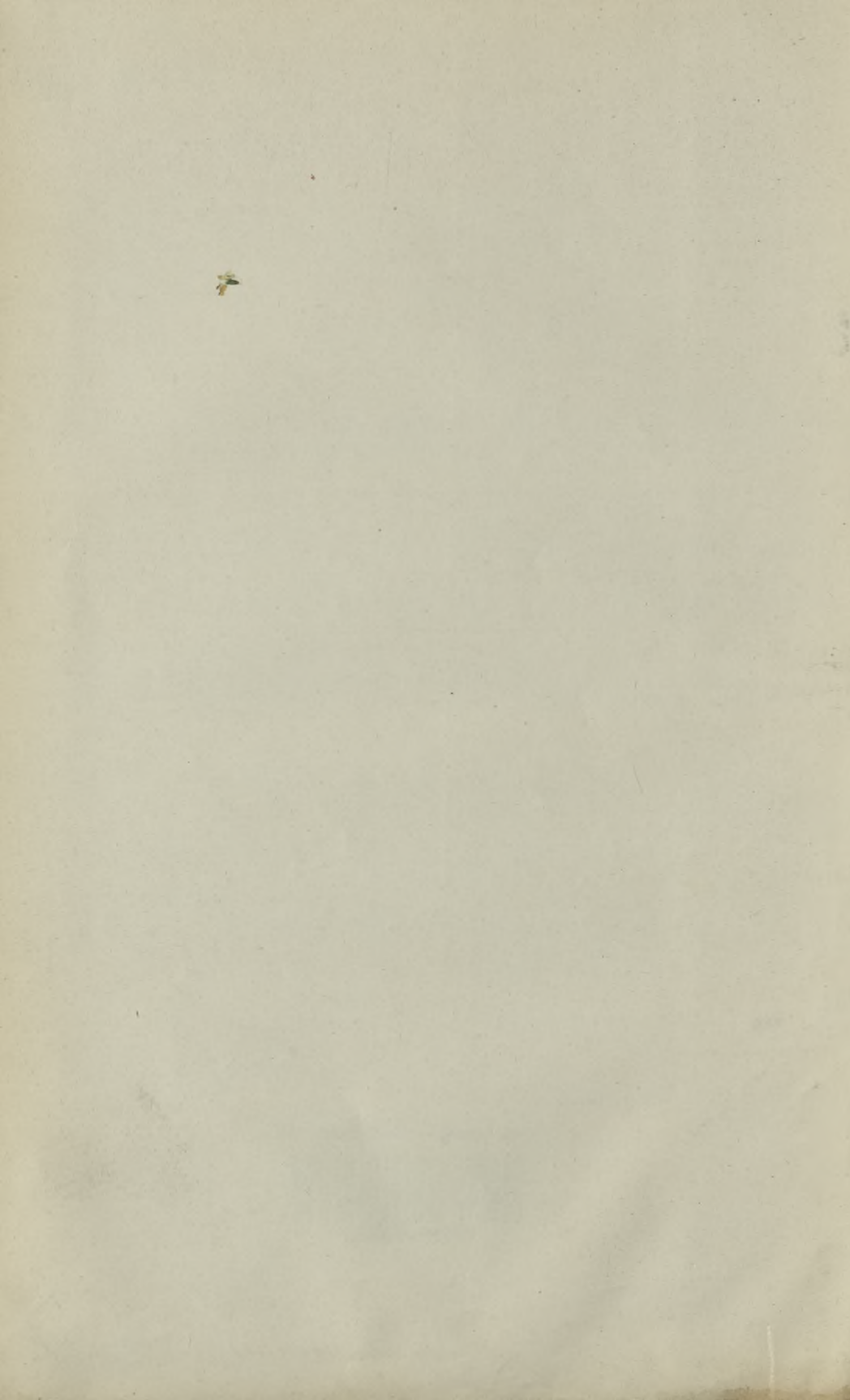


Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294805

X
2.130



Elektrizitätswerke, elektrische Beleuchtung und elektrische Kraftübertragung

Semeinverständliche Darstellung von

Dr. W. Bermbach

und

E. Müller

Oberingenieur der Siemens-Schuckertwerke in Köln a. Rh.

Dritte, umgearbeitete und stark vermehrte Auflage

Mit 267 Abbildungen



Stuttgart 1904

Arnold Bergsträger Verlagsbuchhandlung

H. Kröner

114
88

X
2130

Elektrizitätswerke,
elektrische Beleuchtung und
elektrische Kraftübertragung

Veranschaulichte Darstellung von

Dr. W. Brandt

3. Aufl.

Alle Rechte vorbehalten.

II 5341



Druck von Carl Grüniger, K. Hofbuchdruckerei Zu Gutenberg (Mett & Hartmann), Stuttgart.

Akc. Nr. 4981/50

Vorwort zur dritten Auflage.

Die neue Auflage wurde so stark erweitert und so gründlich umgearbeitet, daß man sie als ein neues Buch ansehen kann. Vor allem sollte bei der Neubearbeitung der Praxis in höherem Maße Rechnung getragen werden, als es früher geschehen ist. Die Verwirklichung dieser Absicht wurde dadurch ermöglicht, daß es dem Verfasser der beiden ersten Auflagen gelang, den technischen Leiter der Kölner Geschäftsstelle der Siemens-Schuckertwerke als Mitarbeiter zu gewinnen.

Das Buch hat hauptsächlich den Zweck, denjenigen, die das Studium der Elektrotechnik nicht als Beruf gewählt haben, Gelegenheit zu geben, sich mit den verschiedenen Systemen der elektrischen Kraftübertragung und den Vorgängen bei derselben bekannt zu machen. Jedoch glauben wir die Ansicht aussprechen zu dürfen, daß auch der Fachmann in verschiedenen Kapiteln manches finden wird, das er für seine Berufstätigkeit verwerten, und auch manches, das zu seiner Orientierung auf Gebieten, die ihm weniger geläufig sind, dienen kann.

Mit Rücksicht auf den Hauptzweck, den wir bei der Wahl des Stoffes und der Art der Behandlung im Auge hatten, wurden die Grundbegriffe der Elektrotechnik eingehender dargelegt, wobei die Wechselströme besondere Berücksichtigung fanden; bei den Maschinen wurden hauptsächlich die Wirkungsweise, die Vorgänge und Behandlung im Betriebe sowie die Vorzüge und Nachteile erörtert, die Berechnungen dagegen übergangen. Durch zahlreiche Literaturangaben wird es jedoch dem Leser ermöglicht, sich über Gegenstände, die ihn besonders interessieren, näher zu unterrichten.

Wenn die Darstellung, wie in den beiden ersten Auflagen, gemeinverständlich genannt wird, so soll durch diesen Zusatz angedeutet werden, daß größere mathematische Kenntnisse bei dem Leser nicht vorausgesetzt werden, daß also Nichtfachleute, welche die elementare Mathematik beherrschen, den Inhalt des Buches verstehen können.

Die Figuren sind größtenteils schematische, zur Erläuterung des Textes genügende; wir haben darauf verzichtet, Abbildungen von ganzen Maschinen zc. aufzunehmen. Die Preislisten und Druckschriften der elektrotechnischen Firmen, die sich jeder Interessent leicht verschaffen kann, bieten ja in dieser Hinsicht Hervorragendes. Wenn einige Totalansichten von Apparaten Druckschriften entnommen wurden, so sind es solche, die wesentlich dazu beitragen, die Beschreibung zu vereinfachen und das Verständnis des Textes zu fördern. Bei der Auswahl der Apparate für Schalt- und Regulierzwecke wurden vorwiegend die Konstruktionen der Siemens-Schuckertwerke berücksichtigt, da den Verfassern das diesbezügliche Material leicht zugänglich war, und sie mit dem Gebrauche dieser Apparate näher bekannt sind.

Den Herren Obergeringenieuren Kinbach (München) und Hübscher (Grevenbroich), die uns in dem Kapitel „Motorischer Teil“ an verschiedenen Stellen Rat erteilten, sprechen wir auch an dieser Stelle unsern verbindlichsten Dank aus.

Köln, Januar 1904.

Die Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Kapitel. Grundbegriffe und Gesetze über den elektrischen Strom	1
1. Arbeit, Leistung, Wärme und Arbeit	1
2. Hilfsvorstellung über die Elektrizität, die elektrische Spannung, das Potential	3
3. Stromstärke und Maßeinheit der Stromstärke — Ampere	8
4. Leitungswiderstand — Ohm, Rheostate	9
5. Das Ohmsche Gesetz, Maßeinheit der elektromotorischen Kraft — Volt	15
6. Stromarbeit — Watt	16
7. Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes für einen beliebigen Teil des Stromkreises, Spannungsverlust und Joulesche Wärme	19
8. Stromverzweigungen, Reihenschaltung, Parallelschaltung	27
2. Kapitel. Magnetismus	34
3. Kapitel. Induktionserscheinungen	40
4. Kapitel. Wechselströme	46
5. Kapitel. Der motorische Teil	78
I. Wasserkraftmaschinen	84
II. Wärmemaschinen	91
A. Die Dampfkraftanlagen	98
1. Dampferzeuger	100
2. Zubehörteile zur Dampfkesselanlage	104
a) Die Speisevorrichtungen	104
b) Der Speisewasservorwärmer	105
c) Der Wasserreiniger	105
3. Die Rohrleitungen	106
4. Die Dampfmaschine	107
a) Die normale Pendeldampfmaschine	107
b) Die Dampflokobile	119
c) Die Heißdampfmaschine von Schmidt	121
d) Dampfturbinen	125
a) Dampfturbine von De Lavale	126
b) Dampfturbine von Parsons	128
e) Rotierende Dampfmaschinen	131
a) Rotationsdampfmaschine von Hult	131
b) Rotationsdampfmaschine von Patschke	132

	Seite
B. Die Explosionsmotoren	136
1. Die Viertaktmotoren	136
2. Der Zweitaktmotor von Schellhäuser	139
3. Der Zweitaktmotor von Körting	141
4. Der Diesel-Motor	144
5. Betriebsmittel für die Explosionsmotoren	146
6. Kapitel. Dynamomaschinen	151
I. Gleichstrommaschinen	151
II. Wechselstrommaschinen	179
III. Die Parallelschaltung von Dynamomaschinen	186
7. Kapitel. Die Akkumulatoren	197
Der Bleiakkumulator	198
Neuere Akkumulatoren	223
Pufferbatterien	225
Zellenschalter	228
8. Kapitel. Transformatoren und Umformer	233
9. Kapitel. Meßinstrumente und Meßmethoden	246
1. Strommesser — Amperemeter	248
2. Spannungsmesser — Voltmeter	253
3. Wattmeter (Elektrodynamometer)	256
4. Leistungsmessung eines Dreiphasensystems	259
5. Universalgalvanometer	262
6. Widerstandsmessung	267
10. Kapitel. Das Leitungsnetz und Verteilungssysteme	268
1. Leitungen	268
2. Das Zweileitersystem	275
3. Mehrleitersysteme	280
4. Indirekte Gleichstromverteilungssysteme	285
5. Wechselstromverteilungssysteme	285
6. Sicherungen	297
7. Blitzschutzvorrichtungen	303
8. Isolationswiderstand, Isolationsprüfung	307
11. Kapitel. Elektrische Beleuchtung	314
1. Photometrie	314
2. Glühlampen	320
3. Die Kernlichtlampe	327
4. Die Osmiumlampe	331
5. Die Quecksilberdampf-Lampe von Hewitt	333
6. Das elektrische Bogenlicht	335
a) Der elektrische Lichtbogen	335
α) Der Gleichstromlichtbogen	335
β) Der Wechselstromlichtbogen	343
γ) Der Flammenbogen	345
b) Kohlenstäbe	347
c) Die Bogenlampen	349
d) Nebenapparate für Bogenlampen	362
e) Schaltungen	365
f) Indirekte Beleuchtung, zerstreutes Licht	367

	Seite
12. Kapitel. Elektromotoren	369
I. Gleichstrommotoren	369
1. Hauptstrommotoren	371
2. Nebenschlußmotoren	374
3. Compoundmotoren	380
II. Wechselstrommotoren	383
1. Synchronmotoren	383
2. Asynchrone Motoren (Induktionsmotoren)	385
3. Neuere Wechselstrommotoren und asynchrone Generatoren	398
13. Kapitel. Hilfsapparate	406
1. Ausschalter und Umschalter	406
2. Regulatoren	416
14. Kapitel. Elektrizitätszähler	424
15. Kapitel. Projektierung und Ausführung	438

Erstes Kapitel.

Grundbegriffe und Gesetze über den elektrischen Strom.

1. Arbeit, Leistung, Wärme und Arbeit.

Arbeit wird von uns oder einem Mechanismus geleistet, wenn ein Körper (eine Masse) unter Überwindung eines Widerstandes in Bewegung gesetzt oder ein schon vorhandener Bewegungszustand aufrechterhalten oder die Geschwindigkeit des Körpers vergrößert wird. Im ersten und letzten Falle wird der Widerstand gebildet durch das sogenannte Beharrungsvermögen oder die Trägheit der Materie sowie die Reibung, im zweiten Falle durch die Reibung allein. Hebt man einen Körper empor, so ist der Widerstand, d. h. die der Bewegung entgegenwirkende Kraft, die Anziehungskraft der Erde; diese wird durch das Gewicht des betreffenden Körpers gemessen.

Um einer Masse, z. B. 1 kg Eisen, eine bestimmte Geschwindigkeit, z. B. 2 m pro Sekunde, zu erteilen, muß von uns eine gewisse Arbeit verrichtet werden; umgekehrt hat eine Masse, die sich bewegt, die Fähigkeit, Arbeit für uns zu leisten. Nach einem bekannten Satze der Mechanik ist das Arbeitsvermögen oder die Energie eines in einen bestimmten Bewegungszustand versetzten Körpers gleich der Arbeit, die wir aufwenden müssen, um den betreffenden Bewegungszustand herbeizuführen. Als Beispiel wählen wir das Schwungrad einer Dampfmaschine, das wir uns vorläufig von der Kurbel getrennt und von Hand angetrieben denken wollen. Sehen wir zunächst von der Reibung in den Lagern sowie von der Reibung zwischen Rad und Luft ganz ab. Soll das Schwungrad mit einer gewissen Umdrehungsgeschwindigkeit rotieren, so muß von uns Arbeit geleistet werden; will man die Umdrehungsgeschwindigkeit vergrößern, so ist abermals Arbeit zu verrichten. Rotiert das Rad, so würde es unter der gemachten Annahme seine Geschwindigkeit dauernd beibehalten. Ist aber das Schwungrad mit einer anderen Maschine verbunden, etwa durch einen Riemen, so gibt es an diese Arbeit ab, und es verringert sich sein eigenes Arbeitsvermögen (seine lebendige Kraft), indem seine Geschwindigkeit abnimmt. Da in Wirklichkeit Reibung stattfindet, so ist 1. die von uns zu leistende Arbeit größer wie eben, 2. nimmt die

Umdrehungsgeschwindigkeit des Schwungrades auch dann ab, wenn es nicht mit einer anderen Maschine zwangsweise verbunden ist, 3. muß fortwährend Arbeit geleistet werden, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit konstant bleiben soll, 4. kann das Schwungrad selbst weniger Arbeit abgeben, da ein Teil seines Arbeitsvermögens für die Überwindung der Reibungswiderstände verbraucht wird.

In Wirklichkeit wird das Schwungrad nicht, wie eben angenommen wurde, von Hand gedreht, sondern es wird von der Maschine selbst angetrieben. Wir brauchen aber, wenn wir die Wirkungsweise des Schwungrades darlegen wollen, die vorhergehenden Betrachtungen nur in einer etwas anderen Form wiederzugeben: Vermöge seiner großen Masse und der großen Geschwindigkeit des rotierenden Radkranzes hat das Schwungrad eine große Arbeitsmenge in sich aufgespeichert; es besitzt eine große lebendige Kraft. Es nimmt überschüssige, vom Motor (Dampfmaschine u. dergl.) geleistete Arbeit in sich auf; hierbei wächst seine Geschwindigkeit. Überwiegt der Arbeitsverbrauch der Arbeitsmaschine, z. B. der Dynamomaschine, so gibt das Schwungrad Arbeit ab und seine Geschwindigkeit wird kleiner. Kurze Zeit dauernde Unregelmäßigkeiten im Gange der Maschine, die entweder durch Schwankungen in der Größe der abzugebenden Arbeit oder durch Schwankungen in der Dampffuhr verursacht werden, werden durch das Schwungrad ausgeglichen bzw. gemildert.

Ein Kilogramm meter oder ein Meterkilogramm ist die Arbeit, die geleistet wird, wenn eine 1 kg schwere Last 1 m hoch gehoben wird. Die Größe der verrichteten Arbeit ist die gleiche, mag man die Last auf dem kürzesten Wege, d. h. in vertikaler Richtung transportieren, oder auf irgend einem anderen Wege, etwa mittels einer schiefen Ebene heben; vorausgesetzt ist hierbei, daß weder im ersten noch im zweiten Falle Reibung stattfindet. Im zweiten Falle ist zwar der Weg ein längerer, dafür aber ist der zu überwindende Widerstand kleiner.

Um eine Masse von p kg bis zur Höhe h m emporzuheben, sind $p \cdot h$ kgm Arbeit zu leisten.

Die in der Zeiteinheit, nämlich in 1 Sekunde, von einer Maschine geleistete Arbeit nennt man die Leistung oder den Effekt der betr. Maschine. In der Technik mißt man die Arbeitsfähigkeit oder die Leistung der Kraftmaschinen, z. B. einer Dampfmaschine, in Pferdekraften oder Pferdestärken (PS oder auch wohl HP vom englischen horse power), und zwar versteht man unter einer Pferdekraft eine Leistung von 75 kgm (pro Sekunde). Mittels einer 1 pferdigen Maschine kann man also in jeder Sekunde eine Last von 75 kg 1 m hoch heben (abgesehen von der Reibung in dem Flaschenzug oder einer ähnlichen Vorrichtung). Wenn die Leistung einer Maschine eine Zeitlang die gleiche geblieben ist oder konstant war, so erhält man die während der betreffenden Zeit verrichtete ganze Arbeit, indem man die Leistung mit der Sekundenzahl multipliziert. Eine Arbeit von $3600 \cdot 75$ kgm nennt man eine Pferdekraftstunde¹⁾ (1 Stunde = 3600 Sekunden).

¹⁾ 1 Pferdekraft während einer Stunde.

Es ist bei der Beurteilung der Güte einer Maschine, bei der die treibende Kraft die Spannkraft heißer Gase oder Dämpfe ist, von Wichtigkeit, die Beziehung zwischen Wärme und Arbeit zu kennen. Durch Versuche (zuerst von Joule) ist nachgewiesen worden, daß eine große Wärmeeinheit (1 Cal.), d. h. diejenige Wärmemenge, die man 1 kg Wasser zuführen muß, wenn man seine Temperatur um 1° C. erhöhen will, gleichwertig oder äquivalent 426 kgm ist. Wenn also Wärme in Arbeit umgewandelt wird, so erhält man für jede umgewandelte Wärmeeinheit 426 kgm Arbeit und umgekehrt. Theoretisch ist also 1 PS-Stunde

äquivalent $\frac{3600 \cdot 75}{426} = 638$ Cal. Könnte man also eine gegebene Wärme-

menge voll und ganz in mechanische Arbeit umsetzen, so würden 638 Cal. genügen, eine vollbelastete 1 pferdige Maschine 1 Stunde lang in Bewegung zu setzen (von Reibungsverlusten ist wieder abgesehen). Wir bemerken jedoch, daß nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie eine vollkommene Umwandlung der Wärme in Arbeit nicht möglich ist, nicht wegen der Wärmeverluste durch Strahlung und Leitung, sondern wegen des Wesens der Wärme bezw. wegen der Eigentümlichkeit des Umwandlungsprozesses selbst.

Wenn 1 kg guter Steinkohle verbrennt, so werden zirka 7500 große Wärmeeinheiten frei; diese würden, wenn die ganze Verbrennungswärme in Arbeit umgewandelt werden könnte, für ungefähr 11½ Pferdekraftstunden genügen. In guten modernen Kesselanlagen gewinnt man pro 1 kg Kohle etwa 8 kg Dampf von 10 Atmosphären, und eine große Dampfmaschine verbraucht ungefähr 6 kg Dampf pro 1 PS-Stunde. Aus diesen Angaben kann man schließen, wie unvollkommen die Ausnutzung der Wärme in unseren Dampfmaschinenanlagen ist. Wir bemerken aber schon jetzt, daß eine wesentlich bessere Ausnutzung der Wärme des Dampfes, als sie in großen, modernen Dampfmaschinen erfolgt, kaum zu erhoffen ist.

2. Hilfsvorstellungen über die Elektrizität, elektrische Spannung, Potential.

Da sich auf die Frage, was die Elektrizität sei, eine einwandfreie Antwort, die allen elektrischen Erscheinungen Rechnung trägt, kaum geben läßt, so sind wir darauf angewiesen, uns eine Hilfsvorstellung¹⁾ zu bilden, die „gedankenökonomischen Wert“ besitzt, d. h. die derartig ist, daß wir uns mit ihrer Hilfe möglichst viele elektrische Erscheinungen plausibel machen können. Eine Hilfsvorstellung, die bei dem ersten Studium der elektrischen Erscheinungen sehr gute Dienste leistet, ist die, daß die Elektrizität ein außerordentlich feiner Stoff (Fluidum) sei, der in das Innere der Körper eindringen und sich in ihnen mit großer Geschwindigkeit vorwärts bewegen (fließen) kann. Diese Hilfsvorstellung,

¹⁾ Diejenigen, die eingehendere Studien über diesen Gegenstand machen wollen, seien verwiesen auf: Die Elektrophysik und die Theorie des Elektromagnetismus von C. Heineke u. H. Gert. Leipzig 1902.

die zwar eine Annahme ist, deren Wahrheit durch nichts bewiesen werden kann, aber auf jeden Fall einen praktischen Wert hat, ist aus dem Bedürfnisse des menschlichen Geistes entsprungen, Analogien zu bilden, und sie ist, wie sich aus unserer technischen Sprache ergibt, eine weit verbreitete; wir erinnern an die Ausdrücke „Strom“, „die Elektrizität strömt, fließt“, „Stromstärke“, „Elektrizitätsmenge“. Damit man erkennt, daß überhaupt die Möglichkeit für das elektrische Fluidum vorhanden ist, in so dichte Körper, wie wir sie in den Metallen vor uns haben, einzudringen und durch ihr Inneres zu strömen, sei darauf aufmerksam gemacht, daß die Materie oder der Stoff, aus dem ein Körper besteht, nach der Auffassung der Naturforscher aus sehr kleinen Teilchen (Molekülen) besteht, die durch verhältnismäßig große Zwischenräume voneinander getrennt sind.

Wie die verschiedenen Substanzen dem Lichte gegenüber ein verschiedenes Verhalten zeigen, indem einige das Licht gut durchlassen, die anderen aber dem Durchgange des Lichtes gleichsam einen großen Widerstand entgegensetzen, so auch der Elektrizität gegenüber (gute und schlechte Leiter).

Man spricht bekanntlich von positiver und negativer Elektrizität. Ist diese Ausdrucksweise aus der Annahme entsprungen, es gäbe zwei ihrem Wesen nach verschiedene Elektrizitätsarten, ist also der Unterschied zwischen positiver und negativer Elektrizität ein qualitativer oder können wir die Unterscheidung auch rechtfertigen, wenn wir die unitarische Hypothese, nach der es nur ein elektrisches Fluidum gibt, als die richtige anerkennen? Im letzteren Falle kann man den Unterschied zwischen positiver und negativer Elektrizität in ähnlicher Weise erklären wie den Unterschied zwischen Wärme und Kälte. Letzterer ist bekanntlich kein prinzipieller, sondern nur ein konventioneller, indem man nämlich übereingekommen ist, einen Körper, dessen Temperatur über dem Gefrierpunkte des Wassers liegt, als „warm“, und einen Körper, dessen Temperatur 0° und weniger als 0° beträgt, als „kalt“ zu bezeichnen. Ghe wir uns weiter mit der aufgeworfenen Frage beschäftigen, wollen wir einen neuen Begriff einführen und erklären. Wenn wir einem die Elektrizität leitenden und gut isolierten Körper, etwa einer Metallkugel, die an einem Seidenfaden aufgehängt ist, Elektrizität — sagen wir einstweilen „positive“ — zuführen, so breitet sich die Elektrizität, wie man experimentell und mathematisch nachweisen kann, nur auf der Oberfläche der Kugel aus. Wegen der Abstoßung, die die einzelnen Elektrizitätsteilchen aufeinander ausüben, hat jedes derselben das Bestreben, den Körper, auf dem es sich befindet, zu verlassen. Diese der Expansion der Gase vergleichbare Tendenz der Elektrizität wird vielfach als elektrische „Spannung“ bezeichnet¹⁾. Je mehr Elektrizität man auf die isolierte Kugel schafft, um so größer wird die elektrische Spannung. Nach der unitarischen Ansicht hat nun jeder nicht elektrifizierte oder unelektrifizierte Körper (im gewöhnlichen Sinne) eine gewisse elektrische Spannung, und zwar

¹⁾ Wir wollen einstweilen der Kürze wegen den Begriff Spannung in dem ange deuteten Sinne gebrauchen.

dieselbe, wie sie die Erde besitzt — man sagt, seine Spannung sei gleich Null. Entzieht man einem solchen Körper Elektrizität, so hat er eine negative Spannung (ist negativ elektrisch); führt man ihm Elektrizität zu, so ist seine Spannung höher als die der Erde — positive Spannung, positiv elektrischer Körper. Wir sehen jetzt ein, daß nach der unitarischen Hypothese der Unterschied zwischen $+$ und $-$ Elektrizität ein analoger ist wie zwischen Wärme und Kälte.

Die neueren Ansichten über elektrochemische Vorgänge basieren auf der Annahme, daß es zwei verschiedene Elektrizitätsarten gäbe, weil eben die elektrochemischen Prozesse einen ausgeprägt dualistischen Charakter aufweisen. Besitzt ein Körper eine gerade so große Menge negativer (freier) Elektrizität wie positiver, so ist er unelektrisch oder hat die Spannung Null. Der Vorgang der Elektrifizierung besteht darin, daß man ein gewisses Quantum der einen Elektrizitätsart dem Körper entzieht oder ihm eine der beiden Elektrizitätsarten zuführt.

Angenommen, es seien zwei isolierte Kugeln K_1 und K_2 mit Elektrizität geladen, und zwar so, daß auf K_1 eine höhere Spannung herrscht als auf K_2 . Werden die beiden Kugeln durch einen Draht miteinander verbunden, so fließt Elektrizität von K_1 nach K_2 , und zwar so lange, bis sich der „Spannungsunterschied“ ausgeglichen hat. Wenn nun auch in den meisten Fällen ein elektrischer Strom entsteht, falls zwei Körper, deren elektrische Spannungen ungleich sind, leitend miteinander verbunden werden, so ist dies jedoch keineswegs immer der Fall. Führt man z. B. dem Konduktor einer Elektrifiziermaschine, also einem zylindrischen, an den Enden abgerundeten Körper, Elektrizität zu, so verteilt sich die Elektrizität nicht gleichmäßig auf der Oberfläche, d. h. die Dichte der Elektrizität an den verschiedenen Stellen des Konduktors ist verschieden groß; an den Enden ist die Dichte am größten und in der Mitte am kleinsten. Daher ist das Bestreben der Elektrizität, den Konduktor zu verlassen, an den Enden am größten, oder es herrschen an den verschiedenen Stellen der Oberfläche verschiedene „Spannungszustände“. Es seien nun zwei räumlich getrennte Konduktoren von gleichen Dimensionen mit derselben Elektrizitätsmenge geladen. Verbindet man ein Ende des ersten Konduktors mit der Mitte des zweiten Konduktors durch einen Draht, so sind zwei Punkte, zwischen denen eine „Spannungsdifferenz“ besteht, miteinander verbunden, aber es erfolgt keine Bewegung der Elektrizität. Es fragt sich also, welcher allgemein gültige Satz über das Fließen der Elektrizität gilt. Der Ableitung dieses Satzes seien die folgenden Betrachtungen gewidmet.

Zwei Kugeln, deren Durchmesser so klein sein mögen, daß wir die Kugeln als Punkte ansehen können, mögen einen Abstand von 1 cm haben. Auf beiden Kugeln befinde sich dieselbe Menge positiver Elektrizität. Die Kugeln, bezw. die Elektrizitäten auf den Kugeln, stoßen sich mit einer gewissen Kraft ab. Die beiden Elektrizitätsmengen mögen so groß gewählt sein, daß die gegenseitige Abstoßung gleich der physikalischen Kräfteinheit sei, die man 1 Dyne

nennt¹⁾. Die unter den gemachten Annahmen auf jeder der beiden Kugeln befindliche Elektrizitätsmenge nennt man die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge.

Wir nehmen jetzt an, daß ein beliebig gestalteter Körper K mit positiver Elektrizität geladen sei und daß sich in sehr großer Entfernung von K eine sehr kleine Kugel befinde, die mit einer Einheit positiver Elektrizität geladen sei. Wollen wir die Elektrizitätsmenge Eins dem Körper K nähern, so müssen wir Arbeit leisten; denn es erfolgt ja während der Annäherung Bewegung unter Überwindung eines Widerstandes, nämlich der Abstoßung zwischen der Elektrizität auf K und derjenigen auf der kleinen Kugel. Die Arbeit, die wir im ganzen leisten müssen, um die Elektrizitätsmenge Eins auf den Körper K zu schaffen, nennt man das Potential des Körpers K (genauer das Potential der von der Elektrizität auf K ausgeübten Kräfte). Der Begriff Potential bezeichnet streng genommen eine Arbeit, man gebraucht ihn aber auch in dem Sinne, als ob durch ihn ein Zustand bezeichnet würde. Man kann ihn dann mit dem Zustande vergleichen, den man in der Wärmelehre die Temperatur nennt.

Wenn wir die Einheit der Elektrizität aus sehr großer Entfernung nicht ganz bis an den Körper K transportieren, sondern vorher, etwa in einem Punkte A in der Umgebung von K , Halt machen, so haben wir eine gewisse Arbeit geleistet. Diese Arbeit wird das Potential der auf K befindlichen Elektrizität in bezug auf A oder im Punkte A genannt. In der Umgebung des Körpers K gibt es offenbar unzählig viele Punkte, denen dasselbe Potential zukommt. Die Gesamtheit dieser Punkte bildet eine den Körper K umhüllende Fläche, eine sogenannte Niveaufläche. Auf einer Niveaufläche kann man die Elektrizität, etwa die auf einer sehr kleinen Kugel befindliche, verschieben, ohne daß man Arbeit zu leisten braucht. Die Oberfläche des Körpers K ist ebenfalls eine Niveaufläche.

Die Elektrizitätsmenge Eins möge sich in unmittelbarster Nähe des geladenen Körpers K befinden und die kleine Kugel von der Erde nicht angezogen werden, sie möge also frei in der Luft schweben. Unsere Kugel entfernt sich dann von K , bis sie sich außerhalb des Bereiches der von K ausgeübten Kräfte befindet. Bei dieser Bewegung kann unsere Kugel bezw. die auf ihr befindliche Elektrizität Arbeit leisten; sie könnte z. B. ein kleines Gewicht heben, das an einem über eine Rolle gelegten Faden hängt; das andere Ende des Fadens müßte natürlich an der Kugel selbst befestigt sein. Das Gewicht müßte mit zunehmender Entfernung, der abnehmenden Abstoßung entsprechend, verkleinert werden. Die Arbeit, die die Elektrizitätsmenge Eins jetzt für uns leistet, ist gerade so groß wie die Arbeit, die wir aufwenden mußten, als wir

¹⁾ Die physikalischen Maßeinheiten sind aus den drei Grundeinheiten: Zentimeter (C), Gramm (G), Sekunde (S) abgeleitet. Man nennt das betreffende System das C-G-S-System oder absolute Maßsystem. 1 Dyne ist gleich der Kraft, mit der 1,02 Milligramm von der Erde angezogen wird.

die kleine Kugel aus sehr großer Entfernung auf den Körper K transportierten (Potential). Während ihrer Bewegung schneidet die Kugel die Niveauflächen senkrecht. Die Elektrizität bewegt sich also von selbst, wenn die Möglichkeit vorhanden ist, von Punkten höheren Potentials zu solchen niedrigeren Potentials. Ist das Potential einer Niveaufläche V_1 und das Potential einer zweiten Niveaufläche V_2 , so leistet die Elektrizitätsmenge Q in s , wenn sie den Weg von der ersten Niveaufläche bis zur zweiten zurücklegt, die Arbeit $V_1 - V_2$.¹⁾ Gehen n Einheiten der Elektrizität von dem Potential V_1 zum Potential V_2 über, so leisten sie im ganzen eine Arbeit von $(V_1 - V_2) \cdot n$ Arbeitseinheiten.

Von der Erde und von allen Körpern, die man im gewöhnlichen Leben als unelektrische bezeichnet, sagt man, sie besäßen das Potential Null. Wird ein elektrifizierter Leiter mit der Erde durch einen Draht verbunden, so hat er nach sehr kurzer Zeit das Potential Null. Werden nämlich allgemein zwei Leiter, die verschiedene Potentiale haben, leitend miteinander verbunden, so bewegt sich die Elektrizität so lange, bis sich die Potentialdifferenz ausgeglichen hat, bis also beide Körper dasselbe Potential haben. Das Potential der Erde ändert sich aber nicht, wenn man ihr eine verhältnismäßig kleine Elektrizitätsmenge zuführt oder wenn sie eine relativ sehr kleine Elektrizitätsmenge abgibt. Wenn das Potential eines Körpers kleiner ist als dasjenige der Erde, so sagt man, der Körper habe ein negatives Potential.

Als Einheit des Potentials dient 1 Volt; wie groß ein Volt ist, werden wir später sehen. Apparate, mittels deren man Potentiale in Volt messen kann, nennt man Elektrometer. Auf die Einrichtung dieser Apparate brauchen wir nicht einzugehen; denn wir beschäftigen uns im folgenden fast nur mit den Eigenschaften und den Wirkungen des elektrischen Stromes. Für uns kommen also Potentialdifferenzen in Betracht, und diese werden, wie wir sehen werden, mit Hilfe des Voltmeters gemessen. Statt des etwas schwerfälligen Ausdruckes Potentialdifferenz gebraucht man in der Elektrizitätslehre, und besonders in der Technik, meistens das Wort Spannung. Wir bemerken jedoch, daß viele Autoren das Wort „Spannung“ als gleichbedeutend mit „Potential“ benutzen und dementsprechend statt „Potentialdifferenz“ auch „Spannungsdifferenz“ sagen.

Die beste Methode, die elektrischen Grundbegriffe und Erscheinungen zu erklären, ohne ein größeres Maß von physikalischen Kenntnissen beim Leser voraussetzen zu müssen, ist der Gebrauch der Analogie. Dieses Mittel wollen wir jetzt in Anwendung bringen.

Es seien R_1 und R_2 (vergl. Fig. 1) zwei Behälter, die durch eine Rohrleitung miteinander verbunden sind. Befindet sich in beiden Behältern Wasser, so fließt dasselbe aus R_1 nach R_2 , da das Wasser das Bestreben hat, die

¹⁾ Zu ergänzen ist hier „C-G-S-Einheiten der Arbeit“. Die betreffende Einheit heißt 1 Erg. Ein Erg ist gleich der Arbeit, die man leistet, wenn man 1,02 Milligramm 1 cm hoch hebt.

vorhandene Niveaudifferenz auszugleichen. Wenn nun durch eine Pumpe P gerade so viel Wasser gehoben wird, wie aus R_1 abfließt, so erhalten wir, solange die Pumpe arbeitet, einen Wasserstrom. Der beschriebene Mechanismus

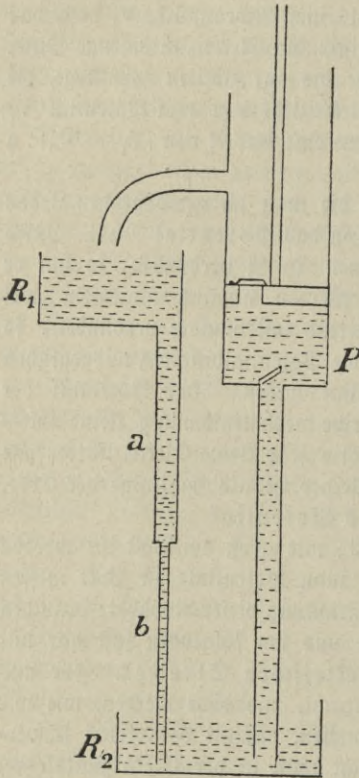


Fig. 1.

kann mit einer Dynamomaschine verglichen werden: Den beiden Behältern entsprechen die beiden Pole (Klemmen) der Dynamo, den verschiedenen Niveaus die verschiedenen Potentiale der Pole; der Rohrleitung a und b entspricht ein die beiden Pole verbindender Draht (Schließungsdraht) oder der äußere Stromkreis. Die Tätigkeit der Pumpe, durch welche die Niveaudifferenz stets wiederhergestellt wird, läßt sich vergleichen mit der Tätigkeit der elektromotorischen Kraft, die den Potentialunterschied der beiden Pole hervorruft und aufrecht erhält, die mechanische Arbeit endlich, die zum Betriebe der Pumpe aufzuwenden ist, mit der mechanischen Arbeit, die für den Antrieb einer Dynamomaschine geleistet werden muß.

Wie ein Wasserstrom nicht zustande kommen kann, wenn nicht eine Niveaudifferenz vorhanden ist, so kann ein elektrischer Strom nicht entstehen, wenn nicht zwischen zwei Körpern eine Spannung (Potentialdifferenz) besteht und aufrechterhalten wird.

Die elektromotorische Kraft einer Dynamo ist die Ursache, die bewirkt, daß zwischen den beiden Polen (Klemmen) der Maschine eine Potentialdifferenz hervorgerufen wird. Statt der elektromotorischen

Kraft (Ursache) mißt man die durch sie hervorgerufene Spannung, die sogen. Klemmspannung (Wirkung). Aus Gründen, die wir später kennen lernen (s. S. 22), ist aber die Klemmspannung nur dann ein Maß für die elektromotorische Kraft, wenn die Dynamo keinen Strom abgibt.

3. Stromstärke und Maßeinheit der Stromstärke — Ampere.

Fließt in jeder Sekunde 1 l Wasser aus der Röhre b (Fig. 1), so muß in jeder Sekunde 1 l Wasser durch jeden Querschnitt der Röhre a , aber auch durch jeden Querschnitt der engeren Röhre b strömen. Verallgemeinert: in einer einfachen (d. h. nicht verzweigten) Wasserleitung fließt in derselben Zeit durch jeden Querschnitt der Leitung dieselbe Menge Wasser. Dieser Satz läßt sich ohne weiteres auf die Elektrizität übertragen: bei einer unverzweigten

(einfachen) Leitung fließt durch jeden Querschnitt der Leitung in ein und derselben Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge, auch wenn Drähte von verschiedenem Querschnitt nacheinander vom Strome durchflossen werden¹⁾.

Diejenige Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt der Leitung fließt, nennt man die Stromstärke. Da das elektrische Fluidum selbst einer direkten Messung nicht zugänglich ist, so sind wir darauf angewiesen, eine durch fließende Elektrizität hervorgerufene sichtbare Wirkung, am einfachsten eine der Elektrizitätsmenge proportionale, für die Messung zu verwenden. Will man auf das absolute Maßsystem nicht näher eingehen, so kommt man am schnellsten zum Ziele, wenn man die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes zu Hilfe nimmt. Schickt man beispielsweise durch eine Lösung von salpetersaurem Silber (AgNO_3) einen elektrischen Strom, so schlägt sich auf der einen Elektrode²⁾ Silber nieder. Die abgeschiedene Silbermenge ist proportional der durch die Lösung geflossenen Elektrizitätsmenge. Werden durch einen Strom von konstanter Stromstärke in 1 Minute 67,2 Milligramm Silber in Freiheit gesetzt, so sagt man, der Strom sei 1 Ampere stark. In den gesetzlichen Bestimmungen über die elektrischen Maßeinheiten vom 6. Mai 1901 sind die näheren Bedingungen angegeben, unter denen die Abscheidung des Silbers stattzufinden hat³⁾.

Eine direkte Messung der Stromstärke in Ampere wird in technischen Anlagen immer mit Hilfe des Amperemeters ausgeführt, dessen Einrichtung in dem Abschnitte „Meßinstrumente“ behandelt wird.

4. Leitungswiderstand — Ohm, Rheostate.

Nach den von uns gemachten Annahmen besteht ein elektrischer Strom darin, daß sich das elektrische Fluidum im Innern eines Leiters bewegt. Hierbei findet, so schließen wir weiter, zwischen den Elektrizitätsteilchen und den Molekülen des Leiters Reibung statt, ähnlich wie sich Wasser, das durch eine mit vielen kleinen Kieselsteinen gefüllte Röhre fließt, an den Kieselsteinen reibt. Es setzt daher jeder Leiter der Bewegung der Elektrizität einen gewissen Widerstand entgegen. Wenn unsere Erklärung des elektrischen Leitungswiderstandes (als Reibungswiderstand) eine den Erfahrungstatsachen Rechnung tragende ist, so muß sich jeder Leiter, durch den ein elektrischer Strom fließt, erwärmen. Daß dieses der Fall ist, kann man leicht experimentell nachweisen; wir begnügen uns aber hier mit einem Hinweise auf die elektrische Glühlampe.

Je größer der Widerstand eines Leiters ist, um so geringer ist seine Fähigkeit oder sein Vermögen, die Elektrizität zu leiten — Leitungsvermögen,

¹⁾ Beim Telegraphieren auf langen Kabeln hat dieser Satz keine Gültigkeit. Wir betrachten aber natürlich einstweilen nur die einfachsten Verhältnisse.

²⁾ Elektroden nennt man die beiden Leiter (Metallplatten, Kohlenstifte etc.), die man in die Lösung eintaucht.

³⁾ Siehe Elektrotechn. Zeitschrift (G.-T. Z.) 1901, S. 435 u. 531. Elektrotechn. Anzeiger (Gl. A.) 1901, Nr. 39, S. 1336.

Leitungsfähigkeit. Leitungswiderstand und Leitungsvermögen verhalten sich daher wie a zu $\frac{1}{a}$.

Die Erfahrung lehrt uns, daß die Größe des Widerstandes, den ein gegebener Leiter dem Strömen der Elektrizität durch sein Inneres entgegensetzt, abhängig ist

1. von dem Materiale, aus dem der Leiter angefertigt ist,
2. von der Länge,
3. von dem Querschnitte des Leiters.

Dagegen spielt die Gestalt des Querschnittes keine Rolle.

Durch Verunreinigungen wird das Leitungsvermögen stark und zwar ungünstig beeinflusst.

Als Maßeinheit für den Leitungswiderstand dient 1 Ohm. Man versteht darunter den Widerstand, den der elektrische Strom in einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei der Temperatur 0°

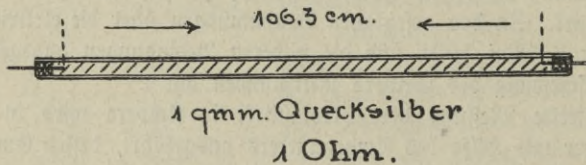


Fig. 2.

findet. Eine solche Säule erhält man, wenn man eine Glasröhre von den vorgeschriebenen Dimensionen mit chemisch reinem Quecksilber füllt (s. Fig. 2).

Ersetzt man die Quecksilbersäule von 1 Ohm Widerstand durch Kupferdraht von 1 qmm Querschnitt, so findet man, daß man ungefähr 60 m dieses Drahtes einschalten muß, ehe der Strom denselben Widerstand wie eben findet. Daher ist der Widerstand in einem Kupferdrahte von 1 m Länge und

1 qmm Querschnitt ungefähr gleich $\frac{1}{60}$ Ohm (Ω). Die Zahl $\frac{1}{60} = 0,0167$

nennt man den spezifischen Widerstand des Kupfers. Allgemein versteht man unter dem spezifischen Widerstande eines Stoffes (ρ)¹⁾ den in Ohm ausgedrückten Widerstand, den der elektrische Strom in einem Drahte (einer Säule) von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt aus dem betreffenden

Stoffe findet. $\frac{1}{\rho}$ nennt man die spezifische Leitungsfähigkeit oder das spezifische Leitungsvermögen. Beispiel: Das spezifische Leitungsvermögen des chemisch reinen Kupfers ist gleich 60. Der elektrische Strom findet in 60 m Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt einen Widerstand von 1 Ohm.

¹⁾ Wir bedienen uns hier und im folgenden der vom Elektrotechn. Verein Berlin vorgeschlagenen Bezeichnungen.

Daß der Widerstand eines Drahtes von gegebenem Querschnitte proportional der Länge des Drahtes ist, sieht man ohne weiteres ein. Es ist dies eben eine Folge des Umstandes, daß die strömende Elektrizität in jedem noch so kleinen Stücke eines Leiters Widerstand findet und daß der Widerstand im ganzen Drahte als Summe der Teilwiderstände anzusehen ist.

Umständlicher ist es, durch logische Schlüsse die Beziehung zwischen Widerstand und Querschnitt eines Leiters abzuleiten. Wir wollen uns daher auf den praktischen Standpunkt des Experimentators stellen.

Versuche lehren uns, daß der Leitungswiderstand in einem Leiter in demselben Verhältnisse abnimmt, in dem der Querschnitt wächst, oder mathematisch ausgedrückt: der Widerstand eines Leiters ist umgekehrt proportional seinem Querschnitte.

Wenn eine Leitung eine Länge von L Metern hat und der Querschnitt q qmm beträgt, so ist der Widerstand W

$$W = \frac{L \cdot \rho}{q}$$

Die Werte von ρ für einige oft in der Elektrotechnik benutzte Leiter sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle I.

	ρ	Temperatur- koeffizient
Aluminium	0,03	0,004
Blei	0,21	0,004
Eisendraht	0,13	0,0048
Kruppin	0,85	0,0007
Kupfer, rein	0,0164	0,00445
„ , käuflich	0,0174	0,004
Manganin	0,47	0
Nickelin	0,45 - 0,56	0,0003
Neufilber	0,88	0,00036

Nach den Sicherheitsvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker ist Kupfer, dessen spezifischer Widerstand größer als $0,0175 = \frac{1}{57}$ ist, als Leitungskupfer nicht annehmbar.

Welche Bedeutung die in der dritten Spalte stehenden Zahlen haben, werden wir später sehen.

In unserer obigen Formel kommen vier Größen vor; kennt man von diesen drei, so kann man die vierte berechnen. Sind z. B. L , W und ρ bekannt, so kann man q finden. Beispiel: Zwei Orte, deren Entfernung 400 m beträgt, sollen durch eine Kupferleitung miteinander verbunden werden; der Widerstand in der Leitung soll 3 Ohm betragen. Welchen Querschnitt muß man wählen?

Setzen wir

$$q = \frac{1}{60},$$

so ist

$$3 = \frac{800 \cdot 1}{60 \cdot q}.$$

Es folgt

$$q = 4,4 \text{ qmm (mm}^2\text{)}.$$

In der Praxis mißt man nicht den Querschnitt eines Drahtes, sondern seinen Durchmesser. Hierbei bedient man sich eines einfachen Apparates, des sogenannten Kalibermaßstabes¹⁾. Beträgt der Durchmesser des Drahtes d mm, so ist

$$q = \frac{d^2}{4} \cdot 3,14 \text{ mm}^2.$$

Mit Hilfe einer Waage und eines Metermaßes kann man den Querschnitt eines Drahtes bestimmen, wenn man das spezifische Gewicht des betreffenden Metalles kennt. Angenommen, ein a Meter langes Stück des Drahtes habe das Gewicht p Gramm und das spez. Gew. sei gleich s , dann ist

$$\text{Volumen} \times s = p,$$

$$\text{Volumen} = \frac{p}{s} \text{ ccm (cm}^3\text{)}.$$

Dividiert man $\frac{p}{s}$ durch 100 a , so erhält man den Querschnitt in Quadratcentimetern. Will man ihn in Quadratmillimetern ausdrücken, so muß man das Resultat noch durch 100 dividieren. Drückt man das Gewicht in Milligramm, die Länge in Millimetern aus, so findet man den Querschnitt sofort in Quadratmillimetern. Für Kupfer genügt es, s gleich 8,9 zu setzen.

Die Leiter erster Klasse, d. h. diejenigen Leiter, welche die Elektrizität leiten, ohne daß sie chemisch verändert werden (Metalle, Kohle etc.), haben bei verschiedenen Temperaturen einen verschiedenen spezifischen Widerstand, und zwar steigt der Widerstand — Kohle ausgenommen — mit der Temperatur. Man überzeugt sich hiervon leicht, wenn man eine Spirale aus dünnem Eisendrahte, durch die ein elektrischer Strom fließt, mittels einer Bunsenschen Flamme erhitzt. Ein in den Stromkreis eingeschaltetes Amperemeter zeigt uns die Zunahme des Widerstandes an. Die Widerstandsvergrößerung bei Erhöhung der Temperatur kann proportional der Temperaturzunahme gesetzt werden. Finden wir beispielsweise, daß eine Eisenspirale bei 15° den Widerstand 50Ω und bei 16° den Widerstand $50,24 \Omega$ besitzt, so ist ihr Widerstand bei 115° gleich $50 + 100 \cdot 0,24 = 74 \Omega$. Dieses Beispiel zeigt uns, daß die Widerstandszunahme infolge Erhöhung der Temperatur eine Erscheinung ist, mit der man in der Praxis wohl zu rechnen hat.

Bezeichnen wir den Widerstand eines Leiters bei 15° mit W_{15} und bei t° mit W_t , so ist

$$W_t = W_{15} [1 + (t - 15) \cdot \alpha].$$

¹⁾ Aus verschiedenen Messungen hat man den Mittelwert zu nehmen.

Die Werte für α , welche Größe man den Temperaturkoeffizienten nennt, sind in der Tabelle I angegeben. Die dort angeführten Metalllegierungen (Manganin, Kruppin, Nickelin, Neusilber) haben einen sehr kleinen Temperaturkoeffizienten; sie ändern also bei der Erwärmung bezw. Abkühlung ihren Widerstand nur in geringem Maße, weshalb man sie mit Vorliebe für solche Widerstände benutzt, deren Größe möglichst unabhängig von der Temperatur sein soll.

Als Faustregel kann man sich für Kupfer merken, daß sein Widerstand bei 100° Erwärmung um rund 40% des ursprünglichen Widerstandes wächst.

Die Leiter zweiter Klasse (Elektrolyte: verdünnte Säuren, Salzlösungen, Glas etc.) und Kohle zeigen das umgekehrte Verhalten wie die Metalle, indem ihr Widerstand bei der Erwärmung abnimmt — sie haben einen negativen Temperaturkoeffizienten.

Wie wir später sehen werden, hängt bei gegebener elektromotorischer Kraft die Stromstärke von dem Widerstande ab, den die Elektrizität auf ihrem ganzen Wege zu überwinden hat. Schaltet man daher in einen Stromkreis einen veränderlichen Widerstand ein, so kann man innerhalb bestimmter Grenzen den Strom regulieren. Man nennt derartige Widerstände Rheostate.

Rheostate. In elektrotechnischen Anlagen finden veränderliche Widerstände als Regulier- oder Vorschaltwiderstände ausgedehnte Verwendung, und zwar hauptsächlich als Metall- und Flüssigkeitswiderstände.

a) Metallwiderstände stellt man entweder aus Drähten her oder aus Streifen bezw. Bändern von rechteckigem Querschnitte. Da ein Band bei gleichem Querschnitte und gleicher Länge eine größere Oberfläche hat wie ein Draht, so ist die Wärmeausstrahlung bei einem bandförmigen Leiter eine größere als bei einem zylindrischen; ersterer kann daher, wie wir in dem Abschnitt über Joulesche Wärme nachweisen werden, eine stärkere Belastung (größere Stromstärke) vertragen. Als Material benutzt man solche Metalllegierungen¹⁾, die einen großen spezifischen Widerstand und, wenigstens in vielen Fällen, einen kleinen Temperaturkoeffizienten haben.

Von den verschiedenen Formen, die man Widerständen aus Metall gibt, seien hier nur folgende erwähnt bezw. kurz beschrieben:

1. Widerstände mit drehbarem Gleitkontakt, Kurbelwiderstände.

Die Zuleitungsdrähte werden an die beiden in der Fig. 3 sichtbaren Klemmen angeschlossen; die rechte Klemme steht mit der Drehungsachse der Kurbel in metallischer Verbindung. Bei der in der

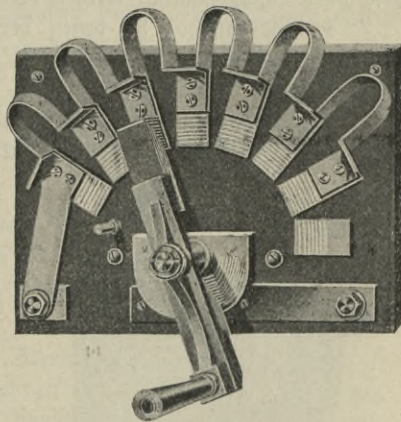


Fig. 3.

¹⁾ Der Widerstand einer Metalllegierung ist größer, als man unter Berücksichtigung des Mischungsverhältnisses durch Rechnung findet.

Figur gezeichneten Kurbelstellung fließt der Strom nur durch die beiden ersten Metallbügel. Selbstverständlich müssen die einzelnen Teile auf einer isolierenden Unterlage (z. B. einer Schiefer- oder Marmorplatte) montiert oder sorgfältig gegen den Rahmen isoliert sein. Statt der Metallbänder verwendet man häufig Spiralen.

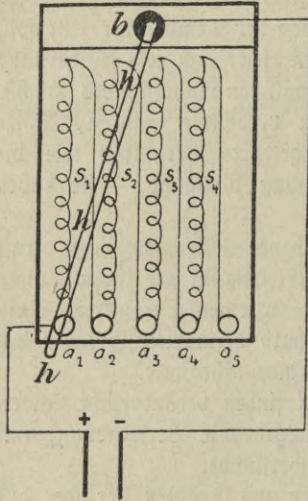


Fig. 4.

Eine der gebräuchlichsten Formen ist in Fig. 4 schematisch dargestellt. h ist eine um b drehbare Kurbel, s_1 zc. sind die Widerstandspiralen, etwa aus Neusilber. Bei der in der Figur gezeichneten Lage sind alle Spiralen ausgeschaltet, der Widerstand ist kurz geschlossen. Dreht man die Kurbel um einen Kontakt, berührt sie also a_2 , so fließt der Strom nur durch s_1 . Für die einzelnen Spiralen wählt man verschiedene Querschnitte, und zwar erhält diejenige Spirale, die bei einer Drehung der Kurbel zuerst ausgeschaltet wird, den kleinsten und diejenige, die zuletzt ausgeschaltet wird, den größten Querschnitt, weil der Strom um so stärker wird, eine je geringere Anzahl von Spiralen er durchfließt.

2. Widerstände mit verschiebbarem Gleitkontakt (siehe Vogenlampen).

3. Widerstände, bei denen mittels Metallstößel einzelne Spiralen kurz geschlossen (ausgeschaltet) werden (Stößelwiderstände).

4. Widerstände, bei denen der Draht oder das Metallband auf einer isolierenden Masse ruht oder in diese eingebettet ist, um schnellere Abkühlung zu erzielen.

Metallwiderstände für starke Ströme versteht man vielfach mit Ölkühlung. Bei Widerständen, die in Anlagen mit höherer Spannung Anwendung

finden, werden die Metallkontakte durch Funken, die sich beim Ein- und Ausschalten bilden, schnell zerstört. Man stellt daher oft die Kontakte aus Kohle her und richtet es so ein, daß sie leicht ausgewechselt werden können.

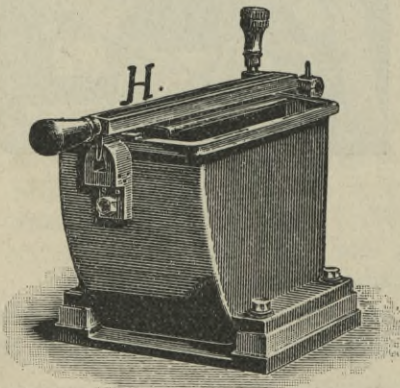


Fig. 5.

b) Flüssigkeitswiderstände. Ein solcher ist in Fig. 5 abgebildet. Man füllt die beiden aus Eisen angefertigten Kästen, die gegen die hintere Anschlußklemme isoliert sind, mit Soda-lösung. Dreht man den die beiden Eisenplatten (Elektroden) tragenden Hebel H abwärts, so wird der Strom

geschlossen, sobald die Elektroden in die Lösung eintauchen. Der Widerstand wird um so kleiner, ein je größeres Stück der beweglichen Elektroden sich in der Lösung befindet, schließlich wird der Widerstand durch den Metallhebel kurz geschlossen, d. h. es fließt nur ein ganz minimaler Strom durch den Apparat.

Man kann sich einen ähnlichen Widerstand, der im Notfalle gute Dienste leistet, z. B. bei der Prüfung einer elektrischen Anlage, leicht selbst herstellen, indem man an zwei Platten aus Eisenblech Kupferdrähte befestigt und diese in ein mit Sodablösung gefülltes Holzfaß eintaucht. Durch Heben und Senken der Elektroden, durch Zugabe von Wasser oder Soda kann man den Widerstand regulieren.

Weitere Bemerkungen über Regulierwiderstände sollen in einem späteren Abschnitte Platz finden.

Wenn sich zwei Leiter berühren, so findet der Strom an der Berührungsstelle einen um so größeren Widerstand, je weniger innig die Berührung, je kleiner die Berührungsfläche ist und je mehr die Oberflächen der betreffenden Stoffe verunreinigt sind (durch Schmutz oder chemisch durch die Luft). Man nennt den Widerstand, den der Strom an der Berührungsfläche selbst findet, Übergangswiderstand.

Über den Widerstand des menschlichen Körpers sind öfters Messungen veranstaltet worden¹⁾. Die Erfahrung spricht dafür, daß wir gegen Wechselströme empfindlicher sind als gegen Gleichstrom. Auf keinen Fall kann man für eine bestimmte Stromart einen bestimmten Wert für den wirklichen oder scheinbaren Widerstand angeben. Denn zunächst ergeben die Messungen, daß der Widerstand bei verschiedenen Personen unter den gleichen Bedingungen verschieden groß ist. Ferner spielen die Lage der Ein- und Austrittsstelle des Stromes, die Größe der Berührungsfläche, deren augenblicklicher Zustand (nasse oder trockene Finger zc.) und in manchen Fällen die Isolation gegen Erde eine große Rolle. Berührt man nur eine Leitung, so erhält man nur dann einen „Schlag“, wenn der Strom durch den Körper in die Erde fließen kann.

Nach Dr. Rath (G. = T. 3. 1899, S. 602) sollen Ströme von etwa 0,1 Amp. wirklich gefährlich sein, in dem Sinne, daß sie Lähmung der Lunge und schließlich des Herzens verursachen.

5. Das Ohm'sche Gesetz, Maßeinheit der elektromotorischen Kraft — Volt.

Wird an eine Stromquelle eine Zugleitung angeschlossen, so hängt die Stärke des durch die Zugleitung fließenden Stromes ab

1. von der elektromotorischen Kraft der Stromquelle,
2. von dem Widerstande, den die fließende Elektrizität in dem Stromkreise findet, und zwar ist nach dem von dem Physiker Ohm aufgestellten Gesetze:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektrom. Kraft}}{\text{Widerstand}} \text{ oder}$$

$$J = \frac{E}{W} \dots \dots \dots (1)$$

¹⁾ Siehe G. = T. 3. 1899, S. 601.

Die Stromstärke ist also proportional der elektromotorischen Kraft und umgekehrt proportional dem Leitungswiderstande.

Das Ohmsche Gesetz findet ungezählte Anwendungen, und man darf wohl sagen, daß es das Fundament der ganzen Elektrotechnik bildet.

Da in einem geschlossenen Stromkreise die Elektrizität nicht nur durch die Außenleitung fließt, sondern auch durch das Innere der Stromquelle (Ankerwicklung, Platten und Säure des Akkumulators), so hat sie auch in der Stromquelle selbst Widerstand zu überwinden (in der durch Fig. 1 angedeuteten Vorrichtung findet das Wasser auch in der Pumpe selbst Widerstand). Bezeichnen wir den Widerstand in der Außenleitung mit w_a — äußerer Widerstand — und denjenigen in der Stromquelle mit w_i — innerer Widerstand —, so ist

$$W = w_a + w_i \text{ und daher}$$

$$J = \frac{E}{w_a + w_i} \dots \dots \dots (2)$$

Wir sind jetzt in der Lage, eine Definition für die Maßeinheit der elektromotorischen Kraft, nämlich 1 Volt, zu geben: Die elektromotorische Kraft einer Stromquelle ist gleich 1 Volt, wenn durch sie bei einem Gesamtwiderstande von 1 Ohm eine Stromstärke von 1 Ampere verursacht wird.

Über die Einrichtung und den Gebrauch der Voltmeter, mittels deren man elektromotorische Kräfte bzw. Klemmspannungen direkt messen kann, soll in dem Abschnitte „Meßinstrumente“ gesprochen werden.

Kennt man von den drei im Ohmschen Gesetze (1) vorkommenden Größen zwei, so kann man die dritte berechnen. Weiß man z. B., daß die Stromstärke 10 Ampere und der gesamte Widerstand 3 Ohm beträgt, so ist die zugehörige elektromotorische Kraft 30 Volt. Sehr häufig benutzt man das Ohmsche Gesetz, da man J und E messen kann, zur Berechnung von Widerständen:

$$W = \frac{E}{J}.$$

Hierbei kann man in vielen Fällen, wenn z. B. die Stromquelle ein Akkumulator oder eine Dynamomaschine ist, den inneren Widerstand vernachlässigen (s. auch den Abschnitt über Spannungsverlust).

6. Stromarbeit — Watt.

Fließende Elektrizität ist, wie wir schon früher gesehen haben, imstande, Arbeit zu verrichten. Wie groß diese ist, läßt sich am besten klar machen, wenn wir wieder die fließende Elektrizität mit fließendem Wasser vergleichen. Wollen wir die Arbeit messen, die fallendes, d. h. strömendes Wasser in 1 Sekunde verrichten kann (s. Fig. 1 S. 8), so messen wir die Stromstärke in Litern und die Fallhöhe des Wassers oder das Gefälle in Metern. Beträgt z. B. die Stromstärke 10 l und das Gefälle 6 m, so ist die Arbeitsfähigkeit, bezogen auf

1 Sekunde, oder die theoretische Leistung der Wasserkraft, da 1 l Wasser 1 kg wiegt, gleich $10 \text{ kg} \times 6 \text{ m} = 60 \text{ Kilogrammmeter}$ oder $\frac{60}{75} = \frac{4}{5} \text{ PS}$.

Wäre also eine ideale Ausnutzung der in dem fallenden Wasser aufgespeicherten Energie möglich, so würde ein durch unsere Wasserkraft betriebener Motor (Wasserrad) an eine Arbeitsmaschine (z. B. eine Kreissäge) $\frac{4}{5} \text{ PS}$ abgeben können.

Bei der Erklärung des Begriffes Potential haben wir schon nachgewiesen, daß die Elektrizität Arbeit leistet, wenn sie vom Potential V_1 zum niedrigeren Potential V_2 übergeht. Wir wollen uns aber im folgenden mehr auf Erfahrungstatsachen stützen als auf die Theorie.

Werden die beiden Pole einer Stromquelle durch eine einfache Leitung miteinander verbunden, so wird im ganzen Stromkreise Wärme erzeugt. Die erzeugte Wärme repräsentiert eine gewisse Arbeit. Da diese Arbeit (Energie) durch die fließende Elektrizität gleichsam erzeugt worden ist, so besitzt fließende Elektrizität Arbeitsfähigkeit. Nun haben wir Energie als die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, erklärt, so daß wir berechtigt sind, von elektrischer Energie zu sprechen.

Schalten wir in unseren Stromkreis einen Elektromotor ein, so wird die elektrische Energie in Wärme und mechanische Arbeit umgewandelt; schalten wir einen Wasserzerseßungsapparat hinzu, so wird außerdem ein Teil der Stromenergie für die Trennung der beiden Bestandteile des Wassers verbraucht, d. h. es wird elektrische Energie in chemische (Spannkraft) umgesetzt. Übrigens wird sowohl in dem Elektromotor als auch in dem Wasserzerseßungsapparate gleichzeitig Wärme erzeugt. Beachten wir noch, daß wir mittels eines elektrischen Stromes Magnetismus und Licht erzeugen können, so erkennen wir, daß sich die elektrische Energie leicht in jede andere Energieform umwandeln läßt. Außerdem hat die elektrische Energie den großen Vorzug, daß man sie ohne große Verluste viele Kilometer weit gleichsam transportieren kann.

Die in einem Teile eines Stromkreises, einem Drahtstücke, einer Lampe zc. in andere Energieformen umgewandelte elektrische Energie wird in analoger Weise gemessen wie die Arbeitsleistung einer Wasserkraft, und zwar ist sie, auf die Sekunde

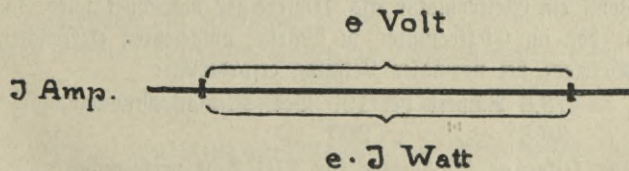


Fig. 6.

bezogen, gleich dem Produkte aus der Stromstärke in Ampere und der Spannung in Volt, die zwischen den Endpunkten des Leitungsstückes¹⁾, den Klemmen der

¹⁾ Daß zwischen zwei beliebigen Punkten eines Stromkreises eine Spannung besteht, soll später gezeigt werden.

Lampe zc. besteht. Beträgt die Stromstärke gerade 1 Ampere und der Potentialunterschied (Spannung) an den Endpunkten des Leiters gerade 1 Volt, so nennt man die in 1 Sekunde in dem betreffenden Stücke der Leitung umgewandelte elektrische Energie 1 Watt, in ehrender Erinnerung an James Watt. 1 Watt ist, wie später gezeigt werden soll, äquivalent (gleichwertig) $\frac{1}{736}$ PS oder

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt.}$$

Der Sinn dieser Gleichung ist folgender: Wenn eine Dynamo bei 736 Volt elektromotorischer Kraft einen Strom von 1 Ampere oder bei 73,6 Volt einen Strom von 10 Ampere zc. abgeben soll und man von Energieverlusten infolge der Reibung und des Luftwiderstandes, sowie von den Energieverlusten, die wir später kennen lernen, absieht, so genügt für den Antrieb der Dynamo eine 1-pferdige Kraftmaschine.

Würde unsere Dynamo bei konstanter elektromotorischer Kraft (etwa 736 Volt) und konstanter Stromstärke (1 Ampere) eine Stunde lang Strom liefern, so würde man in der technischen Sprache die gesamte von der Dynamo abgegebene und im Stromkreise in andere Energieformen umgewandelte elektrische Energie 736 Wattstunden nennen. Die Beziehung zwischen Watt und Wattstunde ist also dieselbe wie zwischen Pferdekraft und Pferdekraftstunde.

Große Arbeitsleistungen eines elektrischen Stromes pflegt man in Kilowatt (KW) anzugeben:

$$1 \text{ Kilowatt} = 1000 \text{ Watt.}$$

(Analoge: Kilogramm, Kilometer.)

Damit sich der Leser mit dem außerordentlich wichtigen Begriffe Watt noch näher vertraut mache, wollen wir ihn auf einige besondere Fälle anwenden:

1. Aus der Angabe: „Die Leistung einer Dynamo beträgt 10 Kilowatt“ kann man nur den Schluß ziehen, daß zum Betriebe der Dynamo bei normaler Belastung mindestens $\frac{10000}{736} = 13,6$ PS erforderlich sind; man weiß aber nicht, wieviel Volt die elektromotorische Kraft und wieviel Ampere die Stromstärke beträgt: denn $50 \text{ Volt} \times 200 \text{ Ampere} = 10 \text{ Kilowatt}$, ebenso $100 \text{ Volt} \times 100 \text{ Ampere}$ zc.

2. Wenn ein Elektromotor als 10-pferdiger bezeichnet wird, so sind, abgesehen von der im Elektromotor in Wärme umgesetzten elektrischen Energie, zu seinem Betriebe bei normaler Leistung erforderlich:

73,6 Ampere bei 100 Volt Klemmspannung,

36,8 „ „ „ 200 „ „ „ zc.

3. Eine 16kerzige Glühlampe für 110 Volt verbrauche 55 Watt. Wir schließen, daß durch die Lampe bei 110 Volt Spannung zwischen den beiden Zuleitungsdrähten ein Strom von $\frac{55}{110} = 0,5$ Ampere fließt.

Wir haben im vorhergehenden oft von der Stromwärme und der Spannung zwischen den Endpunkten eines Leiters gesprochen, und es dürfte an der Zeit sein, diesen beiden Gegenständen eine eingehendere Betrachtung zu widmen.

7. Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes für einen beliebigen Teil eines Stromkreises, Spannungsverlust und Joulesche Wärme.

Es möge, um die Betrachtungen an einen bestimmten Fall anzulehnen, die Potentialdifferenz zwischen den Polen oder Klemmen einer Stromquelle 60 Volt betragen¹⁾. Wir denken uns die beiden Klemmen durch einen Draht, der überall denselben Querschnitt besitzt, miteinander verbunden (vergl. Fig. 7) und diesen Draht in 6 gleiche Stücke eingeteilt: *ab*, *bc* etc. Das Potential fällt in der äußeren Leitung von dem Betrage + 30 Volt auf den Betrag - 30 Volt und sinkt offenbar in dem Teile *ab* um denselben Betrag wie in *bc* etc. An zwei beliebigen Stellen des Drahtes herrscht also ein Potentialunterschied, der sichtbar wird, wenn man die betreffenden Punkte mit einem Voltmeter verbindet. Die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten eines Stromkreises bezeichnet man mit Spannungsverlust (Spannungsabnahme, Potentialgefälle) in dem betreffenden Leiterstück.

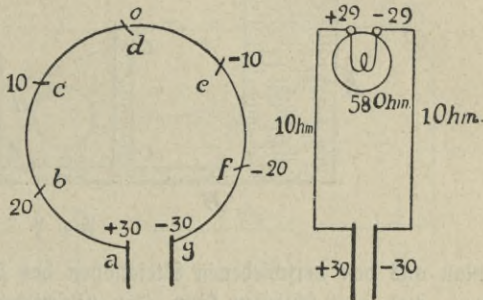


Fig. 7.

Mit unserer Stromquelle möge jetzt eine Glühlampe von 58 Ohm Widerstand durch zwei Drähte von je 1 Ohm Widerstand verbunden werden, so daß der ganze Widerstand im äußeren Stromkreise 60 Ohm beträgt.

Ohne daß sich der elektrische Zustand in den Zuleitungsdrähten ändert, könnten wir den Glühfaden der Lampe durch 58 Drähte von derselben Beschaffenheit wie die Verbindungsdrähte ersetzen. Die Spannung würde dann in jedem Drahte um $\frac{60}{60} = 1$ Volt abnehmen, so daß die Spannung an den

Klemmen der Lampe 58 Volt beträgt. Hätten wir aber zwei Drähte von je 2 Ohm Widerstand als Zuleitung benutzt, so wäre der Spannungsverlust in den beiden Drähten zusammen größer als 2 Volt gewesen; denn pro 1 Ohm wäre die Spannungsabnahme gleich $\frac{60}{62}$ Volt und $4 \cdot \frac{60}{62}$ Volt > 2 Volt.

Daß zwischen zwei beliebigen Punkten eines Stromkreises eine Spannung besteht, kann man sich durch folgenden Schluß klar machen: Die Elektrizität fließt nur dann von einem Punkte, etwa *b* in Fig. 7, nach einem anderen,

¹⁾ Wenn die Klemmspannung 60 Volt beträgt, so braucht nicht die Spannung der einen Klemme + 30 Volt und die der anderen - 30 Volt zu sein. Bei einer Akkumulatorenbatterie liegen die Verhältnisse auch tatsächlich anders. Die Betrachtung wird vereinfacht, wenn wir die in Fig. 6 angedeutete Annahme machen.

etwa c , hin, wenn das Potential in b ein größeres ist als in c . Da nun die Elektrizität von b nach c hinfließt, so muß zwischen b und c eine Spannung bestehen.

Bei fließendem Wasser liegen die Verhältnisse ähnlich. In der Abflußröhre B (Fig. 8) ist der Druck an verschiedenen Stellen verschieden groß, wie

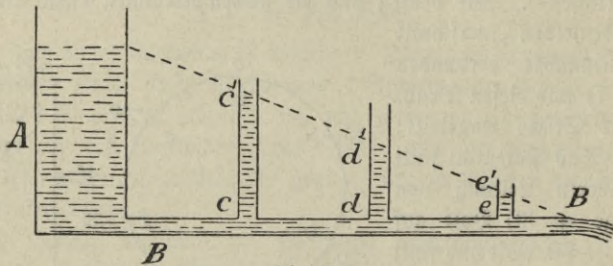


Fig. 8.

man aus den verschiedenen Steighöhen des Wassers in den vertikalen Röhren cc' , dd' , ee' schließen kann (den verschiedenen Drucken in B entsprechen die verschiedenen Potentiale).

Man kann durch theoretische Betrachtungen sowohl wie auf empirischem Wege folgendes Gesetz ableiten:

Spannung an den Enden eines Leiterstückes = Stromstärke
 \times Widerstand des Leiterstückes

oder
$$e = i \cdot w \dots \dots \dots (3)$$

Schreiben wir unsere Gleichung in der Form

$$i = \frac{e}{w},$$

so hat sie dieselbe Gestalt wie die das Ohm'sche Gesetz darstellende.

Bei der großen Bedeutung, die der eben genannte Satz für die Elektrotechnik besitzt, wollen wir eine zwar nicht ganz exakte, aber doch wohl hinreichend genaue Resultate liefernde Versuchsanordnung, mittels deren man die Richtigkeit unserer Gleichung demonstrieren kann, kurz beschreiben: Es sei a b (Fig. 9) ein horizontal gespannter Draht von 1 bis 2 Ohm Widerstand, etwa ein blank geriebener dünner Eisendraht, der mittels der Zuleitungsdrähte d_1 und d_2 mit einer Stromquelle von etwa 4 Volt (2 Akkumulatoren) verbunden sei; die zum Voltmeter für schwache Spannungen und mit größerem innerem Widerstande — damit man den durch das Voltmeter fließenden Strom unberücksichtigt lassen kann — führenden Drähte d_3 und d_4 sind an Gleitkontakten befestigt. Wir können so die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten des Leiters a b messen und finden, daß diese Spannung proportional dem Abstände der beiden Gleitkontakte ist (e proportional w), vorausgesetzt daß die Ungleichheiten des Drahtkalibers an verschiedenen Stellen nicht zu groß sind.

Haben wir noch in die Hauptleitung d_1 oder d_2 einen Kurbelrheostat und ein Amperemeter für schwache Ströme eingeschaltet, so daß wir die Stärke

des durch a b fließenden Stromes variieren und messen können, so sehen wir, daß bei einem bestimmten Abstände der Gleitkontakte die Spannung mit der Stromstärke steigt und sinkt. Bei exakten Versuchen müßte der Leiter gekühlt werden, weil sich bei Änderung der Stromstärke die Temperatur und mit dieser der Widerstand des Drahtes ändert. Zu dem Zwecke müßte man den geradlinigen Draht in Spiralen zerlegen, diese in Alkohol tauchen und ihre Enden an Klemmen befestigen.

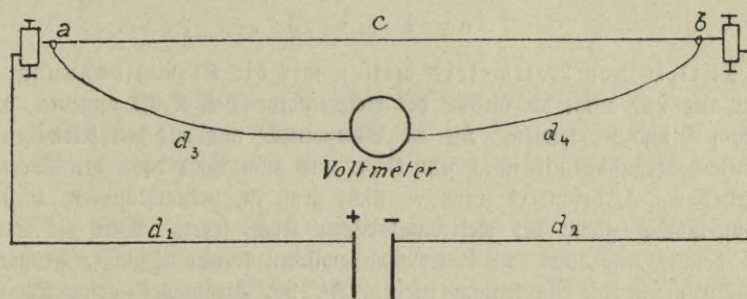


Fig. 9.

Eine praktische Anwendung unserer letzten Formel soll an der Hand einer Aufgabe erläutert werden. Die Klemmspannung einer Dynamo betrage 120 Volt; es sollen an einem 300 m weit entfernten Orte 50 Ampere bei 110 Volt Nutzsprung (= Spannung an den entfernten Enden der Leitung) zur Verfügung stehen; welchen Querschnitt muß man den Leitungsdrähten geben? — Der Spannungsverlust in der Leitung darf 10 Volt betragen; bezeichnen wir also den Widerstand in der ganzen Leitung (Hin- und Rückleitung) mit w , so ist

$$10 = 50 \cdot w, \text{ mithin } w = \frac{1}{5} \text{ Ohm.}$$

Nennen wir den Querschnitt der Leitung q , so ist

$$w = \frac{600 \cdot 0,017}{q} = \frac{1}{5} \text{ und}$$

$$q = 5 \cdot 600 \cdot 0,017 = 51 \text{ qmm.}$$

Die Leitung würde also ein verhältnismäßig großes Gewicht haben, und es fragt sich daher, ob es nicht ökonomischer ist, einen größeren Spannungsverlust in der Leitung zuzulassen und dadurch das Anlagekapital für die Leitung zu verringern. Welcher Querschnitt unter bestimmten Verhältnissen und Bedingungen der ökonomisch günstigste ist, ist eine der wichtigsten Fragen, die bei der Projektierung von elektrischen Anlagen zu lösen sind. (Näheres s. „Leitungsnetz“.)

Der Spannungsverlust in dem ganzen äußeren Stromkreise ist offenbar identisch mit der Klemmspannung, daher

$$\begin{aligned} \text{Klemmspannung} &= \text{äußerer Widerstand} \times \text{Stromstärke} \\ e &= w_a \cdot J \end{aligned} \quad (4)$$

Da der elektrische Strom nicht nur durch den äußeren Stromkreis, sondern auch durch die Stromquelle selbst hindurch fließen muß, in dieser also Widerstand zu überwinden hat, so haben wir auch mit einem Spannungsabfall im Innern der Stromquelle zu rechnen. Bezeichnen wir, wie früher, den inneren Widerstand der Stromquelle mit w_1 , so ist der Spannungsabfall in der Stromquelle gleich $w_1 \cdot J$, und um diesen Betrag ist die Klemmspannung niedriger als die elektromotorische Kraft E :

$$e = E - w_1 \cdot J \dots \dots \dots (5)$$

Mittels des Voltmeters messen wir die Klemmspannung; wir können also nur dann die Größe der elektromotorischen Kraft angeben, wenn wir noch J und w_1 kennen. Ist die Stromquelle nur mit den Klemmen des Voltmeters verbunden, so ist J sehr klein, und man kann dann den Wert des Produktes $w_1 \cdot J$, besonders wenn w_1 nicht groß ist, vernachlässigen, d. h. die Klemmspannung gleich der elektromotorischen Kraft setzen. Wird die Stromquelle belastet, so wird der Unterschied zwischen E und e um so größer, je mehr Strom in die Anzuleitung fließt. Ist die Stromquelle eine Dynamomaschine, so ist auch noch zu beachten, daß w_1 wegen der Erwärmung der Ankerdrähte mit wachsender Stromstärke zunimmt.

Die in der Stromquelle in Wärme umgesetzte elektrische Energie ist, wie wir wissen, der Spannungsabnahme in der Stromquelle proportional. Da nun die im Innern der Stromquelle erzeugte Wärme für uns wertlos ist, so müssen Stromquellen so eingerichtet werden, daß der innere Widerstand einen möglichst geringen Betrag hat. Bei Dynamomaschinen kommt noch hinzu, daß bei starker Erwärmung die Isoliermasse Schaden leidet. Andererseits ist zu berücksichtigen, daß die Verringerung des inneren Widerstandes eine Vergrößerung des Materialverbrauches zur Folge hat, so daß nicht nur die Herstellungskosten wachsen, sondern auch die Lagerreibung.

Die sogenannten Schwankungen im Netze, die sich bei einer eingeschalteten Glühlampe in plötzlichen Ab- oder Zunahmen der Helligkeit äußern, sind meistens darauf zurückzuführen, daß sich der Spannungsverlust in der Leitung ändert. Wenn beispielsweise in dem auf S. 21 behandelten Falle (120 Volt Klemmspannung, 50 Ampere, 110 Volt Verbrauchsspannung, $w = \frac{1}{5}$ Ohm) aus irgendeinem Grunde 75 Ampere statt 50 Ampere verbraucht werden, so beträgt der Spannungsverlust in der Leitung $75 \cdot \frac{1}{5}$ Volt = 15 Volt; an den Klemmen der Lampen herrscht dann nicht mehr die Spannung 110 Volt, sondern $(120 - 15)$ Volt = 105 Volt, so daß durch die Glühfäden ein zu schwacher Strom fließt.

Wir gehen jetzt dazu über, Formeln aufzustellen über die in einem gegebenen Leiter unter gegebenen Bedingungen erzeugte Stromwärme. Wenn der Spannungsverlust in einer Leitung 1 Volt und die Stromstärke 1 Ampere beträgt, so leistet der Strom in der Leitung eine sekundliche Arbeit von 1 Watt, die in der Leitung in Wärme umgesetzt wird. Die Stromwärme ist einer direkten Messung zugänglich — man taucht den Draht in Alkohol ein,

Kalorimeter — und findet, daß einer elektrischen Energie von 1 Watt 0,24 kleine Wärmeeinheiten¹⁾ entsprechen.

$$1 \text{ Watt} = 0,24 \text{ cal.} = 0,00024 \text{ Cal.}^2)$$

Rechnen wir vorstehende Wärmemenge durch Multiplikation mit 426 (s. S. 3) in Kilogrammmeter um, so finden wir, daß

$$1 \text{ Watt} = 0,10224 \text{ kgm,}$$

oder

$$1 \text{ kgm} = 9,8 \text{ Watt}$$

und

$$75 \text{ kgm} = 735 \text{ Watt (genauer 736 Watt)}^3).$$

Anmerkung: Den Zusatz „Sekunde“ zu Watt, den man vielfach findet, halten wir für überflüssig, da in der Definition des Begriffes Watt der Begriff Sekunde steckt.

Man nennt die in einem Leiter durch den elektrischen Strom erzeugte Wärme dem Physiker Joule (sprich: D'jaul) zu Ehren die Joulesche Wärme.

Wenn man die Joulesche Wärme, die in einem Teile eines Stromkreises erzeugt wird, berechnen will, so muß man zwei Fälle scharf voneinander unterscheiden, nämlich

1. der elektrische Strom leistet in dem betreffenden Teile des Stromkreises keine Arbeit, außer daß er den Leitungswiderstand überwindet,
2. der elektrische Strom leistet gleichzeitig eine andere Arbeit (Elektromotor, elektrolytischer Apparat).

Ad 1. Besteht zwischen den Endpunkten eines Leiters die Spannung e Volt und beträgt die Stromstärke J Ampere, so ist der Energieverlust pro Sekunde $e \cdot J$ Watt und mithin die erzeugte Wärmemenge gleich

$$0,24 \cdot e \cdot J \text{ cal,}$$

und in t Sekunden

$$Q = 0,24 \cdot e \cdot J \cdot t \text{ cal.} \quad \dots \quad (6)$$

Da man in dieser Gleichung nach einer früheren Formel e durch $w \cdot J$ ersetzen kann, so ergibt sich, daß

$$Q = 0,24 \cdot w \cdot J^2 \cdot t \text{ cal.} \quad \dots \quad (7)$$

Aus dieser Gleichung kann man zwei Sätze ablesen:

1. Bei gleicher Stromstärke ist die aus elektrischer Energie entstandene Wärmemenge proportional dem Widerstande. Läßt man beispielsweise durch einen Kupferdraht und durch einen Eisendraht von gleicher Länge und gleichem Querschnitte denselben Strom fließen, so wird in dem Eisendrahte

¹⁾ 1 kleine Wärmeeinheit oder 1 Grammkalorie (cal.) ist diejenige Wärmemenge, die man 1 g Wasser zuführen muß, wenn man seine Temperatur um 1° C. erhöhen will.

²⁾ Statt „gleich“ müßten wir eigentlich „äquivalent“ sagen.

³⁾ Wir erhalten kleine Abweichungen, weil die Zahlen 0,24 und 426 nicht ganz der Wirklichkeit entsprechen.

mehr Wärme erzeugt als in dem Kupferdrahte. Durchfließt ferner derselbe Strom verschiedene Kupferdrähte, deren Querschnitte ungleich sind, so werden in derselben Zeit in gleichen Stücken der verschiedenen Drähte ungleiche Wärmemengen erzeugt. Der dünnste Draht fängt bei wachsender Stromstärke zuerst an zu glühen und schmilzt zuerst durch. Es kommt noch hinzu, daß der dünnere Draht durch ein kleineres Wärmequantum bis zum Schmelzpunkte erhitzt wird.

2. Die in demselben Leiter erzeugte Wärmemenge (in 1 Sekunde) wächst mit dem Quadrate der Stromstärke. Bei der Stromstärke $2i$ ist die Joulesche Wärme also viermal so groß wie bei der Stromstärke i .

Ad 2. In diesem Falle kann man aus der Spannung und der Stromstärke nicht wie eben die Stromwärme berechnen. Denn das Produkt $e \cdot J$ gibt uns die ganze in andere Energieformen umgewandelte elektrische Energie an, und von dieser letzteren wird nur ein Teil in Joulesche Wärme umgewandelt. Will man die beiden Summanden einzeln ermitteln, so muß man den Widerstand in dem betreffenden Teile des Stromkreises kennen oder bestimmen. Wird dieser mit w bezeichnet, so ist wie früher

$$Q = 0,24 \cdot w \cdot J^2 \text{ cal. (pro Sekunde).}$$

Es ist zu beachten, daß jetzt nicht mehr e gleich $w \cdot J$ ist; e , die Klemmspannung des Elektromotors oder dergl., muß vielmehr größer als $w \cdot J$ sein. Ein Elektromotor verhält sich also so, als ob sein Widerstand größer als der Ohmsche wäre. (Siehe „Akkumulatoren“ und „Elektromotoren“.)

Der stationäre Zustand. Wenn in einem einfachen Leiter vom Widerstande w Ohm ein Strom von der Stärke J Ampere fließt, so wird in dem Leiter in jeder Sekunde eine nach Formel 7 (S. 23) berechenbare Wärmemenge q erzeugt, die zu einer Temperaturerhöhung führt. Der Wärmezufuhr steht eine Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung gegenüber. Bei größerer Länge des Leiters kann man die Wärmeabgabe durch Leitung vernachlässigen; die Strahlung wird um so stärker, je mehr die Temperatur des Leiters steigt, und es tritt bei jeder Stromstärke ein Zeitpunkt ein, in dem Wärmezufuhr und Wärmeabgabe einander gleich sind. Der dann herrschende Zustand wird der stationäre genannt.

In vielen Fällen ist es von Wichtigkeit, zu wissen, bei welcher Temperatur unter bestimmten Bedingungen der stationäre Zustand eintritt. Wenn es sich um geringe Temperaturerhöhungen handelt, so kann man die Wärmeausstrahlung proportional der Temperaturerhöhung t setzen. Dürfen wir die Wärmeleitung vernachlässigen, so ist es für die folgenden Betrachtungen gleichgültig, ob wir ein großes oder ein kleines Stück des Leiters der Berechnung zugrunde legen. Wir wollen daher ein Stück von 1 mm Länge wählen. Die Oberfläche dieses Stückes ist gleich $d \cdot \pi \text{ mm}^2$, wo d der Durchmesser in Millimetern ist. Nennen wir das Ausstrahlungsvermögen des Drahtes, d. h. die von 1 mm^2 Oberfläche in 1 Sekunde bei 1° Temperaturerhöhung ausgestrahlte Wärme, ϵ , so ist die in 1 Sekunde von unserem Stückchen ausgestrahlte Wärmemenge

$$Q = d \pi \cdot \epsilon \cdot t \text{ cal.}$$

Nach Eintritt des stationären Zustandes ist die ausgestrahlte Wärme gleich der Jouleschen. Mithin

$$d\pi \cdot \varepsilon \cdot t = 0,24 \cdot w \cdot J^2$$

Ist endlich ρ der spezifische Widerstand unseres Leiters, so ist

$$w = \frac{\rho \cdot 4}{1000 \cdot d^2 \cdot \pi}, \text{ da } L = \frac{1}{1000} \text{ m.}$$

Dieses eingesetzt gibt

$$d\pi \cdot \varepsilon \cdot t = 0,24 \cdot \frac{4 \cdot \rho}{1000 \cdot d^2 \cdot \pi} \cdot J^2.$$

Es folgt:

$$t = \frac{0,24 \cdot 4 \cdot \rho}{1000 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon \cdot d^3} \cdot J^2.$$

oder

$$t = K \cdot \frac{J^2}{d^3}, \text{ wo } K = \frac{0,24 \cdot 4 \cdot \rho}{1000 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon}.$$

Es kommt nun darauf an, den Wert von ε zu bestimmen. ε ist nicht nur für die verschiedenen Materialien verschieden, kann sogar für Leiter aus demselben Stoffe verschiedene Werte besitzen. Für blankes Kupfer z. B. ist ε kleiner als für Kupfer, dessen Oberfläche oxydiert ist. Um ε für einen bestimmten Fall zu erhalten, kann man folgenden Weg wählen. Man versieht ein kleines Stück der Oberfläche des betreffenden Leiters mit einem dünnen Überzug eines Stoffes, dessen Schmelzpunkt man kennt (z. B. Fett, Stearin, Woodsches Metall etc.), fängt mit einem schwachen Ströme an und steigert diesen allmählich, und zwar so lange, bis der Überzug anfängt zu schmelzen. Man kennt jetzt ρ , t , J und d , kann also K finden. Da in dem Ausdrucke für K nur ε unbekannt ist, so kann man ε berechnen.

Bei geringerer Temperaturerhöhung erhält man die Temperatur eines Leiters mit hinreichender Genauigkeit aus der Widerstandserhöhung. Angenommen, die Zimmertemperatur betrage 15° . Wir schicken durch den Leiter zuerst einen ganz schwachen Strom, so daß keine merkliche Temperaturerhöhung erfolgt, und messen mittels eines empfindlichen Voltmeters die Spannungsabnahme. Wir können aus e und i den Wert von w_{15} ermitteln:

$$w_{15} = \frac{e_{15}}{i}.$$

Wir senden jetzt den Strom J durch unseren Leiter und warten ab, bis der stationäre Zustand eingetreten ist. Dieser ist übrigens, wenn der betreffende Leiter eine Ankerwicklung, eine Transformatorspule etc. ist, meistens erst nach Verlauf von einigen Stunden vorhanden. (Man lese die „Erläuterungen zu den Normalien zur Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren“ von G. Dettmar. G.-L. Z. 1901, S. 499.) Aus e_t und J finden wir wie eben w_t . Nun ist nach der auf S. 12 angegebenen Gleichung:

$$w_t = w_{15} [1 + (t - 15)\alpha].$$

Kennt man also noch den Temperaturkoeffizienten α , so kann man t berechnen. Hierbei genügt es, für den Temperaturkoeffizienten des Kupfers den konstanten Wert 0,004 anzunehmen.

Bei größerer Temperaturdifferenz zwischen Leiter und seiner Umgebung darf man nicht mehr Proportionalität zwischen Temperaturerhöhung und ausgestrahlter Wärme (Emission) annehmen. Nun ist nach D. Lumer¹⁾ die Emission eines Körpers bei

¹⁾ G.-L. Z. 1902, S. 810.

der absoluten Temperatur T^a) gleich $\sigma \cdot T^a$, wo σ eine von der Natur des Körpers abhängige Konstante und a eine Zahl zwischen 4 und 5 ist. Wiederholt man die vorigen Schlüsse, so findet man

$$T^a = K \cdot \frac{J^2}{d^3}, \text{ wo } K = \frac{4 \cdot 0,24 \cdot \rho}{1000 \cdot \pi^2 \cdot \sigma}.$$

Die Temperatur, bis zu der sich ein gegebener Draht bei einer bestimmten Stromstärke erwärmt, hängt von verschiedenen Umständen ab, unter denen zunächst die Stromdichte zu nennen ist. Man versteht darunter den Quotienten $\frac{\text{Amperezahl}}{\text{Querschnitt}}$. Fließt z. B. durch einen Draht von 10 qmm ein Strom von 20 Ampere, so beträgt die Stromdichte 2 Ampere. Es fragt sich, ob bei derselben Stromdichte für Drähte aus demselben Materiale und unter denselben äußeren Bedingungen die Temperatur nach Eintritt des stationären Zustandes immer dieselbe ist. Es genügt, die Frage für einen konkreten Fall zu entscheiden. Es werde bei einer blanken Freileitung eine Temperaturerhöhung um 30° zugelassen. Diese möge bei einem Drahte von 1 qmm bei der Stromstärke J eintreten. Tritt nun bei einem Drahte von 2 qmm bei derselben Stromdichte J oder der Stromstärke $2 \cdot J$ auch eine Temperaturerhöhung um 30° ein? Es ist

$$\begin{aligned} \text{der Durchmesser des ersten Drahtes } d_1 \text{ gleich } & \frac{2}{\sqrt{\pi}}, \text{ da } 1 = \frac{d_1^2}{4} \pi, \\ \text{„ „ „ zweiten „ } d_2 \text{ „ } & \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}}, \text{ da } 2 = \frac{d_2^2}{4} \pi. \end{aligned}$$

Wenden wir die Formel

$$t = K \cdot \frac{J^2}{d^3}$$

auf den ersten Draht an, so ergibt sich

$$30 = K \cdot \frac{J^2 \sqrt{\pi^3}}{8},$$

und für den zweiten Draht gilt:

$$30 = K \cdot \frac{X^2 \cdot \sqrt{\pi^3}}{8 \cdot \sqrt{8}},$$

wo wir unter X die Stromstärke verstehen, bei der eine Temperaturerhöhung von 30° erfolgt.

Aus den beiden letzten Gleichungen folgt

$$X^2 = J^2 \sqrt{8} \text{ oder } X = J \cdot \sqrt[4]{8}.$$

Wäre unsere Frage zu bejahen, so müßte $X = 2 J$ oder $X^2 = 4 J^2$ sein.

Verallgemeinert man die vorigen Betrachtungen, so findet man folgenden Satz: Läßt man bei einer Leitung eine bestimmte Temperaturerhöhung zu und

¹⁾ T (absolute Temperatur) = $273^\circ + t^\circ$, wenn t die Temperatur in Celsius-Graden ist.

trifft diese bei einem Drahte von 1 qmm Querschnitt bei J Ampere ein, so darf man einen Draht von n qmm Querschnitt mit $J \cdot \sqrt[4]{n^3}$ belasten. Dasselbe Resultat findet man übrigens auch, wenn man von der Gleichung

$$T^a = K \frac{J^2}{d^3}$$

ausgeht.

Bei einer isolierten Leitung ist die Strahlung gegenüber einer blanken Freileitung eine verzögerte. Daraus folgt, daß man einen mit einer Hülle aus Baumwolle, Guttapercha u. dergl. versehenen Draht weniger stark beanspruchen darf als blanke Drähte. Es kommt noch hinzu, daß bei stärkerer Temperaturerhöhung die Isolation Schaden leiden kann. Endlich sei noch erwähnt, daß gerade Drähte sich schneller abkühlen können als solche, die zu einer Spule gewickelt sind.

Nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker über die größte Beanspruchung einer isolierten Kupferleitung soll

bei einem Querschnitte von	$\frac{3}{4}$	1	1,5	2,5	4	6	10 qmm
die höchste zulässige Betriebs-							
stromstärke nicht überschreiten	4	6	10	15	20	30	40 Ampere.

8. Stromverzweigungen, Parallelschaltung, Reihenschaltung.

Nur in wenigen Fällen ist der Weg, den der elektrische Strom zurücklegen muß, ein so einfacher, wie bis jetzt angenommen wurde. Meistens werden von einer Hauptleitung (Sammelschienen) mehrere Nebenleitungen und von diesen wieder andere Leitungen abgezweigt zc. Die Gesamtheit aller vorhandenen Leitungsdrähte bildet das Leitungsnetz. Wir betrachten, da wir Formeln für die Berechnung von Leitungsnetzen nicht zu entwickeln beabsichtigen, nur die einfachsten Fälle der Stromverzweigung. Wir gehen aus von der in Fig. 10 Nr. 1 dargestellten Verzweigung. Es fragt sich, wie sich der von dem positiven Pole P_1 der Stromquelle ausgehende Strom bei b teilt. Die Spannung an den Punkten b und c können wir als die die Elektrizität durch jeden Zweig treibende Kraft ansehen. Beträgt diese Spannung beispielsweise 10 Volt, und haben die Zweige die angeschriebenen Widerstände, so ist nach der Formel 3 (S. 20)

$$i_1 = \text{Stromstärke in } bdc = \frac{10}{2} \text{ Amp.} = 5 \text{ Amp. und}$$

$$i_2 = \text{„ „ } bec = \frac{10}{1} \text{ „} = 10 \text{ „ .}$$

In der Hauptleitung ab ist natürlich die Stromstärke gleich 10 Amp. + 5 Amp. = 15 Amp.

Verallgemeinert man die vorigen Betrachtungen, so findet man, daß die Stromstärken in den einzelnen Zweigen umgekehrt proportional den betreffenden Widerständen sind.

Von praktischer Bedeutung ist die Frage, durch welchen einfachen Widerstand man statt der Zweige die Punkte b und c verbinden muß, wenn der Hauptstrom seine vorige Stärke (15 Amp.) beibehalten oder wenn die Spannung

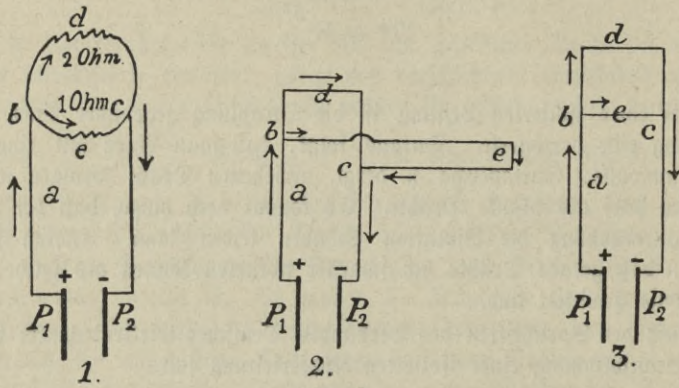


Fig. 10.

zwischen b und c dieselbe bleiben soll. Nennen wir allgemein die Widerstände in den Zweigen w_1 und w_2 und die Spannung an den Endpunkten b und c e, so ist

$$i_1 = \frac{e}{w_1} \text{ und } i_2 = \frac{e}{w_2};$$

folglich

$$J = i_1 + i_2 = e \left(\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right).$$

Denken wir uns die beiden Zweige entfernt und durch den zu berechnenden Widerstand X ersetzt, so soll X eine solche Größe haben, daß

$$J = \frac{e}{X};$$

mithin

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}.$$

Sind drei Zweige vorhanden, so ist

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} \text{ etc.}$$

Bezeichnen wir die Klemmspannung der Stromquelle mit E und den Widerstand in den die Punkte b und c mit der Stromquelle verbindenden Drähten mit w, so ist

$$J = \frac{E}{w + X}.$$

Beispiel: Nennspannung 25 Volt, Widerstand in a und der Rückleitung zusammen 1 Ohm, Widerstände in den Zweigen 2 Ohm und 1 Ohm:

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}, \quad x = \frac{2}{3}, \quad J = \frac{25}{1 + \frac{2}{3}} = 15 \text{ Amp.}$$

Der Spannungsverlust in der gemeinsamen Hin- und Rückleitung beträgt 1.15 Volt = 15 Volt, mithin die Spannung zwischen b und c 10 Volt, wie angenommen wurde.

Ist bdc in Fig. 10 Nr. 1 die Verlängerung der Hauptleitung und zeichnen wir statt der hogenförmigen Drähte rechteckige, so erhalten wir Fig. 10 Nr. 2. In Nr. 3 ist die Nebenleitung verkürzt. In elektrischer Beziehung sind die drei Figuren identisch, obschon ihr Aussehen ein verschiedenes ist.

Eine unter dem Namen Wheatstonesche Brücke bekannte Stromverzweigung findet in der Technik, besonders bei der Messung von Widerständen, oft Verwendung. Denken wir uns

einstweilen die leitende Verbindung zwischen C und D entfernt (Fig. 11), so haben wir eine einfache Stromverzweigung vor uns mit den Zweigen ACB und ADB. Verbindet man einen beliebigen Punkt des oberen Zweiges mit einem beliebigen Punkte des unteren Zweiges, so fließt durch die hergestellte Verbindung CD, die Diagonale, im allgemeinen ebenfalls Strom. Durch passende Wahl der Widerstände w_1, w_2, w_3, w_4 kann man es aber erreichen, daß die Diagonale stromlos wird. Soll durch CD kein Strom fließen, so muß

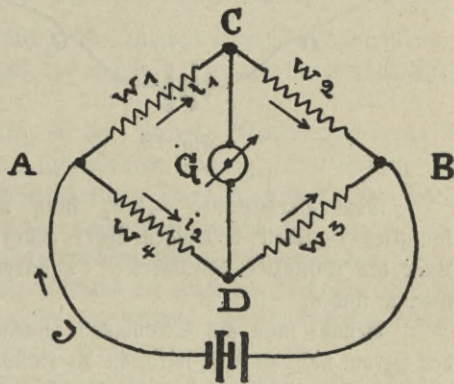


Fig. 11.

1. der durch AC fließende Strom so stark sein wie der durch CB fließende,
2. der Strom in AD gleich sein dem Strome in DB,
3. muß das Potential in C dem Potentiale des Punktes D gleich sein.

Letzteres ist der Fall, wenn

die Spannungsabnahme in AC = Spannungsabnahme in AD und
 " " " BC = " " DB ist.

Drückt man die angegebenen Bedingungen durch Gleichungen aus, so findet man leicht, daß

$$w_1 : w_2 = w_4 : w_3 \text{ oder } w_1 \cdot w_3 = w_2 \cdot w_4.$$

(Wir erinnern an den bekannten Satz über das Schenkviereck.)

Kennt man in unserer Proportion drei Größen oder das Verhältnis zweier und die dritte, so kann man die vierte finden.

Wir wollen eine Methode, mittels der Wheatstoneschen Brücke einen unbekanntem Widerstand zu messen, kurz besprechen. Zwischen zwei Metallplatten mit je zwei Klemmschrauben sei ein Draht AB aus Neusilber (Nickelin 2c.) gespannt, der überall denselben Querschnitt hat, D (Fig. 12) sei ein Gleitkontakt, w_1 ein bekannter (Vergleichs-) Widerstand, während der Widerstand x gemessen werden soll.

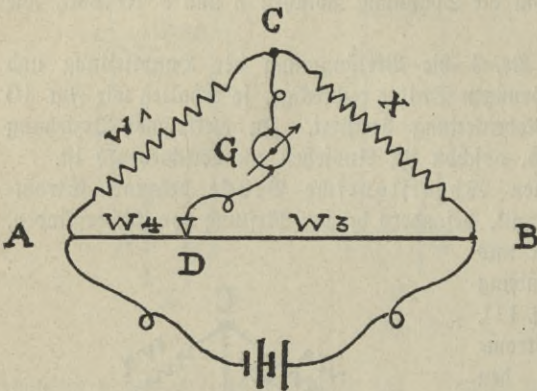


Fig. 12.

Damit man erkennen kann, ob die Diagonale CD stromlos ist, wird in sie ein Galvanoskop G gelegt. Das Verhältnis der Widerstände in den Drahtstücken AD und DB ist durch das Verhältnis der Drahtlängen w_4 und w_3 , die man an einem Maßstabe ablesen kann, gegeben. Ist z. B. $AD = 30$ cm und $DB = 70$ cm, so ist

$$w_4 : w_3 = \frac{30}{70} = \frac{3}{7}.$$

Dem Verhältnisse $w_4 : w_3$ kann man durch Verschiebung des Gleitkontaktes D jeden beliebigen Wert geben; es wird daher bei einer gewissen Lage des Kontaktes den Wert $w_1 : x$ haben. Da nun w_1 bekannt ist, so kann man x finden.

Benutzt man als Stromquelle einen Akkumulator, so schaltet man, damit der Strom nicht zu stark wird, in die Hauptleitung noch einen Kurbbelrheostat ein.

Je empfindlicher das Galvanoskop ist, um so genauer ist die Messung.

Bertauscht man in der Brückenvorrichtung (Fig. 12) Galvanoskop und Meßbatterie miteinander, so gelten dieselben Gleichgewichtsbedingungen wie eben.

Kleine Widerstände, z. B. Ankerwiderstände, lassen sich wegen der Übergangswiderstände nicht ohne weiteres mit der Wheatstoneschen Brücke bestimmen. Man wendet in derartigen Fällen eine von Thomson herrührende Modifikation an (Doppelbrücke), von deren Beschreibung wir aber absehen wollen.

Zu den Stromverzweigungen haben wir auch die Parallelschaltung zu rechnen, die wir jetzt zugleich mit der Hintereinanderschaltung behandeln wollen. Wenn man mehreren Lampen, Motoren oder Apparaten aus derselben Quelle elektrische Energie zuführen will, so kann man zwei verschiedene Schaltungen anwenden, nämlich die beiden eben genannten. Die Hintereinanderschaltung, die man auch Reihen- oder Serienschaltung nennt, wird durch die Fig. 13 veranschaulicht. Der ganze Strom durchfließt der Reihe nach die Lampen l_1, l_2 2c. Bei dieser Anordnung ist jede Lampe (jeder Motor 2c.) von den anderen abhängig; wird also eine Lampe, z. B. l_1 , ausgeschaltet oder brennt ihr Faden durch, so wird die ganze Leitung stromlos und alle Lampen erlöschen.

Nehmen wir an, die Klemmspannung betrage 100 Volt und der Widerstand in jeder Lampe 50 Ohm; dann ist der Widerstand im äußeren Stromkreise gleich 150 Ohm, falls, wie in der Figur angenommen wurde, drei

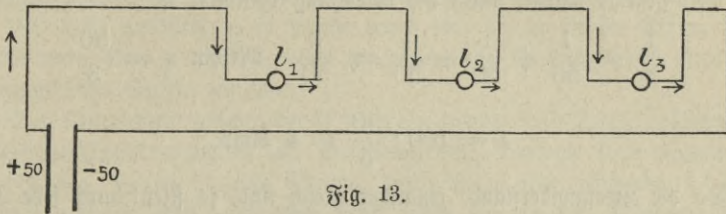


Fig. 13.

Lampen brennen und wir von dem Widerstande in der Leitung absehen. Mithin ist der Strom $\frac{100}{150} = \frac{2}{3}$ Ampere stark. In jeder Lampe beträgt der Spannungsverlust $\frac{2}{3} \cdot 50$ Volt = $33\frac{1}{3}$ Volt. Bei der Hintereinanderschaltung wird also die Spannung geteilt. Hätten die Lampen ungleiche Widerstände, so würde sich die Klemmspannung auf die einzelnen Lampen im Verhältnisse ihrer Widerstände verteilen.

Die reine Reihenschaltung wird in der Praxis seltener angewandt¹⁾ wegen des eben erwähnten Uebelstandes (gegenseitige Abhängigkeit), obschon sie vor der gleich zu besprechenden Parallelschaltung einen großen Vorzug hat. Da nämlich ein und derselbe Strom alle Lampen zc. durchfließt, so hat der in der Leitung zirkulierende Strom eine verhältnismäßig geringe Stärke. Infolgedessen kann man ohne großen Kupferaufwand die durch die Joulesche Wärme bedingten Verluste oder, was auf dasselbe hinausläuft, den Spannungsverlust in den Leitungsdrähten auf einen geringen Prozentsatz reduzieren.

In der Fig. 14 sind drei Lampen parallel geschaltet. Der Strom teilt sich bei a und bei c, die Teilströme vereinigen sich bei e und d. Daß

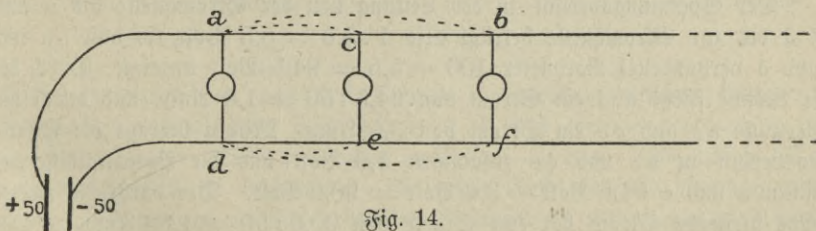


Fig. 14.

wir hier eine Stromverzweigung vor uns haben, erkennen wir noch besser, wenn wir uns den Draht ab der Länge nach halbiert und das Ende der einen Hälfte bei c, das der anderen bei b an den vertikal gezeichneten Zuleitungsdrähten befestigt denken (ebenso unten), wie es die punktierten Linien andeuten sollen.

¹⁾ Wir erwähnen die Hintereinanderschaltung von Bogenlampen, von Bädern für galvanoplastische Zwecke.

Berechnen wir unter denselben Annahmen wie eben die Stärke des von der Stromquelle in die Leitung geschickten Stromes. Die drei Lampen können wir uns durch einen einzigen Widerstand x ersetzt denken, der, wie früher (s. S. 28) gezeigt wurde, durch die Gleichung bestimmt ist:

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{50} + \frac{1}{50} + \frac{1}{50} = \frac{3}{50}. \text{ Mithin } x = \frac{50}{3}$$

und

$$J = 100 : \frac{50}{3} = 6 \text{ Amp.}$$

Da die Zweigwiderstände einander gleich sind, so fließt durch jede Lampe ein Drittel des Gesamtstromes (2 Amp.). — Soll der Strom wie eben (Hintereinanderschaltung) $\frac{2}{3}$ Amp. pro Lampe betragen, so muß man die Nennspannung auf $33\frac{1}{3}$ Volt erniedrigen.

Wir wollen noch den Einfluß des Widerstandes in den Leitungsdrähten auf die Lampenspannungen berücksichtigen. Der Widerstand möge bis zur ersten Lampe 1 Ohm, bis zur zweiten 2 Ohm, bis zur dritten 3 Ohm betragen. Bezeichnen wir mit x den Widerstand, den wir statt der Leitungsstücke ce und $cbfe$ zwischen c und e einschalten können, so ist

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{50} + \frac{1}{51} = 0,0396, \quad x \cong 25,3 \text{ Ohm.}$$

Jetzt haben wir noch eine einfache Stromverzweigung vor uns, die bei a beginnt und bei d endet. Den kombinierten Widerstand y findet man aus der Gleichung:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{50} + \frac{1}{26,3} = 0,058, \quad y = 17,3 \text{ Ohm.}$$

Der Gesamtwiderstand in dem äußeren Stromkreise ist also:

$$w = 1 + 17,3 = 18,3 \text{ Ohm. Mithin } J = 100 : 18,3 = 5,5 \text{ Amp.}$$

Der Spannungsverlust in der Leitung von der Stromquelle bis a und von d bis zur Stromquelle beträgt also $1 \cdot 5,5 = 5,5$ Volt, so daß ein mit a und d verbundenes Voltmeter $100 - 5,5 = 94,5$ Volt anzeigt. Durch die erste Lampe fließt also ein Strom von $94,5 : 50 = 1,9$ Amp. und durch die Leiterstücke ac und de ein Strom von 3,6 Amp. Mithin beträgt der Spannungsverlust in ac und de zusammen 3,6 Volt und die Potentialdifferenz zwischen e und c $94,5 \text{ Volt} - 3,6 \text{ Volt} = 90,9 \text{ Volt}$. Der durch die zweite Lampe fließende Strom hat eine Stärke von $90,9 : 50 = 1,82$ Amp. zc .

Wir sehen also, daß wegen der Spannungsabnahme in der Leitung die Stärke des durch die einzelnen Lampen fließenden Stromes mit der Entfernung der Lampen von der Stromquelle abnimmt.

In manchen Fällen wendet man eine kombinierte Schaltung an (s. Bogenlampen). Diese erhalten wir aus Fig. 14, indem wir in dem Stromwege ad zwei oder mehrere Lampen hintereinander schalten, ebenso in ce zc . Zu dieser Schaltung geht man notgedrungen über, wenn die vorhandene Netzspannung

(Spannung zwischen a und d bezw. c und e) für die zur Verfügung stehenden Lampen eine zu große ist. Nehmen wir beispielsweise an, die zu installierenden Lampen hätten einen Widerstand von 50 Ohm und dürften höchstens mit 1 Ampere belastet werden. Würde man die Lampen einzeln an ein Netz mit etwa 100 Volt anschließen, so würde durch jede ein zu starker Strom fließen. Schaltet man aber je zwei Lampen hintereinander, so kommt ein Strom von der gewünschten Stärke zustande.

Den Unterschied zwischen der Hintereinander- und Parallelschaltung von Stromquellen wollen wir uns durch eine Analogie klar machen.

In Fig. 15 sei P_1 eine Pumpe, durch die in jeder Sekunde 1 l Wasser 8 m hoch gehoben wird. Es kann dann durch eine an dem Reservoir R_1 angebrachte Röhre in jeder Sekunde 1 l Wasser 8 m tief fallen. Lassen wir das abfließende Wasser auf ein kleines Wasserrad einwirken, so kann dieses pro Sekunde eine Arbeit von 8 kgm leisten, wenn wir von Verlusten absehen. Wollen wir die Arbeitsleistung verdoppeln, so können wir dies, wenn uns noch eine zweite Pumpe zur Verfügung steht, auf zwei verschiedenen Wegen erreichen. Wir können

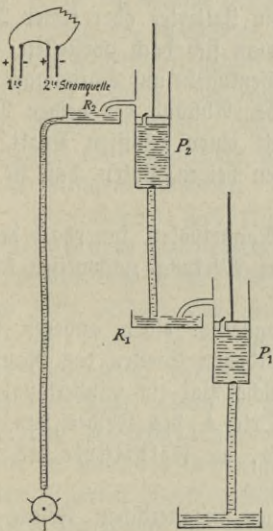


Fig. 15.

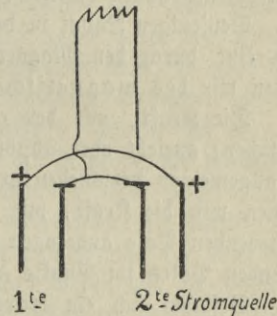


Fig. 16.

nämlich entweder das von der Pumpe P_1 gehobene Wasser mittels der Pumpe P_2 nochmals um 8 m heben, d. h. das Gefälle verdoppeln, oder die zweite Pumpe neben der ersten aufstellen — etwa links neben R_1 —, d. h. die Stromstärke verdoppeln. Im ersten Falle sind die Pumpen hintereinander, im zweiten parallel geschaltet. Ähnlich bei Stromquellen. Stehen uns zwei Stromquellen zur Verfügung und sollen beide auf dasselbe Netz arbeiten, so können wir entweder die Stromquellen hintereinanderschalten, d. h. die ungleichnamigen Pole miteinander verbinden (s. Fig. 15 oben), und erzielen dadurch eine Vergrößerung der Spannung (aber nicht der Stromstärke) oder wir können die Stromquellen parallel schalten (s. Fig. 16) und erzielen dadurch eine Vergrößerung der Stromstärke (aber nicht der Spannung). Näheres über die Parallelschaltung von Dynamomaschinen findet man im 6. Kapitel.

Zweites Kapitel.

Magnetismus.

Die Theorie des Magnetismus und Untersuchungen über die magnetischen Eigenschaften des Eisens sind für den Konstrukteur von hervorragender Bedeutung. Da wir uns aber in diesem Buche mehr mit den Eigenschaften und der Wirkungsweise der elektrischen Maschinen und Apparate beschäftigen als mit ihrer Berechnung und Herstellung, so gehört es nicht zu unseren Aufgaben, den Magnetismus eingehender zu behandeln; wir müssen uns vielmehr darauf beschränken, die in den folgenden Abschnitten vorkommenden Fachausdrücke zu erklären.

Bekanntlich hat jeder Magnet 2 Pole, die man als Nord- und Südpol voneinander unterscheidet. Obschon daher ein isolierter oder freier Pol, z. B. ein freier Nordpol, nicht existiert, so kann man sich doch vorstellen, daß ein solcher existiere. Es mögen zwei sehr kleine Eisenkugeln nur Nordmagnetismus enthalten und zwar beide dieselbe Menge; der Abstand der beiden Pole betrage 1 cm. Die beiden Pole stoßen sich mit einer gewissen Kraft ab. Beträgt diese Kraft 1 Dyne, so sagt man von den beiden Polen, daß sie die Stärke Eins haben (Einheitspol).

Denjenigen Raum in der Umgebung eines Magnetpols, innerhalb dessen man eine durch den Magnetismus hervorgerufene Wirkung nachweisen kann, wollen wir das magnetische Feld nennen.

Die Kraft, mit der ein (feststehender) Magnetpol einen anderen (beweglichen) anzieht oder abstößt, ist an den verschiedenen Stellen des Raumes im allgemeinen verschieden groß. Ist der bewegliche Pol ein Einheitspol, so nennen wir die Kraft, mit der er an einem Orte A des Feldes von dem feststehenden Pole angezogen oder abgestoßen wird, die Feldstärke des feststehenden Poles im Punkte A.

Befindet sich ein freier Pol innerhalb eines magnetischen Feldes, so bewegt er sich auf einer krummen Linie von dem einen Pole weg und nach dem anderen hin.

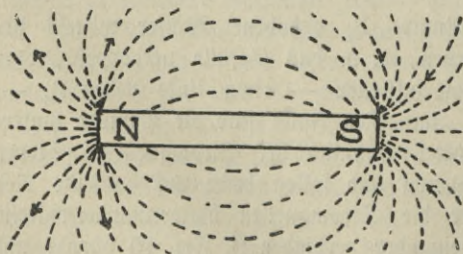


Fig. 17.

Da die Kurve uns in jedem Punkte die Richtung der treibenden Kraft angibt, so nennt man sie Kraftlinie. Ein Teil der Kraftlinien eines Stabmagnets ist in Fig. 17 dargestellt. Hängt man eine magnetisierte Stricknadel an einem längeren, dünnen Faden so auf, daß der untere Pol, der ein Nordpol sei, nur einige Millimeter

von der Tischplatte entfernt ist, und nähert man die Nadel dem Nordpole eines auf dem Tische liegenden Magnetstabes, so beschreibt der bewegliche

Nordpol, sobald man ihn losläßt, eine Kraftlinie. Das bekannteste Mittel, den Verlauf der Kraftlinien innerhalb einer Ebene sichtbar zu machen, besteht darin, daß man eine trockene Glasscheibe oder ein Blatt Kartonpapier mit Eisenfeilspänen bestreut.

Obgleich die Kraftlinien nur gedachte Linien sind, so spricht man von ihnen doch so, als ob sie dünne, unsichtbare, elastische Fäden wären¹⁾, und man nimmt an, daß sie am Nordpole in den Raum nach den verschiedensten Richtungen hin eindringen und den Südpol aufsuchen (vergl. Fig. 17). Die Kraftlinien sind in der Längsrichtung gedehnt und in der Querrichtung verdichtet; daher „haben sie das Bestreben sich zu verkürzen und einander abzustößen“ (Faraday).

Da durch jeden Punkt des magnetischen Feldes eine Kraftlinie gehen muß, so ist die Anzahl der Kraftlinien eines jeden Poles unendlich groß. Man macht jedoch die Annahme, daß zu jedem Pole eine bestimmte, endliche Anzahl von Kraftlinien gehört²⁾. Man denke sich um einen Einheitspol eine Kugel vom Radius 1 cm beschrieben; die Oberfläche der Kugel ist gleich $4\pi \text{ cm}^2$. Man nimmt nun an, daß durch jedes Quadratcentimeter der Kugeloberfläche eine Kraftlinie hindurchgeht, daß also ein Einheitspol im ganzen 4π Kraftlinien aussendet.

Der Begriff Feldstärke eines beliebigen Poles für einen Punkt A des Feldes wird jetzt folgendermaßen definiert: Wir legen durch den Punkt A eine Fläche von 1 cm^2 , die senkrecht auf den Kraftlinien steht; es geht dann durch diese Fläche eine gewisse Anzahl von Kraftlinien hindurch: diese sei gleich m . Dann ist m ein Maß für die Feldstärke³⁾. Würde sich in A ein freier Einheitspol befinden, so würde dieser in der Richtung der Kraftlinien durch eine Kraft gleich m Dynen vorwärtsgetrieben. — Die Zahl m nennt man auch die Kraftliniendichte (Anzahl der Kraftlinien, die durch 1 cm^2 gehen) im Punkte A des magnetischen Feldes. Wir wollen noch ein von Rapp in dem zitierten Werke gewähltes Beispiel anführen: Geben wir die Feldstärke zwischen den Polen und dem Anker einer Dynamomaschine zu 5000 C-G-S-Ein-

¹⁾ Bei dem Studium der Kraftlinientheorie dürfte folgende Vorstellung das Verständnis in mancher Hinsicht fördern: Denkt man sich von dem Nordpole eines Magnets eine Strahlung ausgehend, etwa nach Art der Wärmestrahlung, die einerseits das Bestreben hat in den Raum möglichst weit einzudringen, andererseits aber den Südpol aufzusuchen, so wird, da schließlich alle ausgestrahlte Energie dem Magnete wieder zugeführt wird, nämlich am Südpole, bei einem permanenten Magnet keine Energie verbraucht. Man muß aber Energie aufwenden, um die Strahlung ins Leben zu rufen (Magnetisierungsarbeit). Bei dem Verschwinden des Feldes wird diese Energie frei. Der Begriff Feldstärke ist analog dem Begriffe Helligkeit bei einer Lichtquelle. Wird durch einen elektrischen Strom der Magnetismus verstärkt, so bedeutet dies eine Vergrößerung der Strahlungsintensität zc.

²⁾ Man vergleiche die Darlegungen von G. Rapp in dem Werke: Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom. Berlin, Jul. Springer.

³⁾ Die Feldstärke ist in C-G-S-Einheiten ausgedrückt.

heiten an, so meinen wir damit, daß durch jedes Quadratcentimeter des Zwischenraumes 5000mal so viel Kraftlinien laufen wie durch ein Quadratcentimeter desjenigen Raumes, in dem die Einheit der Kraft (1 Dyne) auf den Einheitspol wirkt.

Ein magnetisches Feld ist ein gleichförmiges, wenn in ihm die magnetischen Kraftlinien parallele Gerade sind. In einem solchen Felde ist die Feldstärke überall dieselbe. Höhlen wir die Pole eines Hufeisenmagnets zylindrisch aus (s. Fig. 18), so können wir den Raum zwischen den Polflächen als gleichförmiges magnetisches Feld ansehen.

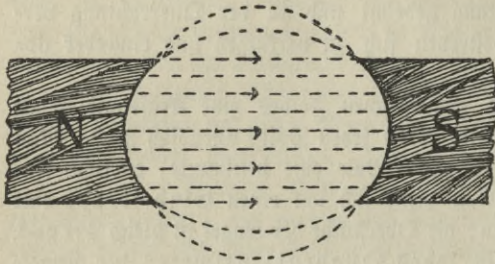


Fig. 18.

Ein von einem elektrischen Strome durchflossener Draht wird von kreisförmigen Kraftlinien umgeben, die Mittelpunkte der Kreise, deren Ebenen senkrecht zum Drahte stehen, liegen auf der Achse des Drahtes.

Ein freier Pol, der von der Erde nicht angezogen wird, würde um den Draht als Achse rotieren. Die Kraftlinien eines stromdurchflossenen Drahtes unterscheiden sich in ihrem Verhalten gegen Eisen in keiner Weise von den Kraftlinien eines Magnets.

Eine Drahtspule (Solenoid), durch die man einen elektrischen Strom schickt, verhält sich Eisen und Magneten gegenüber gerade so wie ein Magnet, dessen Achse (Verbindungsline zwischen Nord- und Südpol) mit der Spulenchse zusammenfällt. Wir können also bei einem Solenoid von einem Nordpole und einem Südpole sprechen. Am Nordpole (etwa der ersten Windung) dringt ein Kraftlinienbündel in den Raum ein, die einzelnen Kraftlinien gehen nach den verschiedensten Richtungen hin, treten am Südpole (letzte Windung) wieder in das Solenoid ein und durchsetzen es.

Permeabilität. Wir denken uns eine Ebene gelegt senkrecht zur Achse des Solenoids durch den Mittelpunkt der Achse — Mittelebene. Die Anzahl der Kraftlinien, die auf ein Quadratcentimeter der Mittelebene kommt, sei gleich \mathcal{H} . Der Wert von \mathcal{H} hängt ab von der angewandten Stromstärke J und der Anzahl der Windungen. In das Innere des Solenoids werde jetzt ein Eisenzylinder geschoben (s. Fig. 19). Bei demselben Werte von J wird das Feld ein stärkeres. Daraus schließen wir, daß das Solenoid mehr Kraftlinien in den Raum sendet als ohne Eisenern. Nennen wir die Anzahl der Kraftlinien, die jetzt durch unser Quadratcentimeter gehen, B , so ist $B > \mathcal{H}$. Wir müssen also \mathcal{H} mit einer Zahl multiplizieren, die größer als 1 ist, wenn wir B erhalten wollen. Bezeichnen wir diese Zahl mit μ , so ist

$$B = \mu \cdot \mathcal{H}.$$

μ , das Verhältnis der neuen Kraftlinienzahl zur ursprünglichen, nennt man die Permeabilität der benutzten Eisensorte. μ hat für verschiedene Eisensorten verschiedene Werte, aber auch für dieselbe Eisensorte ist μ nicht konstant, sondern schwankt mit der Feldstärke. Je leichter sich das Eisen magnetisieren läßt, je leichter es gleichsam die Kraftlinien durchläßt, um so größer ist die Permeabilität oder die Durchlässigkeit des Eisens. μ hat daher in der Lehre vom Magnetismus eine ähnliche Bedeutung wie das Leitungsvermögen in der Elektrizitätslehre.

Die eben eingeführte Größe B nennt man die magnetische Induktion, die ursprüngliche Kraftlinienzahl H , bezogen auf 1 cm^2 , oder die ursprüngliche Feldstärke wird die magnetische Kraft genannt. Wenn der Eisenkern das Solenoid ganz ausfüllt und sein Querschnitt gleich Q Quadratcentimetern ist, so ist die Anzahl der im ganzen vorhandenen Kraftlinien gleich $Q \cdot B$.

Feldverstärkung durch Eisen. Bringt man in das Feld eines Stahlmagnets (permanenten Magnets) oder eines Elektromagnets weiches Eisen, so suchen die Kraftlinien das Eisen auf und werden von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Die Kraftlinien treten also in größerer Zahl an der dem Nordpole des Magnets zugewendeten Seite des Eisens in dieses ein und an der entgegengesetzten Seite aus, als wenn wir das Eisen durch eine andere indifferente Substanz, etwa Luft, ersetzen. Die Kraftlinien suchen gleichsam den bequemeren Weg durch das Eisen auf.

Bezeichnen wir auch hier die Stärke des homogen gedachten Feldes mit H , so ist, wenn wir Eisen in das Feld bringen, die Kraftlinienzahl im Innern des Eisens pro cm^2 größer als H ; nennen wir sie B , so ist wieder $B = \mu \cdot H$.

Ein Solenoid mit Eisenkern nennt man bekanntlich Elektromagnet. Die Stärke des induzierten Magnetismus ist bei weichem Eisen und geringer Stärke des durch das Solenoid fließenden Stromes der Stromstärke angenähert proportional. Bei größerer Stromstärke wächst der Magnetismus langsamer und nähert sich mit wachsender Stromstärke einem Grenzwerte.

Ferner ist bei einer bestimmten Stromstärke der induzierte Magnetismus proportional der Anzahl der vorhandenen Win-

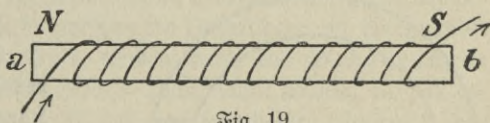


Fig. 19.

dungen, da ja jede einzelne Windung induzierend wirkt. Nennen wir die Windungszahl n und die Stärke des magnetisierenden Stromes J (Ampere), so ist für die Stärke des erregten Magnetismus das Produkt $n \cdot J$ maßgebend und heißt erregende oder magnetisierende Kraft oder Amperewindungen.

Analogon zum Ohm'schen Gesetze: Auf einem Eisenringe mögen sich n Windungen eines Drahtes befinden, durch den ein Strom von J Ampere fließe. Wir bezeichnen den kleinen Radius des Ringes mit r_1 , den großen mit r_2 und den mittleren Radius $\frac{r_1 + r_2}{2}$ mit R_1 ; $L = 2 R_1 \pi$ nennen wir die Länge des Ringes. Die Kraftlinien beschreiben in dem Ringe Kreise. Ist

wieder B die Induktion (Anzahl der Kraftlinien pro 1 cm^2 Querschnitt des Ringes) und Q der Querschnitt des Ringes, so ist die gesamte Kraftlinienzahl $N = Q \cdot B = Q \cdot \mu \cdot \mathfrak{H}$, und es läßt sich beweisen, daß

$$\mathfrak{H} = \frac{0,4 \pi \cdot n J}{L} \quad \text{oder} \quad N = \frac{0,4 \pi \cdot n J}{\mu \cdot Q}.$$

N läßt sich offenbar vergleichen mit der Stärke eines elektrischen Stromes. L ist die mittlere Länge der Kraftlinien, entspricht also der Länge eines Drahtes, durch den ein Strom fließt. Daß μ analog ist der spezifischen Leitungsfähigkeit (für die Elektrizität), ist schon gesagt worden. Nehmen wir für einen Augenblick an, μ wäre das elektrische Leitungsvermögen des Eisenringes, so wäre $\frac{L}{\mu \cdot Q}$ sein elektrischer Leitungswiderstand. Man nennt $\frac{L}{\mu \cdot Q}$ den magnetischen Widerstand des Ringes. Da die Stärke des Kraftlinienflusses innerhalb des Ringes nach unserer Gleichung proportional $0,4 \pi n \cdot J$ ist, so spielt diese Größe hier eine analoge Rolle wie die elektromotorische Kraft im Ohmschen Gesetze. Man nennt daher $0,4 \pi n \cdot J$ die magnetomotorische Kraft. Das Ohmsche Gesetz für einen magnetischen Kreis lautet also

$$\text{Kraftlinienzahl} = \frac{\text{magnetomotorische Kraft}^1)}{\text{magnetischer Widerstand.}}$$

Schneiden wir aus unserem Ringe ein Stück von der Länge d heraus (Fig. 20), so wird der magnetische Widerstand größer; der Widerstand der eingeschalteten Luftsäule hat den Wert $\frac{d \mu_0}{Q}$. Da μ_0 , die Permeabilität der Luft, gleich 1 ist, so geht $\frac{d \mu_0}{Q}$ über in $\frac{d}{Q}$. Der magnetische Widerstand ist also gleich

$$\frac{(L - d)}{\mu \cdot Q} + \frac{d}{Q}.$$

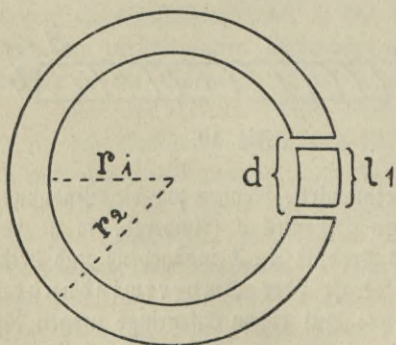


Fig. 20.

Schieben wir in den Luftraum des Ringes einen Eisenkern von der Länge l_1 und dem Querschnitte Q , und nennen wir die magnetische Leitungsfähigkeit des Kernes μ_1 , so hat der ganze magnetische Widerstand den Wert

$$\frac{(L - d)}{\mu Q} + \frac{l_1}{\mu_1 Q} + \frac{(d - l_1)}{Q}.$$

Die zuletzt beschriebene Anordnung entspricht vollständig dem magnetischen Kreise einer Dynamomaschine.

¹⁾ Der Ausdruck $0,4 \pi \cdot n J$ ist die magnetische Kraft eines Solenoides (einer Spule), wenn die Länge gleich 1 cm ist.

Dem Begriffe „elektrischer Leitungswiderstand“ entspricht die Tatsache, daß in einem Leiter Wärme erzeugt wird; dieses gilt nicht für den magnetischen Widerstand. Die Kraftlinien haben also einen wirklichen Widerstand, der einen Energieverlust zur Folge hat, nicht zu überwinden. Man hat den Begriff „magnetischer Widerstand“ eingeführt, um den Gesetzen eine einfachere Gestalt geben zu können.

Wie wir gesehen haben, hat ein Solenoid ein magnetisches Feld. Da in dem Momente, in dem man Strom durch das Solenoid schickt, das Feld erzeugt wird, so wird bei Stromschluß ein Teil der elektrischen Energie für die Erzeugung des Feldes verbraucht oder um den Kraftlinienfluß ins Leben zu rufen. Öffnet man den Stromkreis, so wird die in dem Felde aufgespeicherte Energie frei und ruft in der Spule eine Bewegung der Elektrizität oder eine wirksame elektromotorische Kraft ins Leben.

Befindet sich in dem Solenoid ein Eisenkern, so wird bei Benutzung derselben Stromstärke das Feld verstärkt, so daß für die Erzeugung des Feldes jetzt mehr Energie verbraucht wird.

Hysteresis¹⁾. Durch das Solenoid mit Eisenkern (s. Fig. 19) werde ein Strom geschickt, dessen Stärke wir allmählich bis zu einem gewissen größten Werte steigern. Hierauf werde der Strom geschwächt und, nachdem er den Wert Null erreicht hat, seine Richtung geändert. Mit dem umgekehrten Strom nehmen wir dieselben Veränderungen wie eben vor. Die Magnetisierung werde aber nicht bis zur Sättigungsgrenze getrieben. Die jeder Stromstärke oder jeder magnetisierenden Kraft entsprechende Induktion werde gemessen. Es ergibt sich, wie zuerst Warburg nachgewiesen hat, daß die Induktion bei abnehmender magnetisierender Kraft einen anderen, und zwar größeren Wert besitzt als bei zunehmender magnetisierender Kraft. Hat der Strom oder die magnetisierende Kraft den Wert Null erreicht, so hat die Induktion noch einen gewissen, von der Beschaffenheit des Eisens abhängigen Wert; diese Induktion nennt man die Remanenz (remanenter Magnetismus).

Die eben erwähnten Unterschiede zwischen den Induktionen bei zunehmender und abnehmender magnetisierender Kraft werden durch das Beharrungsvermögen der magnetischen Moleküle erklärt. Man nimmt nämlich an, daß gewöhnliches Eisen aus einer sehr großen Anzahl von sehr kleinen Magneten, den Molekularmagneten, bestehe. Da diese hant durcheinander liegen, so heben sich die von den einzelnen Polen ausgeübten Kräfte gegenseitig auf. Die Magnetisierung des Eisens besteht nach dieser Hypothese darin, daß die Molekularmagnete gedreht werden. Ist die Sättigungsgrenze erreicht, so sind alle Nordpole der Molekularmagnete nach dem einen Ende des Magnetstabes hin und demgemäß alle Südpole nach dem anderen Ende hin gerichtet. Die Molekularmagnete setzen einer drehenden Kraft einen gewissen Widerstand entgegen (Koerzitivkraft). Da die Drehung der Molekularmagnete Zeit in Anspruch nimmt, so erklärt es sich, daß die Stärke der Magnetisierung hinter der magnetisierenden Kraft „nachhinkt“.

¹⁾ Aus dem Griechischen abgeleitet, bedeutet so viel wie Nachhinken.

Die an der Oberfläche des Eisenstabes gelegenen Moleküle sind weniger gebunden und können daher leichter gedreht werden als die tiefer gelegenen. „Bei den dünneren Drähten sind relativ mehr solcher beweglicher Oberflächenmoleküle vorhanden; infolgedessen geht bei denselben die Auflösung der ganzen Anordnung der Moleküle schneller vor sich“ (S. L. La Cour, Theorie der Wechselströme und Transformatoren. Deutsch von Arnold).

Wegen der Koerzitivkraft des Eisens muß für die Drehung der Moleküle Arbeit aufgewendet werden; diese Arbeit wird in dem Eisen in Wärme umgesetzt und wird als Energieverlust infolge der Hysteresis oder Energieverlust durch Hysteresis, auch wohl kurz als Hysteresisverlust bezeichnet. Es ist klar, daß die Verluste infolge der Hysteresis besonders dann eine Rolle spielen, wenn die magnetisierende Kraft oft oder in schnellem Wechsel ihre Stärke ändert. Diesen Fall haben wir vor uns, wenn wir durch eine Elektromagnetspule einen Wechselstrom schicken. Der Eisenkern kann sich dann unter Umständen stark erwärmen (siehe auch Wirbelströme).

Die infolge der Hysteresis in dem Eisen erzeugte Wärme ist nicht nur nutzlos, sie kann auch zu einer schädlichen Erwärmung der Maschinenteile führen. Daher sollte bei Dynamomaschinen und allen Apparaten, in denen Eisen verwendet wird (Transformatoren zc.), nur gut ausgeglühtes Material (mit geringer Koerzitivkraft) Anwendung finden.

Zu beachten ist, daß die Arbeitsverluste durch Hysteresis nicht identisch sind mit der Energie, die zur Erzeugung des Feldes aufzuwenden ist und in dem Felde aufgespeichert wird.

Drittes Kapitel.

Induktionsercheinungen.

Bewegt man einen geradlinigen Leiter so durch ein magnetisches Feld, daß er Kraftlinien schneidet, bei horizontal liegendem Magnet etwa in einer vertikalen Ebene, so wird in dem Leiter eine elektromotorische Kraft ins Leben gerufen. Die erzeugte elektromotorische Kraft ist proportional der Anzahl der Kraftlinien, die in 1 Sekunde geschnitten werden. Natürlich kann man statt eines geradlinigen Leiters einen kreisförmigen oder sonstwie geformten benutzen. Eine Drahtspule besteht nun gleichsam aus mehreren oder vielen hintereinander geschalteten kreisförmigen Leitern. Bewegt man daher eine Spule in geeigneter Weise durch das magnetische Feld, so wird in jeder Windung eine elektromotorische Kraft erregt (induziert), und die elektromotorischen Kräfte addieren sich — wir haben gleichsam eine größere Anzahl von hintereinander geschalteten Elementen vor uns.

Man kann auch, während die Spule ruht, den Magnetstab bewegen, wenn man in der Spule Ströme induzieren will. Schiebt man also in eine fest-

stehende Spule einen Magnetstab, so wird in ihr, solange die Bewegung dauert, ein Strom — falls die Enden der Spule leitend miteinander verbunden sind ¹⁾ — induziert, ebenso wenn man den Magnet aus der Spule zieht. Jedoch ist in diesem Falle die Stromrichtung die entgegengesetzte wie eben. Bei diesen Bewegungen schneiden die einzelnen Windungen der Spule die Kraftlinien.

Wir können uns daher kurz merken, daß in einer Spule eine elektromotorische Kraft induziert wird, wenn sich die Zahl der von den einzelnen Windungen umschlossenen Kraftlinien ändert. Bewegen wir den Magnetstab hin und her, so fließt durch einen mit den Spulenden verbundenen äußeren Stromkreis ein Strom, dessen Richtung und Stärke sich kontinuierlich ändert. Unsere Anordnung stellt einen primitiven Wechselstromgenerator dar. Den näheren Verlauf eines Wechselstromes werden wir in dem folgenden Abschnitte besprechen.

Indem der Elektrotechniker über die Anzahl der Kraftlinien, die von einem Pole ausgehen oder die einem Felde von bestimmter Stärke entsprechen, bestimmte Annahmen macht, ist er in der Lage, aus der Stärke eines magnetischen Feldes, den Dimensionen des Leiters (der Länge des Leiters oder bei einer Windung aus der Größe der von der Windung umschlossenen Fläche), dem Winkel, den die Kraftlinien und der Leiter bilden und aus der Geschwindigkeit, mit der der Leiter im magnetischen Felde bewegt wird, die elektromotorische Kraft in Volt zu berechnen. Die elektromotorische Kraft ist gleich 1 Volt, wenn die sekundliche Änderung der Kraftlinienzahl 10^8 beträgt. Wird beispielsweise ein geradliniger Leiter von 15 cm Länge senkrecht zu den Kraftlinien durch ein magnetisches Feld bewegt, das für den von dem Drahte durchschnittenen Teil als konstantes angesehen werden kann und die Stärke 5000 Einheiten hat (d. h. 5000 Kraftlinien gehen durch 1 cm^2 , das einer senkrecht zu den Kraftlinien stehenden Ebene angehört), so werden bei einer Geschwindigkeit des Leiters von 13,3 m in der Sekunde gerade 10^8 Kraftlinien geschnitten, und es wird in dem Drahte eine elektromotorische Kraft von 1 Volt induziert; denn $1330 \cdot 15 \cdot 5000 = 10^8$.

Verücksichtigen wir jetzt, daß ein stromdurchflossener Draht und ein Magnet anziehende bzw. abstoßende Kräfte aufeinander ausüben. Der in einem Leiter (geradliniger Draht, Windung, Spule) in der eben beschriebenen Weise induzierte Strom hat eine solche Richtung, daß durch die Wechselwirkung zwischen Magnetpol und Leiter eine Abstoßung zustande kommt. Der Magnet sucht gleichsam die Bewegung des Leiters zu verhindern, so daß man Arbeit aufwenden muß, um den Widerstand zu überwinden. Wird der Leiter gehoben, so muß man, auch wenn kein magnetisches Feld zugegen ist, Arbeit verrichten; erfolgt die Aufwärtsbewegung im magnetischen Felde unter Schneidung von Kraftlinien, so ist nicht nur die Schwerkraft zu überwinden, sondern auch der Wider-

¹⁾ Ist das nicht der Fall, so müssen wir statt „Strom“ sagen „elektromotorische Kraft“.

stand im Felde, so daß jetzt die zu leistende Arbeit größer ist als vorhin. Eine der Arbeitsdifferenz äquivalente Menge elektrischer Energie wird in dem Leiter erzeugt. Das Gesagte gilt natürlich nicht, wenn die Enden des bewegten Leiters nicht miteinander verbunden sind, indem dann kein Strom zustande kommen kann.

Wir haben eben angenommen, daß entweder die Spule ruhe und der Magnet bewegt werde oder das Umgekehrte der Fall sei. Man kann aber auch, ohne daß irgend eine Bewegung der Materie erfolgt, eine elektromotorische Kraft induzieren, indem man nämlich ein Feld erzeugt bzw. vernichtet. Schieben wir beispielsweise auf einen aus weichem Eisen angefertigten Stab zwei Spulen, von denen die eine die rechte, die andere die linke Hälfte des Stabes umgibt, so wird in dem Momente, in dem man durch die eine Spule einen Strom schießt, in der anderen eine elektromotorische Kraft erzeugt¹⁾ (\downarrow), ebenso wenn man die erste Spule ausschaltet (\uparrow) oder wenn man den Strom in der ersten Spule verstärkt (\downarrow) oder endlich schwächt (\uparrow). Beim Einschalten wächst die Zahl der die einzelnen Windungen der zweiten Spule durchsetzenden Kraftlinien in kurzer Zeit von Null bis zu dem der angewandten Stromstärke entsprechenden Werte, beim Ausschalten sinkt diese Zahl schnell auf den durch den remanenten Magnetismus gegebenen Betrag.

Da man, wie wir gesehen haben, auch mittels eines elektrischen Stromes allein ein Feld erzeugen kann, so muß man in einem Leiter, der sich in der Nähe eines zweiten stromdurchflossenen Leiters befindet, elektrische Ströme ohne

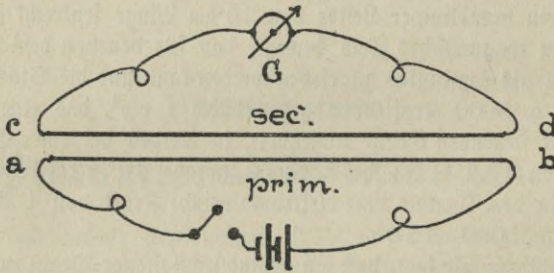


Fig. 21.

Zuhilfenahme von Eisen induzieren können. Es seien in Fig. 21 a b und c d zwei lange, parallele Drähte. Der Draht a b, den wir die primäre Leitung nennen, sei mit einer Stromquelle verbunden. In dem primären Stromkreise befindet sich noch ein Ausschalter und ein Kurzbelrheostat (letzterer ist in unserer schematischen Figur nicht gezeichnet). Schließen wir den Ausschalter, so stürzt sich die Elektrizität in den Draht a b; in diesem Momente können wir in c d mittels eines sehr

¹⁾ Einen Strom, der in der einen Richtung fließt, etwa von links nach rechts, wollen wir bezeichnen durch \uparrow und einen Strom in der entgegengesetzten Richtung durch \downarrow .

empfindlichen Galvanoskopes G einen Strom nachweisen (\downarrow). Der sekundäre Strom dauert aber nur so lange, bis sich in $a b$ ein stationärer elektrischer Zustand ausgebildet hat, also nur sehr kurze Zeit. Drehen wir den Hebel des Ausschalters in die in der Figur gezeichnete Stellung, so entsteht in $c d$, der sekundären Leitung, ein neuer Stromstoß (\uparrow). Drittens werden in der sekundären Leitung Ströme induziert, wenn wir unter Benutzung des Kurbelrheostates die Stärke des primären Stromes vergrößern (\downarrow) oder verkleinern (\uparrow). Man kann folgende zusammenfassende Regel aufstellen: Jedesmal, wenn sich in der primären Leitung der elektrische Zustand ändert, entsteht in der sekundären Leitung ein Induktionsstrom.

Die in der sekundären Leitung induzierte elektromotorische Kraft ist um so größer, je größer die auf die Sekunde umgerechnete Änderung der primären Stromstärke ist¹⁾ oder, anders ausgedrückt, je rascher man die Feldstärke ändert. Die denkbar schnellsten Änderungen der Stärke des primären Feldes erzielt man, wenn man den Stromkreis öffnet und schließt (von dem Einflusse der Selbstinduktion sehen wir einstweilen ab). Ferner ist unter sonst gleichen Umständen die induzierte elektromotorische Kraft proportional der Länge eines jeden der beiden Leiter. Dagegen wird die Induktionswirkung um so kleiner, je größer bei nichtparalleler Lage der beiden Drähte der Winkel ist, den der primäre Leiter mit einer dem sekundären Drahte parallel gezogenen und den ersteren schneidenden Geraden bildet, je größer ferner der Abstand der beiden Drähte ist.

Lange, parallel laufende Drähte erhält man am einfachsten dadurch, daß man zwei Drahtspulen herstellt und die eine Spule in die andere schiebt. Legt man in die innere Spule einen Eisenkern hinein, so werden die induzierten elektromotorischen Kräfte viel größer, weil zu der durch die primäre Spule hervorgerufenen Induktion noch die Magnetinduktion hinzukommt (Transformator).

Den Eisenkern können wir uns aus einer sehr großen Anzahl von zylindrischen Schichten, die sich gegenseitig umhüllen, zusammengesetzt denken und jede Schicht wieder aus vielen nebeneinander liegenden Ringen. Bei den Stromänderungen in der primären Spule wird in jedem der gedachten Eisenringe ein elektrischer Strom induziert. Durch diese Ströme, die man Foucault'sche Ströme oder Wirbelströme nennt, wird der Eisenkern erwärmt. Die erzeugte Wärme (Foule'sche Wärme) bedeutet einen Energieverlust, der zu dem Hysteresisverluste noch hinzukommt. Man sucht die Verluste durch Wirbelströme in Dynamomaschinen zc. dadurch zu verringern, daß man statt einer massiven Eisenmasse Eisenkörper anwendet, die aus einer großen Anzahl von Eisenblechen zusammengesetzt werden, die gegeneinander isoliert sind, etwa durch Papierzwischenlagen.

Selbstinduktion. Ein elektrischer Strom ruft bei Änderungen des augenblicklichen elektrischen Zustandes nicht nur in benachbarten Leitern elektro-

¹⁾ Variieren wir beispielsweise den primären Strom in $\frac{1}{4}$ Sekunde von 10 Amp. bis zu 4 Amp., so ist die sekundliche Änderung 24 Amp.

motorische Kräfte ins Leben, sondern auch in seiner eigenen Bahn. Betrachten wir zunächst einen geradlinigen Draht. Einen solchen können wir uns aus vielen, sehr dünnen Metallfäden, die wir mit f_1, f_2 zc. bezeichnen wollen, zusammengesetzt denken. Schließen wir den Stromkreis, so fließt die Elektrizität durch jeden Faden, und es wirkt der Faden f_1 auf alle anderen induzierend ein, denn es laufen ja alle Fäden parallel zu einander; natürlich üben auch f_2, f_3 zc. auf alle übrigen Fäden Induktionswirkungen aus. Es wird also in unserem Drahte eine elektromotorische Kraft induziert. Entsprechendes gilt bei der Unterbrechung, der Schwächung oder Verstärkung des primären Stromes. Die Induktion, die durch einen Strom in seiner eigenen Bahn hervorgerufen wird, nennt man Selbstinduktion. Bei geradlinigen Leitern ist die Selbstinduktion, wenn es sich nicht um sehr lange Leitungen handelt, wie sie bei der Telegraphie Anwendung finden, so klein, daß man sie praktisch vernachlässigen kann. Dagegen kann die Selbstinduktion in Spulen ganz beträchtliche Werte erreichen.

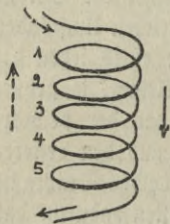


Fig. 22.

Dies wollen wir uns für den Fall klar machen, daß wir einen Stromkreis schließen, von dem eine aus vielen Windungen bestehende Spule ein Teil ist. Der Strom tritt zuerst in die Windung 1 (Fig. 22) ein, etwas später in die Windung 2 usw. In dem Momente, in dem sich der Strom in die Windung 1 stürzt, wird in den Windungen 2, 3 zc. eine elektromotorische Kraft induziert, die einen Strom ins Leben zu rufen sucht, der dem Batteriestrome entgegengesetzt gerichtet ist, wie es durch den punktierten (großen) Pfeil angedeutet wird. In der Spule entsteht also in dem Augen-

blicke, in dem der Strom geschlossen wird, gleichsam eine Gegenströmung, durch die verhindert wird, daß der Strom sofort seine dem Ohmschen Gesetze entsprechende Stärke (J) annimmt; es vergeht vielmehr eine gewisse, allerdings sehr kurze Zeit, bis der Strom seinen Endwert J erreicht. Während dieser Zeit wird das Feld der Spule erzeugt und in diesem Energie aufgespeichert.

Wird der Batteriestrom unterbrochen, so wird in der Spule eine neue elektromotorische Kraft induziert. Jetzt aber hat der induzierte Strom dieselbe Richtung wie der Batteriestrom. Die Selbstinduktion sucht also jetzt zu verhindern, daß die Spule stromlos wird. Weil bei der Unterbrechung des Stromes die Änderung der Stromstärke von J bis Null viel schneller vor sich geht als bei der Schließung von Null bis J und die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft der sekundlichen bezw. auf eine Sekunde umgerechneten Änderung der Stromstärke proportional ist, so entsteht bei der Öffnung des Stromes eine viel höhere Spannung als bei der Schließung (Öffnungsstrom).

Betrachten wir noch die Zustände an der Unterbrechungsstelle. Wenn wir eine geradlinige Leitung, die wir als induktionsfrei ansehen können, durchschneiden und die Endpunkte a und b nennen, so herrscht zwischen a und b eine Potentialdifferenz, die gleich der elektromotorischen Kraft der Stromquelle ist.

Diese Spannung gleicht sich, solange der Abstand zwischen a und b sehr klein ist, in Gestalt eines Fünkchens aus; wie lang dieses Fünkchen werden kann, hängt von der zur Verfügung stehenden Spannung ab. Ist aber der Stromkreis mit Selbstinduktion behaftet, ist beispielsweise ein Elektromagnet eingeschaltet, so kommt bei der Stromunterbrechung zu der Batteriespannung noch die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion hinzu, es ist also gerade so, als ob wir einen Stromkreis unterbrächen, der an eine Stromquelle von viel höherer Spannung angeschlossen ist. Wir erhalten daher einen kräftigeren Funken als in dem zuerst behandelten Falle.

Geht die Unterbrechung eines Stromkreises langsam vor sich, dreht man beispielsweise den Hebel eines Ausschalters langsam, so kann die Funkenentladung in einen Lichtbogen übergehen, durch den die Kontakte zerstört werden können.

Da die Selbstinduktion ein spezieller Fall der Induktion ist, so folgt, daß sich in einem Stromkreise die Selbstinduktion auch dann bemerkbar machen muß, wenn sich die Stromstärke ändert, daß ferner die Selbstinduktion größer wird, wenn wir in eine Spule einen Eisenkern schieben.

Wir wollen hier auf einige Versuche aufmerksam machen, die geeignet sind, die Erscheinungen der Selbstinduktion dem Verständnisse näher zu rücken.

1. Wenn man einen großen Elektromagnet mit einer Stromquelle, z. B. mit einem Akkumulator verbindet, so sieht man, daß ein eingeschaltetes Ampere-meter — Hydrazinstrument nicht geeignet — erst nach Verlauf einer kleinen Zeit die dem Ohmschen Gesetze entsprechende Stromstärke anzeigt.

2. A in Fig. 23 sei ein Gefäß, in dem sich Quecksilber befindet, S ein Stromschlüssel. Taucht man bei der gezeichneten Stellung des Hebels das blanke Ende des frei endenden Drahtes in das Quecksilber ein und hebt ihn schnell aufwärts, so beobachtet man einen hellen, starken Funken; schaltet man aber die Spule (Elektromagnet) mittels des Ausschalters kurz, so entsteht bei Wiederholung des Versuches nur ein schwacher Funken.

3. Man stelle sich in der früher beschriebenen Weise eine Wheatstone'sche Brücke her und benutze als Widerstand w_1 einen möglichst induktionsfreien Leiter (Kurbelrheostat, Glühlampe zc.), dagegen als Widerstand w_2 einen Elektromagnet. Hat man bei geschlossenem Stromkreise die Diagonale stromlos gemacht, so beobachtet man beim Öffnen und Schließen des Stromes, daß die Galvanometernadel ausschlägt.

Ein anderer sehr instruktiver Versuch soll in dem folgenden Kapitel besprochen werden, in dem wir auf die Selbstinduktion zurückkommen müssen.

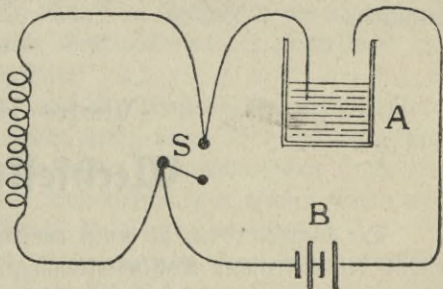


Fig. 23.

Selbstinduktionskoeffizient (Henry). Die in einer gegebenen Spule bei einer Stromänderung induzierte elektromotorische Kraft hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der die Änderung der Stromintensität erfolgt. Nennen wir die auf die Sekunde umgerechnete Änderung der Stromstärke, in Ampere ausgedrückt, a , so ist die induzierte elektromotorische Kraft proportional a , kann also gleich $L \cdot a$ gesetzt werden, wo L ein Faktor ist, der von den Dimensionen der Spule, der Anzahl der Windungen, den Wickelungsverhältnissen und, falls Eisen benutzt wird, von der Beschaffenheit und der Masse des Eisens abhängig ist. Man nennt L den Selbstinduktionskoeffizienten oder den Koeffizienten der Selbstinduktion (Induktanz). Beträgt die sekundliche Änderung der Stromstärke 1 Ampere, so ist die in der Spule induzierte elektromotorische Kraft gleich L Volt. Ist nun unsere Spule so beschaffen, daß unter der jetzt gemachten Annahme über die Änderung der Stromstärke die in der Spule induzierte elektromotorische Kraft gleich 1 Volt ist, so sagt man, der Selbstinduktionskoeffizient der Spule betrage 1 Henry. Der tausendste Teil eines Henry wird Millihenry genannt. Damit der Leser erkennt, wie groß der Unterschied der Selbstinduktion bei geraden Leitungen und Spulen mit Eisenkernen ist, führen wir folgende Beispiele an: Der Selbstinduktionskoeffizient für 100 km Telegraphenleitung aus Kupfer beträgt (nach Streckler, Hilfsbuch für die Elektrotechnik) 0,3 Henry, während er für den Elektromagnet eines Morseapparates bei aufliegendem Anker 18 Henry und bei abstehendem Anker 13 Henry beträgt.

Die Arbeit, die der Strom verrichten muß, um entgegen der Selbstinduktion in einer Spule auf seinen dem Ohmschen Gesetze entsprechenden Wert J zu steigen, wird gegeben durch den Ausdruck $\frac{1}{2} L \cdot J^2$. Diese Arbeit wird während des Anwachsens der Stromstärke in dem Felde der Spule gespeichert und erscheint bei der Öffnung des Stromes wieder als Öffnungsstrom.

Viertes Kapitel.

Wechselströme.

Die Wechselströme, zu denen wir auch die Drehströme zu rechnen haben, spielen bei elektrischen Kraftübertragungen aus Gründen, auf die wir später eingehen werden, eine sehr große Rolle; sie finden fast immer Anwendung, wenn der Weg, den der elektrische Strom zurücklegen muß, ein großer ist.

Wir betrachten zuerst den einfachsten Wechselstrom, nämlich den Sinephasenstrom. Sendet eine Gleichstrommaschine oder eine Akkumulatorenbatterie Strom in eine Leitungsleitung, so fließt der Strom immer in derselben Richtung durch die Leitung, und die Stromstärke bleibt konstant, falls sich die elektromotorische Kraft der Stromquelle und der Widerstand nicht ändern. Wenn aber eine Leitung an eine Wechselstrommaschine angeschlossen ist, so unterliegen Stromrichtung und Stromstärke fortwährenden Änderungen, die nach bestimmten

Gesetzen erfolgen, und zwar in der Weise, daß ein bestimmter elektrischer Zustand nach Verlauf einer gewissen Zeit stets wieder vorhanden ist (periodische Änderungen). Sind a und b in Fig. 24 die Klemmen einer Einphasenstrommaschine, auch kurz Wechselstrommaschine genannt, so fließt der Strom eine Zeitlang in der Richtung der Pfeile 1, etwas später in der Richtung der Pfeile 2 u. s. f. Aus dem Umstande, daß der Strom seine Richtung immerfort ändert, folgt, daß sich die Stromstärke periodisch ändern muß. Denn in

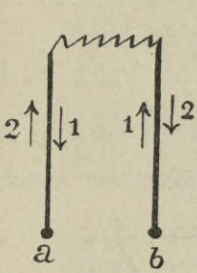


Fig. 24.

dem Momente, in dem sich die Stromrichtung umkehrt, muß die Stromstärke gleich Null sein. Hierauf schwillt der Strom bis zu einem gewissen Höchstwerte an, nähert sich, schwächer werdend, dem Werte Null wieder zu. Man kann die Vorgänge in einem Wechselstromkreise mit den Schwingungen eines Pendels vergleichen. Läßt man die bis a_1

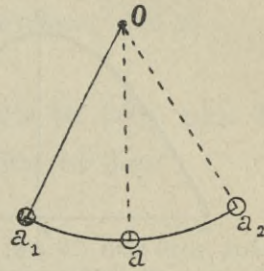


Fig. 25.

(Fig. 25) gehobene Pendelkugel los, so beginnt das Pendel seine Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit Null, bis a wächst die Geschwindigkeit, hat also in a ein Maximum. Hat die Kugel die Gleichgewichtslage passiert, so steigt sie mit abnehmender Geschwindigkeit bis a_2 ; in a_2 ist die Geschwindigkeit gleich Null zu. Man nennt die Zeit, die das Pendel für einen Hin- und Hergang gebraucht (von a_1 bis a_2 und von a_2 nach a_1 zurück), die Schwingungsdauer. Ihr entspricht bei den Wechselströmen die Periode e . Diese beträgt bei uns meistens $1/50$ Sekunde. Der Strom fließt also $1/100$ Sekunde ($= 1/2$ Periode) in der Richtung des Pfeiles 1 (Fig. 24), dann $1/100$ Sekunde in der umgekehrten Richtung zu. Der zu- und abnehmenden Geschwindigkeit der Pendelkugel entspricht die zu- und abnehmende Stromstärke.

Da die Stromstärke, wenn wir von dem Einflusse der Selbstinduktion einstweilen absehen, der elektromotorischen Kraft bezw. der Spannung proportional ist, so folgt, daß die Änderungen der elektromotorischen Kraft oder der Spannung und die Änderungen der Stromstärke in demselben Sinne verlaufen, d. h. der Spannung Null entspricht die Stromstärke Null zu.

Den zeitlichen Verlauf eines Wechselstromes (der elektromotorischen Kraft oder der Stromstärke) stellt man bildlich (graphisch) durch eine Kurve dar, zu der man in folgender Weise gelangt: Es sei ace in Fig. 26 die obere Kante eines Lineals, auf der ein senkrecht stehender Maßstab, den man schnell kürzer oder länger machen kann, parallel zu sich selbst mit konstanter Geschwindigkeit verschoben werde. Dem Maßstabe gebe man in jedem Momente eine der elektromotorischen Kraft entsprechende Länge; es möge etwa einem Millimeter 1 Volt entsprechen. Die Verschiebung des Stabes beginne in dem Momente, in dem die elektromotorische Kraft den Wert Null hat (Punkt a); nach $1/4$ Periode befinde sich das untere Ende des Stabes in b , nach $1/2$ Periode

in c. Verfahren wir in der angeedeuteten Weise, so beschreibt das obere Ende des Stabes eine Kurve, die der in der Figur gezeichneten ähnlich ist (Wellenlinie, Sinuslinie). Für die zweite halbe Periode erhalten wir dieselbe Kurve; entsprechend dem Umfande aber, daß die Stromrichtung die umgekehrte ist wie eben, verschieben wir den Maßstab auf der unteren Seite des unendlich schmal gedachten Lineals. Jedem Punkte der Geraden ae entspricht ein bestimmter Zustand im Stromkreise oder eine bestimmte Phase des Wechselstromes.

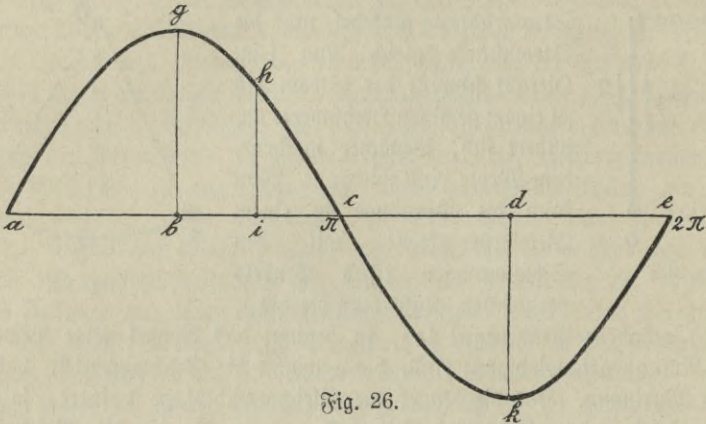


Fig. 26.

Da die elektromotorische Kraft einer Wechselstrommaschine ihre Größe beständig ändert, so kann man immer nur von der momentanen (augenblicklichen) elektromotorischen Kraft reden. Zählen wir die Zeit von dem Momente an, wo wir mit der Bewegung des Maßstabes begannen, so entspricht dem Punkte a die Zeit Null, dem Punkte b die Zeit $\frac{T}{4}$, wenn wir die Dauer einer Periode mit T — in Sekunden ausgedrückt — bezeichnen. Zur Zeit $\frac{T}{4}$ hat die elektromotorische Kraft ihren größten Wert oder ein Maximum (Scheitelspannung, bg in Fig. 26). Wenn man nun übereinkommt, Ströme, die in der einen Richtung fließen, positive Ströme und die zugehörigen elektromotorischen Kräfte positive elektromotorische Kräfte zu nennen und Ströme, die in der anderen Richtung fließen, als negative zu bezeichnen, so hat die elektromotorische Kraft zur Zeit $\frac{T}{4}$ ein positives Maximum und zur Zeit $\frac{3}{4}T$ ein negatives Maximum. Nennt man das positive Maximum der elektromotorischen Kraft E_0 , so wird im einfachsten, idealen Falle die momentane elektromotorische Kraft, d. h. die elektromotorische Kraft zu einer beliebigen Zeit t , ausgedrückt durch

$$e = E_0 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T}.$$

Der Bruch $\frac{1}{T}$, der in unserer Gleichung vorkommt, gibt uns an, wie oft der Strom während einer Sekunde in der einen Richtung fließt; man nennt die betreffende Zahl die Periodenzahl oder Frequenz des Wechselstromes. Nennen wir sie n , so ist also

$$n = \frac{1}{T} \text{ oder } n \cdot T = 1.$$

Unter Benutzung des Zeichens n geht unsere Gleichung über in

$$e = E_0 \cdot \sin 2\pi n t.$$

$2\pi \cdot \frac{1}{T}$ oder $2\pi \cdot n$ ist ein Winkel, da 2π für 360° gesetzt ist.

Nennt man diesen Winkel ω , so erhält unsere Gleichung die Form

$$e = E_0 \cdot \sin \omega t.$$

Anmerkung. Beschreibt man um einen Punkt O (Fig. 27) einen Kreis, dessen Durchmesser so viele Längeneinheiten groß ist, wie E_0 angibt und zieht die Tangente BC , so gibt die Länge einer Sehne, die mit BC den Winkel ωt bildet, die Größe von e an. Denn fällt man die Senkrechte OD , so ist $\sphericalangle BOD = \omega t$ und $\sin \omega t = BD : \frac{E_0}{2} = BF : E_0$. Für die zweite halbe Periode muß man einen Kreis unterhalb BC zu Hilfe nehmen.

Wir wollen unsere Gleichung für die elektromotorische Kraft anwenden, um für einen speziellen Fall den Mittelwert der elektromotorischen Kraft angenähert zu bestimmen. Es sei $E_0 = 150$ Volt und $T = \frac{1}{50}$ Sekunde. Es genügt offenbar, den Mittelwert für die erste halbe Periode aufzusuchen.

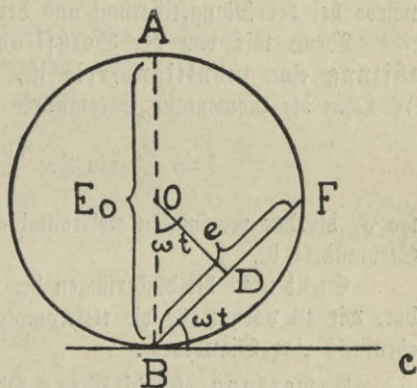


Fig. 27.

Zur Zeit $t = 0$ ist $e = 150 \cdot \sin 0^\circ = 0$

$$\begin{aligned} \text{'' '' } t = \frac{1}{8} \text{ Periode} &= \frac{1}{400} \text{ Sek. ist } e = 150 \cdot \sin \frac{\pi}{4} \\ &= 150 \cdot \sin 45^\circ = 150 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{'' '' } t = \frac{2}{8} \text{ Periode} &= \frac{2}{400} \text{ Sek. ist } e = 150 \cdot \sin \frac{\pi}{2} \\ &= 150 \cdot \sin 90^\circ = 150 \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{'' '' } t = \frac{3}{8} \text{ Periode} &= \frac{3}{400} \text{ Sek. ist } e = 150 \cdot \sin \frac{3\pi}{4} \\ &= 150 \cdot \sin 45^\circ = 150 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Addieren wir die vier Werte der momentanen elektromotorischen Kräfte und dividieren wir die Summe durch 4, so erhalten wir den gesuchten Näherungswert E_m .

$$E_m = \frac{1}{4} \cdot (150 \sqrt{\frac{1}{2}} + 150 + 150 \sqrt{\frac{1}{2}}) = \frac{1}{4} \cdot 150 (1 + 2 \sqrt{\frac{1}{2}}) \\ = 150 \cdot 0,6.$$

Für m Zeitabschnitte ist allgemein

$$E_m = \frac{1}{m} \cdot E_0 \left(\sin 0^\circ + \sin \frac{\pi}{m} + \sin \frac{2\pi}{m} + \dots + \sin \frac{(m-1)\pi}{m} \right).$$

Es läßt sich nun nachweisen, daß die Summe der Sinusfunktionen in der Klammer für großes m den Wert $m \cdot \frac{2}{\pi}$ annimmt, so daß also

$$E_m = E_0 \cdot \frac{2}{\pi} = 0,64 \cdot E_0.$$

Die mittlere elektromotorische Kraft beträgt demnach rund 64 % der maximalen elektromotorischen Kraft. Dasselbe gilt für die mittlere Stromstärke. Diese würde bei der Magnetisierung und der Elektrolyse in Betracht kommen.

Wenn wir von der Selbstinduktion absehen, wenn also die Belastung eine induktionsfreie ist, so ist bei einem Gesamtwiderstande von W Ohm die momentane Stromstärke i :

$$i = \frac{E_0}{W} \sin 2\pi \frac{t}{T} = J_0 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

wo J_0 die der maximalen elektromotorischen Kraft E_0 entsprechende maximale Stromstärke ist.

Stellt man die Änderungen der Stromstärke in analoger Weise graphisch dar, wie es vorhin für die elektromotorische Kraft geschehen ist, so erhält man ebenfalls eine Sinuskurve.

Anmerkung. Es sei $W = 2$ Ohm. Beschreibt man um die Mitte von OB in Fig. 27 einen zweiten Kreis, der BC berührt, so stellt die kleinere Sehne den augenblicklichen Wert der Stromstärke dar.

Bei induktionsfreier Belastung kann man aus der Kurve für die elektromotorische Kraft, wenn man den Widerstand W kennt, leicht die Kurve für die Stromstärke erhalten. Es sei z. B. $W = 2$ Ohm. Wir zeichnen eine hinlänglich große Anzahl von Lotes auf a b in Fig. 26, z. B. bg , hi , und halbieren jedes Lot. Durch die Mittelpunkte wird der Verlauf einer neuen Kurve, der Stromkurve, festgelegt. Man sagt in diesem Falle, es bestehe zwischen dem Strome und der elektromotorischen Kraft Phasengleichheit, oder es bestehe keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Wenn sich also Strom und Spannung in derselben Phase befinden, so ist für $W = 1$ Ohm der Strom zu einer beliebigen Zeit t so viel Ampere stark, wie die Spannung Volt beträgt.

Wenn es sich um Arbeitsleistungen eines Wechselstromes handelt, so kommen nicht die Mittelwerte der Stromstärke und der Spannung in Betracht, sondern die sogen. effektive Stromstärke und die effektive Spannung. Damit wir zu diesen neuen Begriffen gelangen, wollen wir folgende Aufgabe behandeln: Ein Wechselstrom durchfließe einen Widerstand von W Ohm (etwa eine Glühlampe), wie groß ist die während 1 Sekunde in dem Widerstande in Wärme umgesetzte elektrische Energie, wenn die maximale Spannung E_0 Volt beträgt? Wir denken uns die Periode T , die $\frac{1}{50}$ Sekunde betragen möge, in eine größere Anzahl von Zeitabschnitten zerlegt, sehen während jedes Zeitabschnittes Stromstärke und Spannung als konstant an, bestimmen die während eines jeden Intervalls entwickelte Wärme und addieren. Die Anzahl der Zeitabschnitte sei gleich 8.

Bei Gleichstrom von der Stärke i Ampere ist die in $\frac{T}{8}$ Sekunde in dem Widerstande W Ohm erzeugte Wärmemenge gleich $W \cdot i^2 \cdot 0,24 \cdot \frac{T}{8}$ cal. Der Kürze wegen setzen wir den Faktor

$$W \cdot 0,24 \cdot \frac{T}{8} = a.$$

Die in den einzelnen Zeitabschnitten durch den Wechselstrom in der Glühlampe erzeugten Wärmemengen bezeichnen wir mit $q_1, q_2 \dots q_8$.

Erstes Intervall von 0 bis $\frac{T}{8}$: $i_1 = 0$,

$$q_1 = 0;$$

zweites " " $\frac{T}{8}$ " $2 \cdot \frac{T}{8}$: $i_2 = \frac{E_0}{W} \sin \frac{\pi}{4} = J_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$,

$$q_2 = a \cdot \frac{1}{2} J_0^2 \text{ cal.};$$

drittes " " $2 \cdot \frac{T}{8}$ " $3 \cdot \frac{T}{8}$: $i_3 = J_0 \cdot \sin \frac{\pi}{2} = J_0$,

$$q_3 = a \cdot J_0^2 \text{ cal.};$$

viertes " " $3 \cdot \frac{T}{8}$ " $4 \cdot \frac{T}{8}$: $i_4 = J_0 \cdot \sin \frac{3\pi}{4} = J_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$,

$$q_4 = a \cdot \frac{1}{2} J_0^2 \text{ cal.}$$

usw.

Mithin

$$q_1 + q_2 + \dots + q_8 = a \cdot J_0^2 \left(\sin^2 0 + \sin^2 \frac{\pi}{4} + \sin^2 \frac{\pi}{2} + \dots + \sin^2 7 \cdot \frac{\pi}{4} \right) \text{ cal.}$$

$$= a \cdot J_0^2 \left(0 + \frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} + 0 + \frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} \right) \text{ cal.}$$

$$= 4a \cdot J_0^2 = \frac{T}{2} \cdot 0,24 \cdot W \cdot J_0^2 \text{ cal.}$$

Das ist die während einer Periode entwickelte Wärmemenge. Da 1 Sekunde gleich $\frac{1}{T}$ Perioden, so erhalten wir unser Endergebnat, wenn wir den

vorigen Ausdruck mit $\frac{1}{T}$ multiplizieren. Es ist also die in dem Widerstande W in 1 Sekunde erzeugte Wärme

$$Q = 0,24 \cdot W \frac{J_0^2}{2} \text{ cal.}, \text{ oder, da } W \cdot J_0 = E_0, Q = 0,24 \cdot \frac{1}{2} E_0 \cdot J_0 \text{ cal.}$$

Merkwürdigerweise ist unsere Antwort nicht ein angenäherter, sondern der exakte Wert für die erzeugte Wärme¹⁾.

Ein Gleichstrom, der in unserem Widerstande W in 1 Sekunde dieselbe Wärmemenge Q erzeugt, wie unser Wechselstrom, muß eine gewisse Stärke haben, die wir mit J bezeichnen wollen. Also haben wir die Beziehung:

$$0,24 \cdot W \cdot J^2 = 0,24 \cdot W \cdot \frac{J_0^2}{2}$$

oder

$$J = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0.$$

Wenn die durch den Gleichstrom von J Ampere und den Wechselstrom von der Scheitelstromstärke J_0 erzeugten Wärmemengen einander gleich sind, so ist auch die Leistung des Gleichstromes die gleiche wie die Leistung oder der Effekt des Wechselstromes. Man nennt daher $J = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0$ die effektive oder wirksame Stärke des Wechselstromes. Da $\sqrt{\frac{1}{2}} = 0,71$, so beträgt die effektive Stromstärke 71% der maximalen.

Beispiel: Es sei $W = 20$ Ohm, $J_0 = 10$ Amp.; dann ist die effektive Stromstärke gleich 7,1 Amp. Durch einen Gleichstrom von 7,1 Amp. wird in einem Widerstand von 20 Ohm in derselben Zeit dieselbe Wärmemenge erzeugt wie durch einen Wechselstrom, dessen maximale Stärke gleich 10 Amp. ist.

Soll durch unseren Widerstand von W Ohm ein J Amp. starker Gleichstrom fließen, so muß an den Enden des Widerstandes eine Spannung von $J \cdot W$ Volt herrschen. Wir setzen

$$J \cdot W = E.$$

Da nun die Leistung des Gleichstromes gleich $E \cdot J$ Watt und diejenige unseres Wechselstromes gleich $0,24 \cdot \frac{1}{2} E_0 \cdot J_0 \text{ cal.} = \frac{1}{2} E_0 \cdot J_0 \text{ Watt}$, so ist

$$E \cdot J = \frac{1}{2} E_0 \cdot J_0 \quad \text{oder, da } J = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0,$$

$$E \cdot J_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} E_0 \cdot J_0;$$

mithin

$$E = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot E_0.$$

¹⁾ Die Erklärung hierfür liegt in dem folgenden Satze: Teilt man einen Winkel von $360^\circ = 2\pi$ in n gleiche Teile, wo $n > 2$, so ist:

$$\sin^2 0 + \sin^2 2\pi \cdot \frac{1}{n} + \sin^2 2\pi \cdot \frac{2}{n} + \dots + \sin^2 \frac{(n-1)\pi}{n} = \frac{n}{2}.$$

Man kann daher, wenn es sich um Arbeitsleistungen handelt, einen Wechselstrom schon durch drei Gleichströme erzeugen.

Man nennt E oder $\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot E_0$ die wirksame oder effektive Spannung des Wechselstromes.

Multipliziert man also die effektive Spannung mit der effektiven Stromstärke, so erhält man die in einem induktionsfreien Widerstande während 1 Sekunde geleistete Arbeit des Wechselstromes in Watt.

In der Praxis mißt man die effektive Stromstärke und die effektive Spannung. Mit diesen Größen hat man so zu rechnen, als ob man es mit Gleichstrom zu tun hätte (s. Meßapparate).

Wenn man in der angedeuteten Weise, also durch Zerlegung des Wechselstromes in Gleichströme, die Quadrate der Augenblicksstromstärken — so sagt man vielfach statt „momentane Stromstärken“ — addiert und das arithmetische Mittel (den Mittelwert) bildet, so erhält man $\frac{1}{2} \cdot J_0^2$. Da die Quadratwurzel aus dem gefundenen Werte gleich der wirksamen Stromstärke ist, so gilt folgende Definition:

„Als wirksame (effektive) Stromstärke — oder, wenn nichts anderes festgesetzt ist als Stromstärke schlechthin — gilt die Quadratwurzel aus dem zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Augenblicksstromstärken¹⁾.“

Eine entsprechende Definition gilt für die wirksame elektromotorische Kraft oder die Spannung.

Ehe wir den Einfluß der Selbstinduktion berücksichtigen, wollen wir eine sehr wichtige Aufgabe lösen. In zwei Wechselstrommaschinen mögen Ströme erzeugt werden, die dieselbe Periode T haben, es sollen jedoch die größten Werte der beiden elektromotorischen Kräfte 1. voneinander verschieden sein, 2. nicht zur selben Zeit vorhanden sein, und zwar möge die zweite maximale Spannung etwas später auftreten als die erste. Die Werte, die den elektromotorischen Kräften zur Zeit t zukommen, können dann dargestellt werden durch die Ausdrücke

$$e_1 = E_{0,1} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und

$$e_2 = E_{0,2} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right).$$

Der erste Strom hat also seinen größten Wert zur Zeit $t = \frac{T}{4}$, der zweite zur Zeit $t = \frac{T}{4} + \varphi \cdot \frac{T}{2\pi}$, denn für diesen letzteren Wert wird $2\pi \frac{t}{T} - \varphi = \frac{\pi}{2}$.

Stellen wir die beiden elektromotorischen Kräfte in der früher beschriebenen Weise durch Kurven dar und benutzen wir bei der Zeichnung dieselbe gerade Linie, so fallen die Schnittpunkte der beiden Kurven mit der horizontalen Achse nicht zusammen.

Die beiden gekennzeichneten Wechselströme sind in der Phase gegeneinander verschoben, es besteht zwischen ihnen eine Phasenverschiebung.

¹⁾ Siehe G.-T. 3. 1901, S. 435.

Die beiden Ströme mögen durch denselben induktionsfreien Widerstand W fließen, und es sei

$$\frac{E_{0,1}}{W} = J_{0,1}, \quad \frac{E_{0,2}}{W} = J_{0,2}.$$

Dann ist zur Zeit t

$$i_1 = J_{0,1} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und

$$i_2 = J_{0,2} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right).$$

In jedem Momente kommt ein einziger Strom zustande, dessen Wert zur Zeit t gleich der algebraischen Summe der beiden Einzelströme ist:

$$i = J_{0,1} \sin 2\pi \frac{t}{T} + J_{0,2} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right).$$

Es fragt sich nun, wie groß die resultierende effektive Stromstärke ist, wie sie mit Hilfe eines Wechselstromamperemeters gefunden wird, oder wie stark muß ein Gleichstrom sein, wenn durch ihn in dem Widerstande W dieselbe Wärmemenge pro Sekunde erzeugt werden soll wie durch die beiden Wechselströme.

Um die gesuchte Größe zu erhalten, bilden wir das arithmetische Mittel aus den Quadraten der augenblicklichen Stromstärken (i) und ziehen die Quadratwurzel. Die Periode T teilen wir in n gleiche Teile:

1^{ter} Zeitabschnitt von $t = 0$ bis $t = \frac{T}{n}$:

$$i_1^2 = \left(J_{0,1} \sin 2\pi \frac{1}{n} + J_{0,2} \sin \left(2\pi \frac{1}{n} - \varphi \right) \right)^2 = J_{0,1}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{n} \\ + J_{0,2}^2 \sin^2 \left(2\pi \frac{1}{n} - \varphi \right) + 2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \sin 2\pi \frac{1}{n} \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{1}{n} - \varphi \right).$$

2^{ter} Zeitabschnitt von $t = \frac{T}{n}$ bis $t = 2 \cdot \frac{T}{n}$:

$$i_2^2 = J_{0,1}^2 \sin^2 2\pi \frac{2}{n} + J_{0,2}^2 \cdot \sin^2 \left(2\pi \frac{2}{n} - \varphi \right) \\ + 2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \sin 2\pi \frac{2}{n} \cdot \sin \left(2\pi \frac{2}{n} - \varphi \right).$$

.....
n^{ter} Zeitabschnitt von $t = \frac{n-1}{n} T$ bis $\frac{n}{n} T$:

$$i_n^2 = J_{0,1}^2 \cdot \sin^2 2\pi \frac{n}{n} + J_{0,2}^2 \cdot \sin^2 \left(2\pi \frac{n}{n} - \varphi \right) \\ + 2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \sin 2\pi \frac{n}{n} \cdot \sin \left(2\pi \frac{n}{n} - \varphi \right).$$

Bilden wir die Summe $i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_n^2$, so können wir alle Glieder mit $J_{0,1}^2$ zusammenfassen, ebenso alle Glieder mit $J_{0,2}^2$ und endlich alle Glieder mit $2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2}$.

$$i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_n^2 = J_{0,1}^2 \cdot A + J_{0,2}^2 \cdot B + 2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot C,$$

und zwar ist

$$A = \sin^2 2\pi \frac{1}{n} + \sin^2 2\pi \frac{2}{n} + \dots + \sin^2 2\pi \frac{n}{n}.$$

Wir wissen aber schon, daß die Summe auf der rechten Seite den Wert $\frac{n}{2}$ hat (i. S. 52, Fußnote), wenn wir n größer als 2 wählen.

$$B = \sin^2 \left(2\pi \frac{1}{n} - \varphi \right) + \sin^2 \left(2\pi \frac{2}{n} - \varphi \right) + \dots + \sin^2 \left(2\pi \frac{n}{n} - \varphi \right).$$

Auch hier hat die Summe der Quadrate den Wert $\frac{n}{2}$, wenn $n > 2$.

$$C = \sin 2\pi \frac{1}{n} \cdot \sin \left(2\pi \frac{1}{n} - \varphi \right) + \sin 2\pi \frac{2}{n} \cdot \sin \left(2\pi \frac{2}{n} - \varphi \right) \\ + \dots + \sin 2\pi \frac{n}{n} \cdot \sin \left(2\pi \frac{n}{n} - \varphi \right).$$

Der Ausdruck rechts hat, wie man beweisen kann, den Wert $\frac{n}{2} \cdot \cos \varphi$.

Daher ist

$$i_1^2 + i_2^2 + \dots + i_n^2 = \frac{n}{2} \cdot (J_{0,1}^2 + J_{0,2}^2 + 2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \cos \varphi).$$

Dividieren wir durch n , so erhalten wir das Quadrat der resultierenden effektiven Stromstärke, die wir mit J bezeichnen wollen:

$$J^2 = \frac{1}{2} J_{0,1}^2 + \frac{1}{2} J_{0,2}^2 + J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \cos \varphi.$$

Würde nur der erste Wechselstrom durch den Widerstand W fließen, so wäre die effektive Stromstärke J_1 durch die Gleichung bestimmt:

$$J_1^2 = \frac{1}{2} J_{0,1}^2.$$

Setzen wir entsprechend

$$J_2^2 = \frac{1}{2} J_{0,2}^2,$$

so ist J_2 die effektive Stromstärke, wenn nur der zweite Wechselstrom durch den Widerstand fließt. Unsere Gleichung geht über in die folgende:

$$J^2 = J_1^2 + J_2^2 + (\sqrt{2} \cdot J_1) \cdot (\sqrt{2} \cdot J_2) \cdot \cos \varphi = J_1^2 + J_2^2 + 2 \cdot J_1 \cdot J_2 \cdot \cos \varphi.$$

Dieses Resultat läßt sich geometrisch deuten. Es sei in Fig. 28 $AB = J_1^1$,

¹⁾ AB soll gleich so viel Längeneinheiten, etwa mm, sein, wie J Ampere beträgt.

$AC = J_2$, $\sphericalangle BAC = \varphi$, BD parallel AC und CD parallel AB . Dann ist nach einem bekannten trigonometrischen Satze

$$AD^2 = AB^2 + BD^2 - 2 \cdot AB \cdot BD \cdot \cos(180^\circ - \varphi)$$

oder, da $\cos(180^\circ - \varphi) = -\cos \varphi$,

$$AD^2 = J_1^2 + J_2^2 + 2J_1 \cdot J_2 \cdot \cos \varphi.$$

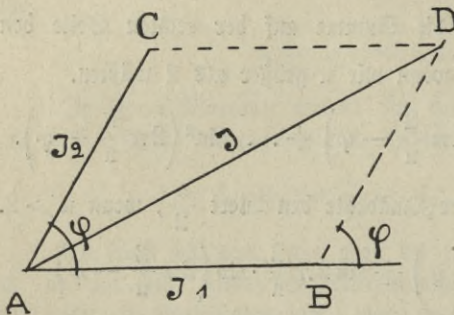


Fig. 28.

Durch AD wird daher J dargestellt. Man muß also, um die resultierende effektive Stromstärke (die Stärke eines äquivalenten Gleichstromes) zu erhalten, dasselbe Verfahren anwenden wie bei der Zusammensetzung von Kräften in der Mechanik (Parallelogramm der Kräfte). Wie man sich umgekehrt eine wirklich vorhandene Kraft in zwei Kräfte, die sogen. Komponenten,

zerlegt denken kann, so kann man sich auch einen Wechselstrom in zwei Ströme zerlegt denken.

Multiplizieren wir die Gleichung

$$J^2 = \frac{1}{2} J_{0,1}^2 + \frac{1}{2} J_{0,2}^2 + J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \cos \varphi$$

mit 2 und berücksichtigen wir, daß $2 \cdot J^2$ das Quadrat der maximalen Stromstärke desjenigen Wechselstromes ist, den man sich statt der beiden wirklich vorhandenen Wechselströme durch den Widerstand W fließend denken kann, oder daß $2J^2$ das Quadrat der resultierenden maximalen Stromstärke ist, so sieht man ein, daß man die resultierende maximale Stromstärke in derselben Weise aus den Komponenten $J_{0,1}$ und $J_{0,2}$ erhalten kann wie die effektive resultierende Stromstärke. Wäre also in unserer Fig. 28 $AB = J_{0,1}$, $AC = J_{0,2}$ und wieder $\sphericalangle BAC = \varphi$, so wäre $AD = J_0$.

Für die elektromotorischen Kräfte (maximale und effektive) gilt Analoges wie für die Stromstärken. Denn multiplizieren wir die Gleichung

$$J_0^2 = J_{0,1}^2 + J_{0,2}^2 + 2 \cdot J_{0,1} \cdot J_{0,2} \cdot \cos \varphi$$

mit W^2 , so ergibt sich, da $J_0 \cdot W = E_0$ c .

$$E_0^2 = E_{0,1}^2 + E_{0,2}^2 + 2 \cdot E_{0,1} \cdot E_{0,2} \cdot \cos \varphi$$

und

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi.$$

Einfluß der Selbstinduktion. Indem wir noch immer an der Annahme festhalten, daß die elektromotorische Kraft einer Wechselstrommaschine

und daher auch die Spannung in einem Teile des Stromkreises durch eine Sinuslinie dargestellt werde, so daß

$$e = E_0 \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

wollen wir nunmehr den Einfluß der Selbstinduktion verfolgen. Daß die Selbstinduktion bei Wechselströmen eine sehr wichtige Rolle spielt, liegt auf der Hand, weil ja die Selbstinduktion bei jeder Änderung der Stromstärke ins Leben tritt.

Es sei ein Elektromagnet, dessen Spule einen Widerstand von 0,15 Ohm hat, mit einer Gleichstromquelle, etwa einem Akkumulator, verbunden. Wird durch die Spule ein Strom von 6 Ampere geschickt, so zeigt ein mit den Klemmen des Elektromagnets verbundenes Voltmeter eine Spannung von $6 \cdot 0,15 = 0,9$ Volt an. Schließen wir aber unseren Elektromagnet an eine Wechselstromquelle an und regulieren wir den Strom so, daß er wieder 6 Ampere (effektiv) stark ist, so zeigt ein Wechselstromvoltmeter eine höhere Spannung als 0,9 Volt an. Bei dem benutzten Elektromagnet betrug sie 10,2 Volt. Näherte man den Polen weiches Eisen, einen Anker, so wurde die Potentialdifferenz noch größer, sie stieg bis zu 12 Volt. Die Elektromagnetspule verhält sich also dem Wechselstrom gegenüber so, als ob sie im ersten Falle (ohne Anker) einen Widerstand von 1,7 Ohm hätte. Es wäre nun falsch, anzunehmen, in der Spule und in dem Eisen (Hysteresisverluste, Wirbelströme) würden in 1 Sekunde $10 \cdot 6 = 60$ Watt in Wärme umgesetzt. 60 Watt ist nur die scheinbare Leistung des Wechselstromes. Daß die Spannung bei Benutzung von Wechselstrom größer ist als bei Gleichstrom, ist auf die Selbstinduktion zurückzuführen. Gehen wir zu einem Beweise unserer Behauptung übergehen, wollen wir eine Analogie besprechen, die geeignet ist, das Verständnis der folgenden theoretischen Darlegungen zu erleichtern.

Es sei A (Fig. 29) ein Gefäß mit Stutzen, CD eine Röhre, die mit A durch einen Gummischlauch verbunden sei und in dem zweiten Behälter B mündet. Wir wollen der Einfachheit halber ferner annehmen, daß durch Zu- oder Abfluß einer kleineren Menge Wasser, wie sie im folgenden in Betracht kommt, eine Änderung des Niveaus weder in A noch in B bewirkt wird. Steht das Wasser in beiden Gefäßen gleich hoch, so fließt kein Strom durch die Leitung. Heben wir aber A empor, so kommt ein von A nach B fließender Strom zustande, der in jedem Augenblicke, wenn wir uns das kleine in CD gezeichnete Wasserrad R vorläufig arretiert denken, proportional der vorhandenen Niveaudifferenz ist. Bewegen wir A abwärts bis zur Anfangslage, so fließt durch CD ein Strom, dessen Stärke mit dem Höhenunterschiede der beiden Wasserpiegel abnimmt; die Stromrichtung ist dieselbe wie eben. Sinkt der Behälter A noch tiefer, so fließt ein Strom von D nach C hin, dessen Stärke mit der negativen Höhe — so wollen wir den Abstand des Bodens von der Ebene, in der er sich ursprünglich befand, jetzt nennen — wächst. Wenn wir also A bis zur Höhe $+h$ Meter aufwärts und bis zur Höhe $-h$ Meter abwärts bewegen, dann wieder emporheben u. s. f., so wird die Leitung von

einem Wechselstrome durchflossen, und zwar befindet sich dieser Strom mit der treibenden Kraft, nämlich dem Drucke, stets in derselben Phase.

Betrachten wir jetzt den Einfluß, den das Schaufelrad R auf die Strömung ausübt. Wird A gehoben, so wird R in Rotation versetzt, und das fließende Wasser muß die Trägheit des Rades überwinden. Die Folge ist, daß der Strom während der Aufwärtsbewegung eine geringere Stärke besitzt wie eben. Der Strom hinkt gleichsam hinter dem Drucke nach. Bei der Abwärtsbewegung des Behälters ist der Strom stärker als er bei Abwesenheit des Rades sein würde, da das Rad, in dem Energie aufgespeichert ist, Wasser aus A nach B befördert. Befindet sich A in der anfänglichen Stellung, so hört das Strömen des Wassers noch nicht auf, und erst bei einer gewissen negativen Höhe kommt der Rückstrom zustande. Die Trägheit des Schaufelrades verhindert also, daß sich Strom und Druck in derselben Phase befinden.

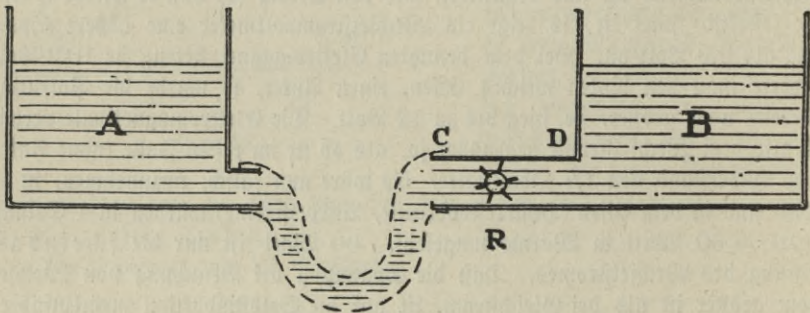


Fig. 29.

Der Trägheit des Wasserrades, die sich einer Änderung der Stromrichtung widersetzt, entspricht diejenige Eigenschaft (bezw. Größe), die man bei Wechselströmen als Reaktanz bezeichnet, und die eine Folge der Selbstinduktion ist. Wächst nämlich die Spannung, so nimmt wegen der gegen electromotorischen Kraft der Elektromagnetpule, um auf diese zurückzukommen, der Strom nicht in demselben Tempo zu wie die Spannung, sondern langsamer. Wird die electromotorische Kraft, nachdem sie ihren Scheitelwert erreicht hat, kleiner, so sucht die Selbstinduktion die Abnahme des Stromes zu verhindern. Wechselst die Spannung ihr Vorzeichen ($e = 0$), so hat i noch einen gewissen positiven Wert. Erst wenn e einen gewissen, von der Größe der Selbstinduktion und dem Ohmschen Widerstand abhängigen negativen Wert erreicht hat, kehrt sich der Strom um. Der Strom hat also in keinem Momente den der electromotorischen Kraft der Maschine und dem Ohmschen Widerstande w der Spule entsprechenden Wert:

$$\frac{E_0}{w} \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Da sich die Spule allen Änderungen der Stromstärke widersetzt, so zeigt sie ein solches Verhalten, als ob sie einen größeren Widerstand hätte als bei Gleichstrom. Ferner befinden sich Strom und Spannung nicht mehr, wie bei

induktionsfreier Belastung in derselben Phase; wohl aber haben Strom und Spannung dieselbe Periode. Da die Stromphase gegen die Spannungsphase in der Weise verschoben ist, daß der Strom hinter der Spannung zurückbleibt, so sagt man, der Strom habe Nachheilung. Berücksichtigen wir noch, daß bei sinusartigem Verlaufe der Spannung auch die Stromlinie eine Sinuskurve ist, so ergibt sich folgendes: Wenn wir die zeitliche Änderung der elektromotorischen Kraft wie früher (vergl. S. 49 Fig. 27) mittels eines Kreises und einer rotierenden Sehne darstellen (Fig. 30) und wieder die Annahme machen, daß $w = 2 \text{ Ohm}$ sei, so müssen wir unter Berücksichtigung der Selbstinduktion den Radius des für die Stromstärke bestimmten Kreises kleiner als $\frac{1}{2} AB$ machen, ferner gibt jetzt nicht mehr das innerhalb des kleineren Kreises liegende Stück der Sehne $e = E_0 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$ die zur Spannung e zugehörige Strom-

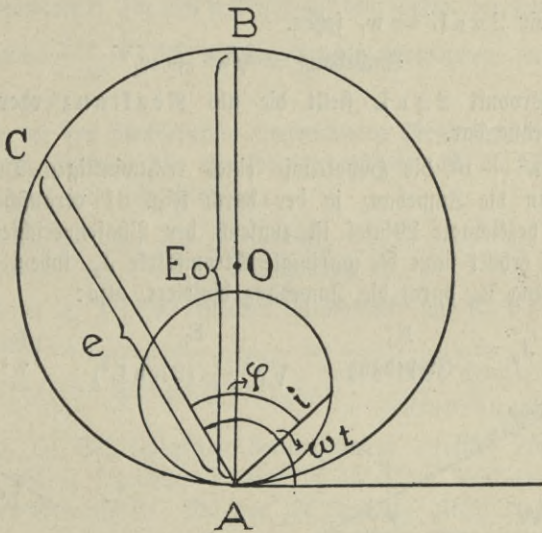


Fig. 30.

stärke an, sondern eine Sehne in dem kleineren Kreise, die mit e einen gewissen Winkel bildet (s. Fig. 30). Dieser Winkel, den man mit φ bezeichnet, ist ein Maß für die Phasenverschiebung zwischen dem Strome und der Spannung, und man nennt ihn den Phasenverschiebungswinkel oder auch kurz die Phasenverschiebung.

Nennen wir die maximale Stromstärke J_0 , so ist

$$i = J_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right).$$

Der Strom hat also den Wert Null, wenn

$$2\pi \frac{t}{T} - \varphi = 0, \text{ d. h. wenn } t = \frac{\varphi \cdot T}{2\pi},$$

und er hat seinen größten Wert, wenn

$$2\pi \frac{t}{T} - \varphi = \frac{\pi}{2}, \text{ d. h. wenn } t = \frac{\varphi \cdot T}{2\pi} + \frac{T}{4}.$$

Ist z. B. $\varphi = 60^\circ$, so hat der Strom den Wert Null, wenn $t = \frac{60 \cdot T}{360} = \frac{1}{6} T$ Sekunde. Zu dieser Zeit hat die Spannung den Wert

$$e = E_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{6} = E_0 \cdot \sin 60^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot E_0 = 0,85 E_0.$$

Den scheinbaren Widerstand, den die Spule besitzt, nennt man die Impedanz. Diese kann man berechnen, wenn man den Ohmschen Widerstand w , die Periodenzahl n und den Selbstinduktionskoeffizienten L kennt, und zwar ist

$$\text{Impedanz} = \sqrt{w^2 + (2\pi nL)^2}$$

oder, wenn wir $2\pi nL = w_1$ setzen.

$$\text{Impedanz} = \sqrt{w^2 + w_1^2}$$

Das Produkt $2\pi nL$ stellt die als Reaktanz oder Induktanz bezeichnete Größe dar.

Da $\sqrt{a^2 + b^2}$ die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks bedeutet, so erhält man die Impedanz in der durch Fig. 31 veranschaulichten Weise. Der mit φ bezeichnete Winkel ist zugleich der Phasenverschiebungswinkel.

Ferner erhält man die maximale Stromstärke J_0 , indem man die maximale Spannung E_0 durch die Impedanz dividiert, also:

$$J_0 = \frac{E_0}{\text{Impedanz}} = \frac{E_0}{\sqrt{w^2 + (2\pi nL)^2}} = \frac{E_0}{w_1}.$$

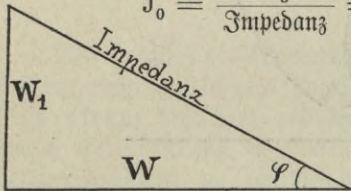


Fig. 31.

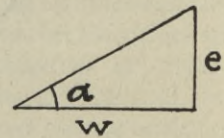


Fig. 32.

Der Unterschied zwischen Gleichstrom oder Wechselstrom bei induktionsfreier Belastung einerseits und Wechselstrom mit Selbstinduktion (induktive Belastung) andererseits tritt in den folgenden Figuren zutage. Fließt durch einen Widerstand von w Ohm Gleichstrom, und beträgt die Spannung an den Endpunkten des Leiters e Volt, so ist (s. Fig. 32, in der die horizontale Kathete gleich w sein soll)

$$J = \text{tg } \alpha, \text{ da ja } \text{tg } \alpha = \frac{e}{w}.$$

Ist der Selbstinduktionskoeffizient L der Strombahn verschwindend klein, so bezieht sich unsere Fig. 32 auch auf Wechselstrom, und $\text{tg } \alpha$ ist die momentane Stromstärke, wenn e die momentane Spannung ist. — Bei Wechselstrom mit induktiver Belastung müssen wir zwei rechtwinklige Dreiecke mit gemeinsamer

Hypotenuse (Impedanz) zeichnen (s. Fig. 33). Die trigonometrische Tangente des Winkels α ist gleich der Stromstärke.

Aus der Fig. 31 folgt, daß

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi nL}{w}$$

Wenn also der wirkliche oder Ohmsche Widerstand w in einem stromdurchflossenen Leiter, z. B. einer Spule, ein sehr kleiner ist im Vergleich zu $2\pi nL$, so wird $\operatorname{tg} \varphi = \infty$ oder $\varphi = 90^\circ$.

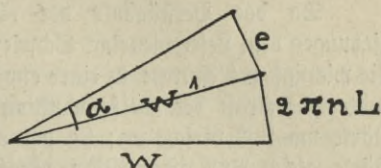


Fig. 33.

Fließt also ein Wechselstrom durch eine Induktionspule, deren Ohmscher Widerstand verschwindend klein ist, so bleibt der Strom 90° hinter der Spannung zurück. In diesem Falle steht der Vektor der Stromstärke (s. Fig. 30) senkrecht auf dem Vektor der Spannung (AC). Da in dem Bruche $\frac{2\pi nL}{w}$ nur positive Größen vorkommen, so liegt φ stets zwischen 0° und 90° .

Mit Hilfe der für Wechselstrom eingerichteten Meßinstrumente mißt man auch bei Phasenverschiebung die effektive Stromstärke und die effektive Spannung. Multipliziert man die Gleichung

$$J_0 = \frac{E_0}{\text{Impedanz}}$$

mit $\sqrt{\frac{1}{2}}$, so ist, da $J_0 \sqrt{\frac{1}{2}}$ die effektive Stromstärke und $E_0 \sqrt{\frac{1}{2}}$ die effektive Spannung bedeutet,

$$J = \text{effektive Stromstärke} = \frac{\text{effektive Spannung}}{\text{Impedanz}}$$

Die durch die Selbstinduktion hervorgerufene effektive elektromotorische Kraft, die wir mit e_s bezeichnen wollen, ist gleich der Reaktanz multipliziert mit der effektiven Stromstärke. Da nun die Reaktanz gleich $2\pi nL$ ist, so ist

$$e_s = 2\pi nL \cdot J.$$

Man mißt aber durch ein mit den Klemmen der Spule verbundenes Voltmeter nicht e_s , sondern das Produkt aus Impedanz und J , weil außer e_s noch der durch den Ohmschen Widerstand bedingte Spannungsverlust wJ vorhanden ist. Daß man die beiden Spannungen nicht algebraisch addieren darf, ergibt sich durch folgende Überlegung. Diejenige Spannung, die zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes dient, befindet sich mit dem Strom in derselben Phase. Die in der Spule induzierte elektromotorische Kraft dagegen ist gegen die Phase des Stromes um 90° verschoben. Daher muß man e_s und $w \cdot J$ zu Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks machen. Durch die Hypotenuse wird dann die gesuchte Klemmspannung dargestellt. In dem neuen Dreieck ist der von der Hypotenuse und der Kathete wJ gebildete Winkel wieder der Phasenverschiebungswinkel φ . Denn

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi n L}{w} = \frac{2\pi n L J}{w \cdot J} = \frac{\text{elektromotorische Kraft der Selbstinduktion}}{\text{Ohmschen Spannungsverlust}}$$

Da das Verständnis der eben beschriebenen Erscheinungen und Beziehungen dem Leser vielleicht Schwierigkeiten bereitet, so wollen wir noch einmal die wichtigsten Resultate in einer etwas veränderten Form angeben: Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist in jedem Momente gegen die Stromstärke um 90° verschoben; sie hat also ihren größten Wert, wenn die Stromstärke gleich Null ist. Wäre der Ohmsche Widerstand im Stromkreise gleich Null, so würde die effektive Klemmspannung der Spule gleich der gegenelektromotorischen Kraft der Spule sein. Da in Wirklichkeit der Widerstand nicht Null ist, so ist die Klemmspannung (effektiv) größer als die effektive elektromotorische Kraft der Selbstinduktion. Um den Ohmschen (wahren) Widerstand der Spule zu überwinden, können wir uns eine besondere elektromotorische Kraft an den Enden der Spule wirksam denken; diese befindet sich mit dem Strome in Phasegleichheit. Die betreffende elektromotorische Kraft (effektiv) nennen wir e_w , und zwar ist $e_w = w \cdot J$. Die Klemmspannung ist die Resultierende aus der effektiven elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion und aus e_w . Da die beiden Komponenten um 90° gegeneinander verschoben sind, so erhält man die Klemmspannung e als Diagonale eines Rechtecks, dessen Seiten gleich e_s und e_w sind (s. S. 56). Mithin

$$e^2 = e_s^2 + e_w^2.$$

Entsprechendes gilt für die maximalen Werte. Ist also E_0 der maximale Wert der Klemmspannung, E_s der maximale Wert der Selbstinduktion und $E_w = w \cdot J_0$, so ist

$$E_0^2 = E_s^2 + E_w^2.$$

Wir wollen an der Hand eines Beispiels zeigen, wie man den Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule und den Phasenverschiebungswinkel aus Größen, die der Messung leicht zugänglich sind, berechnen kann. Durch eine Spule, deren Ohmscher Widerstand $0,5 \text{ Ohm}$ beträgt, werde ein Wechselstrom von 50 Perioden geschickt. Die gemessene Klemmspannung betrage 6 Amp. , die Stromstärke 30 Volt .

Wir berechnen zuerst die Impedanz w^1 .

$$w^1 = \frac{30}{6} = 5 \text{ Ohm.}$$

In der Gleichung

$$w^1 = \sqrt{w^2 + (2\pi \cdot n \cdot L)^2}$$

ist jetzt nur L unbekannt.

$$(2\pi n L)^2 = (w^1)^2 - w^2 = 25 - 0,25 = 24,75$$

$$100 \cdot 3,14 \cdot L = \sqrt{24,75} = 5 \text{ (angenähert),}$$

$$L = \frac{5}{314} = 0,016.$$

Um φ zu erhalten, benutzen wir die Gleichung

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi n L}{w} = \frac{5}{0,5} = 10,$$

φ ist also ungefähr gleich $78^\circ 50'$.

Sind zwei Induktionsspulen hintereinander geschaltet, so besteht in jeder eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Klemmspannung und die Phasenverschiebungswinkel sind im allgemeinen verschieden groß. Außerdem kommt noch die Phasenverschiebung der beiden Spulen als ganzes aufgefaßt in Betracht. Den Phasenverschiebungswinkel der Kombination φ finden wir aber in analoger Weise wie früher. Sind nämlich w_1 und w_2 die wirklichen Widerstände der beiden Spulen, L_1 und L_2 deren Selbstinduktionskoeffizienten, so können wir die beiden Spulen als eine einzige auffassen, deren Ohmscher Widerstand gleich $w_1 + w_2$ und deren Selbstinduktionskoeffizient gleich $L_1 + L_2$ ist. Bezeichnen wir daher die Impedanz der Kombination mit W^1 , so ist

$$W^1 = \sqrt{(w_1 + w_2)^2 + [2 \pi n (L_1 + L_2)]^2}.$$

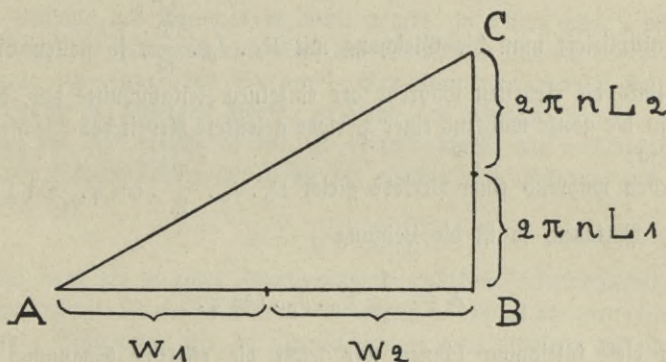


Fig. 34.

Wir erhalten also φ , wenn wir ein rechtwinkliges Dreieck zeichnen, dessen Katheten gleich $w_1 + w_2$ und $2 \pi n (L_1 + L_2)$ sind (s. Fig. 34). Der Winkel CAB ist der gesuchte Winkel φ . Fließt durch die beiden Spulen ein Strom von J Ampere, so ist die Klemmspannung der ersten Spule gleich $w_1 \cdot J = J \sqrt{w_1^2 + (2 \pi n L_1)^2}$ und diejenige der zweiten gleich $w_2 \cdot J = J \sqrt{w_2^2 + (2 \pi n L_2)^2}$, während die Klemmspannung für beide Spulen durch $W^1 \cdot J$ gegeben ist.

Sind zwischen zwei Punkten A und B zwei induktive Widerstände parallel geschaltet, und nennen wir die Ohmschen Widerstände w_1 und w_2 , die Selbstinduktionskoeffizienten L_1 und L_2 , so verhalten sich die beiden Ströme i_1 und i_2 umgekehrt wie die Impedanzen, also

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{\sqrt{w_2^2 + (2 \pi n L_2)^2}}{\sqrt{w_1^2 + (2 \pi n L_1)^2}}$$

Wir wollen uns jetzt die Aufgabe stellen, die Leistung eines Wechselstromes auf elementarem Wege für den Fall zu bestimmen, daß zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung besteht, die durch den Winkel φ gemessen wird. Bei sinusartigem Verlaufe der elektromotorischen Kraft ist

$$e = E_0 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} \text{ und } i = J_0 \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right),$$

wo $J_0 = E_0$ dividiert durch die Impedanz ist. Wir zerlegen auch jetzt die Periode in m Zeitabschnitte, sehen während eines jeden Zeitabschnittes Spannung und Stromstärke als konstant an und bestimmen die Einzelarbeiten. Wir benutzen für die Ableitung den schon früher formulierten Satz: Ist m eine ganze Zahl, die größer als 2 ist, so gilt die Gleichung:

$$\begin{aligned} \sin 2\pi \frac{1}{m} \cdot \sin \left(2\pi \frac{1}{m} - \varphi \right) + \sin 2\pi \frac{2}{m} \cdot \sin \left(2\pi \frac{2}{m} - \varphi \right) + \dots \\ + \sin 2\pi \frac{m}{m} \cdot \sin \left(2\pi \frac{m}{m} - \varphi \right) = \frac{m}{2} \cdot \cos \varphi. \end{aligned}$$

Multipliziert man die Gleichung mit $E_0 \cdot J_0 \cdot \frac{T}{m}$, so stellen die Summanden links die Arbeiten während der einzelnen Zeitabschnitte dar, die rechte Seite also die ganze während einer Periode geleistete Arbeit des Wechselstromes. Es ist also:

Arbeit während einer Periode gleich $E_0 \cdot J_0 \cdot \frac{T}{2} \cdot \cos \varphi$. Da 1 Sekunde gleich $\frac{1}{T}$ Perioden, so ist die Leistung

$$A = \frac{1}{2} E_0 \cdot J_0 \cdot \cos \varphi.$$

In diese Gleichung können wir leicht die effektive Spannung und die effektive Stromstärke einführen, die wie bei induktionsfreier Belastung durch die Gleichungen

$$J = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0 \text{ und } E = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot E_0$$

mit den Maximalwerten verknüpft sind. Da nämlich $\frac{1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$, so können wir schreiben:

$$A = \left(\sqrt{\frac{1}{2}} E_0 \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{2}} J_0 \right) \cdot \cos \varphi = E \cdot J \cdot \cos \varphi \text{ Watt.}$$

Man erhält also die wirkliche Leistung eines Wechselstromes in einem induktiven Widerstande, wenn man das Produkt aus der effektiven Spannung an den Enden des Widerstandes und der effektiven Stromstärke mit dem Cosinus des Phasenverschiebungswinkels multipliziert. Da $\cos \varphi < 1$, ausgenommen wenn $\varphi = 0^\circ$ — induktionsfreier Widerstand —, so ist die wirkliche Leistung kleiner als die scheinbare $E \cdot J$, wie man sie mittels des Volt- und Amperemeters findet. Die wirkliche Leistung gibt man in Watt, die scheinbare in Volt-Ampere an.

Da der Stromvektor mit dem Spannungsvektor den Winkel φ bilden muß, so läßt sich unser Resultat auch folgendermaßen deuten. $J \cdot \cos \varphi$ ist die Projektion des Vektors der effektiven Stromstärke auf den Vektor der effektiven Spannung, also die Strecke p in Fig. 35. Da nun das Produkt $E \cdot p$ die

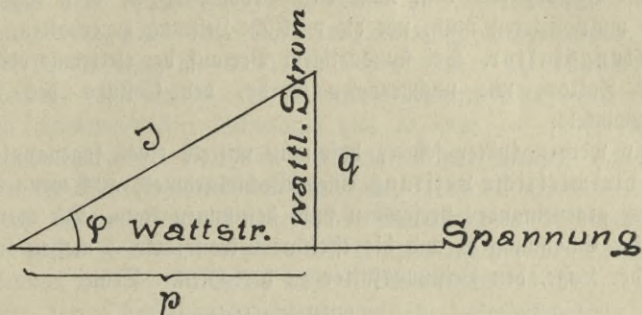


Fig. 35.

wirkliche Leistung des Stromes in Watt angibt, so nennt man p die Wattkomponente des Stromes oder kurz den Wattstrom und die auf p senkrechte Komponente den wattlosen Strom¹⁾. Der Wattstrom befindet sich also mit der Spannung in derselben Phase, während der wattlose Strom gegen die Spannung um 90° verschoben ist. Es ist zu beachten, daß nach der Definition die effektive Stromstärke nicht gleich der algebraischen Summe aus p und q ist, sondern daß

$$J = \sqrt{p^2 + q^2}.$$

Will man die in einer Induktionspule und den Zuleitungsdrähten durch den Strom erzeugte Joulesche Wärme berechnen, so kommt der ganze Strom J in Betracht. Man muß also die Querschnitte so groß wählen, als ob man es mit Gleichstrom von J Ampere zu tun hätte. Da also auch der wattlose Strom an der Wärmeerzeugung beteiligt ist, während er für die Arbeitsleistung, etwa in einem Elektromotor, nicht in Betracht kommt, so wird durch den wattlosen Strom die Leitung unnützerweise belastet.

Wir können uns auch in jedem Momente den vorhandenen Strom in zwei Komponenten zerlegt denken, von denen wir die eine als den momentanen Wattstrom und die andere als den momentanen wattlosen Strom ansehen

¹⁾ Wir machen darauf aufmerksam, daß die Zerlegung des Stromes in zwei Komponenten nur eine gedachte ist, daß also die Komponenten nur gedachte sind. Man wird vor Irrtümern bewahrt, wenn man die Zerlegung des Stromes mit der Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten vergleicht. Fällt nämlich die Richtung einer Kraft nicht zusammen mit der Bewegungsrichtung, wie es z. B. der Fall ist, wenn ein Körper mittels einer schiefen Ebene gehoben wird, so denkt man sich die wirklich vorhandene Kraft durch zwei Komponenten ersetzt, in eine mit der Bewegungsrichtung zusammenfallende und in eine auf dieser senkrecht stehende. Erstere kommt in Betracht, wenn man die Arbeit bestimmen will, durch die letztere wird der Druck gemessen.

können. Die algebraische Summe dieser beiden Komponenten muß natürlich gleich dem in der betrachteten Zeit wirklich vorhandenen Strome sein. p und q sind die Effektivwerte der beiden Komponenten (wir erinnern an den auf S. 56 abgeleiteten Satz).

Den Faktor, mit dem man das Produkt $E \cdot J$, d. h. die scheinbare Leistung, multiplizieren muß, um die wirkliche Leistung zu erhalten, nennt man den Leistungsfaktor. Bei sinusartigem Verlauf der elektromotorischen Kraft ist dieser Faktor, wie nachgewiesen wurde, der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels.

Wir werden später sehen, daß man mittels eines sogenannten Wattmeters die wirkliche Leistung eines Wechselstromes, auch wenn Strom und Spannung gegeneinander verschoben sind, bestimmen kann. Da man nun auch die effektive Spannung E und die effektive Stromstärke J messen kann, so ist man in der Lage, den Leistungsfaktor zu berechnen. Denn

$$\cos \varphi = \frac{\text{Wirkliche Leistung}}{E \cdot J}$$

Wenn man die auf eine Wechselstrommaschine seitens einer Kraftmaschine übertragene mechanische Arbeit ermitteln will, so kommt nur die wirkliche Leistung des Wechselstromes in Betracht.

Um das Verständnis der vorhergehenden theoretischen Darlegungen zu erleichtern und die Bedeutung der neu eingeführten Begriffe noch einmal vor Augen zu führen, wollen wir einen bestimmten Fall behandeln:

Durch eine Spule mit Eisenkern (Elektromagnet) fließe ein Wechselstrom; der Ohmsche Widerstand der Spule betrage 0,15 Ohm. Mittels geeigneter Meßapparate (s. Meßinstrumente) sei ermittelt:

Die Nennspannung E zu 10 Volt, die Stromstärke J zu 6 Ampere und die wirkliche Leistung zu 36 Watt.

Es ist

die scheinbare Leistung = $6 \cdot 10$ Volt-Ampere,

der Leistungsfaktor $\cos \varphi = \frac{\text{wirkliche Leistung}}{\text{scheinbare Leistung}} = \frac{36}{60} = 0,6$

die Wattkomponente $p = \frac{\text{wirkliche Leistung}}{\text{Spannung}} = \frac{36}{10} = 3,6$ Ampere,

da $E \cdot p$ die wirkliche Leistung ist,

die wattlose Komponente $q = \sqrt{J^2 - p^2} = \sqrt{6^2 - 3,6^2} = 4,8$ "

der Ohmsche Spannungsverlust $e_1 = 0,15 \cdot 6 = 0,9$ Volt

die effektive elektromotorische Kraft der Selbstinduktion $e_s = \sqrt{E^2 - (wJ)^2} = \sqrt{10^2 - 0,9^2} = 9,9$ Volt

der Energieverlust durch Stromwärme = $wJ^2 = 0,15 \cdot 36 = 5,4$ Watt.

Da die wirkliche Leistung 36 Watt beträgt, so ist der Energieverlust durch Hysteresis und Wirbelströme (Eisenverluste) gleich $36 - 5,4 = 30,6$ Watt. Es werden also in dem Eisenkern in jeder Sekunde 0,24 · 30,6 cal. erzeugt.

Wir haben früher gesehen, daß Kraftlinien erzeugt werden, wenn durch einen Leiter ein Strom fließt, und daß das Feld besonders stark ist, wenn der Leiter ein Solenoid ist. Es fragt sich nun, ob die Kraftlinien auf die Wattkomponente oder die wattlose Komponente zurückzuführen sind. Da durch das Entstehen und Verschwinden des Feldes die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion und diese durch den Kraftlinienfluß hervorgerufen wird, so schließen wir, daß durch die wattlose Komponente die Kraftlinien erzeugt werden. Ist nämlich ein Widerstand nahezu induktionsfrei — einen vollkommen induktionsfreien Widerstand gibt es nicht —, so ist die wattlose Komponente verschwindend klein und das Feld ist sehr schwach. Ist ferner bei einer Spule der Ohmsche Widerstand sehr klein, so ist die wattlose Komponente nahezu gleich der gemessenen Stromstärke. Berücksichtigen wir noch, daß die Spule ein starkes Feld hat, obschon die Wattkomponente verschwindend klein ist, so erkennen wir die Richtigkeit unserer Behauptung.

Außer dem Ohmschen Widerstande und der Selbstinduktion spielt bei Wechselströmen noch die Kapazität eine Rolle. Ehe wir den Einfluß der Kapazität in einem Wechselstromkreise behandeln, wollen wir uns zunächst mit einigen neuen Begriffen vertraut machen.

Es seien P_1 und P_2 in Fig. 36 zwei Metallplatten, deren Oberflächen parallel laufen. Verbinden wir P_1 und P_2 mit den Polen einer Gleichstromquelle, so fließt so lange Elektrizität nach den beiden Platten hin, bis sie die gleichen Potentiale besitzen, wie die Pole der Stromquelle. Die durch die Drähte fließende Elektrizitätsmenge oder der Ladungsstrom ist um so größer, je größer die Oberflächen der Platten sind und je kleiner deren Abstand ist. Wir hatten stillschweigend angenommen, daß das die beiden Platten trennende Medium Luft sei. Wir können aber auch das Medium Luft durch ein anderes, die Elektrizität nicht leitendes ersetzen, etwa durch Glas (Leydener Flasche), paraffiniertes Papier, Glimmer zc. Man nennt einen Apparat, bestehend aus zwei Metallblättern (Stanniol), die durch eine die Elektrizität nicht leitende Substanz voneinander getrennt sind, einen Kondensator oder Ansammlungsapparat für die Elektrizität. Das isolierende Medium zwischen den Metallbelegungen heißt Dielektrikum. Diejenige Elektrizitätsmenge, die man einem Kondensator zuführen muß, um ihn bis zum Potential 1 Volt zu laden, oder die der Kondensator aufnimmt, wenn die ladende elektromotorische Kraft 1 Volt beträgt, nennt man die Kapazität (Fassungsvermögen) des Kondensators. Die Kapazität hängt nicht nur von der Größe der Oberfläche der Belegungen, der sie proportional ist, und der Dicke der isolierenden Zwischenschicht, der sie umgekehrt proportional ist,

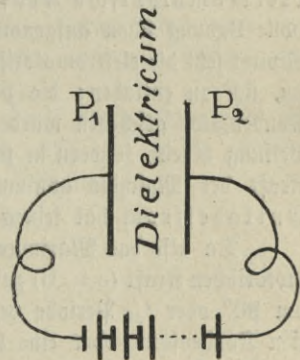


Fig. 36.

sondern auch von der Natur des Dielektrikums ab (Dielektrizitätskonstante).

Nennt man die Kapazität eines Kondensators C , so nimmt er, wenn die ladende elektromotorische Kraft E Volt beträgt, die Elektrizitätsmenge

$$Q = C \cdot E$$

auf.

Als Einheit der Kapazität dient das Farad, und zwar ist die Kapazität $= 1$ Farad, wenn der Kondensator die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb aufnehmen kann, wenn die ladende elektromotorische Kraft 1 Volt beträgt. Da das Farad eine außerordentlich große Einheit ist, von der in der Praxis immer nur sehr kleine Bruchteile vorkommen würden, so hat man eine kleinere Einheit eingeführt, nämlich das Mikrofarad:

$$1 \text{ Mikrofarad} = \frac{1 \text{ Farad}}{1 \text{ Million}} = 1 \text{ Farad} \cdot 10^{-6}.$$

Wir wollen jetzt annehmen, daß ein Kondensator mit den Polen einer Wechselstrommaschine verbunden sei, und zwar möge, um Vereinfachungen zu erzielen, der Widerstand in der Maschine und in den Verbindungsdrähten so klein sein, daß wir ihn vernachlässigen dürfen und daher auch den Spannungsverlust in der Leitung. Steigt die elektromotorische Kraft der Maschine von Null bis zum Maximum, so nimmt der Kondensator Strom auf. Hat die elektromotorische Kraft ein Maximum, so hat der Kondensator seine volle Ladung schon aufgenommen, der Ladestrom hat also den Wert Null. Nimmt jetzt die elektromotorische Kraft der Maschine ab, so fängt der Kondensator an, sich zu entladen; die positive Elektrizität fließt also nicht, wie es ohne Kondensator geschehen würde, von der positiven Klemme der Maschine in die Leitung hinein, sondern in umgekehrter Richtung. Je mehr die elektromotorische Kraft der Maschine abnimmt, um so stärker wird der Rückstrom und der Entladestrom hat seinen größten Wert, wenn $e = 0$.

Da also das Maximum der Stromstärke mit dem Minimum der elektromotorischen Kraft ($e = 0$) zusammenfällt, so ist der Strom gegen die Spannung um 90° oder $\frac{1}{4}$ Periode verschoben, und zwar hat der Strom Voreilung. Ein Kondensator oder eine Kapazität bewirkt also gerade das Umgekehrte wie eine Induktionspule oder eine Selbstinduktion. Man nennt daher eine Kapazität auch wohl negative Selbstinduktion.

Schaltet man in die Zuleitung zu einem Kondensator ein geeignetes Wechselstromamperemeter ein, so zeigt dieses die effektive Stärke J der Lade- und Entladeströme an. Da ein Kondensator auf den Stromverlauf einen wesentlichen Einfluß ausübt und von ihm Ströme bald in der einen bald in der anderen Richtung ausgehen, so dürfen wir von einer elektromotorischen Kraft der Kapazität reden. Es läßt sich beweisen, daß

$$J = E \cdot 2 \pi n C,$$

wo E die effektive elektromotorische Kraft der Kapazität ist. Will man J in Ampere haben, so muß man C in Farad ausdrücken. Man nennt J den

Kapazitätsstrom; dieser ist ebenfalls ein wattloser Strom. Die vorige Gleichung kann man benutzen, um die Kapazität zu bestimmen, wenn man die Frequenz kennt.

Wenn ein Leiter mit einer Stromquelle verbunden wird, so wird jedes Stück des Leiters bis zu einer gewissen Spannung geladen; für die Ladung der einzelnen Teile des Leiters wird Elektrizität verbraucht — ähnlich wie eine Wasserleitung sich zuerst mit Wasser füllen muß, ehe sie Wasser abgibt. Daher hat jeder Leiter eine gewisse Kapazität. Ist der Leiter an eine Wechselstrommaschine angeschlossen, so erfolgt während jeder Periode Ladung und Entladung.

Sind zwei parallele Leitungsdrähte mit den Polen der Wechselstrommaschine verbunden, so stellt diese Anordnung einen Kondensator dar, indem wir nämlich die Leitungsdrähte als die Belegungen und die Luft zwischen den Drähten als das Dielektrikum ansehen können. Je kleiner der Abstand der beiden Leitungsdrähte ist, um so größer ist die Kapazität der Leitung. Für zwei parallele Drähte aus Kupfer, die bei dem Radius r cm einen Abstand von d cm haben, ist die Kapazität in Mikrofarad pro 1 km Doppelleitung

$$C = \frac{0,0121}{\log \frac{d}{r}}.$$

Bei Kabeln ist das Dielektrikum die die Leitungen trennende Guttaperchahülle. Besonders groß ist die Kapazität eines Kabels, bei dem die eine Leitung in der Mitte des Kabelquerschnittes liegt und die zweite Leitung einen aus Kupferdrähten bestehenden konzentrischen Ring bildet. Ferner kann man eine Leitung und den Bleimantel bezw. die Eisenarmatur oder eine Leitung und die Erde oder das Wasser als Kondensator ansehen.

Ist ein induktionsfreier Widerstand w mit einem Kondensator von der Kapazität C Farad hintereinander geschaltet (Fig. 37), so ist die effektive Spannung zwischen A und B durch die Gleichung bestimmt:

$$E = J \cdot \sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{2\pi n C}\right)^2},$$

wenn J die effektive Stromstärke ist. $\frac{1}{2\pi n \cdot C}$ entspricht dem Produkte $2\pi n \cdot L$, das wir

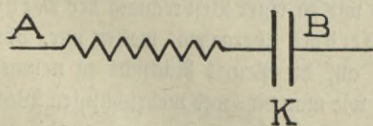


Fig. 37.

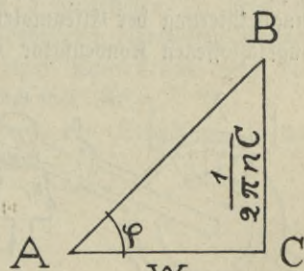


Fig. 38.

früher in den Gleichungen fanden. Die Quadratwurzel kann man als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Katheten w und $\frac{1}{2\pi n C}$ ansehen (Fig. 38). Der von der Kathete w und der Hypotenuse eingeschlossene

Winkel ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung; es ist also

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\frac{2 \pi n C}{w}} = \frac{1}{2 \pi n C \cdot w}.$$

Ist $w = 0$, so ist $\operatorname{tg} \varphi = \infty$ und $\varphi = 90^\circ$.

Es ist zu beachten, daß der Strom, wie sich aus einer früheren Bemerkung ergibt, Voreilung hat. Für den allgemeinen Fall, in dem Ohmscher Widerstand, Kapazität und Selbstinduktion gleichzeitig vorhanden sind, gilt die Beziehung

$$E = J \sqrt{w^2 + \left(2 \pi n L - \frac{1}{2 \pi n C}\right)^2}.$$

Ist in dieser Gleichung w der Widerstand des ganzen Stromkreises, den man sich übrigens auch in einem einzigen induktionsfreien Widerstande konzentriert denken kann, L der Selbstinduktionskoeffizient des ganzen Stromkreises inkl. Maschine in Henry, C die Kapazität des ganzen Stromkreises in Farad und J die effektive Stromstärke, so ist E die effektive elektromotorische Kraft.

Unsere letzte Gleichung umfaßt die früher für die Stromstärke angegebenen und kann als das auf Wechselströme übertragene Ohmsche Gesetz angesehen werden. Ist $2 \pi n L = \frac{1}{2 \pi n C}$, so heben sich Kapazität und Selbstinduktion vollständig auf, und es ist wie bei Gleichstrom $J = \frac{e}{w}$.

Man nennt die ganze in unserer Gleichung vorkommende Quadratwurzel die Impedanz, $\frac{1}{2 \pi n C}$ die Kapazitätsreaktanz und $2 \pi n L - \frac{1}{2 \pi n C}$ (die Induktanz oder) die resultierende Reaktanz.

Die Kapazität verzehrt keine Energie, abgesehen von der statischen Hysterese. Wie nämlich im Eisen Energie verbraucht wird für die Umagnetisierung der Eisenmoleküle, so wird in einem an eine Wechselstromquelle angeschlossenen Kondensator Energie verzehrt für die „Umelektrisierung“ der Moleküle des Dielektrikums. Diese Energie ist übrigens so klein, daß man sie in der Praxis vernachlässigen kann.

Gehe wir zu einer Besprechung der Mehrphasenströme übergehen, wollen wir, ohne zunächst auf die Praxis Rücksicht zu nehmen, zusehen, wie man ein- und mehrphasigen Wechselstrom erzeugen kann. In Fig. 39, die wir ebenso wie die beiden folgenden Figuren einer

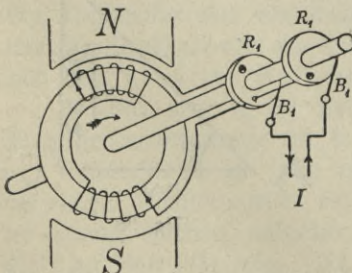


Fig. 39.

eine Einphasenstrommaschine, kurz Wechselstrommaschine genannt, schematisch dargestellt. Zwischen den Polen eines Magnets N und S sehen wir einen Eisenring

mit zwei hintereinander geschalteten Drahtspulen. Die Drahtenden sind an zwei auf der Drehungsachse befestigte und gegeneinander isolierte Schleifringe R_1 befestigt. Ist der Ring mit der Achse starr verbunden und rotiert die Achse, so dreht sich auch der Ring, und die beiden federnden Metallstreifen B_1 schleifen auf den Ringen. Bei der Drehung werden in den beiden Spulen elektromotorische Kräfte erzeugt, die sich addieren. Nach jeder halben Umdrehung ändert der in die Leitung I fließende Strom seine Richtung. Die Periode ist bei dieser Anordnung gleich der Zeit, in der der Ring eine Umdrehung macht. Wären vier Magnetpole mit Abständen von 90° vorhanden (N, S, N, S), so daß sich die beiden Nordpole diametral gegenüber liegen und ebenso die beiden Südpole, so müssen die beiden Spulen in demselben Sinne gewickelt sein. Bei jeder Umdrehung würde der Strom viermal seine Richtung wechseln, so daß die Periode gleich der halben Umdrehungszeit des Ringes sein würde. Sind p Pole im Kreise angeordnet, wo p eine gerade Zahl ist, und macht der Ring in 1 Sekunde K Touren, so ist die Zahl der Polwechsel pro Sekunde gleich $p \cdot K$. Da nun zwei Polwechsel einer Periode entsprechen, so ist die Periodenzahl oder die Frequenz

$$n = \frac{p \cdot K}{2}.$$

Eine Zweiphasenstrommaschine ist in Fig. 40 schematisiert. Auf dem Eisenringe befinden sich 4 Drahtspulen, von denen je zwei sich diametral gegenüberliegende miteinander verbunden und im entgegengesetzten Sinne aufgewickelt sind.

Die Enden des einen Spulenpaares sind an den Schleifringen R_1 , die des anderen an den Schleifringen R_2 befestigt. Die Phasenverschiebung der in den beiden Spulenpaaren induzierten elektromotorischen Kräfte beträgt, da die Spulen des einen Paares von denen des anderen Paares um 90° entfernt sind, $\frac{1}{4}$ Periode oder 90° .

Ist also die Kurve der elektromotorischen Kraft eine Sinuslinie, so hat zur Zeit t die eine elektromotorische Kraft den Wert

$$e_1 = E_0 \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

und die andere den Wert

$$e_2 = E_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{\pi}{2} \right).$$

Der Zweiphasenstrom erfordert 4 Leitungen, wie man aus der Figur ersieht. Man kann jedoch bei nicht zu hohen Spannungen zwei der vier Leiter zu einem vereinigen. Die Leitung besteht dann aus zwei dünneren und einem

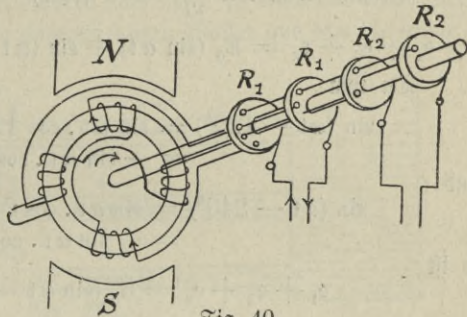


Fig. 40.

dickeren Drahte, und zwar muß der Querschnitt der gemeinsamen Rückleitung $\sqrt{2} \cdot Q$ sein, wenn Q der Querschnitt der dünneren Drähte ist.

Da das Zweiphasensystem nur selten Anwendung findet, so können wir von einer näheren Besprechung desselben absehen¹⁾.

Dreiphasenstrom, Drehstrom. Wenn wir den Ring in Fig. 40 mit 3 Spulen bewickeln, die 120° voneinander entfernt sind, und die 6 freien Drahtenden mit 6 Schleifringen verbinden, so erhalten wir das nicht verkettete oder offene Dreiphasensystem; bei diesem ist jeder Stromkreis von den beiden anderen unabhängig. Die elektromotorischen Kräfte zur Zeit t lassen sich durch folgende Gleichungen darstellen

$$e_1 = E_0 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad e_2 = E_0 \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - 120^\circ \right),$$

$$e_3 = E_0 \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - 240^\circ \right).$$

Mithin, wenn wir $\frac{2\pi}{T} = \alpha$ setzen,

$$e_1 + e_2 + e_3 = E_0 (\sin \alpha t + \sin (\alpha t - 120^\circ) + \sin (\alpha t - 240^\circ)).$$

Da nun

$$\begin{aligned} \sin (\alpha t - 120^\circ) &= \sin \alpha t \cdot \cos 120^\circ - \cos \alpha t \cdot \sin 120^\circ \\ &= -\sin \alpha t \cdot \cos 60^\circ - \cos \alpha t \cdot \sin 60^\circ \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \sin (\alpha t - 240^\circ) &= \sin \alpha t \cdot \cos 240^\circ - \cos \alpha t \cdot \sin 240^\circ \\ &= -\sin \alpha t \cdot \cos 60^\circ + \cos \alpha t \cdot \sin 60^\circ, \end{aligned}$$

so ist

$$e_1 + e_2 + e_3 = E_0 (\sin \alpha t - 2 \sin \alpha t \cdot \cos 60^\circ).$$

Nun ist aber $\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$, mithin

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Sind die Widerstände oder bei induktiver Belastung die Impedanzen der drei Phasen — so nennt man die drei Stromkreise — einander gleich, so ist auch in jedem Momente

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Wenn wir daher von jeder Phase einen der beiden Leitungsdrähte nehmen und die drei Leitungen zu einer einzigen vereinigen, so ist die gemeinsame Leitung zu jeder beliebigen Zeit stromlos und kann daher in Wegfall kommen. Wir gelangen so zu der in Fig. 41 skizzierten Anordnung. Wie man sieht, sind die Anfänge der drei Spulen mit den Schleifringen verbunden und die Enden miteinander verkettet; man nennt das verkettete Dreiphasensystem kurz Drehstrom²⁾. Eine Analogie soll dazu dienen, den Stromverlauf in dem durch

¹⁾ Noch nicht 1% der Elektrizitätswerke Deutschlands ist nach dem Zweiphasensysteme eingerichtet.

²⁾ Die Erklärung des Namens findet man im Abschnitte Wechselstrommotoren.

unserer Fig. 41 dargestellten System zu veranschaulichen. In den Röhren R_1 , R_2 , R_3 (Fig. 42) befinden sich dichtschließende Kolben. Bewegen wir einen

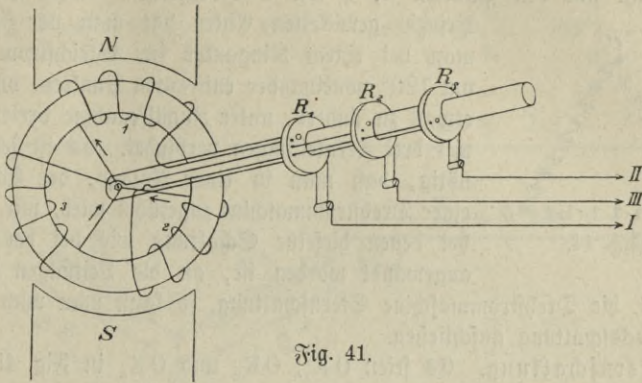


Fig. 41.

Kolben nach rechts und die beiden anderen nach links, so drückt der erste Kolben Wasser in B hinein und die beiden anderen saugen Wasser aus dem Reservoir B

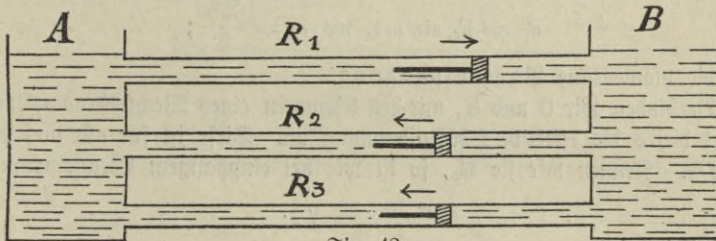


Fig. 42.

und befördern es in den Behälter A. Wenn nun der eine Kolben infolge passender Wahl der Geschwindigkeit so viel Wasser in B hinein drückt, wie die beiden anderen zusammen aus B saugen, so ändert sich weder in A noch in B das Niveau.

Die in der Fig. 41 angedeutete Schaltung nennt man die Sternschaltung oder die offen verkettete Schaltung. Schematisch stellt man die Sternschaltung durch Fig. 43 dar, in der a , b und c den drei Wicklungen einer Dynamomaschine oder eines Elektromotors entsprechen.

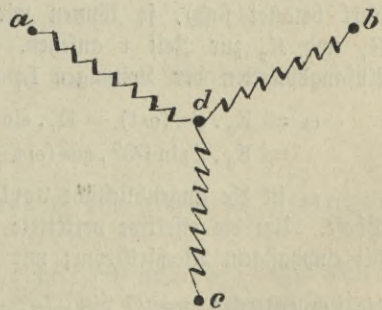


Fig. 43.

Die Verkettung kann aber auch noch auf eine andere Weise erfolgen, nämlich nach der Dreieckschaltung, die man auch die geschlossen verkettete oder kurz geschlossene Schaltung nennt. Man erhält diese, wenn man das Ende der ersten Spule mit dem Anfange der zweiten, das Ende der zweiten

mit dem Anfange der dritten und das Ende der dritten mit dem Anfange der ersten Spule verbindet, wie es die schematische Fig. 44 zeigt. Die drei Leitungen werden jetzt mit den Punkten a, b und c verbunden. Einen nach diesem

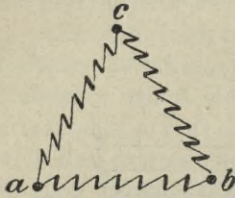


Fig. 44.

Prinzip gewickelten Anker hat man vor sich, wenn man bei einem Ringanker für Gleichstrom an drei um 120° voneinander entfernten Punkten, ohne irgend etwas zu ändern, unter Zuhilfenahme dreier Bürsten mit drei Fernleitungen verbindet. Es ist jedoch nicht nötig, daß man in einer Anlage, der Strom aus einer Drehstrommaschine zugeführt wird, nur Motoren, bei denen dieselbe Schaltung wie bei der Maschine angewandt worden ist, an die Leitungen anschließt.

Hat z. B. die Drehstrommaschine Sternschaltung, so kann man auch Motoren mit Dreieckschaltung anschließen.

Sternschaltung. Es seien OK_1 , OK_2 und OK_3 in Fig. 45 die drei Phasen einer Drehstrommaschine (die Spulen in Fig. 41), L_1 , L_2 und L_3 die drei Fernleitungen. Zur Zeit t herrscht zwischen dem neutralen Punkte O und der Klemme K_1 eine Spannung, die gleich gesetzt werden kann

$$e_1 = E_0 \sin \omega t, \text{ wo } \omega = \frac{2\pi}{T};$$

e_1 ist die momentane Phasenspannung.

Verbinden wir O und K_1 mit den Klemmen eines Wechselstromvoltmeters, so zeigt dieses die effektive Phasenspannung an. Diese ist für alle drei Phasen dieselbe¹⁾. Nennen wir sie E_p , so ist wie bei einphasigem Wechselstrom

$$E_p = E_0 \sqrt{\frac{1}{2}}.$$

Zur Zeit t ist die zweite Phasenspannung

$$e_2 = E_0 \sin (\omega t - 120^\circ).$$

Da nun in O das Potential Null herrscht (wenn die drei Phasen gleich stark belastet sind), so können wir e_1 und e_2 auch als die Potentiale in K_1 und K_2 zur Zeit t ansehen. Daher besteht zwischen K_1 und K_2 , den Anfangspunkten der Leitungen L_1 und L_2 , zur Zeit t die Potentialdifferenz

$$\begin{aligned} e_k &= E_0 \cdot \sin (\omega t) - E_0 \cdot \sin (\omega t - 120^\circ) \\ &= E_0 \cdot 2 \sin 60^\circ \cdot \cos (\omega t - 60^\circ)^2 = E_0 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos (\omega t - 60^\circ)^2. \end{aligned}$$

e_k ist die augenblickliche verkettete Spannung für die erste und zweite Phase. Um die effektive verkettete Spannung zu erhalten, verfahren wir wie bei einphasigem Wechselstrom; wir zerlegen also die Periode in m Intervalle, die sich erstrecken von 0 bis $\frac{T}{m}$, $\frac{T}{m}$ bis $2 \cdot \frac{T}{m}$ etc., bilden die zugehörigen

¹⁾ Die Momentanwerte sind natürlich verschieden.

²⁾ Ergibt sich aus der Formel: $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$.

Werte von e_k , quadrieren jeden einzelnen und bilden das arithmetische Mittel. Das Quadrat der gesuchten Größe hat also den Wert

$$\frac{1}{m} \cdot E_0^2 \cdot 3 \cdot \left[\cos^2 \left(2\pi \cdot \frac{1}{m} - 60^\circ \right) + \cos^2 \left(2\pi \cdot \frac{2}{m} - 60^\circ \right) + \dots \right].$$

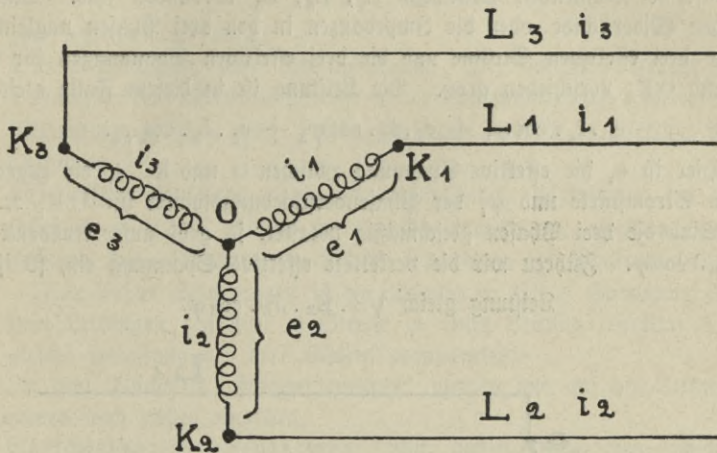


Fig. 45.

Da die Klammer wieder den Wert $\frac{m}{2}$ hat, so ist unser ganzer Ausdruck gleich

$$\frac{1}{m} \cdot E_0^2 \cdot 3 \cdot \frac{m}{2} = 3 \cdot \frac{E_0^2}{2}.$$

Um die effektive verkettete Spannung selbst zu erhalten, müssen wir die Quadratwurzel ziehen, die wir mit E_p bezeichnen wollen:

$$E_k = E_0 \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{3}.$$

Da endlich die effektive Phasenspannung E_p , deren Maximalwert mit E_0 bezeichnet wurde, gleich $E_0 \sqrt{\frac{1}{2}}$, so ist

$$E_k = E_p \sqrt{3}.$$

Die effektive verkettete Spannung ist also gleich der effektiven Phasenspannung mal $\sqrt{3}$.

Wenn von der Spannung bei Drehstrom gesprochen wird ohne einen Zusatz, so ist die verkettete effektive Spannung (Spannung zwischen je zwei der drei Hauptleitungen) zu verstehen¹⁾. Diese Definition gilt auch für die Dreieckschaltung.

¹⁾ Siehe G.-L. 3. 1901, S. 477.

Da bei der Sternschaltung Phase und Leitung hintereinandergeschaltet sind, so ist der Phasenstrom gleich dem Leitungsstrom; dies gilt natürlich sowohl für die Momentanwerte als auch für die effektiven Werte.

Wir wollen jetzt annehmen, daß OK_1 , OK_2 und OK_3 in Fig. 45 Widerstände mit Selbstinduktion seien, die mit den drei von der entfernten Drehstrommaschine kommenden Leitungen L_1 , L_2 , L_3 verbunden sind. Sind die Ohmschen Widerstände oder die Impedanzen in den drei Phasen ungleich, so sind die drei effektiven Ströme und die drei effektiven Spannungen für OK_1 , OK_2 und OK_3 verschieden groß. Die Leistung ist in diesem Falle gleich

$$e_1 \cdot i_1 \cdot \cos \varphi_1 + e_2 \cdot i_2 \cdot \cos \varphi_2 + e_3 \cdot i_3 \cdot \cos \varphi_3.$$

Hier ist e_1 die effektive Spannung zwischen 0 und K_1 , i_1 die zugehörige effektive Stromstärke und φ_1 der Phasenverschiebungswinkel für OK_1 zc.

Sind die drei Phasen gleichmäßig belastet, so geht unser Ausdruck über in $3 E_p J \cos \varphi$. Führen wir die verkettete effektive Spannung ein, so ist

$$\text{Leistung gleich } \sqrt{3} \cdot E_k \cdot J_k \cdot \cos \varphi.$$

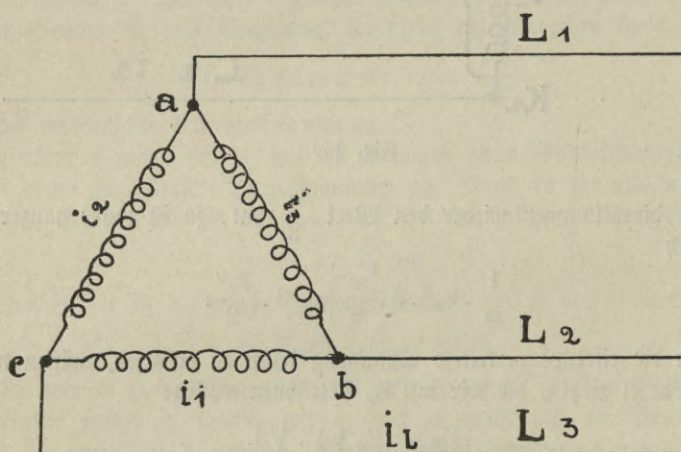


Fig. 46.

Dreieckschaltung, auch Ringschaltung genannt. Zur Zeit t sei der Strom in der ersten Phase gleich i_1 , in der zweiten Phase gleich i_2 und der durch die Leitung L_3 (Fig. 46) fließende Strom gleich i_L . Dann ist

$$i_L = i_1 - i_2^1).$$

Man findet, indem man zu den Effektivwerten übergeht, wie eben, daß

$$J_L = \sqrt{3} \cdot J_k,$$

wenn J_k der effektive Strom in einer Phasenwicklung ist.

¹⁾ Man stelle sich vor, daß sich der Strom i_1 in c in die Teile i_2 und i_L teilt.

Dagegen ist die verfertete Spannung oder die Linienspannung (Spannung zwischen zwei Leitungen) E_k gleich der Phasenspannung. Denn die Spannung zwischen L_2 und L_3 ist dieselbe wie zwischen den Enden der Spule e b.

Für die Leistung des Drehstromes gilt dasselbe wie für die Sternschaltung:

$$P = \sqrt{3} \cdot E_k \cdot J_L \cdot \cos \varphi.$$

Zusammenfassung:

1. Offene Wickelung oder Sternschaltung. Der effektive Strom in der Leitung = dem effektiven Strom in der Phasenwicklung, und die effektive Spannung zwischen zwei Leitungssträngen = $\sqrt{3} \times$ effektive Phasenspannung.
2. Geschlossene Wickelung oder Dreieckschaltung. Strom in der Leitung (effektiv) = $\sqrt{3} \times$ Strom in einer Phasenwicklung, effektive Spannung zwischen zwei Leitungen = effektive Spannung der Phasenwicklung.

Für beide Schaltungen ist die Leistung = $\sqrt{3} \times$ Spannung zwischen zwei Leitungen (effektiv) \times Strom in einer Leitung (effektiv) $\times \cos \varphi$, gleiche Belastung der drei Phasen vorausgesetzt.

In dem Abschnitte „Messinstrumente“ werden wir auf die Leistung des Drehstromes noch näher eingehen.

Verschiedene Kurvenformen. Wir haben früher den Effektivwert der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke, sowie die Arbeit eines Wechselstromes für den Fall berechnet, daß die elektromotorische Kraft der Wechselstrommaschine durch eine Sinuslinie dargestellt werden kann. Meistens hat man es aber in der Praxis mit Wechselströmen zu tun, denen andere Kurvenformen entsprechen. In diesem Falle kann man eine Zerlegung der betreffenden Kurve in eine Reihe von Sinuslinien, denen verschiedene Periodenzahlen entsprechen, vornehmen (Fourier). Man nennt die so erhaltenen Sinuslinien bezw. die zugehörigen Sinusfunktionen die Harmonischen der gegebenen Stromkurve. Die Harmonische mit der kleinsten Periodenzahl nennt man die Grundwelle; alle anderen Sinusfunktionen bezw. die zugehörigen Kurven, deren Periodenzahlen das 2fache, 3fache u. der Grundwelle sind, werden die höheren Harmonischen oder die Oberwellen genannt. Jeder Harmonischen entspricht ein besonderer Strom, und die verschiedenen Ströme sind als vollständig unabhängig voneinander zu betrachten. In der Technik kommen fast immer nur diejenigen Harmonischen, deren Periodenzahl ein ungerades Vielfaches der Grundwelle sind, in Betracht¹⁾.

Nennen wir die Effektivwerte der einzelnen Stromstärken $J_1, J_3, J_5 \dots$, so ist die effektive Stromstärke des wirklich vorhandenen Stromes

$$J = \sqrt{J_1^2 + J_3^2 + J_5^2 + \dots}$$

und Entsprechendes gilt für die effektive Spannung.

¹⁾ Was die mathematische Behandlung anbelangt, so verweisen wir auf „Die Theorie der Wechselströme und Transformationen“ von F. L. Ia Cour. Berlin 1902.

Die Leistung unseres Wechselstromes von beliebiger Kurvenform ist gleich

$$A = E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + E_3 \cdot J_3 \cdot \cos \varphi_3 + \dots$$

Auch bei Strömen, deren Kurven keine Sinuslinien sind, ist das Produkt aus der effektiven (gemessenen) Spannung, E , und der effektiven (gemessenen) Stromstärke, J , größer als die wirkliche Leistung. Man kann die wirkliche Leistung dadurch erhalten, daß man $E \cdot J$ mit dem Cosinus eines gewissen Winkels φ multipliziert. $\cos \varphi$ nennt man den Leistungsfaktor. Es ist jedoch zu beachten, daß φ hier nicht die „wirklich auftretende Phasenverschiebung ist, sondern nur eine gedachte, nämlich die Phasenverschiebung zwischen einer (gedachten) elektromotorischen Kraft und einem Strom, die beide von Sinusform und in bezug auf den Effektivwert der wirklichen elektromotorischen Kraft und dem wirklichen Strom äquivalent sind und dieselbe Leistung wie diese ergeben. Diesen gedachten sinusförmigen Wechselstrom heißt man den äquivalenten Sinusstrom; mit diesem wird in der Praxis gewöhnlich gerechnet, und in den meisten Fällen ist dies auch für praktische Zwecke genau genug“ (La Cour).

In der Wechselstromtechnik wird oft das Verhältnis aus der effektiven elektromotorischen Kraft und dem Mittelwerte der elektromotorischen Kraft gebraucht. Da sich dieses Verhältnis mit der Form der Kurve ändert, so hat man ihm den Namen Formfaktor gegeben. Da für eine sinusförmige Kurve

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \text{ und } E_m = \frac{2}{\pi} E_0, \text{ so ist hier der Formfaktor gleich } \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11.$$

Fünftes Kapitel.

Der motorische Teil.

In der Dynamomaschine wird nach den Ausführungen des Kapitels 3 der elektrische Strom dadurch erzeugt, daß entweder der Anker der Maschine rotiert, während das Feld ruht, oder umgekehrt; hierbei werden die Induktionsspulen des Ankers von den Kraftlinien des Feldes geschnitten. Die induzierten Ströme haben eine solche Richtung, daß sie in Folge der Wechselwirkung zwischen Strom und Magnet die mechanische Bewegung zu hemmen suchen (Lenz'sches Gesetz); deswegen ist es erforderlich, der Dynamomaschine dauernd mechanische Arbeit zuzuführen. Diese Arbeit wird entweder durch Ausnutzung der lebendigen Kraft (kinetischen Energie) in Bewegung befindlicher Massen gewonnen, wobei die Materie unverändert bleibt, oder durch Umwandlung der Spannkraft (potentiellen Energie) des Stoffes auf chemischem Wege, wobei die Materie Veränderungen erleidet. Zur Gewinnung von Arbeit auf dem ersten Wege steht uns die lebendige Kraft der Wassergefälle, des Windes, sowie der Erscheinung von Ebbe und Flut zur Verfügung; wir beschränken uns indessen bei den folgenden Erörterungen auf die Ausnutzung der Wassergefälle, da die

Verwertung der anderen Bewegungsercheinungen zur Erzeugung von Arbeit bis jetzt eine allgemeine praktische Bedeutung nicht erlangt hat. Die Umwandlung der Spannkraft in mechanische Arbeit geschieht in Wärmemotoren, die wir in Dampfmaschinen und Gaskraftmaschinen einteilen. Der prinzipielle Unterschied zwischen diesen beiden thermodynamischen Maschinengattungen besteht darin, daß sich bei der Dampfmaschine der Verbrennungsprozeß des Energieträgers außerhalb der Maschine vollzieht, während bei der Gaskraftmaschine dieser Prozeß in der Maschine selbst vor sich geht. Infolgedessen wird bei der Dampfmaschine ein Zwischenglied für die Übertragung der Energie des Brennstoffes — der Dampf — erforderlich, das bei der Gaskraftmaschine wegfällt, indem bei dieser die Ausdehnungstendenz eines im Zylinder zur Explosion gebrachten Gemenges aus brennbaren Gasen und atmosphärischer Luft direkt zur Erzeugung mechanischer Arbeit benutzt wird.

Die Betrachtung der Wasserkraftmaschinen und der Wärmemotoren bezüglich ihrer Konstruktion, Wirkungsweise und wirtschaftlichen Eigenschaften — insoweit sie für den Reflektanten auf eine elektrische Anlage und den eine solche projektierenden Ingenieur wesentliches Interesse besitzen — ist der Gegenstand dieses Kapitels.

Bei der häufigen Überschätzung des Wertes der Wasserkräfte, besonders der kleineren, für den Betrieb elektrischer Zentralanlagen erscheint es zweckmäßig, bevor wir auf das eigentliche Thema näher eingehen, diejenigen Punkte kurz zu erörtern, die für die Entscheidung der Frage von Bedeutung sind, ob im gegebenen Falle eine vorhandene Wasserkraft für die Zentrale zu verwenden, oder anstatt dieser richtiger eine Betriebsanlage mit Wärmemaschinen zu wählen ist. Denn erfahrungsgemäß wird öfters die Ausnutzung einer Wasserkraft zur Versorgung in der Nähe liegender Ortschaften mit Elektrizität vorgesehen, ohne daß ihr Besitzer oder die sonstigen Interessenten rechtzeitig eine Klärung der gestellten Frage herbeiführen. Man geht dabei von der Ansicht aus, daß die Ersparnis des Brennmaterials allein das ausschlaggebende Moment für die Ausnutzung der Wasserkraft in jedem Falle bilde, was indessen keineswegs immer zutrifft, wie aus nachstehendem hervorgehen dürfte. Wir beschränken uns dabei auf Wasserkräfte mit verhältnismäßig geringen Gefällhöhen, wie sie in der Ebene und in hügeligem Gelände häufig vorkommen, und auf Zentralanlagen mit überwiegendem Lichtkonsum.

Für die Wahl der Betriebsanlage ist in erster Linie die im Interesse der Rentabilität zu stellende Forderung maßgebend, daß die jährlichen Gesamtausgaben, die sich aus den Zinsen des zu investierenden Kapitals, dessen Amortisation und den laufenden Betriebsausgaben zusammensetzen, ein Minimum werden. Hierzu ist zunächst erforderlich, daß die Betriebsanlage nicht wesentlich größer bemessen wird, als zur Deckung des wirklich vorhandenen Konsumes gerade notwendig, weil eine unvollständige Ausnutzung der Maschinenanlage die Rentabilität naturgemäß beeinträchtigen muß. Da nun der Konsum bei derartigen Anlagen gewöhnlich aus kleinen Anfängen heraus allmählich anzuwachsen pflegt, so muß von vornherein darauf Bedacht genommen werden, daß die vorerst

für den nächsten Bedarf einzurichtende Betriebsanlage jederzeit vergrößert werden kann, ohne daß Betriebsstörungen damit verbunden wären. Ferner sollen die Betriebsmaschinen eine möglichst weitgehende Veränderung ihrer Leistung gestatten, ohne daß ihre Regulierfähigkeit und die Ökonomie des Betriebes dadurch in Frage gestellt würden. Wie nämlich aus dem Stromverbrauchsdiagramme (Fig. 47) für den kürzesten Wintertag und den längsten Sommertag hervorgeht, ist der Stromverbrauch einer hauptsächlich Beleuchtungszwecken dienenden elektrischen Zentrale nicht nur in den verschiedenen Jahreszeiten sehr verschieden,

Stromverbrauchsdiagramm einer Zentrale
mit überwiegendem Lichtconsum.

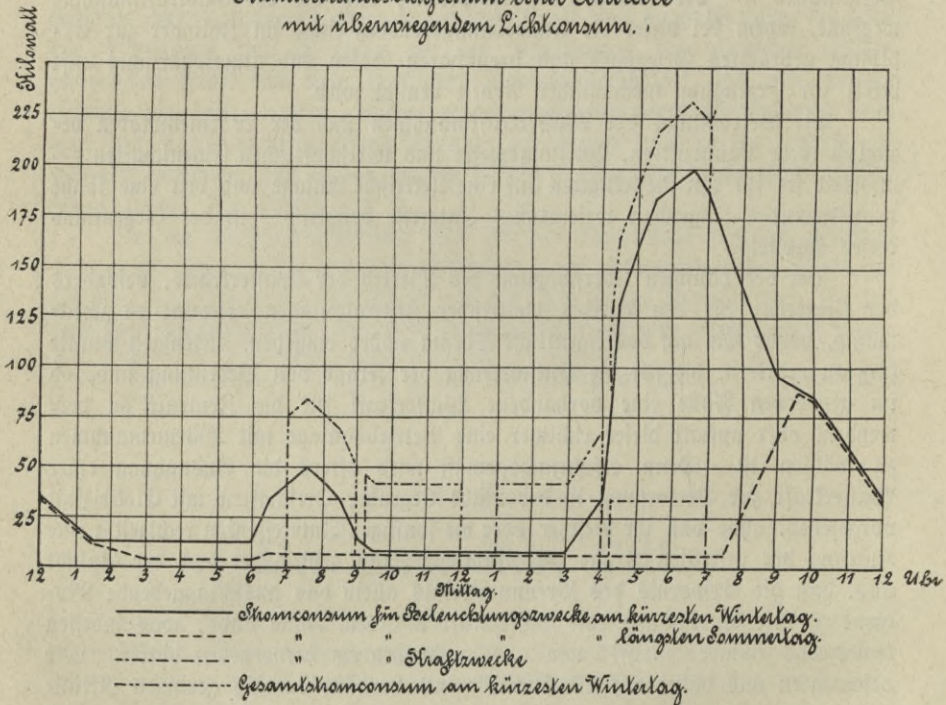


Fig. 47.

sondern es finden auch an jedem einzelnen Betriebstage erhebliche Schwankungen des Konsumes statt, die sich um so stärker bemerkbar machen, je mehr der auf die Beleuchtung entfallende Stromverbrauch denjenigen für Kraftzwecke überwiegt; diesen Belastungsschwankungen sollen die Betriebsmaschinen folgen können. Endlich ist als weiteres Moment von wesentlicher Bedeutung für die Rentabilität der Anlage die Reduktion der eigentlichen Betriebsausgaben auf das geringstmögliche Maß hervorzuheben; diese Ausgaben bestehen aus den laufenden Reparatur- und Instandhaltungskosten, den Kosten für den Betriebsmaterialverbrauch, der — abgesehen vielleicht von etwas Schmier- und Putzmaterial — bei Wasserkraftanlagen ganz fortfällt, sowie aus den Ausgaben für die Bedienung der Anlage.

Wir wollen nun untersuchen, wie sich diesen prinzipiellen Forderungen gegenüber die Wärmemaschinen und wie die Wasserkraftmaschinen verhalten; hierbei genügt es, von den ersteren nur die Dampfmaschinen zum Vergleiche heranzuziehen.

Eine Dampfkrastanlage läßt sich in einfacher und bequemer Weise der jeweiligen Größe des Konsumes anpassen, da eine solche für jede beliebige Leistung ausgeführt werden kann und jederzeit eine Erweiterung in beliebigem Umfange ohne Betriebsstörung gestattet; denn die bei der Vergrößerung der Anlage neu aufzustellenden Dampfkessel und Maschinen werden vollständig unabhängig von der vorhandenen Betriebsanlage montiert, und die Vereinarigung der neuen mit den alten Betriebsmitteln kann nach Fertigstellung der ersteren binnen kürzester Frist bewerkstelligt werden. Selbst die Hochbauten der Zentralstation können bei zweckentsprechender Disposition mit der Erweiterung der Maschinenanlage gleichzeitig vergrößert und so die Anlagekosten mit dem Stromabfahre stets im Einklange erhalten werden. Auch besitzt die Dampfmaschine die weiter verlangte Eigenschaft der Veränderlichkeit ihrer Leistung in verhältnismäßig großem Umfange bei relativ günstigem Dampfverbrauche und guter Regulierfähigkeit. Deshalb bestimmt man zweckmäßig die Normalleistung der Maschine, bei der sie mit ihrem günstigsten Dampfverbrauche arbeitet, nicht nach der maximalen Belastung des Leitungsnetzes; sondern es genügt, wie wir später sehen werden, meistens, einen wesentlich geringeren Betrag dafür in Rechnung zu stellen. Die so berechnete Maschine vermag bei entsprechend größerer Füllung, auch den über die Normalleistung hinausgehenden, durch die Spitzen des Verbrauchsdiagrammes dargestellten Belastungen zu genügen, wobei der relativ größere Dampfverbrauch wegen der verhältnismäßig kurzen Dauer dieser Mehrbelastungen keine ausschlaggebende Rolle spielt. Andererseits fallen bei der Dampfkrastanlage die aus dem Verbrauche an Betriebsmaterialien, wie Kohlen, Öl und Puzwolle, entstehenden Ausgaben, sowie die Kosten für die Bedienung sehr ins Gewicht. Der Kohlenverbrauch schwankt je nach dem System und der Qualität der verwandten Kessel und Maschinen, sowie nach der Güte des Brennmaterials in ziemlich weiten Grenzen; immerhin kann man annehmen, daß bei modern eingerichteten kleineren Lichtzentralen — und nur um solche handelt es sich hier — und mittleren Kohlenpreisen die Kosten des Kohlenverbrauchs 15% der Gesamtausgaben (inkl. Kapitalzinsen und Abschreibungen) kaum übersteigen. Der Schmier- und Puzmaterialverbrauch ist nicht von ausschlaggebender Bedeutung; dagegen fallen die Kosten für die Bedienung wieder mehr ins Gewicht, da bei räumlich getrennter Kessel- und Maschinenanlage hierzu zwei Mann erforderlich sind, vorausgesetzt, daß der Maschinenbetrieb auf eine Arbeitsschicht zugeschnitten wird, was bei Zuhilfenahme einer Akkumulatorenbatterie, wie wir später sehen werden, stets möglich ist.

Anderes liegen die Verhältnisse, wenn es sich um den Betrieb einer elektrischen Zentrale durch Wasserkraft handelt. Bei den folgenden Erörterungen nehmen wir vorerst an, daß entweder die Wasserkraft das ganze Jahr hindurch nahezu konstant sei, oder daß die maximale Belastung der Maschinen,

welche dem höchsten Stromverbrauche entspricht, auch bei niedrigstem Wasserstande noch gedeckt werde. Selbst in diesem günstigsten Falle haben wir mit dem Umstande zu rechnen, daß die Betriebsanlage bezüglich ihres wasserbautechnischen Teiles, d. i. Herstellung des Wehres, sowie des Ober- und Unterwassergrabens oder der dementsprechenden Rohrleitungen oder Kanäle, von vornherein gewöhnlich für die volle Leistung der Wasserkraft ausreichend gebaut werden muß; das gleiche ist der Fall bezüglich der Hochbauten, sowie meistens auch der Maschinenanlage selbst, weil eine nachträgliche Vergrößerung dieser Teile ohne Störung des Betriebes kaum ausführbar ist. Wollte man auch eine Erweiterungsfähigkeit der Maschinenanlage annehmen, so hat man doch damit zu rechnen, daß den Wasserkraftmaschinen die den Dampfmaschinen eigentümliche Fähigkeit der Steigerung der Leistung über einen Normalbetrag hinaus fehlt; infolgedessen muß der Bestimmung ihrer Leistung die maximale Netzbelastung zugrunde gelegt werden. Die Folge ist daher in beiden Fällen eine ungenügende Belastung der Maschinen während eines großen Teiles der Betriebszeit und damit zusammenhängend auch eine Verminderung der Regulierfähigkeit und des Wirkungsgrades. Von viel größerer Bedeutung ist jedoch die aus vorstehendem sich ergebende Tatsache, daß die Gesamtanlage bereits in ihrem ersten Betriebsstadium, in welchem der Konsum niedrig zu sein pflegt, mit dem Kaufpreise des Geländes und der Gerechtsamen, sowie mit dem Anlagekapitale für die voll ausgebaute Wasserkraft belastet ist, und daß deshalb in vielen Fällen die Rentabilitätsaussichten einer solchen Anlage — trotz der Kohlenersparnis und dem meist kleineren Bedienungspersonal — geringer sein werden als bei einer Dampfkraftanlage.

Nun trifft die den vorstehenden Ausführungen zugrunde gelegte Annahme einer im wesentlichen konstanten Wasserkraft gewöhnlich nicht zu, sondern es handelt sich — besonders bei Wasserläufen in ebenem und hügeligem Gelände — meistens um Wasserkräfte mit mehr oder weniger großen Wassermengen und verhältnismäßig geringen Gefällhöhen. Derartige Wasserkräfte leiden im allgemeinen unter einer großen Veränderlichkeit ihrer Wassermengen zu verschiedenen Jahreszeiten, und häufig fällt eine Periode niedrigsten Wasserstandes gerade zusammen mit einer solchen des größten Strombedarfes. Wenn nun die bei Niedrigwasser vorhandene Wassermenge für die Deckung des größten Strombedarfes nicht ausreicht, so ist die Aufstellung einer oder mehrerer Reservedampfmaschinen oder dergl. und damit eine weitere Erhöhung sowohl des Anlagekapitals als auch der Betriebsausgaben nicht zu umgehen, gleichgültig, ob die vorhandenen Wasserkraftmaschinen für den größten Konsum bei höherem Wasserstande ausreichen oder nicht. In diesen Verhältnissen liegt ein weiteres Moment für die Unsicherheit der Rentabilitätsgrundlagen bei Benützung solcher Wasserkräfte begründet, das um so mehr ins Gewicht fällt, als man dabei häufig von im voraus sehr schwer zu berechnenden Faktoren abhängig ist.

Der Vollständigkeit halber müssen wir an dieser Stelle auch die Frage der Verwendung von Akkumulatoren als Betriebsmittel für Zentralanlagen streifen und bemerken darüber folgendes:

Bei Gleichstromanlagen verwendet man mit Vorteil Akkumulatoren, um einen Ausgleich in den Belastungsschwankungen herbeizuführen, denen die Betriebsmaschinen infolge der steten Änderungen des Stromverbrauches unterworfen sind; ferner um den geringen Nachtkonsum zu decken, wenn derselbe — wie es bei kleineren Anlagen meist der Fall — die Unterhaltung des Maschinenbetriebes während der Nacht und die dadurch entstehenden Kosten der Bedienung der Anlage nicht lohnt¹⁾. Die Kapazität der Akkumulatoren ist auf Grund des Verbrauchsdiagrammes unter Berücksichtigung der Leistung der Betriebsmaschinen und der vorstehend angedeuteten Beschränkung der Zeitdauer des Maschinenbetriebes zu bestimmen, wobei sich für die Leistung der Batterie gewöhnlich ein Bruchteil der Maschinenleistung ergibt.

Nun begegnet man häufig der Meinung, auch eine kleinere Wasserkraft, die zur Deckung des vorhandenen Strombedarfes bei weitem nicht ausreicht, könne dennoch mit Hilfe einer Akkumulatorenbatterie vorteilhaft als Betriebskraft einer Zentralanlage nutzbar gemacht werden. Man denkt sich den Betrieb so, daß die Wasserkraftmaschine Tag und Nacht durchläuft, und der Strom der von ihr angetriebenen Dynamomaschine in erster Linie zur Aufspeicherung in einer Batterie von solcher Größe verwandt wird, daß die verhältnismäßig lange Zeit des schwachen Konsumes zu ihrer Ladung gerade ausreicht, und daß die Batterie in der relativ kurzen Zeit des Hauptkonsumes die Deckung des größten Teiles des Strombedarfes allein übernimmt. Diese Annahme trifft indessen in den meisten Fällen nicht zu, weil die für Verzinsung, Amortisation und Unterhaltung der verhältnismäßig großen Akkumulatorenbatterie aufzuwendenden Beträge, sowie die aus der Vermehrung der Betriebsausgaben infolge des durchgehenden Maschinenbetriebes resultierenden Kosten den Vorteil der Kohlenersparnis gewöhnlich überwiegen.

Wie aus den vorstehenden Ausführungen ersichtlich, wird es stets auf die besonderen Verhältnisse des einzelnen Falles ankommen, ob eine Wasserkraft zum Betriebe einer zu erbauenden Zentralanlage geeignet ist oder nicht; denn das Moment der Kohlenersparnis allein ist, wie schon vorbemerkt, für die Entscheidung dieser Frage nicht immer von ausschlaggebender Bedeutung. Es spielen hierbei die Kosten des Erwerbes des erforderlichen Geländes und der Gerechtigkeiten, ferner die oft sehr erheblichen Anlagekosten für den wasserbautechnischen Teil, die mehr oder weniger großen Schwankungen des Wasserstandes, der Zweck, für welchen der elektrische Strom vorwiegend verwendet werden soll — bei überwiegendem Kraftkonsumte beispielsweise ergeben sich leicht ganz andere Verhältnisse wie bei überwiegendem Lichtkonsumte — endlich das Verhältnis der Größe des zu erwartenden Konsumes zu der Leistung der Wasserkraft eine Rolle; über alle diese Punkte kann nur eine mit größter Sorgfalt

¹⁾ Auch bei Wechselstrom- und Drehstromanlagen kann zu dem gleichen Zwecke die Verwendung von Akkumulatoren in einzelnen Fällen in Aussicht genommen werden; alsdann wird eine doppelte Umformung des primären Stromes erforderlich; im übrigen kommen jedoch für diesen Fall die nämlichen Gesichtspunkte in Betracht wie oben.

durchzuführende Berechnung der laufenden Ausgaben den erforderlichen Aufschluß geben, der einerseits die Ausnutzung der Wasserkraft, andererseits die Verwendung von Wärmemaschinen zugrunde zu legen ist, nachdem für beide Fälle präzise Kostenanschläge aufgestellt worden sind.

I. Wasserkraftmaschinen.

Die Arbeit, welche eine Wasserkraft theoretisch zu leisten vermag, berechnet sich aus der Beziehung:

$$N = \frac{Q \cdot v \cdot 1000 \cdot h}{75} \text{ PS,}$$

worin

Q = Wasserquerschnitt kurz vor dem Beaufschlagungspunkte in q_m ,

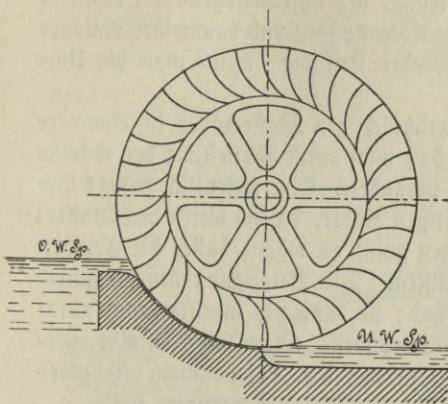
v = Geschwindigkeit des Wassers in Metern pro Sekunde,

h = Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel in Metern.

Von dieser theoretischen Arbeit kann jedoch nur ein Teil in der Wasserkraftmaschine wirklich ausgenutzt werden, indem ein anderer Teil, der durch den Wirkungsgrad der Maschine bestimmt ist, in dieser verloren geht; die auf diesen Arbeitsteil sich beziehenden Verhältnisse werden wir bei der Besprechung der einzelnen Maschinen erörtern. Den Querschnitt Q des Wasserlaufes ermittelt man durch mehrfache, möglichst genaue Messungen des vom Wasser angefüllten Teiles des Laufbettes und die Wassergeschwindigkeit durch einen Schwimmer, der möglichst tief in den Wasserlauf eintaucht; man bestimmt alsdann die Zeit, in welcher der Schwimmer eine vorher abgemessene Strecke zurücklegt.

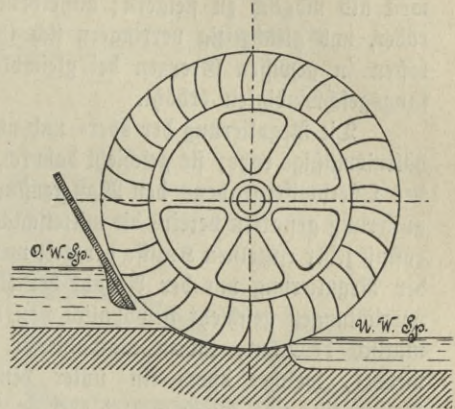
Die einfachsten Wasserkraftmaschinen sind die bekannten **Wasserräder**, die aus einem mit der horizontal gelagerten Achse durch Speichen verbundenen und mit Schaufeln zur Aufnahme des Wassers versehenen Radfranze bestehen; sie werden entweder aus Holz oder aus Schmiedeeisen hergestellt. Je nach ihrer Beaufschlagung teilen wir die Wasserräder ein in oberflächliche, mittelschlächliche und unterflächliche Räder. Bei den oberflächlichen Rädern erfolgt die Beaufschlagung im Scheitelpunkte, und die Drehung wird vorwiegend durch das Gewicht des in die Schaufeln strömenden Wassers bewirkt. Bei dem unterflächlichen Wasserrade beruht die Wirkung hauptsächlich auf dem Stöße des unterhalb der Achsmitte des Rades in die Schaufeln eintretenden Wasserstrahles; hierbei kann die Einrichtung sowohl so getroffen werden, daß das Wasser über die Schütze hinweg in die Schaufeln gelangt — Überfallräder — als auch so, daß es unter der Schütze austritt und in geringem Abstände über dem Unterwasserspiegel in die Schaufeln eintritt — Spannschützenräder. Als Vertreter der ersten Gattung erwähnen wir das Zuppinger-Rad, während das zweite System durch das Poncelet-Rad repräsentiert wird (Fig. 48 und 49). Diese beiden Räder besitzen gekrümmte Schaufeln von solcher Gestalt, daß außer der Stoßwirkung auch die lebendige Kraft des Wassers zur Ausnutzung gelangt; außerdem wird bei diesen Rädern das Wasser auf dem Wege von seinem

Eintritte bis zum Austritte durch eine nach dem Radumfang gekrümmte, möglichst nahe an die Schaufelkanten herangerückte Wandung nach außen abgeschlossen. — Bei den mittelschlächtigen Wasserrädern erfolgt die Beaufschlagung ungefähr in der Höhe der Radachse, bei einzelnen Ausführungen etwas darüber,



Zugspringer-Rad.

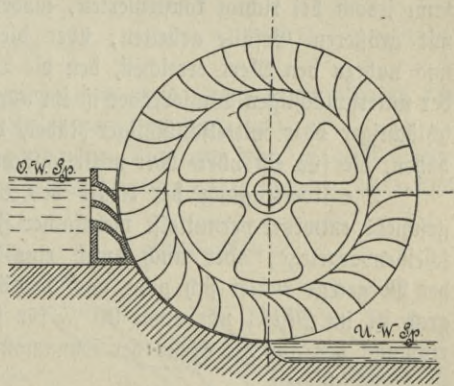
Fig. 48.



Poncellet-Rad.

Fig. 49.

bei anderen etwas tiefer (Fig. 50). Die Wirkung des Wassers beruht bei solchen Rädern, zweckentsprechende Form der Schaufeln vorausgesetzt, sowohl in seinem Stoße gegen die Schaufeln als auch in seinem Gewichte. Da sich bei diesen Rädern der Wassereintritt nach der Schaufelform richten muß, so wird derselbe gewöhnlich durch Kullissen geregelt. — Die Entscheidung der Frage, welche Ausführungsform im konkreten Falle anzuwenden ist, um bei möglichst niedrigen Anlagekosten den höchsten Wirkungsgrad zu erreichen, richtet sich im wesentlichen nach der Höhe des vorhandenen Gefälles und nach der verfügbaren Wassermenge. Bei Gefällen von mehr als 4 m Höhe und kleineren Wassermengen ist im allgemeinen das obereschlächtige Wasserrad am Platze, während bei Gefällhöhen unter 4 m bis etwa 2,5 m gewöhnlich mittelschlächlige Räder und bei noch kleinerem Gefälle untereschlächtige Räder Anwendung finden.



Mittelschlächliges Wasserrad.

Fig. 50.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Wasserräder schwankt je nach den örtlichen Verhältnissen und der angewandten Konstruktion in ziemlich weiten

Grenzen und hängt in erster Linie von der Menge des beaufschlagenden Wassers ab; sie kann bis zu 2 m pro Sekunde betragen. Für den Antrieb von rasch laufenden Dynamomaschinen empfiehlt es sich, die Umfangsgeschwindigkeit schon mit Rücksicht auf die dabei in Betracht kommenden Überetzungsverhältnisse so weit als möglich zu steigern; außerdem wächst der Wirkungsgrad der Wasserräder, und gleichzeitig verringern sich ihre Abmessungen und damit ihre Anlagekosten in gewissen Grenzen bei gleichbleibender Leistung, wenn man die Umfangsgeschwindigkeit erhöht.

Die Regulierung der ober- und unterschlächtigen Wasserräder ist eine verhältnismäßige rohe; sie geschieht dadurch, daß man durch Verstellung der Schütze des Oberwassergrabens den Wasserzufluß verändert. Eine wesentlich feinere Regulierung gestatten bereits die mittelschlächtigen Räder, da bei diesen der Wasserzufluß jeder einzelnen Kluße geregelt werden kann; es wächst daher die Feinheit der Regulierung mit der Anzahl der Klüffen. Die Betätigung der Reguliervorrichtungen geschieht gewöhnlich von Hand; sie läßt sich indessen auch automatisch bewirken, indem man hierzu beispielsweise einen Elektromotor verwendet, welcher durch ein unter dem Einfluß der Netzspannung stehendes Relais ein- und ausgeschaltet oder in seiner Drehrichtung geändert wird.

Die bei den Wasserrädern auftretenden Verluste setzen sich zusammen aus dem Gefälleverluste des Wassers bei seinem Eintritte in die Schaufeln und beim Austritte aus denselben; ferner aus der Reibung der Achsenzapfen in den Lagern und dem Luftwiderstande, den das Rad zu überwinden hat. Der Gesamtwirkungsgrad beträgt bei älteren Anlagen, z. B. Mühlrädern, die für kleinere Beleuchtungsanlagen öfters in Frage kommen, kaum mehr als 40—50%; er kann jedoch bei richtig konstruierten, modernen Rädern, besonders solchen, die mit größerem Gefälle arbeiten, über diesen Betrag hinaus wesentlich steigen und nahezu den Wert erreichen, den die Turbinen besitzen. Der Wirkungsgrad der unterschlächtigen Wasserräder ist im allgemeinen geringer, als derjenige ober- oder mittelschlächtiger Räder, die ersteren kommen deshalb für Fallhöhen, die für ein ober- oder mittelschlächtiges Rad genügen, nicht in Betracht.

Die Übertragung der Kraft des Wasserrades auf die Dynamomaschine geschieht entweder vermitteltst mehrfacher Zahnradvorgelege, oder durch Riemen- oder Scheibenvorgelege, oder auch durch eine Vereinigung beider. Die Anordnung der Vorgelege richtet sich ganz nach den örtlichen Verhältnissen; ihr Wirkungsgrad ist im Mittel mit etwa 90% für jede einfache Überetzung bei der Berechnung der auf die Welle der Dynamomaschine wirklich übertragenen Leistung zu berücksichtigen.

Eine im allgemeinen wesentlich rationellere Ausnutzung der im Wasserfälle enthaltenen Energie, als sie mit Wasserrädern möglich ist, erreicht man mit Turbinen.

Die Turbine besteht aus einem feststehenden Leitapparate und einem mit der Rotationsachse verbundenen Laufrade. Der Leitapparat erteilt dem Wasser eine bestimmte Richtung, in welcher es möglichst stoßfrei in das Laufrad eintritt und seine lebendige Kraft an das letztere abgibt, — im Gegen-

sage zu den Wasserrädern, bei denen das Wasser, wie wir sahen, vorwiegend durch sein Gewicht und durch den Stoß gegen die Nabschaufeln wirkt. Der Leitapparat L ist bei den Turbinen im gewöhnlichen Sinne des Wortes ein mit einer großen Zahl in bestimmten Sinne gekrümmter Zellen versehenes Rad,

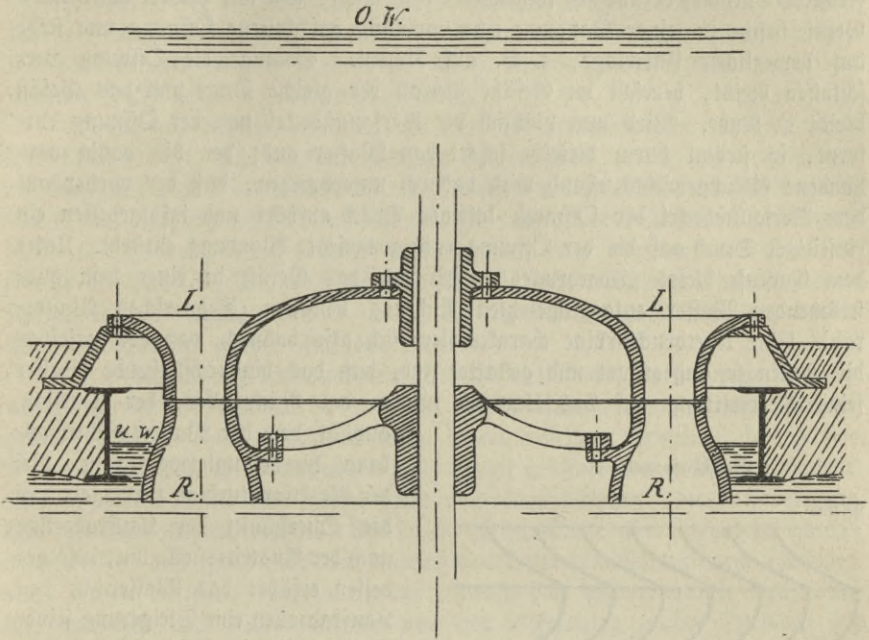


Fig. 51.

welches fest montiert wird; das rotierende Lauftrad R ist jenem ähnlich konstruiert und mit korrespondierenden Zellen versehen (Fig. 51).

Die Turbinen zerfallen bezüglich ihrer Wasserwirkung in zwei Hauptgruppen, nämlich in Druckturbinen und Überdruckturbinen. Die Ausführungsformen der Turbinen jeder der beiden Gruppen sind sehr mannigfaltig, wie aus den nachstehenden Erörterungen hervorgeht.

Sind die Zellen des Leitapparates und des Laufrades so gestaltet und angeordnet, daß die hindurchgehenden Wasserstrahlen lediglich vermöge ihres natürlichen Druckes auf die Wandungen der Lauftradzellen unter Abgabe ihrer Geschwindigkeit an die letzteren, so bezeichnet man den Apparat als Druckturbine oder Aktionsturbine, auch wohl als Girard-Turbine nach dem Namen ihres Erfinders. Die Lauftradzellen einer Aktionsturbine

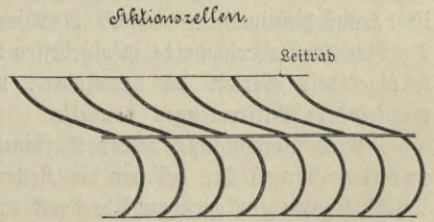


Fig. 52.

haben überall den gleichen Querschnitt und konstante Krümmung (Fig. 52); die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades ist am günstigsten, wenn sie gleich der halben Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers gewählt wird.

Die Reaktions-turbine oder Überdruckturbine (Fouval-Turbine, Francis-Turbine) beruht auf folgender Erscheinung: Ein mit Wasser angefülltes Gefäß besitze in seiner Wandung eine vorläufig geschlossene Öffnung und stehe auf beweglicher Unterlage, z. B. auf Rollen. Solange die Öffnung verschlossen bleibt, herrscht im Gefäße überall der gleiche Druck und das Gefäß bleibt in Ruhe. Wird nun plötzlich der Verschlussdeckel von der Öffnung entfernt, so strömt durch dieselbe sofort das Wasser aus; der bis dahin vorhandene Gleichgewichtszustand wird dadurch unterbrochen, daß der vorher auf dem Verschlussdeckel der Öffnung lastende Druck aufhört und infolgedessen ein einseitiger Druck auf die der Öffnung entgegengesetzte Wandung entsteht. Unter dem Einfluß dieses „Überdruckes“ wird sich das Gefäß in einer dem ausströmenden Wasser entgegengesetzten Richtung bewegen (Segnersches Wasser-rad). Eine Überdruckturbine charakterisiert sich also dadurch, daß bei derselben die Zellen so angeordnet und gestaltet sind, daß das hindurchfließende Wasser seine Drehwirkung auf das Laufrad infolge des Rückpralles, der Reaktion,

Reaktionszellen.

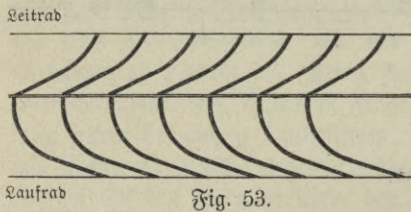


Fig. 53.

ausübt, dem der Wasserzuführungskanal hierbei unterworfen ist. Bei der Reaktions-turbine verringert sich der Querschnitt der Laufradzellen nach der Austrittsstelle hin; infolgedessen erfährt das Wasser in den Laufradzellen eine Steigerung seiner Geschwindigkeit (Fig. 53). Eine weitere Folge der Reaktionswirkung ist in der Pressung zu erblicken,

die in dem Spalte zwischen Leitrad und Laufrad herrscht, im Gegensatz zu den Aktionsturbinen, bei welchen ein Spaltdruck nicht vorhanden ist. Daher eignen sich Überdruckturbinen besonders für kleinere und mittlere Gefälle, während Druckturbinen vorwiegend für größere Gefällhöhen in Frage kommen. Endlich ist darauf hinzuweisen, daß die Reaktionswirkung eine präzise Regulierung der Turbinenkanäle erschwert; infolgedessen wird man die besser regulierbare Druckturbine mit Vorteil da verwenden, wo es sich um die Ausnutzung stark wechselnder Wassermengen handelt.

Eine Vereinigung beider Turbinenarten wird durch die sogen. Grenz-turbine dargestellt, bei der die Zellen eine solche Form haben, daß in der Turbine zwar ein geringer Überdruck entsteht, gleichzeitig aber das Wasser das Laufrad mit konstanter Geschwindigkeit passiert. Das Anwendungsgebiet dieser Turbinen ist dasselbe wie das der Reaktionsturbinen.

Die Turbinen werden hauptsächlich in folgenden Formen ausgeführt:

1. Als Axialturbinen, wobei das Wasser die beiden Turbinenräder in der Richtung der Rotationsachse durchfließt; die Achse kann hierbei sowohl

vertikal angeordnet werden, in welchem Falle der Leitapparat sich über dem Laufrade befindet, als auch horizontal; alsdann sind die beiden Räder nebeneinander angeordnet.

2. Als Radialturbinen, wobei das Wasser die beiden Turbinenräder in einer zur Achse senkrechten Richtung durchströmt. In diesem Falle befindet sich das eine Turbinenrad innerhalb des anderen, und zwar bezeichnet man die Turbine als außenschlächtig, wenn der Leitapparat außen liegt; im anderen Falle heißt sie innenschlächtig.

Ferner unterscheidet man bei den Turbinen bezüglich ihrer Beaufschlagung Vollturbinen, bei welchen sämtliche Laufradzellen gleichzeitig beaufschlagt werden, und Partialturbinen, bei denen nur ein Teil der Laufradzellen eine Beaufschlagung erfährt; im letzteren Falle wird der Leitapparat gewöhnlich nicht als Rad ausgebildet, sondern er besteht aus einem oder mehreren Kanälen, welche den Laufradzellen das Wasser zuführen. Partialturbinen kommen hauptsächlich dann in Frage, wenn es sich um die Ausnutzung verhältnismäßig kleiner Wassermengen bei großer Fallhöhe handelt.

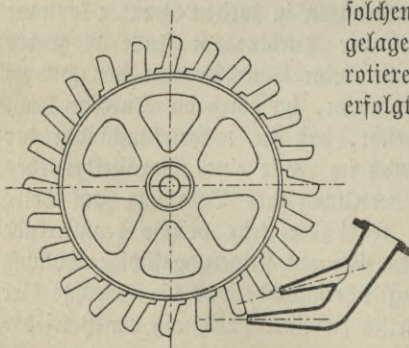
Die Regulierung der Turbinen geschieht meist durch Veränderung der beaufschlagenden Wassermenge in der Weise, daß die Anzahl der wirksamen Leitradzellen vermehrt oder vermindert wird, indem dieselben mittelst beweglicher Klappen oder Schiebervorrichtungen nach Bedarf geöffnet oder geschlossen werden. Diesem Zwecke dient eine große Zahl von Konstruktionen, deren Erörterung hier zu weit führen würde. Es sei an dieser Stelle aber besonders darauf hingewiesen, daß gerade für den Antrieb von Dynamomaschinen durch Turbinen eine präzise wirkende Regulierung der letzteren von hervorragender Bedeutung ist, und daß aus diesem Grunde von den Lieferanten solcher Turbinen für das richtige und zweckentsprechende Funktionieren des Regulierapparates bestimmte und weitgehende Garantien verlangt werden sollten. Der Turbinenregulator muß mit Rücksicht auf die vorgeschriebene Unveränderlichkeit der Zentralspannung die Tourenzahl bei Belastungsänderungen in weiten Grenzen konstant halten; er muß ferner ein „Durchgehen“ der Turbine im Falle plötzlicher vollkommener Entlastung, die beispielsweise beim Durchbrennen der Hauptbleisicherungen leicht eintreten kann, verhindern, da sonst die Turbine leicht eine so hohe Umfangsgeschwindigkeit erreicht, daß sie unter Umständen der Zerstörung ausgesetzt ist. Er muß endlich im Falle eines Parallelbetriebes mit einer Dampfmaschine die richtige Verteilung der Belastung auf beide Betriebsmaschinen gestatten, weil sonst leicht die sehr präzise regulierende und in bezug auf ihre Leistung in weiten Grenzen steigerungsfähige Dampfmaschine den größten Teil der Belastung übernimmt, und die Turbine leer oder schwach belastet mitläuft, was natürlich zu einer Erhöhung der Betriebskosten Veranlassung gibt.

Die Turbinen bieten gegenüber den Wasserrädern mancherlei Vorteile, die sich sowohl auf ihre Anpassungsfähigkeit an die örtlichen Verhältnisse, als auch auf die Wirkungsweise der Maschinen selbst beziehen. Was den ersten Punkt anbelangt, so gestatten die Turbinen die Ausnutzung eines jeden

Gefälles von beliebiger Höhe in rationeller Weise. Ferner sind sie in weiten Grenzen unabhängig von den lokalen Gefällverhältnissen, insofern, als sie bezüglich ihrer Anordnung im Gefälle nicht an die Lagerung des Laufrades unmittelbar über bzw. unter dem Unterwasserspiegel gebunden sind; denn die unterhalb der Turbine befindliche Höhendifferenz bis zum Unterwasserspiegel besitzt eine Saugwirkung, die der entsprechenden Druckwirkung des Gefälles vollständig gleichkommt — vorausgesetzt, daß der Zusammenhang der Wassersäule zwischen Oberwasserspiegel und Unterwasserspiegel an keiner Stelle unterbrochen wird. Was ferner die Wirkungsweise betrifft, so gestatten die Turbinen, wenn sie in ihrer Konstruktion und Anordnung den Verhältnissen des einzelnen Falles richtig angepaßt werden, eine wesentlich bessere Ausnutzung der Wasserkraft als die Wasserräder, da sie im allgemeinen einen besseren Wirkungsgrad haben als diese.

Die in der Turbine auftretenden Verluste setzen sich zusammen aus Kraftverlusten infolge der Reibung der Achse in ihren Lagern, ferner aus Reibungs- und Wirbelverlusten, die das Wasser auf seinem Wege durch die Zellen des Leit- und Laufrades erfährt; ferner aus dem Spaltverluste und dem Verluste, welcher der Geschwindigkeit des aus dem Laufrade tretenden Wassers entspricht. Der Gesamtwirkungsgrad einer modernen, allen Anforderungen der Technik entsprechend gebauten und den Verhältnissen des konkreten Falles richtig angepaßten Turbine kann zu 75 % angenommen werden, ein Wirkungsgrad, der von Wasserrädern nur ganz ausnahmsweise unter besonders günstigen Verhältnissen erreicht werden dürfte.

Die Übertragung der Kraft von der Turbine auf die Dynamomaschine erfolgt bei Maschinen von großer Leistung, sowie bei rasch laufenden Turbinen am besten durch direkte Kupplung beider Achsen, bezw. durch Aufsetzen des Rotationskörpers der Dynamo auf die Turbinenachse, da alsdann die Transmissionsverluste erspart werden. Bei Turbinen mit vertikaler Achse muß in solchen Fällen die Dynamo ebenfalls vertikal gelagert werden, so daß die Drehung ihres rotierenden Teils in einer horizontalen Ebene erfolgt. Ist die direkte Kupplung beider Maschinen nicht angängig, so schaltet man bei Turbinen mit vertikaler Achse am besten ein Kegehradgetriebe zwischen die treibende und getriebene Welle, während man bei horizontal gelagerten Turbinen eine Riemenscheibe auf deren Achse setzen und die Dynamo von dieser aus antreiben kann.



Pelton-Rad.

Fig. 54.

Zu den Turbinen muß auch das in der Konstruktion von den vorstehend erwähnten Ausführungen äußerlich abweichende **Peltonrad** — trotz seiner anders lautenden Bezeichnung — gerechnet werden. Das Peltonrad besteht aus

einem von Holz oder Eisen verfertigten, wasserradähnlichen Laufrade mit horizontaler Achse, an dessen Peripherie eine Anzahl doppeltmilbenförmiger, gewöhnlich aus harter Bronze hergestellter Schaufeln befestigt ist; das beaufschlagende Wasser wird dem Laufrad gewöhnlich an seinem Tiefpunkte zugeführt und vermittelt einer — bei größeren Ausführungen auch mehrerer — Nöhren gegen die Schaufeln geleitet (vergl. Fig. 54).

Die beiden Mulden einer jeden Schaufel sind durch eine Zwischenwand von mäßiger Schärfe voneinander getrennt (Fig. 55); durch dieselbe wird der beaufschlagende Wasserstrahl geteilt und an den Innenwänden der beiden Schaufelhälften entlang geführt, wobei er seine lebendige Kraft an dieselben abgibt.



Fig. 55.

Betrachtet man die Wirkungsweise des Peltonrades, so erkennt man, daß es gewissermaßen aus zwei miteinander verbundenen Schaufelrädern besteht, deren Schaufeln je die Hälfte des eintretenden, durch die Zwischenwand geteilten Wasserstrahles einseitig zugeführt wird, während die an den Schaufeln entlang gleitenden Wasserstrahlen lediglich durch ihren natürlichen Druck wirken. Da ferner das beaufschlagende Wasser nur eine, oder bei größeren Ausführungen wohl zwei oder höchstens drei der Schaufeln gleichzeitig trifft, so sind alle Kennzeichen gegeben, um das Peltonrad als eine doppelseitenschlächtige partial beaufschlagte Aktionsturbine mit horizontaler Achse zu charakterisieren.

Die Regulierung geschieht durch Drosselung der beaufschlagenden Wasserstrahlen, also unter Druckverlust; deshalb sind Voraussetzungen für die zweckmäßige Verwendung des Peltonrades im konkreten Falle konstante Wasserkraft und konstante Arbeit; der Wirkungsgrad des Apparates liegt unter dieser Voraussetzung ziemlich hoch und kann 75—80 % betragen. —

Was das Anwendungsgebiet der verschiedenen Turbinen anbelangt, so wird man bei kleineren und mittleren Gefällen meist normale Turbinen mit vertikalen Achsen anwenden, und zwar Aktionsturbinen für kleinere, Reaktionsturbinen für größere Rotationsgeschwindigkeiten. Bei großen Gefällhöhen sind entweder Reaktionsturbinen mit horizontaler Achse oder auch Peltonräder am Platz; die letzteren finden manchmal in Bergwerken vorteilhaft Verwendung, wenn es sich — wie es öfter vorkommt — darum handelt, die Kraft der von höher gelegenen Sohlen in den Sumpf stürzenden Wasser für elektrische Schachtbeleuchtung, Streckenförderung u. dergl. nutzbar zu machen.

II. Wärmemaschinen.

Bevor wir auf den Gegenstand selbst näher eingehen, seien folgende Bemerkungen über die Brennmaterialien und die Ausnutzung der in ihnen enthaltenen Energie zur Dampferzeugung vorausgeschickt. Da die Verwendung der Steinkohle stark überwiegt, so wollen wir sie allein berücksichtigen.

Die Steinkohle enthält Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Wasser (H₂O), und zwar sowohl chemisch gebundenes als hygroskopisches, ferner

Schwefel und mineralische Beimengungen. Die mineralischen Substanzen bleiben, wenn die Kohle verbrannt wird, als Asche zurück. Die Zusammensetzung ist eine sehr schwankende; meistens enthält die Steinkohle:

75—85 % C, 4—5 % H, $1\frac{1}{2}$ —4 % H_2O , Asche 2—10 % und darüber,
10—12 % O, Schwefel in geringer Menge.

Man bezeichnet Kohlen mit 2—4 % Aschenbestandteilen als gute, solche mit 4—10 % als mittelmäßige und mit 10 % und mehr Prozent als schlechte.

Bei Gegenwart einer bestimmten Menge Eisenoxyds oder von Silikaten nimmt die Asche eine mehr oder minder zähflüssige Beschaffenheit an und gibt dadurch leicht Veranlassung zur Verstopfung der Rostspalten — Schlackebildung. Diesem Übelstande, durch den die Bewegung der Luft verhindert wird, kann man dadurch abhelfen, daß man der betreffenden Kohle eine andere geeignete Sorte beimischt; auch wird empfohlen, etwas Kalk oder schwefelsaures Natrium zuzusetzen. Durch letzteren Zusatz wird die Schlacke dünnflüssig, so daß sie durch die Rostspalten fallen kann.

Pulverisiert man eine kleine Probe Kohle und erhitzt man sie stark im Platintiegel, so ist der Rückstand entweder pulverig (Sandkohle), oder es tritt eine mehr oder minder weitgehende Schmelzung ein. Die Kohle heißt Sinterkohle, wenn der Koks zu einer zusammenhängenden, festen, aber rauhen Masse zusammensintert, und Backkohle, wenn die Masse eine glatte, metallglänzende Oberfläche zeigt. Die Backkohlen werden auch als fette Kohlen, die hitzebeständigen Sand- und Sinterkohlen als Magerkohlen bezeichnet.

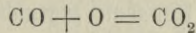
Unter dem Brennwert oder der Heizkraft eines Heizmaterials versteht man diejenige Wärmemenge, die bei der Verbrennung von 1 kg des betreffenden Stoffes frei wird, wenn sich die Verbrennungsprodukte bis zur Temperatur der Umgebung (15°) abkühlen können. Um uns von der möglichen und wirklichen Ausnutzung der Verbrennungswärme ein Bild zu verschaffen, wollen wir annehmen, daß 1 kg Kohlenstoff vollständig verbrenne, d. h. sich mit Sauerstoff (O) zu Kohlenäure (CO_2) verbinde. Bei diesem Vorgange wird eine gewisse Wärmemenge frei, die etwa 8400 Kalorien beträgt. Die erzeugte Wärme geht, wenn wir von der Wärmestrahlung seitens der glühenden Kohle absehen, auf das Verbrennungsprodukt (CO_2) über. In der Praxis geht aber die Verbrennung nicht in reinem Sauerstoffe vor sich, sondern in der dem Brennstoffe zugeleiteten atmosphärischen Luft. Um 1 kg C in CO_2 überzuführen, sind 11,6 kg Luft erforderlich. Würde nur dieses theoretische Luftquantum in den Feuerraum gelangen, so würden 12,6 kg Verbrennungs- oder Rauchgase entstehen, die durch die frei gewordenen 8400 Kal. bis zu einer gewissen Temperatur t erhitzt würden. Da in den technischen Feuerungsanlagen das theoretische Luftquantum überschritten wird — das wirkliche Luftquantum beträgt bei einer gut bedienten Anlage das 2 bis 3fache des theoretischen —, so verteilt sich die Verbrennungswärme auf eine größere Gasmenge, so daß die Rauchgase eine Temperatur annehmen, die weit unter t liegt. In einer Dampfkesselanlage geben die heißen Gase auf ihrem Wege zum Schornsteine an die kälteren Wände

des Kessels Wärme ab, und zwar im denkbar günstigsten Falle so lange, bis sie selbst die Temperatur des Kessels angenommen haben. Die in den abziehenden Gasen aufgespeicherte Wärme bedeutet natürlich einen Wärmeverlust, und je mehr das theoretische Luftquantum überschritten wird¹⁾, um so größer ist dieser Wärmeverlust, oder um so niedriger ist der Wirkungsgrad der Dampfkesselanlage.

Ferner ist zu beachten, daß bei zu starkem Luftzuge den Gasen wegen ihrer größeren Strömungsgeschwindigkeit für die Wärmeabgabe an die Kesselwand nicht genügend Zeit bleibt.

Wird beispielsweise bei einer Kohle von 80% C, 5% Wasserstoff und 10% Sauerstoff das Dreifache des theoretischen Luftquantums verbraucht, und haben die abziehenden Gase bei ihrem Eintritt in den Schornstein eine Temperatur von 250°, so gehen ca. 25% der Verbrennungswärme verloren.

Bei zu schwachem Luftzuge geht die Verbrennung zu langsam vor sich und kann eine unvollständige sein, indem sich nämlich statt Kohlenäure (CO₂) Kohlenoxyd (CO) bildet. Die dem Prozesse



entsprechende Wärmemenge ist natürlich als Verlust zu betrachten.

Als Maß für die Stärke des Luftzuges, der, wie sich aus den vorhergehenden kurzen Betrachtungen ergeben dürfte, für die Ökonomie einer Feuerungsanlage von großer Bedeutung ist, dient der Unterschied des Druckes außerhalb des Feuerraumes und des Druckes am unteren Ende des Schornsteines. Diesen Unterschied mißt man, indem man eine zum Teil mit Wasser gefüllte U förmige Glasröhre durch einen Gummischlauch mit dem Schornsteine verbindet.

Wenn man berücksichtigt, daß sich die Heizgase auf ihrem Wege zum Schornsteine fortwährend abkühlen und daß sie keine Wärme mehr abgeben können, wenn ihre Temperatur gleich ist der Temperatur des Kesselteiles, den sie befeuchten, so findet man, daß die Wärmeausnutzung eine günstigere wird, wenn man dafür sorgt, daß die Temperatur des Kessels ein nach dem Schornstein hin gerichtetes Gefälle hat. Dieses erreicht man, wenn das Wasser im Kessel entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Feuergase strömt — Gegenstromheizfläche. Strömt das Wasser in gleicher Richtung wie die Heizgase, so nennt man die Heizfläche Parallelstromheizfläche.

Die Menge der dem Brennstoffe zuströmenden Luft hängt außer von der Stärke des Zuges von der Größe der Rostrfläche ab, und zwar kommt hier die sogen. freie Rostrfläche in Betracht. Man versteht darunter die Summe der zwischen den einzelnen Rostrstäben befindlichen Spalten. Wenn Steinkohlen verfeuert werden, beträgt die freie Rostrfläche in der Regel 33—50% der

¹⁾ Das theoretische Luftquantum muß in der Praxis überschritten werden, weil man die Bewegung der Luft niemals so leiten kann, daß alle Sauerstoffteilchen mit den heißen Teilen des Brennstoffes in Berührung kommen und chemisch gebunden werden. Als Minimum der Luftzufuhr kann man das Doppelte des theoretischen Quantums ansehen.

Gesamtrostfläche. Die Angaben über die Menge des Brennstoffes, die man zweckmäßig auf 1 qm Rostfläche in 1 Stunde verbrennt, schwanken innerhalb weiter Grenzen. Unter normalen Verhältnissen kann man mit etwa 75 bis 90 kg Steinkohle pro Stunde und Quadratmeter rechnen.

Die Bestimmung des Heizwertes der Kohle kann erfolgen:

1. aus der chemischen Analyse,
2. durch die kalorimetrische Methode,
3. durch die Verdampfungsprobe.

Ad 1. Durch die chemische Analyse möge ermittelt sein, daß 100 kg Kohlen enthalten:

C kg Kohlenstoff, H kg Wasserstoff, O kg Sauerstoff, S kg Schwefel,
W kg Wasser.

Dann ist nach der Dulong'schen Formel der Heizwert der betreffenden Kohle, bezogen auf 100 kg, ausgedrückt in großen Wärmeeinheiten

$$Q = 8100 C + 29000 (H - \frac{1}{8} O) + 2500 S - 600 W.$$

Dieser Formel liegt die Annahme zugrunde, daß sich die Verbrennungsgase bis zu etwa 100° abkühlen können.

Was den Wasserstoff anbelangt, so wird unterschieden zwischen dem gesamten und dem disponiblen Gehalt. Man nimmt nämlich an, daß der vorhandene Sauerstoff an Wasserstoff gebunden sei. Nun binden, wie man unter Berücksichtigung der Atomgewichte aus der Formel H_2O (= Wasser) entnehmen kann, 2 kg H 16 kg O, oder 1 kg Sauerstoff bindet $\frac{1}{8}$ kg Wasserstoff. Daher ist $H - \frac{1}{8} O$ der disponible Wasserstoff der Kohle, d. h. der Wasserstoff, der sich mit Sauerstoff der Luft zu Wasser vereinigen kann.

Das letzte Glied ist negativ, weil durch das Wasser der Heizwert erniedrigt wird. Da nämlich das Wasser als Dampf entweicht, so ist insbesondere diejenige Wärme als Verlust anzusehen, die Dampf von 100° abgibt, wenn er in Wasser von 100° übergeht (latente Wärme). Diese beträgt pro 1 kg Dampf 537 Kalorien.

Ad 2. Die kalorimetrische Methode besteht darin, daß man eine kleine Probe von etwa 1 g, die mittels einer Presse zu einem kleinen Zylinder geformt wird, in der Berthelot'schen Bombe verbrennen läßt; die Verbrennungswärme wird von einer größeren Wassermenge, die die Bombe umgibt, aufgenommen. Die Bombe wird vor der Entzündung der Kohlenprobe mit Sauerstoff von etwa 12 Atm. gefüllt und die Verbrennung dadurch eingeleitet, daß man einen um das Zylinderchen gewundenen, dünnen Eisendraht mittels eines elektrischen Stromes bis zum Glühen erhitzt¹⁾.

Ad 3. Am häufigsten dürfte wohl in der Praxis die Verdampfungsprobe angewandt werden. In etwas erweiterter Form findet sie auch bei der Prüfung einer Dampfkesselanlage Anwendung. Es ist jedoch zu beachten, daß die Ver-

¹⁾ Näheres siehe Fischer, Technologie der Brennstoffe, oder Zeitschrift für angewandte Chemie 1892, S. 389.

dampfungsprobe nur die Güte verschiedener Kohlenforten miteinander zu vergleichen, dagegen nicht den absoluten Heizwert einer bestimmten Kohlenforte festzustellen ermöglicht. Ein zutreffendes Resultat erhält man ferner nur dann, wenn man bei jeder Probe unter denselben äußeren Bedingungen arbeitet. So z. B. kann durch die größere oder geringere Dicke der Kesselsteinschicht das Resultat nicht unerheblich beeinflusst werden.

Der Versuch ¹⁾ soll möglichst lange dauern (etwa 10 Stunden), damit der Einfluß von Unregelmäßigkeiten, Schwankungen, Zufälligkeiten, der unvermeidlichen Messungs- und Wägungsfehler, sowie der Qualitätsdifferenzen des Brennmaterials auf das Prüfungsergebnis ausgeschaltet wird. Vor Beginn des Versuches muß der Dampfkessel längere Zeit im Betriebe gewesen sein, so daß die Wärmeabgabe nach außen eine konstante ist; der Dampf muß seine normale Spannung haben. Der Wasserstand im Kessel ist zu markieren; er soll ebenso wie der Dampfdruck während des ganzen Versuches möglichst auf gleicher Höhe gehalten werden. Die in kurzen Intervallen vorzunehmenden Messungen und die Untersuchungen erstrecken sich auf:

1. die während des Versuches verdampfte Wassermenge in kg,
2. " " " " verbrauchte Kohlenmenge in kg,
3. den Dampfdruck oder die Dampftemperatur, die Temperatur des Speisewassers,
4. Stärke des Luftzuges,
5. Temperatur der Gase an der Stelle, wo sie den Kessel verlassen,
6. Analyse der abziehenden Gase.

Die Gasanalyse ist vorzunehmen, weil sie ein Mittel an die Hand gibt, festzustellen, ob und inwieweit die Verbrennung eine vollständige war, und weil man aus ihr die zugeführte Luftmenge berechnen kann.

Bei den eventuell vorzunehmenden Berechnungen ist noch folgendes zu berücksichtigen: Die Siedetemperatur des Wassers hängt von dem auf ihm lastenden Drucke ab. Ist dieser Druck der Luftdruck (1 kg pro 1 cm²), so erfolgt das Sieden, d. h. die schnelle Verdampfung unter Bildung von Dampfblasen, bei 100°. Kann der im Kessel entstandene Dampf nicht entweichen, so tritt in den mit Luft angefüllten Raum über dem Wasser Dampf, und der Druck wächst über 1 Atm.; infolgedessen steigt der Siedepunkt. Die Beziehung zwischen Druck im Kessel und Siedetemperatur ist aus folgender Tabelle zu ersehen.

Tabelle II.

Siedetemperatur	Druck in Atm.	Siedetemperatur	Druck in Atm.
100° Cels.	1	159° Cels.	6
120,6° "	2	171° "	8
134° "	3	180° "	10
144° "	4	187° "	12
152° "	5		

¹⁾ Näheres siehe Zeitschr. des Vereins Deutscher Ingenieure 1900, Nr. 14, oder G.-Z. 3. 1900, S. 352.

[Je größer der Kesseldruck, desto kleiner ist das spezifische Volumen des Dampfes = Anzahl Liter Dampf, die man aus 1 kg Wasser erhält. Dieses nimmt etwas langsamer ab, als der Steigerung des Druckes entsprechen würde.]

Unter Überdruck versteht man den um 1 Atm. (nämlich den äußeren Luftdruck) verminderten Druck, den der Dampf ausübt. Unter Druck ohne jede nähere Angabe ist der Überdruck zu verstehen.

Um 1 kg Wasser von t_0° in Dampf von t_1° zu verwandeln, sind erforderlich:

$$606,5 + 0,305 \cdot t_1 - t_0 \text{ Cal.}$$

Beispiel: Die Temperatur des Speisewassers sei 30° , der Dampfdruck im Kessel 10 Atm. Wir müssen dann, um 1 kg Dampf zu erzeugen, einem Kilogramm Wasser im ganzen zuführen: $606,5 - 0,305 \cdot 180 - 30 = 631,5 \text{ Cal.}$

Nennen wir also die Verdampfungszahl, d. h. die Anzahl der Kilogramm Wasser von bestimmter Anfangstemperatur, die durch 1 kg Brennstoff in Dampf von gewisser Temperatur (oder Spannung) verwandelt werden, so können wir die an den Kessel abgegebene Wärmemenge berechnen. Nennen wir den Heizwert Q und die an den Inhalt des Kessels abgegebene Wärme Q_1 , so ist $\frac{Q_1}{Q}$ der Wirkungsgrad der Dampfkesselanlage.

Von der in dem Dampfe aufgespeicherten Wärmemenge Q_1 kann nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie auch bei einer vollkommenen thermodynamischen Maschine nur ein Teil in äußere Arbeit verwandelt werden. Die Ausnutzung ist um so größer, je höher die Anfangstemperatur des Dampfes und je niedriger die Temperatur ist, mit welcher der Dampf den Arbeitszylinder verläßt.

Nennen wir den Bruchteil von Q_1 , der in Arbeit umgesetzt wird, Q_2 , so heißt man $\frac{Q_2}{Q_1}$ den thermischen Wirkungsgrad der Maschine. Von der in der Maschine erzeugten (indizierten) Arbeit wird ein Teil zur Überwindung der Reibung und des Luftwiderstandes verbraucht, so daß die von der Maschine abgegebene Arbeit, die Nutzarbeit, kleiner ist als die indizierte Arbeit. Man nennt das Verhältnis der Nutzarbeit zur indizierten Arbeit den indizierten Wirkungsgrad, oder kurz den Wirkungsgrad der Maschine.

Wir wollen uns noch, ehe wir mit der Beschreibung der Dampfmaschinenanlage beginnen, mit dem Unterschiede zwischen gesättigtem und überhitztem Dampf bekannt machen. Ein gegebener Raum kann bei einer bestimmten Temperatur nur eine gewisse Menge Dampf (eine gewisse Anzahl Gramm Dampf) aufnehmen. Wenn nun ein Raum dasjenige Dampfgewicht enthält, das er bei der augenblicklich herrschenden Temperatur aufnehmen kann, so sagt man, der betreffende Raum sei mit Dampf gesättigt und nennt den in unserem Raume befindlichen Dampf gesättigten Dampf. Die Sättigungsmenge oder die Kapazität eines Raumes wächst mit der Temperatur. Enthält ein

Raum weniger Dampf, als er bei der herrschenden Temperatur aufzunehmen vermag, so heißt der Dampf überhitzt.

Wir wollen jetzt annehmen, es befinde sich in einem Zylinder mit leicht verschiebbarem Kolben eine kleine Menge Wasser. Wird das Wasser bis zum Siedepunkte erhitzt (100° C.), so wird der Kolben durch den Dampf emporgehoben und der Raum zwischen Kolben und Flüssigkeit ist stets mit gesättigtem Dampfe angefüllt, solange Wasser vorhanden ist. Wird der Kolben durch ein Gewicht belastet, etwa mit $9 \text{ kg pro } 1 \text{ cm}^2$, so daß der ganze äußere Druck jetzt 10 Atm. beträgt, so beginnt das Sieden des Wassers bei einer höheren Temperatur (180°); im übrigen gilt aber daselbe wie oben. Es möge jetzt in unserem Zylinder alles ursprünglich vorhandene Wasser in Dampf übergegangen sein; wir können dann auf zwei verschiedene Weisen den gesättigten Dampf in überhitzten überführen, nämlich erstens durch Erhöhung der Temperatur bei konstantem Volumen (Erhöhung der Kapazität) und zweitens durch Vergrößerung des Volumens bei konstanter Temperatur — natürlich auch durch Erhöhung der Temperatur und gleichzeitige Vergrößerung des Volumens. Der letzte Fall dürfte derjenige sein, der bei Dampfmaschinenanlagen mit Überhitzern in betracht kommt, denn der fortwährende Dampfverbrauch in der Dampfmaschine ist gleichwertig einer Volumvergrößerung.

Um eine Erklärung für die Bezeichnung „überhitzter“ Dampf zu geben, wollen wir annehmen, daß gesättigter Dampf von der Temperatur t_1 (beispielsweise 100°) und dem Drucke p_1 (1 Atm.) bei konstantem Volumen durch Wärmezufuhr bis zur Temperatur t_2 (etwa 180°) erhitzt werde. Infolge der Temperaturerhöhung steigt die Spannkraft des Dampfes — nach dem Mariotteschen Gesetze — und bei der Temperatur t_2 (180°) sei der Druck p_2 . Dieser Druck p_2 ist kleiner, als wenn wir gesättigten Dampf von der Temperatur t_2 hätten. In unserem Beispiele ist p_2 kleiner als 10 Atm. , d. h. kleiner als der Druck, den der gesättigte Dampf von 180° ausübt. Nennen wir den Druck des überhitzten Dampfes $p_2 - \delta$. Suchen wir zu $p_2 - \delta$ in unserer Tabelle II, die für gesättigten Dampf gilt, die zu $p_2 - \delta$ zugehörige Temperatur, so liegt diese unter t_2 (180°). Der überhitzte Dampf hat also eine höhere Temperatur (Übertemperatur) als gesättigter Dampf, der denselben Druck wie der überhitzte Dampf ausübt.

In dem gesättigten Dampfe, der sich in einem Dampfkessel bildet, befinden sich stets (besonders bei beschleunigter Dampfbildung) kleine Partikelchen nicht verdampften Wassers, welche durch die aus der Flüssigkeit entweichenden Dampfblasen entporgerissen worden sind — nasser Dampf. Diese Flüssigkeitspartikelchen können in dem dampferfüllten Raume des Kessels nicht verdampfen, da ja dieser Raum schon mit Dampf gesättigt ist. Leitet man den nassen, gesättigten Dampf durch eine oder mehrere Röhren, in denen eine höhere Temperatur herrscht als in dem Dampfkessel, so geht er in trockenen und, wenn die Erhitzung weit genug getrieben wird, in überhitzten Dampf über.

Nach diesen einleitenden Bemerkungen gehen wir zur Besprechung der Wärmemaschinen selbst über und behandeln zuerst:

A. Die Dampfkraftanlagen.

Eine Dampfkraftanlage besteht aus drei Hauptteilen, den Dampferzeugern oder Kesseln, der Dampfröhrlleitung und der Dampfmaschine; zu diesen kommt noch eine Anzahl Zubehörteile, deren Zweck und Anordnung in der Gesamtanlage aus der nachstehenden schematischen Figur hervorgeht. Zu der letzteren bemerken wir, daß — abgesehen von den Kesselspeisevorrichtungen — keineswegs alle darin aufgeführten Hilfsapparate in jedem Einzelfalle erforderlich sind; es wird sich vielmehr die Entscheidung der Frage, ob der eine oder andere Apparat anzuwenden und wie er zweckmäßig anzuordnen ist, stets nach den besonderen Verhältnissen des gerade vorliegenden Falles richten. Die Skizze hat daher lediglich den Zweck, den Einblick in den organischen Zusammenhang der Einzelteile, aus denen eine Dampfkraftanlage bestehen kann, zu erleichtern.

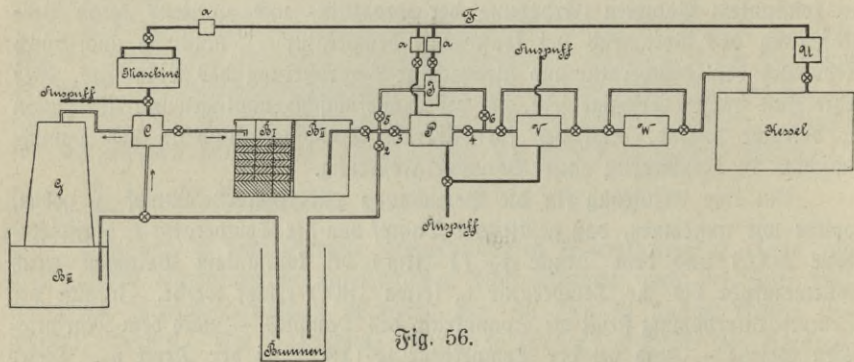


Fig. 56.

Wir gehen aus von der Speisepumpe P, deren Saugleitung mit einem Zweige nach dem Speisewasserbassin B_{II} und mit dem anderen zum Brunnen führt. Das Bassin enthält, wie wir später sehen, ölfreies, angewärmtes Wasser und dient für den normalen Betrieb als Speisewasserreservoir; der Brunnen kommt hierfür nur ausnahmsweise in Betracht, nämlich dann, wenn das Bassin B_{II} — etwa wegen der Vornahme von Reinigungsarbeiten — nicht gebrauchsfähig sein sollte. An Stelle des Brunnens kann eventuell ein Reservoir Bassin treten, das mit der öffentlichen Wasserleitung oder dergl. in Verbindung steht. Die Ventile 1 und 2 gestatten, die Pumpe entweder mit dem Bassin B_{II} oder mit dem Brunnen bzw. einem dementsprechenden Reservoir in Verbindung zu setzen; vermittelt des Ventils 3 wird die Saugleitung und durch das Ventil 4 die Druckleitung der Pumpe P geöffnet und geschlossen. Der Pumpe parallel geschaltet ist ein Injektor J, welcher für die erstere als Reserve dient; dieser kann durch das Ventil 5 mit der Saugleitung und durch Ventil 6 mit der Druckleitung für das Speisewasser in Verbindung gebracht werden. Sowohl die Pumpe, die hier als Dampfmaschine gedacht ist, wie der Injektor erhalten ihren Betriebsdampf aus der Hauptdampfleitung F.

Von der Pumpe bzw. dem Injektor wird das Speisewasser in den Dampfkessel gedrückt. Ist das Wasser kesselssteinhaltig, so empfiehlt sich die

Einschaltung eines Wasserreinigers W, welcher dasselbe von seinen kesselsteinbildenden Bestandteilen befreit. Ferner kann in die Druckleitung ein Vorwärmer V eingeschaltet werden, der von irgend einer Wärmequelle, z. B. den Abgasen des Kessels (Economiser), geheizt wird. In dem Schema ist angenommen, daß der Vorwärmer durch den Abdampf der Pumpe geheizt wird. Wenn der Kessel durch den Injektor gespeist wird, so ist der Vorwärmer überflüssig, weil das vom Injektor gelieferte Speisewasser in ihm nahezu auf Siedetemperatur gebracht wird.

Der vom Kessel erzeugte und eventuell in einem Überhitzer U überhitzte Dampf wird durch die Hauptdampfleitung F der Dampfmaschine zugeführt und leistet in dieser Arbeit. Die Hauptdampfleitung ist — besonders bei Verwendung von gesättigtem Dampfe — mit Wasserabscheidern a reichlich auszustatten.

Aus der Maschine gelangt der Dampf entweder ins Freie (Auspuffmaschine) oder in den Kondensator (Kondensationsmaschine).

In dem Kondensator C wird der Dampf verdichtet und zwar entweder dadurch, daß er mit kaltem Wasser vermischt wird (Einspritzkondensation), oder daß die Wandungen des Apparates von außen mit Wasser gekühlt werden und der Dampf sich an der Innenseite derselben niederschlägt (Oberflächenkondensation). Infolge der Verdichtung des Dampfes entsteht in dem Kondensatorgefäß ein Vakuum, das durch die Kondensationspumpe aufrecht erhalten wird und der Arbeit der Maschine zugute kommt, indem der von dem Kolben zu überwindende Gegendruck eine entsprechende Verminderung erfährt. Die Kondensationspumpe schafft nicht nur das im Kondensator sich sammelnde Wasser fort, sondern sie saugt auch am einfachsten selbst das Kühlwasser aus einem Kaltwasserbassin, z. B. dem Brunnen. Die Wärme, welche das Wasser beim Durchgang durch den Kondensator aufnimmt, kann vorteilhaft dadurch ausgenutzt werden, daß man einen Teil desselben zur Kesselspeisung verwendet. Bevor es jedoch hierzu geeignet erscheint, muß das Wasser von den Verunreinigungen, insbesondere den Ölbeimengungen, die es im Kondensator aufnimmt, befreit werden; zu diesem Zweck wird es in das Reinigungsbassin B₁ geleitet, in das man auch das Kondensat der verschiedenen Wasserabscheider, sowie eventuell dasjenige des mit Frischdampf geheizten Zylindermantels abführen kann, um auch deren Wärme auszunutzen. Dieses Bassin, das von dem Bassin B_{II} durch eine Zwischenwand getrennt ist und mit demselben durch eine am Boden befindliche Öffnung kommuniziert, enthält eine Anzahl abwechselnd mit dem Deckel und dem Boden des Bassins abschließender Scheidewände, die indessen nicht ganz so hoch sind wie das Bassin selbst und deshalb dem Wasser den Übertritt von einer Bassinzelle in die andere gestatten. Die Zwischenräume dieser Scheidewände sind mit Filtriermaterial, bestehend etwa aus Schichten von Koks und Holzwohle oder dergl., in abwechselnder Reihenfolge ausgefüllt, welche erneuert werden können; vermittelt dieser Filter wird das dem Bassin B_I zufließende, durch Öl verunreinigte Wasser von diesem befreit, indem das Öl sich oberhalb der Filterschichten ansammelt, während das gereinigte Wasser durch die am Bassinboden in der Zwischenwand befindliche

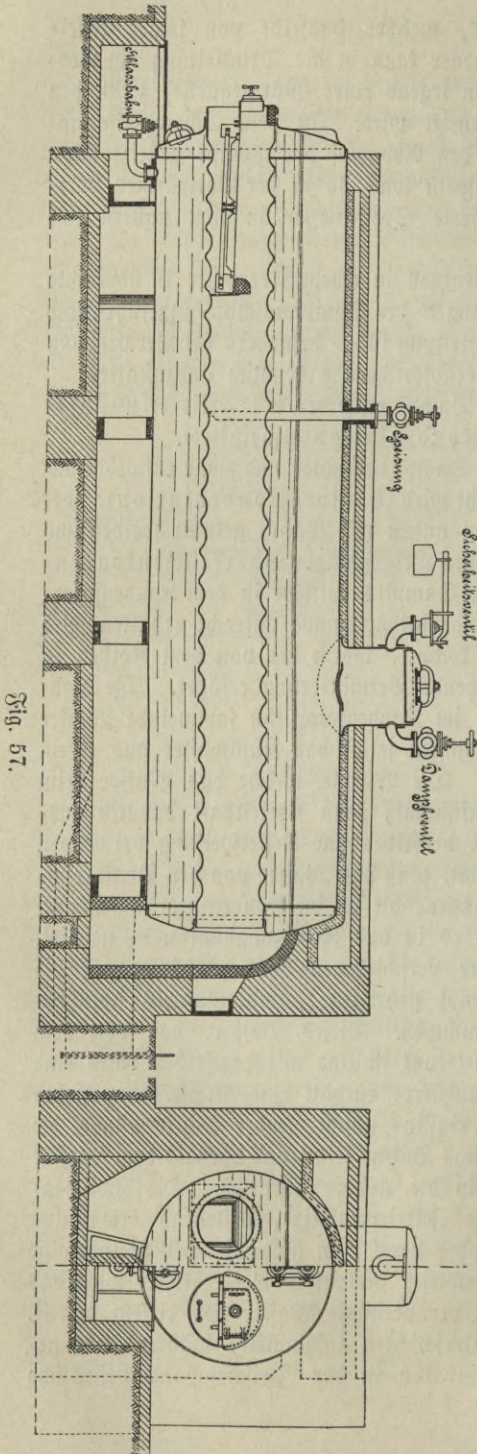


Fig. 57.

Öffnung in das Bassin B_{II} übertritt und nun zur Kesselspeisung verwandt wird. Das ausgeschiedene Öl kann abgeschöpft und gereinigt werden, worauf es wieder verwendbar ist.

Wenn die Beschaffung der für die Kondensation erforderlichen, ziemlich bedeutenden Wassermengen mit Schwierigkeiten oder Unkosten verknüpft sein sollte, so kann man den Hauptteil des Kühlwassers, nachdem es den Kondensator passiert hat, einem Gradierwerk G zuführen, in welchem es sich abkühlt und darauf in dem Bassin B_{III} sammelt; aus dem letzteren saugt es der Kondensator von neuem an.

Wir wenden uns jetzt zu den einzelnen Teilen der Dampfkräftanlage.

1. Dampferzeuger.

Von der großen Zahl der vorhandenen Ausführungsformen sollen nur die beiden für elektrische Zentralanlagen hauptsächlich in Betracht kommenden Systeme des Flammrohrkessels und des Wasserröhrenkessels Berücksichtigung finden.

Der **Flammrohrdampfkessel**, zweifellos die einfachere Kesselform, wird als Einflammrohrkessel (Cornwall-Kessel) und als Zweiflammrohrkessel (Lancashire-Kessel) ausgeführt. Er besteht aus einem an beiden Enden geschlossenen Eisenblechzylinder, welcher von einem exzentrisch angeordneten bzw. zwei Feuerrohren der Länge nach durchzogen wird; das im Kessel befindliche Wasser umspült daher diese Röhren von allen Seiten. Die Feuerrohren werden entweder aus glatten Blechen her-

gestellt, in welchem Falle sie durch Ringe oder durch Querröhren (Galloway-Röhren) versteift werden, durch die das Kesselwasser zirkuliert, oder sie werden aus Wellblechen angefertigt, die an sich genügende Steifigkeit besitzen (Fig. 57). Den glatten Röhren gegenüber haben die Wellröhren den weiteren Vorteil einer Vergrößerung der Heizfläche auf gleichem Raume; ferner besitzen die Wellröhren eine gewisse Elastizität, infolge deren die Stirnflächen der Kessel, mit welchen sie zusammengenietet sind, bei der Ausdehnung dieser Röhren in der Längsrichtung weniger ungünstig beansprucht werden.

Flammrohrkessel können nur bis zu einer gewissen Größe ausgeführt werden, und zwar aus folgenden Gründen:

Die Fläche des Kofes, der bekanntlich innerhalb des Feuerrohres angeordnet ist, wird in der Breite beschränkt durch den Durchmesser dieses Rohres und in der Länge durch die Möglichkeit einer gleichmäßigen Beschickung. Da nun das Feuerrohr durch den auf ihm lastenden Dampfdruck sehr ungünstig beansprucht wird, so dürfte etwa 1 m (bei Wellröhren etwas mehr) als der maximal zulässige Durchmesser zu betrachten sein, weil bei größeren Abmessungen die Bleche so stark gewählt werden müssen, daß nicht nur die Herstellungskosten der Kessel zu groß werden, sondern auch die Gewichte derselben zu kaum überwindlichen Transportschwierigkeiten Veranlassung geben würden. Mit Rücksicht auf die Beschickung wird man die Länge des Kofes nicht wesentlich größer nehmen können als 1,5 bis 1,8 m. Da nun die auf dem Kofe zu verfeuernde Kohlenmenge im Interesse einer möglichst vollkommenen Verbrennung ein bestimmtes Gewicht — pro Stunde und Quadratmeter Koffläche 80 bis 90 kg — nicht überschreiten soll, so ist eine Heizfläche von 100 bis höchstens 120 qm als obere Grenze für die Ausführung der Cornwall-Kessel zu betrachten.

Der Raum, den die Kessel dieses Systems in Anspruch nehmen, ist verhältnismäßig groß; haben doch Cornwall-Kessel von 100 qm Heizfläche bereits eine Länge von etwa 10 m. Eine Dampfkesselanlage größeren Umfangs bedingt daher bei Verwendung von Flammrohrkesseln verhältnismäßig große Kesselhäuser. Nichtsdestoweniger ist diese Kesselform wegen ihrer großen Einfachheit und Betriebssicherheit sehr beliebt, zumal dieselbe wegen ihres großen Dampfraumes auch bei relativ hoher Beanspruchung noch technisch trockenen Dampf liefert. Die normale Beanspruchung der Flammrohrkessel liegt bei 16 bis 18 kg Dampfentwicklung pro Quadratmeter wasserberührter Heizfläche; dieselbe kann bis auf etwa 25 kg gesteigert werden, ohne daß der Feuchtigkeitsgehalt des erzeugten Dampfes das maximal zulässige Maß von 1,5 bis 2% überschreitet. Der Wirkungsgrad moderner Flammrohrkessel beträgt 70 bis 75%; bei Verfeuerung von westfälischer Steinkohle von 7500 Kal. Heizwert und guter Bedienung ergeben dieselben eine Verdampfung von 8 bis 8,5 kg Wasser pro 1 kg Kohle.

Der **Wasserröhrendampfkessel** besteht gewöhnlich aus einem zylindrischen Oberkessel und einem darunter in geeigneter Lage angeordneten Rohrsysteme, das aus zahlreichen schmiedeeisernen Röhren von relativ kleinem Durchmesser — etwa 80 bis 100 mm — zusammengesetzt wird. Das Rohrsystem steht

durch zwei schmiedeeiserne, an der Vorder- und Hinterseite des Oberkessels befindliche kastenförmige Ansätze, in deren Innenwandungen die Röhren eingesetzt sind, mit dem Oberkessel in Verbindung (Fig. 58). Das Rohrsystem und etwa die Hälfte des Oberkessels sind mit Wasser gefüllt; die Feuerung befindet sich unter dem ersteren, die Heizgase umspülen das Rohrsystem und häufig auch einen Teil des Oberkessels, indem der Weg, den die Gase nehmen, durch Einfügung von stehend und liegend angeordneten Zwischenwandungen aus Eisen oder feuerfestem Material zwangsläufig geregelt wird.

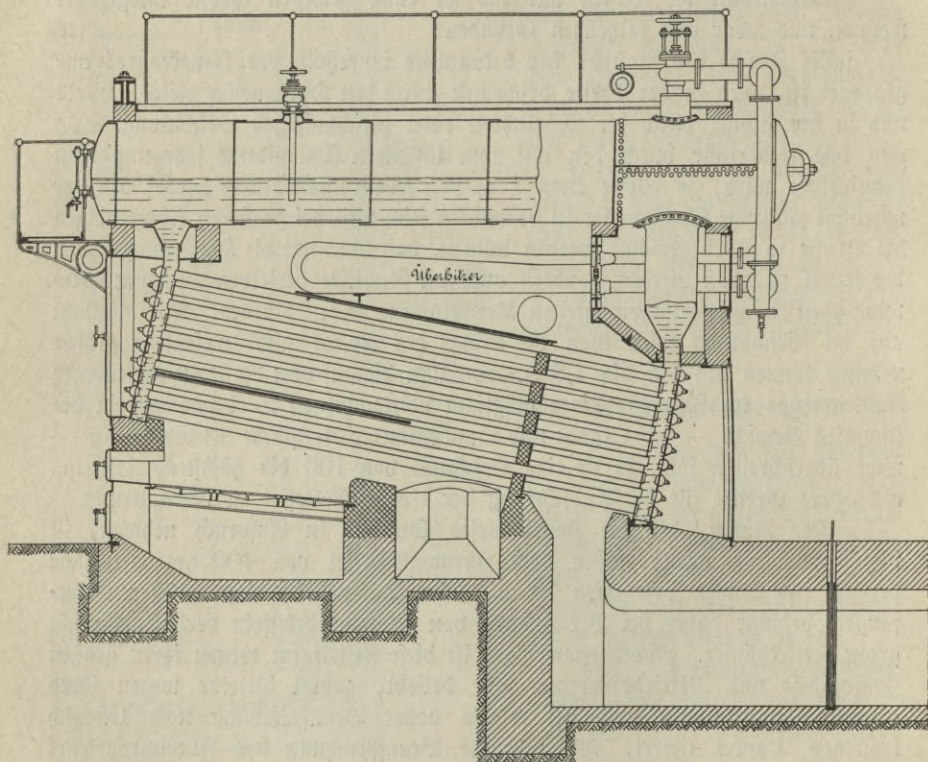


Fig. 58.

Die Gesamtanordnung dieses Dampfkessels hat eine ständige Zirkulation des Wassers zur Folge, indem das heiße durch die der größten Hitze ausgesetzten Röhren und den vorderen Wasserkasten zum Oberkessel aufsteigt und das kühlere, spezifisch schwerere Wasser vom Oberkessel durch den hinteren Wasserkasten zum tiefer gelegenen Ende des Rohrsystems sinkt. Der mit dieser Zirkulation verbundene Hauptvorteil liegt in der Möglichkeit einer raschen und intensiven Dampfbildung, infolge deren solche Kessel sehr schnell betriebsfähig sind; dagegen liefern dieselben bei forciertem Betriebe leicht nassen Dampf, so daß man zweckmäßig ihre Beanspruchung nicht so hoch treibt, wie es der

Flammrohrkessel gestattet. Als weitere Vorteile der Zirkulation sind zu erwähnen die Verminderung des Kesselsteinansatzes und der bei ruhendem Wasserinhalt vorliegenden Gefahr, daß sich Dampfblasen an den Kesselwänden festsetzen, die, wenn sie in großer Menge auftreten, wegen ihrer geringen Wärmedurchlässigkeit Veranlassung zum Sühendwerden der Kesselbleche und damit zu Explosionen geben können (Siedeverzug).

Für den Wasserröhrenkessel kommen die den Flammrohrkessel beschränkenden Faktoren nicht in Betracht, da man einerseits bezüglich der Abmessungen des Kofes, weil außerhalb des Kessels liegend, nicht an die beim Flammrohrkessel gegebenen engen Grenzen gebunden ist, und andererseits das Wasserröhrensystem die Herstellung einer großen Heizfläche auf verhältnismäßig kleinem Raume gestattet. Infolgedessen kann der Wasserröhrenkessel für wesentlich größere Leistungen — man geht bis 300 qm Heizfläche und darüber hinaus — gebaut werden. Mit Rücksicht auf die bereits erwähnte Gefahr der Erzeugung von nassem Dampfe wird man zweckmäßig die Beanspruchung dieser Kessel im normalen Betriebe nicht höher wählen als etwa 10 kg und maximal auf 15 bis 16 kg pro Quadratmeter Heizfläche festsetzen, obwohl von den Kessellieferanten häufig wesentlich höhere Beanspruchungen als zulässig angegeben werden.

Die nicht ganz einfache Konstruktion der Wasserröhrenkessel erfordert große Aufmerksamkeit des Wartepersonals bei der Bedienung, wenn die Kessel dauernd in einwandfreiem Zustande erhalten werden sollen. Insbesondere sind die der größten Hitze ausgesetzten Wasserröhren in erster Linie dem Verschleiß ausgesetzt, weshalb sie von Zeit zu Zeit aus ihrer Lagerung in den Wasserkästen herausgenommen, gereinigt und auf ihren betriebsfähigeren Zustand hin sorgfältig untersucht werden müssen; bei der Abmessung des Kesselhauses ist hierauf Rücksicht zu nehmen. In bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebes ist der Wasserröhrenkessel dem Flammrohrkessel vollkommen gleichwertig.

Zu jedem Dampfkessel gehört eine feine und eine grobe Armatur, deren einzelnen Teile gesondert vorgeschrieben sind. Die feine Armatur setzt sich zusammen aus dem Dampfabsperrentil, dem Speiseventil mit Rückschlagventil, dem Sicherheitsventil; ferner dem Manometer, dem Kontrollhahn mit Wasserfaß und dem Ablasshahn. Die grobe Armatur besteht aus den Feuergefränken mit Aschefallklappen, Feuerbrücken, Kofsträgern, Kofstäben, Feuertiiren mit Rahmen; ferner dem Rauchschieber mit Rahmen, Gegengewichten und Kette; ferner den Kesselstühlen, den Befestigungsankern und Platten, dem Einsteigekasten sowie der Galerie mit Treppe. Außer diesen Teilen empfiehlt sich die Ausstattung des Kessels mit verschiedenen, mit abnehmbaren Glasscheiben versehenen Schaulöchern zur Beobachtung der Rauchgase, ferner einer Dampfentwässerungsvorrichtung im Dampfdom bezw. Dampfsammler, einem vollständigen Schürzeug, einem Satz Rohrreinigungswerkzeuge (Rohrbürste, Rohrschaber und Gestänge), einem Rohrdichteapparat, einer Außabblasevorrichtung, Schutzvorrichtungen für die Wasserstandsgläser, Reinigungstüren mit Rahmen an der vorderen Stirnwand der Oberkessel, Isolierung mit Wärmechutzmasse

der freiliegenden Stirnwände und Domteile, sowie endlich einem kompletten Satz Schraubenschlüssel.

Das dauernd gute Funktionieren der Dampfkesselanlage setzt eine stete, sorgfältige Überwachung derselben in allen ihren Teilen, sowie eine häufige Reinigung besonders der Kesselbleche und Röhren von der an ihnen haftenden Flugasche und Kesselsteinablagerung voraus. Denn gerade diese Verunreinigungen wirken besonders schädlich, da sie die Wärmedurchlässigkeit der Kesselwandungen außerordentlich vermindern, wodurch der Wirkungsgrad der Anlage verschlechtert wird, und zwar um so mehr, je dicker diese Ablagerungsschichten werden. Außerdem tragen diese Verunreinigungen zur frühzeitigen Abnutzung der Kessel erheblich bei und verursachen so nicht nur empfindliche Betriebsstörungen, sondern geben auch leicht zu gefährlichen Explosionen Veranlassung. Diese Umstände haben bekanntlich dazu geführt, die Dampfkesselanlagen nicht nur einer polizeilichen Konzession, sondern auch einer ständigen Überwachung durch die dafür bestimmten behördlichen Organe zu unterstellen, welche in regelmäßigen Revisionen zum Ausdruck kommt. Durch die Vornahme dieser Revisionen, sowie der von Zeit zu Zeit erforderlichen größeren Reinigung ist nun eine zeitweilige Ausserbetriebsetzung des dafür in Betracht kommenden Kessels unvermeidlich. Da jedoch der Betrieb einer elektrischen Zentralstation unter allen Umständen aufrecht erhalten werden muß, so ist bei einer solchen Anlage von vornherein die Aufstellung eines Reservekessels vorzusehen, welcher den nicht betriebsfähigen Kessel ersetzt. Diese Reserve kann in den Fällen, in welchen man beim ersten Ausbau der Anlage mit beschränkten Mitteln zu rechnen hat, etwas billiger erstellt werden, wenn man die erforderliche Gesamtleistung auf zwei Betriebskessel verteilt und jeden derselben so dimensioniert, daß er bei maximaler Beanspruchung allein den Betrieb aufrecht zu erhalten vermag. Im normalen Betriebe werden beide Kessel zusammen benutzt, sobald durch die Höhe des Konsums die normale Beanspruchung eines derselben wesentlich überschritten wird.

2. Zubehörteile zur Dampfkesselanlage.

a) Die Speisevorrichtungen.

Den behördlichen Vorschriften entsprechend müssen in jeder Dampfkesselanlage mindestens zwei voneinander vollkommen unabhängige Apparate zum Kesselspeisen vorhanden sein, deren jeder allein für die Kesselanlage genügt. Für den normalen Betrieb verwendet man gewöhnlich eine Dampfspeisepumpe, und zwar für kontinuierliche Kesselspeisung eine schwingradlose Pumpe mit sehr geringer Tourenzahl, für intermittierenden Betrieb dagegen eine rascher laufende Schwingradpumpe. Die Pumpen müssen natürlich für einen der Dampfspannung entsprechenden Druck gebaut sein. Mit Rücksicht auf den ziemlich hohen Dampfverbrauch der Pumpen mit nur einem Dampfzylinder empfiehlt sich die Anwendung der wesentlich sparsamer arbeitenden Compound-Dampfpumpen, falls nicht der Abdampf der Pumpe anderweitig benutzt wird, z. B. zur Vorwärmung des Speisewassers etc.

Als zweiter Speiseapparat wird meist eine Dampfstrahlpumpe (Injektor) verwandt. Die Wirkung dieses Apparates, der überhaupt keine beweglichen Teile besitzt, beruht darauf, daß ein durch eine Düse geleiteter Dampfstrahl aus einem Wasserrohre das Wasser ansaugt und es durch ein zweites Rohr in den Kessel drückt. Die Saugwirkung des Apparates ist bei kaltem Speisewasser bedeutend größer als bei angewärmtem; der Körtingsche Universalinjektor beispielsweise besitzt beim Ansaugen von kaltem Wasser eine Saughöhe bis zu $6\frac{1}{2}$ m, beim Ansaugen von auf 60° C. vorgewärmtem Wasser dagegen eine solche von nur etwa 2 m. Es empfiehlt sich jedoch, dem Injektor die Saugarbeit möglichst ganz zu ersparen, was dadurch geschieht, daß man ihm das Wasser aus einem höher liegenden Reservoir zuführt. Das Speisewasser wird durch die innige Berührung mit dem Dampfe bis zu einer ziemlich hohen Temperatur — 80° C. und darüber — vorgewärmt, so daß der verhältnismäßig große Dampfverbrauch des Apparates zum Teile wieder ausgeglichen wird. Da indessen eine zweckentsprechend gebaute Dampfmaschine zweifellos sparsamer arbeitet wie der Injektor und diesen etwas diffizilen Apparat auch in bezug auf die Betriebssicherheit übertrifft, so läßt man den Injektor gewöhnlich in Reserve stehen und arbeitet, wie bereits erwähnt, im normalen Betriebe mit der Pumpe. Nichtsdestoweniger gibt es eine beträchtliche Anzahl — besonders neuerer — Anlagen, bei denen die Kesselspeisung ausschließlich durch Injektoren geschieht.

Sowohl die Speisepumpe wie der Injektor sind mit Rücksicht auf die große Wichtigkeit dieser beiden Apparate für den geordneten Betrieb der Dampfkesselanlage sehr reichlich zu bemessen; es empfiehlt sich, jeden derselben für mindestens das Anderthalbfache bis Zweifache derjenigen Leistung zu bestimmen, die im normalen Betriebe erforderlich ist.

b) Der Speisewasservorwärmer.

Auf möglichst hohe Vorwärmung des dem Kessel zuzuführenden Speisewassers ist, wie aus den seitherigen Auseinandersetzungen hervorgeht, besonders Gewicht zu legen, und zwar sowohl aus Gründen der Ökonomie als auch mit Rücksicht auf die Haltbarkeit der Kessel, auf die plötzliche Abkühlungen schädlich wirken. Wenn daher diese Vorwärmung, wie es beim Injektor der Fall ist, nicht durch den Speiseapparat selbst geschieht, so wird ein besonderer Vorwärmer erforderlich, für den es wiederum eine große Zahl von Ausführungsformen gibt. Dieselben beruhen indessen wohl sämtlich darauf, daß man das Speisewasser durch ein Rohrsystem drückt, welches entweder von dem Abdampfe der Dampfmaschine oder der Speisepumpe oder auch von den Abgasen des Kessels geheizt wird. Die manchmal vorkommende Heizung des Vorwärmers mit Frischdampf oder auch durch eine besondere Feuerung ist als unwirtschaftlich zu verwerfen.

c) Der Wasserreiniger.

Der Wasserreiniger ist ein Apparat, welcher das Speisewasser von seinen Kesselstein bildenden Bestandteilen, hauptsächlich schwefelsaurem sowie

doppeltkohlensaurem Kalk und kohlensaurer Magnesia, befreit. Es empfiehlt sich daher, bei der Einrichtung einer Dampfkraftanlage das in Aussicht genommene Speisewasser auf den Gehalt von Kesselsteinbildnern chemisch untersuchen zu lassen, um ein Urteil darüber zu gewinnen, ob eine Wasserreinigung erforderlich ist oder nicht. Die Wirkung der technischen Wasserreiner, für die es ebenfalls eine größere Zahl von Konstruktionen gibt, beruht darauf, daß das Speisewasser in einem Behälter mit Dampf vermischt und so auf eine Temperatur von etwa 80° C. gebracht wird; hierbei verwandelt sich der im Wasser vorher gelöste doppeltkohlensaure Kalk in fast unlöslichen kohlensauren Kalk, indem die Wärme ein Molekül Kohlenäure austreibt. Dasselbe gilt für die kohlensaure Magnesia. Zwecks Ausscheidung des schwefelsauren Kalkes genügt es, dem kalten Speisewasser kohlensaures Natron zuzusetzen. Überwiegt der Gehalt an Magnesia denjenigen an schwefelsaurem Kalk, so ist die warme Reinigung am Platz, im anderen Falle dagegen die kalte Reinigung. In beiden Fällen lagern sich die festen Bestandteile am Boden des Reiner ab und werden von Zeit zu Zeit entfernt. Das gereinigte Wasser passiert gewöhnlich noch eine Filter, bevor es in den Kessel geleitet wird.

Der Wasserreiner erfordert nicht unbeträchtliche Anlagelkosten und Betriebsausgaben; die letzteren setzen sich zusammen aus den Kosten für die Bedienung und Instandhaltung, für den Verbrauch an Chemikalien, Filtriermaterial und Dampf. Diese Kosten sind zweckmäßig vor der Beschlußfassung über die Aufstellung eines solchen Apparates in Rechnung zu ziehen und mit denjenigen zu vergleichen, welche beim Gebrauche des ungereinigten Speisewassers durch die Notwendigkeit einer häufigeren Entfernung der Kesselsteinablagerung entstehen. Ergibt jedoch die Menge der im Speisewasser vorhandenen Kesselsteinbildner die unbedingte Notwendigkeit einer Reinigung desselben, so empfiehlt es sich im Interesse der Sicherheit des Betriebes, den Reinigungsapparat reichlich zu bemessen.

3. Die Rohrleitungen.

Die unter Dampfdruck befindlichen Rohre sind zweckmäßig aus Schmiedeeisen herzustellen, während für die übrigen Gußeisenrohre verwandt werden können. Der Querschnittsberechnung der Dampfrohrleitungen ist bei gesättigtem Dampfe eine zulässige Dampfgeschwindigkeit von 25—30 m pro Sekunde, bei überhitztem eine solche von 50—55 m pro Sekunde zugrunde zu legen. Bei der Anordnung dieser Rohrleitungen ist im Interesse der Verminderung des Spannungsverlustes darauf zu achten, daß scharfe Krümmungen vermieden und durch möglichst schlanke Bogen ersetzt werden. Ferner ist dafür zu sorgen, daß sämtliche Rohrleitungen in der Richtung des Dampfstromes mit ausreichendem Gefälle verlegt werden, das bei Dampfrohrleitungen 1:200 bis 1:100 betragen soll. Durch reichliche Anbringung von Wasserabscheidern ist für genügende Entwässerung der Dampfrohre Sorge zu tragen.

Die Bildung von Wasserfäcken ist zu vermeiden; wenn solche infolge der örtlichen Verhältnisse nicht zu umgehen sein sollten, so ist durch den Einbau

von Wasserabscheidern auf ihre gute Entwässerung Bedacht zu nehmen. Dem Ausdehnungsbestreben der Nohre infolge der auftretenden Temperaturdifferenzen ist durch Einbau von Krümmern oder sonst geeigneten Expansionsvorrichtungen Rechnung zu tragen.

Auf solide Konstruktion der Nohrverbindungen und vorzügliche Dichtung derselben, bei höheren Dampfdrücken unter Verwendung eingedrehter Nuten, ist bei den Dampfleitungen die größte Sorgfalt zu verwenden; insbesondere ist darauf zu achten, daß die Flanschen der Verbindungsstellen genügende Stärke besitzen, ferner daß die zu ihrer Verbindung dienenden Schraubenbolzen ausreichende Dicke und Länge haben, daß sie in genügender Zahl vorhanden sind und ihre Muttern durch Aufsetzen von Gegenmuttern gesichert werden. T-Stücke sollen bei den Hochdruckdampfleitungen stets aus Stahlguß hergestellt werden.

Ferner ist auf richtige, solide und ausreichende Lagerung der Rohrleitungen zu achten, damit in ihnen keine Spannungen auftreten können, die zu Undichtigkeiten Veranlassung geben. Fehler, die in dieser Beziehung bei der Montage gemacht werden, rächen sich nachher bitter, da sie die empfindlichsten Betriebsstörungen zur Folge haben.

Sowohl die Hauptdampfleitung als auch sämtliche Abzweigungen von derselben erhalten Absperrventile, die so angebracht werden müssen, daß bei geschlossenen Ventilen tote Rohrleitungsstrecken tunlichst vermieden werden, da solche nur zu Kondensverlusten Veranlassung geben. Ferner sind sämtliche Dampfleitungen aufs sorgfältigste zu isolieren; hierzu verwendet man vielfach Kieselgurmasse, Asbest etc.

Wir wiederholen: Auf richtige Disposition der Rohrleitungen, bei der alle irgend möglichen Betriebsverhältnisse in Rücksicht zu ziehen sind, auf vorzügliche Dichtung und sorgfältigste Montage, ferner auf die Verwendung des besten Materials ist bei der Wichtigkeit dieses Teiles der Dampfkrantanlage für einen geordneten Betrieb der größte Wert zu legen; dem Lieferanten sollten in dieser Beziehung bei der Bestellung die schärfsten und weitestgehenden Garantieverpflichtungen auferlegt werden.

4. Die Dampfmaschine.

a) Die normale Pendeldampfmaschine.

Aus der Hauptdampfleitung gelangt der Dampf, nachdem er einen Wasserabscheider passiert hat, durch das Haupteinlassventil in die Dampfmaschine, in der sein Ausdehnungsbestreben in bekannter Weise zur Arbeitsleistung dadurch ausgenützt wird, daß man den Dampf auf den Kolben im Arbeitszylinder einwirken läßt und die Bewegung des Kolbens vermittelt der Kolbenstange, Gradführung und Pleuelstange auf die Kurbelachse überträgt. Je nachdem nun die Expansion des Dampfes in einem einzigen oder in mehreren hintereinander geschalteten Zylindern erfolgt, unterscheidet man Einfach- und Mehrfach-Expansionsmaschinen. Die Entscheidung der Frage, welche von

beiden Maschinenarten im gegebenen Falle den Vorzug verdient, ist abhängig von der Spannung des zur Verfügung stehenden Dampfes und von der Leistung, welche die Maschine entwickeln soll. Für einen Dampfüberdruck bis zu einer oberen Grenze von etwa 6 Atm. und kleinere Leistungen verwendet man am besten Einzylinderdampfmaschinen, und für größere Leistungen eine Kombination zweier solchen, die sogen. Zwillingmaschinen mit einstufiger Expansion, da die wesentlich teureren Mehrfachexpansionsmaschinen in diesem Falle nicht günstiger arbeiten. Steht dagegen Dampf von mehr als 6 Atm. Überdruck zur Verfügung, so empfiehlt sich auch für kleinere Leistungen die Verwendung von Mehrfachexpansionsmaschinen, weil dieselben die Anwendung höherer Dampfspannungen und damit eine wesentlich günstigere Ausnutzung des Brennstoffes gestatten, wie Maschinen mit einfacher Expansion. Bei der Einrichtung der Betriebsanlage einer Zentralstation wird man deshalb zweckmäßig die Kessel für hohe Dampfspannung vorsehen¹⁾.

Die Mehrfachexpansionsmaschinen zerfallen in solche mit zweifacher und mit dreifacher Expansion; die ersteren heißen Verbund- oder Compound-Dampfmaschinen, und die letzteren Dreifachexpansions- oder Triplexmaschinen. Die Verbundmaschinen kommen für Dampfeintrittsspannungen bis zu etwa $9\frac{1}{2}$ Atm., entsprechend ca. 10 Atm. Kesselüberdruck, in Betracht, während die letzteren bei darüber hinausgehenden Einlaßspannungen und im allgemeinen nur für ganz große Leistungen Anwendung finden.

Die Verbundmaschinen besitzen zwei Arbeitszylinder, die entweder nebeneinander oder hintereinander angeordnet werden; im letzteren Falle bezeichnet man sie als Tandemmaschinen. Selbstverständlich können zwei Verbundmaschinen mit hintereinander liegenden Zylindern zu einer Zwillingverbundmaschine mit zwei nebeneinander liegenden Zylinderpaaren in einer den Zwillingmaschinen mit einstufiger Expansion analogen Weise vereinigt werden; solche Maschinen kommen für sehr große Leistungen in Frage.

Die Dreifachexpansionsmaschinen haben drei Arbeitszylinder, von denen der Hoch- und Mitteldruckzylinder gewöhnlich hintereinander und der Niederdruckzylinder neben den ersteren angeordnet werden; der letztere wird indessen häufig in zwei ebenfalls hintereinander angeordnete Zylinder zerlegt, infolgedessen eine Zwillingverbundmaschine mit einer vierzylindrigen Dreifachexpansionsmaschine äußerlich große Ähnlichkeit hat.

Bei Maschinen mit nebeneinander liegenden Arbeitszylindern und einer entsprechenden Anzahl von Kurbeln werden die letzteren im Interesse der größeren Gleichförmigkeit des Ganges auf der Maschinenachse gegeneinander versetzt angeordnet, bei einer Zweizylindermaschine beispielsweise derart, daß die eine Kurbel der anderen um etwa 90° voreilt. Da nun auch die Kolben-

¹⁾ Für den Fall, daß ein Teil dieses Dampfes noch zu anderen Zwecken, z. B. zur Heizung u. dergl. verwandt werden soll, für die sich die hohe Spannung nicht eignet, kann man dieselbe mittelst eines Dampfspannungs-Reduzierventils beliebig vermindern.

stellungen um einen entsprechenden Betrag gegeneinander verschoben sind, so bedingt diese Anordnung bei Mehrfachexpansionsmaschinen der in Rede stehenden Bauart die Anwendung einer Dampfkammer zwischen je zwei Expansionsstufen, die gewissermaßen Sammelbassins für den Dampf bilden, der aus den vor ihnen liegenden Zylindern strömt und nachher in den dahinter liegenden Zylindern die Expansionsarbeit fortsetzt. Diese Dampfkammern, in denen der Dampf zur Ruhe kommt, heißen Receiver; bei Verbundmaschinen in Tandemanordnung fällt der Receiver weg.

Die Zylinderwandungen erfahren während der Ausströmungsperiode eine beträchtliche Abkühlung infolge der Verdampfung des Kondenswassers, das sich während der vorausgegangenen Einströmungsperiode im Zylinder gebildet hat. Dadurch wird nicht nur der auf dem Kolben lastende Gegendruck erhöht, sondern es gibt diese Abkühlung auch Veranlassung zu verstärkter Kondenswasserbildung bei der folgenden Einströmungsperiode. Ferner werden die Zylinder und der Receiver von der sie umgebenden Außenluft weiter abgekühlt und durch die so entstehenden Wärmeverluste unter Umständen bedeutende Arbeitsverluste herbeigeführt. Dieser Übelstand läßt sich nun sehr verringern, wenn man die Zylinder und Receiver mit Heizmänteln umgibt, in die man Frischdampf leitet; der hierfür erforderliche Dampf spielt gegenüber dem dadurch bedingten Gewinn an Arbeit und besserem Funktionieren der Maschine keine ausschlaggebende Rolle. Es empfiehlt sich daher, bei Bestellung einer Dampfmaschine die Anwendung dieser Heizmäntel stets vorzuschreiben.

Sämtliche Maschinen werden sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Anordnung ausgeführt; die ersteren kommen hauptsächlich für größere Umdrehungszahlen der Kurbelachse in Betracht, bedingen daher für den unmittelbaren Antrieb von Dynamomaschinen im allgemeinen geringere Anlagekosten, wie die Horizontalmaschinen, da die letzteren für die gleiche Leistung — der geringeren Tourenzahl entsprechend — größere Abmessungen erhalten, also an und für sich teurer werden, außerdem einen wesentlich größeren Raumbedarf haben und endlich größere Dynamomodelle erfordern.

Ferner haben wir bei den Dampfmaschinen bezüglich der Steuerung zu unterscheiden zwischen Maschinen mit Schiebersteuerung — Flachschieber- und Rundschieber- oder Rädersteuerung — sowie solchen mit Hahnsteuerung und mit Ventilsteuerung. Die Schiebersteuerung findet heute vorwiegend Anwendung bei schnelllaufenden Dampfmaschinen von kleineren Leistungen; langsamlaufende Maschinen, sowohl vertikale, wie horizontale, sollten stets mit Ventilsteuerung ausgestattet werden, da die Ventilmachine der Schiebermaschine bezüglich des Dampfverbrauches wegen der präziseren Wirkung der Steuerung bedeutend überlegen ist. Erstklassige Maschinenfabriken liefern heute Ventildampfmaschinen für 125 Touren pro Minute und darüber; zu erwähnen ist hierbei insbesondere die Lenksche Ventilsteuerung¹⁾, die sich durch Einfachheit der Konstruktion und Geräuschlosigkeit des Ganges auszeichnet und sogar bei

¹⁾ Zeitschr. d. Vereins d. Ingen. 1900, Nr. 43.

sehr schnell gehenden Dampfmaschinen, die 200 Touren und mehr pro Minute machen, mit Vorteil angewandt werden kann. Bei stehenden Verbundmaschinen wird häufig nur der Hochdruckzylinder mit Ventilsteuerung ausgeführt, während der Niederdruckzylinder Schieber- oder Hahn-(Corliß-)Steuerung erhält. Durch die Steuerung wird dem Frischdampf der Weg zum Arbeitszylinder im geeigneten Momente geöffnet und verschlossen; dieselbe regelt ferner die abwechselnde Beaufschlagung der beiden Kolbenseiten durch den Dampf und gestattet ihm endlich in bestimmten Intervallen den Austritt ins Freie oder in den Kondensator. Sowohl die Steuerschieber als auch die Steuerventile werden von Exzentern oder unruunden Scheiben betätigt, die bei der Schiebersteuerung direkt auf der Maschinenachse, bei der Ventilsteuerung dagegen gewöhnlich auf einer besonderen Steuerwelle sitzen, die von der Maschinenachse mittelst Regelräder angetrieben wird.

An die Regulierung der für den Betrieb elektrischer Zentralanlagen dienenden Dampfmaschinen werden hohe Anforderungen gestellt, weil der tadellose Betrieb der elektrischen Lampen und Motoren von der Unveränderlichkeit der Spannung des zugeführten Stromes abhängt, diese aber eine konstante Rotationsgeschwindigkeit der Dynamomaschine zur Voraussetzung hat. Der Reguliermechanismus der Dampfmaschine muß daher so beschaffen sein, daß durch ihn bei allen vorkommenden Belastungen die Tourenzahl der Maschine so weit als möglich konstant gehalten wird. Außer den mit einer Änderung der Tourenzahl verbundenen Geschwindigkeitsänderungen haben wir indessen bei der Dampfmaschine auch diejenigen Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit der Kurbelachse zu berücksichtigen, die sich innerhalb einer halben Umdrehung derselben vollziehen und auf der Ungleichförmigkeit der Kolbenbewegung beruhen. Es muß deshalb dafür Sorge getragen werden, daß auch diese Änderungen so weit als möglich ausgeglichen werden. Diesen beiden Zwecken dienen der Pendelregulator und das Schwungrad.

Bei dem Pendelregulator wird die Fliehkraft der Schwungkugeln dazu benutzt, durch die Bewegung der mit den Kugeln verbundenen Nuffe ein Stellwerk zu betätigen, welches die Steuerung der Maschine derart beeinflusst, daß bei einer Änderung der Belastung dem Zylinder mehr oder weniger Dampf zugeführt, d. h. sein Füllungsgrad geändert wird. Die Reguliertätigkeit des Pendelregulators wird daher erst beginnen, nachdem infolge der Belastungsänderung der Maschine eine Änderung ihrer Geschwindigkeit eingetreten ist. Dieselbe würde eine plötzliche, ruckweise sein, wenn auf der Maschinenachse kein Schwungrad säße; das letztere nimmt nämlich an der Regulierung teil, und zwar insofern, als es die Verlangsamung des Ganges bei eintretender Mehrbelastung und die Beschleunigung desselben bei eintretender Entlastung durch Abgabe bzw. Aufnahme von Energie verzögert und deshalb auf den Reguliervorgang dämpfend wirkt. Der Regulator muß im übrigen möglichst präzise wirken, so daß er schon auf geringfügige Änderungen der Geschwindigkeit kräftig reagiert und die neuen Füllungsgrade binnen kürzester Frist einstellt, da sonst erhebliche Tourenschwankungen mit ihren betriebsstörenden Be-

gleiterscheinungen unvermeidlich sind. Ferner muß der Regulator die Einstellung der normalen Tourenzahl auch bei Leerlauf der Maschine gestatten, sowie eine willkürliche Veränderung des Füllungsgrades während des Ganges der Maschine zulassen, etwa durch Verschiebung eines an seiner Muffe angebrachten Laufgewichtes; diese Forderungen sind von besonderer Wichtigkeit, wenn es sich um die Parallelschaltung mehrerer von je einer Dampfmaschine angetriebener Wechselstrommaschinen handelt¹⁾.

Während das Schwungrad, wie wir sahen, bei der Regulierung der Tourenzahl gewissermaßen eine nebensächliche Rolle spielt, ist sein Einfluß auf den Ausgleich der Differenzen in der Winkelgeschwindigkeit der Kurbelachse von um so größerer Bedeutung. Diese Differenzen entstehen, wie bereits bemerkt, bei der Änderung der geradlinigen Kolbenbewegung in die rotierende der Kurbel infolge der ungleichförmigen Kolbengeschwindigkeit. Betrachten wir den Bewegungsvorgang während eines einfachen Kolbenhubes, so sehen wir, daß der Kolben seinen Hub aus der einen Totpunktstellung mit der Geschwindigkeit Null beginnt und nach Beendigung des Hubes in der anderen Totpunktstellung die Geschwindigkeit Null wieder erreicht; es verhält sich somit seine Bewegung genau wie diejenige eines Pendels, das zwischen zwei Nullstellungen ein Maximum der Geschwindigkeit besitzt. An diesen Geschwindigkeitsänderungen nimmt die mit dem Kolben durch Stangen und Gelenke verbundene Kurbel entsprechenden Anteil, derart, daß der Kurbelzapfen bei einer halben Umdrehung — gleich einem Kolbenhube — zwei Geschwindigkeitsminima (in der Anfangs- und Endstellung) und ein Geschwindigkeitsmaximum (in einer Zwischenstellung) erfährt. Der Quotient

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\max} + v_{\min}}$$

2

heißt der Ungleichförmigkeitsgrad der Maschine. In ähnlicher Weise, wie es bezüglich der Winkelgeschwindigkeit der Kurbel der Fall, ändern sich auch die an dem Kurbelzapfen angreifenden Drücke. Belastet man nun die Kurbelachse mit Schwungmassen, so bewirken diese einen Ausgleich in den Geschwindigkeits- und Druckänderungen des Kurbelzapfens, indem sie bei abnehmender Winkelgeschwindigkeit Energie an die Kurbel abgeben, und bei zunehmender Winkelgeschwindigkeit solche aufspeichern. Dieser Ausgleich wird im allgemeinen um so vollständiger, der Gang der Maschine also um so ruhiger und gleichförmiger, je größer das Schwungmoment der Schwungmassen gewählt wird.

Die Anforderungen, die an die Gleichförmigkeit des Ganges gestellt werden, richten sich sowohl nach der Art und Weise, wie die Kraft von der Dampfmaschine auf die Dynamomaschine übertragen wird, als auch nach dem Systeme der Dynamo und den Betriebsverhältnissen, unter denen die letztere

¹⁾ Vergl. Zeitschr. d. Vereins d. Ingen. 1899, S. 1181 u. ff.

arbeitet. Riemen- und Seilübertragungen, oder auch elastische Kuppelungen wirken ausgleichend auf die Änderungen der Winkelgeschwindigkeit; infolgedessen kann man in solchen Fällen die Anforderungen an die Gleichförmigkeit des Ganges der Dampfmaschine herabsetzen. Bei direkter Kuppelung von Dampf- und Dynamomaschine stellt ferner eine Gleichstrommaschine für ausschließlichen Kraftbetrieb niedrigere Ansprüche an die Gleichförmigkeit, als eine solche für Lichtbetrieb, weil sich in den Glühlampen bereits verhältnismäßig geringe Geschwindigkeitsänderungen durch Änderungen der Leuchtkraft bemerkbar machen, und zwar um so mehr, wenn dieselben — wie es hier zu trifft — periodisch auftreten. Die höchsten Anforderungen an die Gleichförmigkeit des Ganges der Dampfmaschine stellen direkt mit denselben gekuppelte Wechselstrommaschinen, wenn sie miteinander parallel arbeiten sollen, weil bei ungenügender Gleichförmigkeit eine Anzahl betriebsstörender, später zu besprechender Erscheinungen auftreten, die einen richtigen Parallelbetrieb unmöglich machen können.

An dieser Stelle sei bemerkt, daß sich Dreifachverbundmaschinen wegen der Schwierigkeit der für die Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen erforderlichen genauen Einregulierung zu dem Antriebe der letzteren nicht eignen.

Die Größe der erforderlichen Schwungmassen kann unter Zugrundelegung des vorzuschreibenden Ungleichförmigkeitsgrades δ rechnerisch und graphisch ermittelt werden; der maximal zulässige Betrag für δ ist für die verschiedenen Betriebsfälle auf Grund der Erfahrung festgestellt. Bei direkter Kuppelung der Dampfmaschine mit der Dynamomaschine soll δ , wenn es sich um eine Gleichstrommaschine für Lichtbetrieb ohne Akkumulatoren handelt, den Betrag von 1 : 150, und wenn es sich um den Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen handelt, den Betrag von 1 : 250 nicht überschreiten.

Die Ausgleichschwungmassen werden entweder in Form eines besonderen Schwungrades auf der Maschinenachse aufgesetzt, oder sie werden in dem Rotationskörper der elektrischen Maschine untergebracht, manchmal auch in Gestalt eines Schwungradfranzes seitlich von dem rotierenden Teile der Dynamo angeordnet und mit ihm konstruktiv verbunden. Die Anordnung eines besonderen Schwungrades empfiehlt sich stets bei Gleichstrommaschinen, bei denen der Anker rotiert, während das Magnetssystem feststeht, da die Ausführung des Gleichstromankers als Schwungrad Konstruktionschwierigkeiten begegnet, welche die Herstellungskosten der Dynamomaschine beträchtlich verteuern; außerdem ist der Wirkungsgrad solcher Maschinen geringer als derjenige von Gleichstrommaschinen normaler Bauart. Bei Wechselstrommaschinen dagegen, und besonders solchen von größerer Leistung, empfiehlt sich die Vereinigung der Schwungmassen mit dem Rotationskörper, der hier gewöhnlich durch das Magnetssystem gebildet wird, und zwar ist der Einbau dieser Schwungmassen in das Magnetrad der vorerwähnten seitlichen Anordnung trotz des etwas höheren Preises wegen des besseren Aussehens der Maschine entschieden vorzuziehen.

Durch die Einrichtung einer Kondensationsanlage kann man die Leistung der Maschine bei demselben Gesamtdampfverbrauche bedeutend steigern

(20—30%) oder bei derselben Leistung den Dampfverbrauch für die Pferdekraftstunde bedeutend verringern (20—30%); auch erhält man warmes Wasser zur Kesselspeisung. Der Kraftbedarf für die Kondensation ist im allgemeinen gering und beträgt etwa 4—6% der Normalleistung der Maschine.

Der Kühlwasserverbrauch der Kondensationsanlagen ist erheblich und beträgt bei Einspritzkondensation das 18—25fache, bei Oberflächenkondensation etwa das 22—30fache des von der Kesselanlage verbrauchten Speisewassers, wobei erstere Werte für natürliches, letztere für rückgekühltes Einspritzwasser von 25—30° C. gelten.

Sind mehrere Dampfmaschinen vorhanden, so kann entweder für jede eine besondere oder für sämtliche Maschinen eine gemeinsame Kondensation (Zentralkondensation) eingerichtet werden; letztere benötigt geringeren Kraftbedarf, etwa 2—3% der Normalleistung aller Maschinen, und ist deshalb hauptsächlich dann zu empfehlen, wenn stets mehrere Maschinen gleichzeitig im Betriebe sind.

Bei Einzelkondensation wird die Kondensationspumpe gewöhnlich von der Dampfmaschine selbst angetrieben. Dieses geschieht entweder dadurch, daß der Pumpenzylinder hinter dem Dampfzylinder der Dampfmaschine in horizontaler Lage angeordnet und der Kolben der Pumpe auf der zu diesem Zwecke verlängerten Kolbenstange der Maschine aufgesetzt wird, so daß der Kondensator sich in gleicher Höhe mit der Dampfmaschine, also über Maschinenhausflur befindet; oder der Kondensator wird im Maschinenkeller aufgestellt und die Kondensationspumpe vermittelt Balanciers oder Schleppturbel von der Maschinenachse oder Kolbenstange aus angetrieben.

Die Anordnung der Kondensation über Flur ist die einfachere und übersichtlichere; sie hat einen geringeren Kraftbedarf und ist billiger in der Anschaffung.

Die Verlegung der Kondensation unter Flur besitzt den Vorteil geringeren Raumbedarfes, ist unauffällig und stört deshalb weniger das schöne Aussehen der Maschinen, besonders dann, wenn auch die Rohrleitungen unter Flur liegen. Sie findet hauptsächlich bei höherer Umdrehungszahl der Maschinen Verwendung, da bei der Anordnung unter Flur die Kolbengeschwindigkeit der Pumpe beliebig gewählt werden kann. Die Pumpe muß unter Flur aufgestellt werden, wenn der Saugwasserspiegel mehr als 5—6 m unter Flur liegt.

Bei den Kondensationspumpen unter Flur unterscheidet man hauptsächlich zwei Arten, nämlich liegende und stehende. Die ersteren finden mehr Verwendung bei geringeren Umdrehungszahlen; sie haben den Vorteil, daß der Kolben immer unter Wasser liegt und daher ein Verschleifen desselben von geringerem Einflusse auf das Vakuum ist; die letzteren sind einfacher in der Bauart, meist bequemer zugänglich und infolge der einfacheren Wasserwege geeigneter für höhere Umdrehungszahlen der Maschinen, weshalb man sie ausschließlich bei vertikalen Dampfmaschinen anwendet.

Übersteigt die Saughöhe den Betrag von 5—6 m, so muß dem Kondensator das Wasser durch eine besondere Pumpe zugeführt werden; in diesem Falle ist die Aufstellung einer Rückkühlanlage in Erwägung zu ziehen.

Die Zentralkondensationen werden sowohl als Einspritz- als auch als Oberflächenkondensatoren gebaut; letztere kommen hauptsächlich in Betracht, wenn kein reines Wasser zur Kesselspeisung vorhanden ist. Bei Zentralkondensationen wird stets eine besondere Luft- und eine besondere Wasserpumpe angeordnet, die durch einen Motor, z. B. eine kleine Dampfmaschine oder einen Elektromotor angetrieben werden. Zum Absaugen der Luft dient in diesem Falle meist eine Schieberluftpumpe, während zur Wasserförderung eine gewöhnliche Wasserpumpe benutzt wird. Diese Teilung hat den Vorteil, daß die Zentralkondensationsanlagen nach dem Gegenstromprinzip gebaut werden können; solche Apparate erfordern zur Erzielung derselben Luftleere geringere Wassermengen und haben deswegen einen geringeren Kraftbedarf, wie die nach dem Gleichstromprinzip ausgeführten Kondensatoren.

Da beim Anschlusse an eine Zentralkondensation die Regulierung der Dampfmaschinen wegen der Saugwirkung der Kondensation erschwert wird, so sind besondere Vorkehrungen zu treffen, um bei plötzlichen Entlastungen eine unzulässige Steigerung der Tourenzahl der Dampfmaschine zu verhindern.

Der bedeutende Wasserverbrauch der Kondensation erschwert oft ihre Verwendung, besonders dann, wenn entweder nicht genügend Wasser zur Verfügung steht oder wenn die Wasserbeschaffung mit erheblichen Kosten verknüpft ist, wie es z. B. beim Anschlusse der Dampfkraftanlage an die öffentliche Wasserleitung gewöhnlich zutrifft. In solchen Fällen verwendet man mit Vorteil das Gradierwerk, besonders den Kühlturm (Kamin Kühler), in dem das zur Kondensation verbrauchte und dadurch erwärmte Wasser gekühlt und so zu erneuter Verwendung geeignet gemacht wird. Der Kamin Kühler besteht aus einem turmförmigen, durch Bretter nach außen abgeschlossenen und innen mit kreuzweise angeordneten Lattenlagen versehenen Holzgerüste, auf welches das zu kühlende Wasser gepumpt wird; das letztere fällt alsdann tropfenweise von einer Lattenschicht zur anderen und wird durch den im Inneren des Gerüstes — wie bei einem Schornsteine — vorhandenen starken Luftzug gekühlt, worauf es in einem unter dem Gradierwerke befindlichen Bassin gesammelt wird. Auf diese Weise gewinnt man den größten Teil des Kühlwassers zurück, da nur das verdunstete und verwehte Wasser, das etwa $\frac{1}{20}$ — $\frac{1}{30}$ des gesamten Wasserquantums ausmacht, ersetzt zu werden braucht. Auch für die Gradierwerke gibt es eine größere Zahl von Ausführungsformen, die indessen sämtlich auf dem nämlichen Prinzipie beruhen; von einer Besprechung derselben wollen wir Abstand nehmen.

Da die Druckhöhe der Kondensationspumpe bei Verwendung von Gummiflappen nur wenige Meter beträgt, so wird das zu kühlende Wasser gewöhnlich vermittelst einer besonderen Pumpe auf das Gradierwerk befördert; dies ist auch einer der Gründe, die bei Zentralkondensationen zur Trennung der Kondensationspumpe in eine Luft- und eine Wasserpumpe Veranlassung geben, weil die Wasserpumpe das Wasser direkt auf den Kühlturm heben kann. Es gibt indessen auch eine versenkte Anordnung des Gradierwerkes, bei der die normale Kondensationspumpe direkt zur Förderung des Wassers auf das Gradierwerk benutzt werden kann. Der Luftzug wird bei der versenkten Ausführung

des Gradierwerkes entweder durch einen oder mehrere Ventilatoren hergestellt, oder es muß bei Verwendung natürlichen Luftzuges ein größeres Gradierwerk aufgestellt werden, als es bei Überflurkühlern notwendig sein würde.

Bei Verwendung rückgekühlten Wassers für die Kondensation ist es zweckmäßig, sich mit einem Vakuum von 75—82 % zu begnügen, da bei höherem Vakuum das Gradierwerk zu groß und damit zu teuer werden würde. Bei Verwendung natürlichen Kühlwassers sollte dagegen das Vakuum mindestens 80—85 % betragen; über den letzteren Wert hinauszugehen ist im allgemeinen nicht rätlich, weil bei höherem Vakuum die Kosten für die Wasserbeschaffung wegen des damit verbundenen großen Kraftbedarfes meist so stark anwachsen, daß die Wirtschaftlichkeit der Kondensation leicht in Frage gestellt wird.

Die Totalleistung der Dampfmaschine setzt sich zusammen aus der äußeren oder effektiven Arbeit und der Leerlaufarbeit; sie wird bestimmt mit Hilfe des Indikators und deshalb indizierte Arbeit genannt. Das Verhältnis der effektiven zur indizierten Arbeit heißt der Wirkungsgrad der Maschine; dieser ist abhängig von der Art der Ausführung sowie von der Größe der Maschine und kann bei großen Dampfmaschinen bis zu 92 % betragen.

Das vom Indikator aufgezeichnete Dampfdruckdiagramm ermöglicht jedoch nicht nur die Berechnung der Maschinenleistung, sondern es gibt auch über präzise oder mangelhafte Wirkung der Steuerung und des Kondensators, über die richtige oder unrichtige Dimensionierung der Dampfzuführungs- und Ableitungskanäle, überhaupt über den vorschrittmäßigen Zustand aller mit dem Dampfe in Berührung kommenden Organe der Maschine genauen Aufschluß. Das Indikator-diagramm ist daher ein untrügliches Zeugnis über den ordnungsgemäßen Zustand der wichtigsten, nicht direkt vor Augen liegenden Teile der Dampfmaschine, während sich etwaige Fehler im Gestänge, der Gradführung oder der Lagerung entweder dem Auge und Ohr direkt bemerkbar machen oder durch Warmlaufen der betreffenden Organe kundgeben. Die Aufnahme von Indikator-diagrammen sollte daher bei Abnahme einer Dampfmaschinenlieferung niemals unterlassen werden.

Um ein einwandfreies Resultat zu erhalten, ist es erforderlich, die Dampfdruckdiagramme auf beiden Kolbenseiten zu nehmen und der Berechnung den Mittelwert aus beiden Diagrammen zugrunde zu legen, da z. B. bei einseitiger Kolbenstange die Kolbenoberfläche auf der entgegengesetzten Seite um den Kolbenstangenquerschnitt größer ist. Außerdem können einseitige Fehler in den Steuerungsorganen, den Dampfkanälen usw. vorhanden sein, die man bei Abnahme des Diagrammes nur auf der anderen Zylinderseite nicht würde feststellen können. Der von dem Indikator aufgezeichnete Linienzug gibt ein Bild von dem Verlaufe der Dampfdruckänderungen im Zylinder, die sich während eines Hin- und Herganges des Kolbens auf der betreffenden Seite abspielen. Die ausführliche Erörterung des Diagrammes würde hier zu weit führen; indem wir bezüglich des genaueren Studiums der Arbeitsvorgänge im Zylinder auf die einschlägige, sehr umfangreiche Literatur verweisen, begnügen wir uns hier mit einer kurzen, nur die Hauptpunkte berührenden Erläuterung.

Die beistehende Fig. 59 stellt das theoretische Diagramm einer Einzylinder-Dampfmaschine dar, die mit Auspuff arbeitet. Auf der Abszisse sind die Länge des Zylinderhohlraumes $0-0'$, auf den Ordinaten die den einzelnen Kolbenstellungen entsprechenden Dampfdrücke in bestimmten Maßstäben aufgetragen.

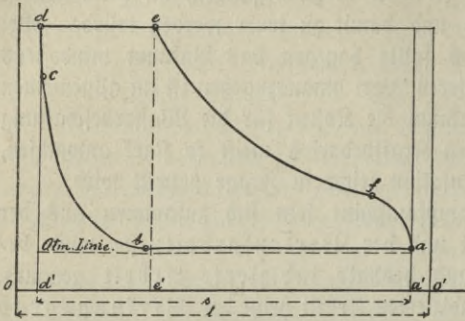


Fig. 59.

Der Kolben bewege sich in der Richtung von a nach b unter dem Einfluß des hinter ihm befindlichen Dampfdruckes, während der vor ihm befindliche Dampf auspufft; der von dem letzteren ausgeübte Gegendruck ist nur wenig größer als 1 Atmosphäre und beträgt gewöhnlich etwa 0,1 Atm. Überdruck. Wenn der Kolben im Punkte b angelangt ist, wird die Ausströmungsöffnung geschlossen, und nun komprimiert der Kolben den noch vor ihm im Zylinder befindlichen Dampfrest nicht ganz bis zur Höhe des Einströmungsdruckes, bis zum Punkte c . In diesem Punkte, also bevor noch der Kolben seine Totpunktstellung in d erreicht hat, beginnt bereits die Einströmung des frischen Dampfes (Voreinströmung), so daß in der Umkehrstellung d vor dem Kolben der volle Frischdampfdruck herrscht. Die Strecke $d'o$ stellt den schädlichen Raum dar, welcher durch den Raumbedarf des Dampfeinströmungskanals bedingt ist. Die Frischdampfzufuhr dauert nach erfolgter Umkehr des Kolbens bis zur Kolbenstellung e , so daß also das Verhältnis der Längen $\frac{d'e'}{d'a'}$ den

Füllungsgrad des Zylinders ergibt. Im Punkte e beginnt nach erfolgtem Abschluß des Dampfeinströmungskanals die Expansion, die annähernd hyperbolisch verlaufen soll und im Punkte f , also bevor der Kolben seine rechte Totpunktstellung erreicht, ihren Abschluß findet. Bei f wird bereits der Auspuffkanal geöffnet (Vorausströmung), infolgedessen der Druck rasch auf die Ausströmungsspannung sinkt, die bei a , in der rechten Totpunktstellung, eintritt. Bei einer mit Kondensation arbeitenden Dampfmaschine verschiebt sich die Ausströmungslinie $a-b$ bis fast zur 0 -Linie, da der Überdruck des Kondensators nur etwa 0,2 Atm. beträgt. Ebenso, wie die Expansionslinie, soll auch die Kompressionslinie angenähert hyperbolisch und jedenfalls mit stetiger Krümmung verlaufen; die Einströmungs- und Ausströmungslinien sollen einen annähernd horizontalen und geradlinigen Verlauf haben. Aus wesentlichen Abweichungen der einzelnen Linienzüge des Diagrammes von diesen Formen kann man auf die Fehler schließen, die die in Betracht kommenden Organe besitzen.

Die von dem Diagramme eingeschlossene Fläche stellt das Produkt Druck mal Kolbenweg, also die totale Leistung der Maschine während eines einfachen

Kolbenshubes in kgm dar. Ermittelt man durch Planimetrieren der Kurven oder auf rechnerischem Wege den Mittelwert p_m der auf dem Kolben während eines Hubes lastenden Überdrücke, also denjenigen der absoluten Höhen des Diagrammes, so ist die totale oder indizierte Leistung der Maschine in Pferdekraften ausgedrückt durch die Formel

$$N_i = \frac{p_m \cdot 0.1 \cdot 2n}{60 \cdot 75} PS_i$$

worin O = Kolbenoberfläche in qem, l = Schublänge in m und n = Tourenzahl pro Minute. Für p_m ist der Mittelwert aus den Diagrammen auf beiden Kolbenseiten einzusetzen und aus einer größeren Anzahl von Aufnahmen zu bestimmen. Bei mehrzylindrigen Maschinen müssen selbstverständlich die Diagramme von allen Zylindern gleichzeitig aufgenommen und bei der Berechnung der Maschinenleistung berücksichtigt werden.

Betrachten wir noch einen Augenblick das vorstehende Diagramm mit Rücksicht darauf, daß die von dem Linienzuge eingeschlossene Fläche ein Maß für die Arbeit der Maschine ist, so sehen wir, daß durch die Kompression des Vorderdampfes gegen Ende des ersten Kolbenshubes (Linie bc) die Arbeit verkleinert wird, und zwar um so mehr, je früher die Kompression beginnt und je höher sie getrieben wird. Trotzdem empfiehlt sich eine ziemlich weitgehende Kompression, weil durch dieselbe eine unter Umständen beträchtliche Dampfersparnis herbeigeführt wird, indem sich der schädliche Raum mit den Dampfrückständen des Zylinders füllt und Frischdampfverluste dadurch vermieden werden. Ferner bildet der komprimierte Vorderdampf ein elastisches Kissen, welches die Beschleunigung des Massendruckes ausgleicht und ein stoßfreies, sanftes Arbeiten der Maschine herbeiführt.

Aus der obigen Formel geht hervor, daß die Leistung der mittleren Höhe des auf dem Kolben lastenden Druckes proportional ist; dieser Mittelwert des Druckes wird um so größer, je größer der Füllungsgrad des Zylinders ist, und er erreicht sein Maximum bei voller Füllung. Bei einem ganz bestimmten Füllungsgrade wird nun der Dampfverbrauch, bezogen auf die Einheit der Leistung, die sich mit den Füllungen in ziemlich weiten Grenzen ändert, ein Minimum. Die diesem Füllungsgrade, dem ökonomisch günstigsten, entsprechende Leistung der Maschine heißt die normale. Die Maximalleistung würde daher, ohne Berücksichtigung des hierbei auftretenden bedeutenden Dampfverbrauches und bei genügender Festigkeit der Maschine erst bei voller Füllung stattfinden; mit Rücksicht jedoch auf diese beiden Gesichtspunkte setzt man in der Praxis die Grenze, bis zu der die Leistung gesteigert werden darf, wesentlich niedriger. Bei Verbundmaschinen liegt z. B. der ökonomisch günstigste Füllungsgrad bei etwa 15—18% des Hochdruckzylinders, während der der praktischen Maximalleistung entsprechende Füllungsgrad auf etwa $\frac{1}{3}$ des Hochdruckzylinders festgesetzt wird, entsprechend einer Steigerung der Leistung um etwa 25% der normalen. Bei höheren Füllungen würde die Maschine durchaus unwirtschaftlich arbeiten; schon aus diesem Grunde sind dieselben — für Dauerleistungen wenigstens — nicht zu empfehlen.

In der Praxis interessiert nun weniger die Totalleistung der Maschine, als deren Nutz- oder Effektivleistung, d. h. die an der Maschinenachse zur Verfügung stehende Energie. Die Berechnung dieser Leistung aus der Differenz der durch die Diagramme bei voller Belastung und bei Leerlauf festzustellenden Leistungen ergibt kein genügend genaues Resultat, da die Leerlaufarbeit wesentlich kleiner ist, als die in der Maschine bei ihrer Vollbelastung (wegen der erhöhten Reibung) auftretenden Verluste. Bei kleinen Dampfmaschinen kann nun die effektive Leistung direkt mittels eines Bremsdynamometers festgestellt und durch Vergleich dieser Leistung mit der durch das Indikator=diagramm aufgezeichneten Totalleistung der Wirkungsgrad berechnet werden. Maschinen von größerer Leistung stellen dagegen an die Abmessungen des Bremsdynamometers und an die Ausführung der damit vorzunehmenden Versuche sehr schwer zu erfüllende Forderungen; man bestimmt deshalb bei solchen Maschinen die Effektivleistung am besten dadurch, daß man sie auf eine Dynamomaschine von bekanntem Wirkungsgrade arbeiten läßt und die jeweilige Belastung der letzteren gleichzeitig mit der Aufnahme der Indikator=diagramme feststellt.

Die Übertragung der Arbeit von der Dampfmaschine auf die von ihr anzutreibende Dynamomaschine geschieht entweder vermittelt eines Treibriemens oder durch Verbindung der Achsen beider Maschinen mittels fester oder elastischer Kupplung oder endlich durch direktes Aufsetzen des Rotationskörpers der Dynamomaschine auf die Achse der Dampfmaschine. Der Riemenantrieb kommt hauptsächlich für kleinere Maschinensätze bei Verwendung langsam laufender Dampfmaschinen in Betracht, während die direkte Kupplung vorwiegend bei schnell laufenden Dampfmaschinen, besonders stehender Ausführung, Anwendung findet; das Schwungrad kann im Interesse der Raumersparnis auf der Kupplung aufgesetzt bezw. mit derselben konstruktiv verbunden werden.

Um die Lagerreibung zu vermindern, wird man zweckmäßig die Zahl der Lager möglichst beschränken; so dürfte bei der direkten Kupplung der Dynamo mit der Dampfmaschine für die erstere in den meisten Fällen die Anbringung eines Außenlagers genügen. Anstatt der festen Kupplung wird häufig auch die Achse der Dampfmaschine verlängert und die Dynamomaschine direkt auf der Verlängerung aufgesetzt; man spart in diesem Falle die Kupplung, erschwert allerdings gleichzeitig die Montage und eventuelle Demontage, da nunmehr die beiden Maschinen voneinander abhängig sind. Die dritte Antriebsweise, bei der der rotierende Teil der Dynamomaschine direkt auf der Dampfmaschinenachse montiert wird, findet hauptsächlich bei großen Maschinensätzen Anwendung; besonders eignen sich dafür liegende Tandem=Dampfmaschinen, da bei solchen nur zwei Lager für die gemeinsame Achse erforderlich sind und die Dynamo von allen Seiten bequem zugänglich ist. Bei horizontalen Verbundmaschinen mit nebeneinanderliegenden Zylindern muß in diesem Falle der Gleichstromanker auf einer verstärkten Nabe montiert werden, damit er über die Kurbeln der Antriebsdampfmaschine übergestreift werden kann; für Wechselstrom- und Drehstrommaschinen kommt dieses nicht in Betracht, da die Magneträder derselben leicht zweiteilig ausgeführt werden können.

Wenn durch das Indikatorgramm die vertragliche Leistung und der ordnungsmäßige Zustand der Arbeitszylinder, Steuerung und Kondensation nachgewiesen ist, wenn es sich ferner durch längeren Probetrieb herausgestellt hat, daß auch das Gestänge mit seinen Lagerungen und Führungen, sowie die Lagerung der Nabe zu Beanstandungen keine Veranlassung gibt, so bleibt noch der Nachweis des Wirkungsgrades und des Dampfverbrauches pro Pferdekraftstunde übrig, um ein abschließendes Urteil über die Qualität der Maschine zu erhalten. In der Praxis wird bei Feststellung der betreffenden Werte gewöhnlich so verfahren, daß der Lieferant der Maschine sich zuerst selbst durch mehrtägigen, bei größeren Anlagen event. mehrwöchentlichen Probetrieb und Anstellung von Vorversuchen von dem vertragsmäßigen Zustande der Lieferung überzeugt, worauf an einem bestimmten Termine der Probelauf und die Anstellung der Abnahmeversuche nach einem zu vereinbarenden Programme, für das der Verein deutscher Ingenieure Normen aufgestellt hat, stattfindet. Diese Abnahmeversuche werden zweckmäßig mit denjenigen, die sich auf die zur Maschinenanlage gehörige Dampfkesselanlage beziehen, vereinigt.

Was nun insbesondere den Dampfverbrauch anbelangt, so ist derselbe für die Güte der Maschine und für die Höhe der gesamten Betriebskosten von so hervorragender Bedeutung, daß von dem Lieferanten bei der Bestellung der Maschine die Gewährleistung der Angaben bezüglich dieses Punktes vertraglich verlangt werden sollte; ähnlich verhält es sich mit dem Wirkungsgrade, weshalb es sich empfiehlt, die Garantie betreffend den Dampfverbrauch sowohl auf die indizierte als auch die effektive Leistung zu beziehen, also den Dampfverbrauch pro PS.-Stunde und pro PS_e-Stunde vertraglich festzulegen. Über die Höhe des zulässigen Dampfverbrauches lassen sich allgemein gültige Angaben in kurzen Ausführungen nicht machen, da sie sich wesentlich nach den Verhältnissen des einzelnen Falles richtet; es kommt dabei der Dampfdruck, die Größe, das System und die Tourenzahl der Maschine, die Anwendung einer Kondensation, Überhitzung usw. in Betracht. Der Dampfverbrauch pro effektive Pferdekraftstunde ist um den der Leerlaufarbeit der Maschine, bezw. der zur Überwindung der inneren Widerstände erforderlichen Arbeit entsprechenden Betrag höher, als derjenige pro indizierte Pferdekraftstunde und errechnet sich aus dem letzteren durch Division mit dem Wirkungsgrade. Auch der Wirkungsgrad hängt, wie der Dampfverbrauch, von den Verhältnissen des konkreten Falles wesentlich ab und schwankt daher in ziemlich weiten Grenzen, so daß hierüber ebenfalls keine allgemein gültigen Angaben gemacht werden können; er nimmt im allgemeinen mit steigender Belastung der Maschine etwas zu.

b) Die Dampflokomobile.

Eine häufig zur Verwendung gelangende Modifikation der stationären Dampfkraftanlage mit räumlich getrennten Dampferzeugern und Maschinen stellt die Dampflokomobile dar, bei der die beiden genannten Hauptteile der Dampfkraftanlage zu einem einzigen Apparate vereinigt sind. Die Ausführung ist gewöhnlich derart, daß die Dampfmaschine auf dem Dampfkessel montiert ist;

einzelne, besonders englische Fabriken liefern jedoch auch Lokomobilen, bei denen die Maschine unter dem Kessel angeordnet ist, eine Ausführungsform, bei der beide Teile voneinander unabhängig sind, insofern zwar der Einfluß der Erschütterungen durch den Betrieb der Maschine auf die Festigkeit der Konstruktion wegfällt, auf der anderen Seite aber die Zugänglichkeit der durch den Kessel teilweise verdeckten Maschine verringert wird. Die Lokomobilen werden sowohl mit Einzylindermaschinen als auch mit Verbunddampfmaschinen ausgestattet und in allen Größen bis zu etwa 200 Pferdekraften ausgeführt; sie können mit Kondensationseinrichtung und gegebenenfalls einem Gradierwerke ebenso verbunden werden wie eine stationäre Dampfkraftanlage. Die Übertragung der Kraft auf die Dynamomaschine geschieht mittels Riemens, zu welchem Zwecke die Lokomobile mit einem Schwungrad versehen wird; des besseren Ausgleiches wegen stattet man sie auch mit zwei Schwungrädern aus.

Als Vorteile der Lokomobile vor der stationären Dampfkraftanlage sind zu erwähnen der wesentlich geringere Raumbedarf, der sich durch Wegfall des Kesselhauses und — besonders bei kleineren Anlagen — auch des Schornsteines bemerkbar macht, da hier gewöhnlich ein aus Eisenblech hergestelltes Abzugsrohr für die Heizgase genügt. In Wegfall kommen ferner bei der Lokomobile die Einmauerung des Kessels, sowie das Fundament für die Dampfmaschine. Auch die bei der stationären Dampfkraftanlage erforderlichen, meist ausgedehnten Rohrleitungen zwischen Kessel und Maschine fallen weg bezw. schrumpfen auf ganz kurze Verbindungsstücke zusammen. Es lassen sich daher bei einer Lokomobile gegenüber einer stationären Anlage unter Umständen sehr beträchtliche Ersparnisse an Anlagekapital für Grunderwerb, Hochbauten, Maurerarbeiten und Rohrleitungen machen, wobei zu berücksichtigen ist, daß sich die Kosten für die Lokomobile selbst kaum wesentlich höher stellen als diejenigen von Kessel und Maschine zusammen, wenn sie voneinander räumlich getrennt sind. Es kommt hinzu, daß auch die Betriebskosten einer Lokomobile unter Umständen niedriger sind als diejenigen einer stationären Anlage, weil die erstere zur Bedienung nur einen Mann erfordert, während die letztere gewöhnlich deren zwei, des Maschinisten und des Heizers, bedarf. Auch der Dampfverbrauch der Lokomobile ist nicht höher als bei einer stationären Dampfmaschine; er wird sich sogar etwas niedriger stellen wegen des Wegfalles der Kondensverluste in den Rohrleitungen. Diesen Vorzügen stehen indessen auch gewisse Nachteile gegenüber, von denen der geringere Wirkungsgrad des Lokomobilkessels gegenüber einem eingemauerten stationären Kessel in Folge der Wärmestrahlung des ersteren als das kleinere Übel erwähnt sein mag. Von größerer Bedeutung ist der Umstand, daß durch den Betrieb des Lokomobilkessels eine Verschmutzung der Dampfmaschine und besonders auch der in demselben Raum befindlichen elektrischen Maschinen und Apparate durch Asche und Kohlenstaub kaum zu vermeiden ist; hierdurch wird nicht nur die Lebensdauer der davon betroffenen Apparate beeinträchtigt, sondern es können auch sehr empfindliche Betriebsstörungen besonders am elektrischen Teile der Anlage durch Kurzschlüsse u. dergl. verursacht werden.

Nichtsdestoweniger kann in manchen Fällen, zumal bei kleineren Anlagen, die Lokomobile mit der stationären Dampfstraftanlage erfolgreich konkurrieren, auch manchmal für die Anlage eines Reserवेशages wegen der geringeren Gestehungskosten in Frage kommen. Für größere Betriebsanlagen kommt sie schon wegen der Beschränkung in ihrer Leistungsfähigkeit nicht in Betracht.

c) Die Heißdampfmaschine von Schmidt.

Im Verlaufe der vorstehenden Erörterungen hatten wir mehrfach Gelegenheit, auf die Arbeitsverluste hinzuweisen, welche durch die Kondensation des Dampfes infolge der Abkühlung, die er auf seinem Wege vom Kessel zur Maschine und in dieser selbst erfährt, verursacht werden. Es sind auch einige Mittel angegeben worden, die geeignet erscheinen, diese Verluste zu verringern; erwähnt wurden als solche die Erzeugung möglichst trockenen Dampfes, sorgfältige Isolierung der Rohrleitungen, der Arbeitszylinder und Receiver, sowie die Heizung der letzteren mit Frischdampf unter Verwendung von Heizmänteln. Diese Hilfsmittel genügen indessen nicht, die Dampfkondensation vollständig zu verhindern; um das zu erreichen, bedarf es einer beträchtlichen Überhitzung des Kesseldampfes, die so weit zu treiben ist, daß der Wärmeverlust, den der Dampf auf dem ganzen von ihm zurückzulegenden Wege erfährt, seine Temperatur nicht unter die Grenze zu drücken vermag, bei der er kondensiert. Zu diesem Zwecke muß der Dampf, vorzügliche Isolierung aller von ihm berührten Teile der Anlage vorausgesetzt, auf etwa 350° erhitzt werden. Diese bedeutende Überhitzung ist indessen mit Schwierigkeiten verknüpft, weil das dazu erforderliche Temperaturgefälle der Heizgase eine verhältnismäßig hohe Anfangstemperatur derselben voraussetzt, der die Überhitzerrohre, die schon bei etwas über 400° Erwärmung für Dampf durchlässig werden, nicht standhalten. Dem Ingenieur Schmidt gelang es nun, dieser Schwierigkeit auf folgende Weise Herr zu werden und die gewünschte Überhitzung zu erreichen:

In einem stehenden, mit Quersiedern ausgestatteten Dampfkessel wird durch Beanspruchung des letzteren mit etwa 45—50 kg Dampf pro Quadratmeter Heizfläche absichtlich nasser Dampf erzeugt; die Kesseldimensionen fallen deshalb verhältnismäßig sehr klein aus (Fig. 60).

Dieser Dampf wird durch den Vorüberhitzer geleitet, der aus 2 Reihen Heizschlangen besteht und oberhalb des Kessels in den Strom der abziehenden Heizgase eingebaut ist. Der Dampf wird in dem von den heißesten Abgasen nasspülten Vorüberhitzer getrocknet; die verdampfenden Wasserteilchen führen gleichzeitig eine wirksame Kühlung der Rohrschlange herbei, so daß deren Temperatur nicht höher wird, als etwa $350\text{—}375^{\circ}$, was zulässig ist. Aus dem Vorüberhitzer gelangt der Dampf in den sogen. Nachverdampfer, einen gegen Wärmeverluste möglichst isolierten Zylinder, in dem infolge der entstehenden Druckabnahme die letzten Wasserreste noch verdampfen. Von dem Nachverdampfer aus wird der nun schon stark überhitzte Dampf durch eine zweite, nach dem Gegenstromprinzip oberhalb des Vorüberhitzers im Strome der Heizgase angeordnete Rohrschlange, den Hauptüberhitzer, geleitet und in

diesem auf die Endtemperatur überhitzt. Da die Heizzgase vorher einen großen Teil ihrer Wärme an den Vorüberhitzer abgegeben haben, so werden auch die Rohre des Hauptüberhitzers nicht unzulässig erwärmt.

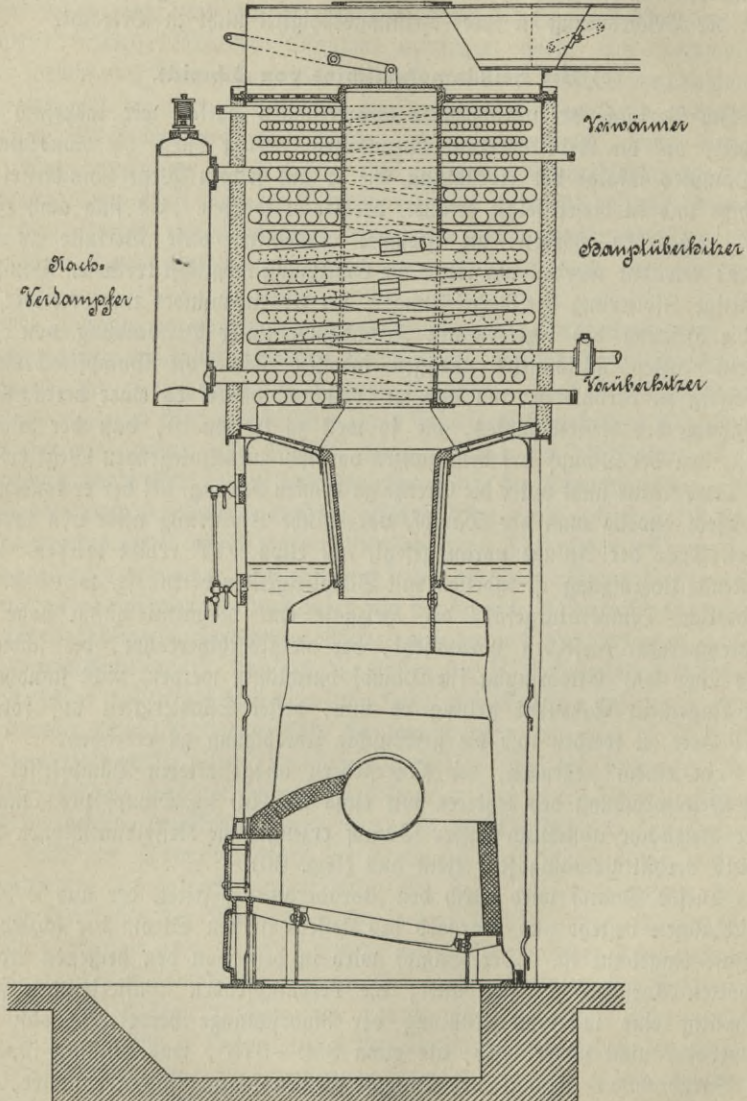


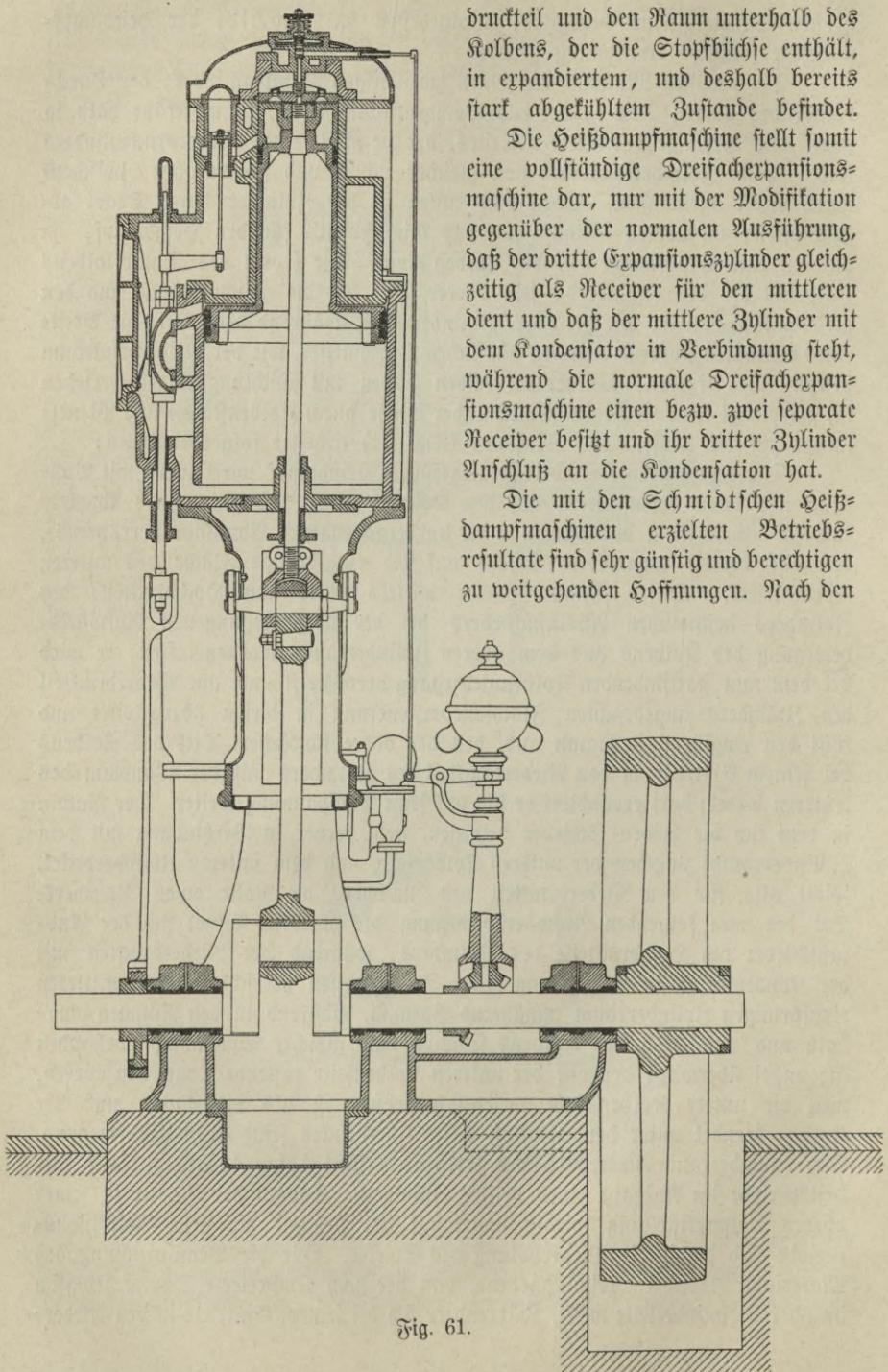
Fig. 60.

Die Verwendung des stark überhitzten Dampfes in einer Maschine von normaler Bauart würde besonders mit Rücksicht auf die verhältnismäßig geringe Widerstandsfähigkeit der Stopfbüchsen gegenüber den hohen Temperaturen

großen Schwierigkeiten begegnen; infolgedessen hat Schmidt der Heißdampfmaschine folgende Anordnung gegeben:

Die vertikale Maschine hat einen zweiteiligen Dampfzylinder; der Durchmesser des oberen Teiles, der als Hochdruckraum dient, ist ungefähr halb so groß, wie derjenige des unteren Teiles, der die Rolle eines Niederdruckzylinders spielt. Beide Zylinderteile sind von gleicher Länge und stoßen ohne Zwischenwand direkt aneinander. Oben und unten ist der Zylinder durch Deckel abgeschlossen; im oberen befindet sich das Einlassventil für den Heißdampf, im unteren eine Stopfbüchse für die Kolbenstange. Die Form des Dampfkolbens entspricht der des Zylinders; sein oberer Teil hat die gleiche Länge und den gleichen Durchmesser wie der obere Zylinderraum, während der untere die Breite eines normalen Kolbens und den nämlichen Durchmesser, wie der Niederdruckraum besitzt. Der Kolben, welcher an beiden Enden mit Dichtungsringen versehen ist, überträgt seine Kraft in gewöhnlicher Weise durch Kolbenstange und Pleuelstange auf die Achse. Die Maschine (Fig. 61) arbeitet folgendermaßen:

Der dem oberen Zylinderteile zugeführte Heißdampf wirkt zuerst mit Volldruck und dann expandierend auf den Kolben, wobei sich der letztere abwärts bewegt. Gleichzeitig drückt der von der vorhergegangenen Admision herrührende, teilweise bereits expandierte Dampf auf die ringförmige Fläche des unteren Kolbenteiles. Dieser Dampf wurde mittels eines am Hochdruckteile des Zylinders befindlichen Auslasschiebers bei der vorhergegangenen Aufwärtsbewegung des Kolbens aus dem oberen Zylinderraum herausgelassen; er wird bei dem nun stattfindenden Kolbenniedergang vermittelt einer am Niederdruckteil des Zylinders angebrachten Flachschiebersteuerung in diesen übergeleitet und füllt den ringförmigen Raum aus, den der obere schwächere Teil des Kolbens bei seinem Eintritte in den Niederdruckteil des Zylinders mit der Wandung des letzteren bildet; dort expandiert er bis auf seine Endspannung weiter. Der Raum, in dem sich die beiden Schieber bewegen, steht ferner in Verbindung mit dem Zylinderraum zwischen der unteren Kolbenseite und dem unteren Zylinderdeckel, spielt also für den Niederdruckteil des Zylinders die Rolle eines Receivers. Bei der nun folgenden Aufwärtsbewegung des Kolbens öffnet sich der Auslasschieber am Hochdruckteile des Zylinders, während der Niederdruckteil mit der Kondensation in Verbindung tritt. Infolgedessen herrscht in dem mittleren ringförmigen Zylinderraum annähernd Vakuum, während in den Räumen oberhalb und unterhalb des Kolbens Dampf von gleicher Spannung vorhanden ist; dabei überwiegt der auf der unteren Kolbenseite lastende Druck den oberen, weil die untere Kolbenfläche wesentlich größer ist als die obere, und der Kolben beendet unter dem Einfluß dieses Überdruckes seine Aufwärtsbewegung. Der Zylinderraum unterhalb des Kolbens erfüllt daher während dieser Arbeitsperiode die Aufgabe eines dritten Zylinders. Sobald der Kolben in seiner oberen Totpunktstellung wieder angelangt ist, beginnt die neue Admissionsperiode und damit die Wiederholung des Spieles. Für die Beanspruchung des Materials ist dabei ausschlaggebend, daß der hoch temperierte Dampf lediglich im oberen Zylinderteile wirkt, während er sich bei seinem Eintritte in den Nieder-



druckteil und den Raum unterhalb des Kolbens, der die Stopfbüchse enthält, in expandiertem, und deshalb bereits stark abgekühltem Zustande befindet.

Die Heißdampfmaschine stellt somit eine vollständige Dreifachexpansionsmaschine dar, nur mit der Modifikation gegenüber der normalen Ausführung, daß der dritte Expansionszylinder gleichzeitig als Receiver für den mittleren dient und daß der mittlere Zylinder mit dem Kondensator in Verbindung steht, während die normale Dreifachexpansionsmaschine einen bezw. zwei separate Receiver besitzt und ihr dritter Zylinder Anschluß an die Kondensation hat.

Die mit den Schmidtschen Heißdampfmaschinen erzielten Betriebsergebnisse sind sehr günstig und berechtigen zu weitgehenden Hoffnungen. Nach den

Fig. 61.

Versuchen von Schröter (Z. d. V. d. S. 1895) hatte eine Heißdampfmaschine von 72 PS; einen Wirkungsgrad von 86,5% und einen Dampfverbrauch von 5,63 kg pro effektive PS-Stunde, was als außerordentlich günstig bezeichnet werden muß.

d) Dampfturbinen.

Der periodische Richtungswechsel und die ungleichförmige Geschwindigkeit der Kolbenbewegung sind als prinzipielle Eigentümlichkeiten aller Pendel-Kraftmaschinen zu betrachten, die sich beim Antriebe von gleichmäßig rotierenden Arbeitsmaschinen, insbesondere von Dynamomaschinen, durch eine Reihe schwer zu beseitigender Übelstände unliebsam bemerkbar machen. Hierher gehört vor allem die Notwendigkeit des vielteiligen, zwischen Kolben und Kurbelachse liegenden Übertragungsmechanismus einschließlich des Schwungrades, durch den die Pendelbewegung der Maschine in eine möglichst gleichförmige Rotationsbewegung umgewandelt wird. Dieser Mechanismus bedingt indessen eine außerordentliche Komplikation des Apparates und eine wesentliche Erhöhung seiner Leerlaufarbeit; auch wird durch ihn die Betriebsicherheit vermindert, da jeder einzelne der zur Umwandlung der Kolbenbewegung erforderlichen Teile einen Unsicherheitsfaktor darstellt. Endlich werden dadurch die Anlagekosten der Maschine erheblich verteuert, und zwar nicht nur die direkten Herstellungskosten, sondern auch die indirekten Kosten, die aus dem größeren Raumbedarfe und der Notwendigkeit eines umfangreichen Fundamentes erwachsen. Die Pendelbewegung ist deshalb als der wunde Punkt dieser Maschinen anzusehen, dessen üble Folgen durch die bis zum äußersten getriebene Vervollkommnung der Konstruktion wohl gemildert, aber — weil in ihrem Prinzip begründet — niemals ganz beseitigt werden können.

Der Gedanke, die lebendige Kraft des Dampfes in ähnlicher Weise, wie es mit der des Wassers in den Wasserrädern und Turbinen geschieht, zur direkten Erzeugung einer Rotationsbewegung auszunutzen, lag deshalb nahe; seine Ausführung scheiterte indessen lange Zeit an dem Umstande, daß der hochgespannte Dampf eine enorme Geschwindigkeit besitzt, die 1000 m pro Sekunde und darüber beträgt. Diese Dampfgeschwindigkeit bedingt nämlich, wie wir später sehen werden, so hohe Umlaufzahlen der unter dem Einflusse des Dampfes sich bewegenden Rotationskörper, daß nicht nur an die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber den dabei auftretenden Beanspruchungen sehr schwer zu erfüllende Anforderungen gestellt werden, sondern auch die Herstellung eines betriebssicheren und mit gutem Wirkungsgrade arbeitenden Mechanismus zur Umwandlung der hohen Umdrehungszahlen in für die Praxis brauchbare Geschwindigkeiten mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist. Erst in der neuesten Zeit gelang es, dieser Schwierigkeiten Herr zu werden und Dampfturbinen zu bauen, welche den an sie zu stellenden Anforderungen entsprechen, wie die Konstruktionen von de Lavale, Parsons, Rateau, Büllig-Gescher-Wyß, Riedler-Stumpf u. a. beweisen. Von diesen Turbinen sollen nur die beiden zuerst genannten beschrieben werden, da sie zurzeit wohl

am weitesten verbreitet sind und in ihnen die beiden Wirkungsprinzipien der Turbinen, nämlich das Aktions- und das Reaktionsprinzip, in erfolgreicher Weise zur Anwendung gelangt sind. Es sei indessen hervorgehoben, daß die übrigen vorstehend erwähnten Turbinenkonstruktionen — nach den von den Fabrikanten derselben geleisteten Garantien zu urteilen — den beiden zu beschreibenden als durchaus gleichwertig an die Seite gestellt werden müssen.

α) Dampfturbine von de Lavale.

Diese Dampfturbine ist nach dem Principe der Wasser-Aktionsturbinen gebaut. Sie besteht wie diese aus einem Laufrade mit horizontaler Achse, das mit Aktionszellen von gleichen Eintritts- und Austrittswinkeln und von

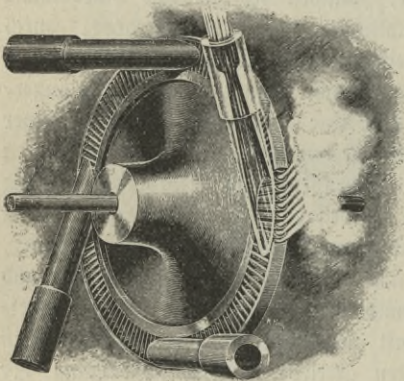


Fig. 62.

konstanten Querschnitten versehen ist; die Zellen sind an dem Rande des Rades quer zu seiner Mittelebene angeordnet (Fig. 62). Denselben wird der Dampf mittels eines aus mehreren Düsen bestehenden Leitapparates zugeführt; die Anzahl der Düsen richtet sich nach der Größe der Turbine. Die Leitdüsen sind in gleichen Abständen am Zellenkranz angeordnet und besitzen konische Form mit einem in der Richtung zur Ausströmungsöffnung zunehmenden Querschnitte.

Da der Dampf nur einer beschränkten Anzahl von Laufradzellen zugeführt wird und die letzteren in der Richtung der Achse durchströmt, so ist die Turbine als eine partiell beaufschlagte, seitenschlächtige Aktionsturbine mit horizontaler Achse zu bezeichnen.

In den Zuführungsdüsen verliert der Dampf wegen der eigenartigen Form der ersteren den größten Teil seiner Spannung; infolgedessen fehlt dem mit großer Geschwindigkeit ausströmenden Dampfstrahle die Tendenz, sich seitlich zu zerstreuen. Man kann deshalb den Zwischenraum zwischen Düsenöffnung und Zellenkranz verhältnismäßig groß wählen, ohne wesentliche Dampfverluste befürchten zu müssen, was natürlich für die Betriebssicherheit des Apparates von Bedeutung ist.

Der Geschwindigkeit des Dampfes muß diejenige des Laufrades entsprechen, wenn nicht Arbeit verloren gehen soll. Da nun bekanntlich die günstigste Laufradgeschwindigkeit einer solchen Turbine gleich der halben Geschwindigkeit des Energieträgers ist, so berechnet sich für Turbinen von kleinerer Leistung bis zu etwa 5 PS, bei einem Laufradumfang von etwa 1 m und der obigen Dampfgeschwindigkeit von 1000 m pro Sekunde die Tourenzahl zu etwa 30000 pro Minute. Bei Turbinen von größerer Leistung vermindert sich die Rotationsgeschwindigkeit der Zunahme des Laufraddurchmessers entsprechend;

die Tourenzahl beträgt indessen bei Apparaten von mehreren 100 PS Leistung immerhin noch 7500 bis 10000 pro Minute. Diese Geschwindigkeiten stellen natürlich an die Qualität des zur Verwendung gelangenden Materials, sowie an die Sorgfalt und Solidität der Konstruktion die höchsten Anforderungen. Besondere Schwierigkeit bietet hierbei die Lagerung der Achse, da es nicht möglich ist, die Massen des Laufrades so genau auszubalancieren, daß bei der ungeheuren Rotationsgeschwindigkeit die Schwerlinie derselben stets mit der Richtung der Achse zusammenfällt. Diesem Umstande hat nun de Lavale mit Erfolg dadurch Rechnung getragen, daß er die Laufradachse so dünn als möglich ausführte und so lose lagerte, daß sie sich nach allen Seiten federnd ausbiegen kann; infolgedessen stellt sich die materielle Achse von selbst stets in die Richtung der Schwerlinie ein. Die Laufradachse einer Turbine von etwa 30 PS Leistung beispielsweise ist nicht viel stärker als ein normaler Bleistift. Die Reibung zwischen dem Laufrade und der atmosphärischen Luft ist natürlich bei der hohen Rotationsgeschwindigkeit sehr bedeutend und hat beträchtliche Arbeitsverluste zur Folge; diese lassen sich indessen dadurch sehr vermindern, daß man die Turbine mit einem gewöhnlichen Kondensator verbindet.

Zur Reduktion der hohen Tourenzahl auf das für den praktischen Betrieb verwendbare Maß dient ein Zahnradvorgelege; bei größeren Turbinen sind deren zwei vorhanden. Jedes Vorgelege besteht aus einem kleinen, auf der Turbinenachse sitzenden Schraubenrade mit entgegengesetzter Steigung der unter einem Winkel von 45° gegen die Achse gestellten, fein geteilten Zähne, das in ein auf einer Vorgelegewelle sitzendes Zahnrad von dem zehnfachen Durchmesser eingreift, so daß die Tourenzahl des Vorgeleges bei kleineren Modellen etwa 3000 pro Minute beträgt und bei großen bis auf etwa 750 pro Minute sinkt. Die Achsen der Dynamomaschinen werden mit den Vorgelegewellen gewöhnlich direkt gekuppelt.

Die Regulierung erfolgt entweder mittels eines Drosselventils, das unter dem Einflusse eines Regulators steht, oder sie geschieht von Hand dadurch, daß eine oder mehrere Düsen von dem Dampfrohre abgesperrt werden.

Der Dampfverbrauch dieser Turbine entspricht bei kleineren Ausführungen und niedrigen Dampfspannungen ungefähr demjenigen einer Einzylinder-Dampfmaschine gleicher Leistung; er wird um so günstiger, je höher man die Spannung des zugeführten Dampfes wählt. Größere Turbinen, welche mit Kondensation arbeiten, haben einen Dampfverbrauch, der demjenigen einer unter denselben Verhältnissen arbeitenden Verbund-Dampfmaschine gleicher Leistung entspricht.

Der Ausführung von größeren Turbinen als etwa für 300 PS Leistung scheint die nicht genügende Widerstandsfähigkeit des Materials gegen die hohe Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades vorläufig große Schwierigkeiten entgegenzustellen. Für kleinere Leistungen dagegen hat sich die Turbine in verschiedenen Fällen jahrelangen Betriebes gut bewährt. Die Maschine besitzt vor der normalen Dampfmaschine verschiedene Vorzüge, wegen deren sich manchmal Gelegenheit zu ihrer Verwendung findet. Zu erwähnen sind hierbei ihre geringen Abmessungen, in Folge deren sie nur einen kleinen Raum beansprucht

und ein ganz unbedeutendes Fundament erfordert; ihre Bedienung ist wegen der Einfachheit des Apparates sehr einfach, ihr Ölverbrauch gering, und die Unterhaltungskosten sind sehr mäßig.

Diese wertvollen Eigenschaften der Maschine haben neuerdings Veranlassung gegeben, auf einzelnen deutschen Eisenbahnstrecken mit ihrer Hilfe die elektrische Zugbeleuchtung versuchsweise einzuführen. Zu diesem Zwecke wird eine mit einer Lichtdynamo gekuppelte Dampfturbine auf der Lokomotive montiert, von der sie ihren Betriebsdampf erhält.

β) Dampfturbine von Parsons.

Die bedeutende Geschwindigkeit des Laufrades ist bei der soeben besprochenen Dampfturbine auf den Umstand zurückzuführen, daß das ganze Geschwindigkeitsgefälle des Dampfes in einem einzigen Rade verarbeitet werden muß. Würde man daher den Dampf mehrere Laufräder von zweckentsprechenden Formen und Abmessungen, die auf einer gemeinschaftlichen Achse sitzen, hintereinander durchströmen lassen, derart, daß sich das Geschwindigkeitsgefälle auf sämtliche Räder gleichmäßig verteilt, so würde sich die Umlaufzahl der Achse im Verhältnis zur Anzahl der Laufräder vermindern. Von diesem Gedanken ausgehend konstruierte Parsons eine Dampf-Reaktionsturbine, die je nach der Größe mit 3000 bis 700 Touren pro Minute arbeitet und deshalb mit rasch laufenden Betrieben — Dynamomaschinen, Schiffswellen u. dergl. — direkt gekuppelt werden kann.

In einem horizontal gelagerten zylindrischen Gehäuse, an dessen Innenwand eine große Zahl mit Leit- und Laufrädern versehener Radkränze feststehend angeordnet ist, rotiert eine Trommel, auf der eine entsprechende Anzahl von Laufradkränzen, die ebenfalls mit Schaufeln ausgestattet sind, derart befestigt ist, daß zwischen je zwei Leitradkränzen ein Laufrad Platz findet. Der Dampf wird einer vor dem ersten Leitrad befindlichen Dampfammer vermittelt eines von einem Pendelregulator indirekt beeinflussten Ventils zugeführt und durchstreicht nun expandierend sämtliche Leit- und Laufradschaufeln, indem er seine Geschwindigkeit an die letzteren abgibt; hierauf gelangt er entweder ins Freie oder in einen gewöhnlichen Kondensator (Fig. 63).

Die Gesamtzahl der Leit- und Laufradschaufeln ist sehr bedeutend und schwankt zwischen 20000 und 30000; dieselben können nicht alle gleichmäßig ausgeführt werden, weil der Raumbedarf des Dampfes mit fortschreitender Expansion, gerade so wie bei einer Mehrfachexpansionsmaschine, größer wird. Es muß deshalb den Radzellen eine verschiedene Größe gegeben werden, und zwar so, daß die der Dampfaustrittsstelle näher liegenden die kleinsten sind. Zu diesem Zwecke wird die ganze Expansionsarbeit des Dampfes in drei Abschnitte — analog einer Dreifachexpansionsmaschine — zerlegt, die sich durch stufenförmige Vergrößerung des Durchmessers der Trommelachse und der Schaufeln kennzeichnen. Die Länge der Schaufeln variiert zwischen 5 und 150 mm; dieselben werden aus harter Bronze hergestellt. Um die Verluste zu vermindern, die dadurch entstehen, daß der Dampf zum Teile direkt durch die

Zwischenräume der Leit- und Laufräder geht, ohne die Schaufeln zu passieren, muß der Abstand zwischen beiden — bei den ersten Radkränzen wenigstens — so klein als irgend möglich gemacht werden. Derselbe beschränkt sich auf geringe Bruchteile eines Millimeters; infolgedessen werden an die Exaktheit der Ausführung natürlich die höchsten Anforderungen gestellt.

Der Dampf übt nun einen starken, einseitigen Druck auf die Laufradtrommel in horizontaler Richtung aus, der beim Antriebe einer Dynamomaschine künstlich ausgeglichen werden muß; dieses geschieht auf folgende Weise:

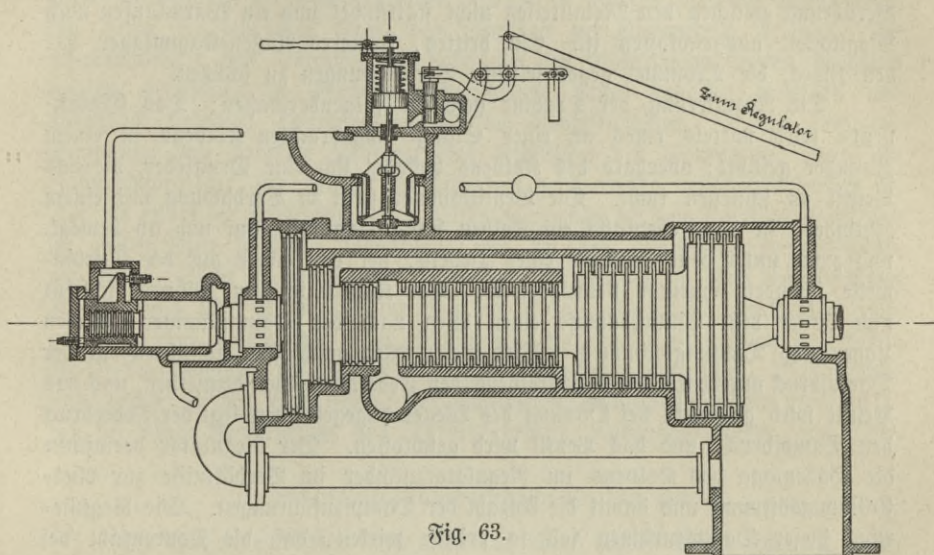


Fig. 63.

Die Laufradtrommel erhält auf der dem ersten Leit- und Laufrade gegenüberliegenden Seite der Dampfeinströmungskammer eine Anzahl von Kämme, die in entsprechende, an der Innenwand des Zylinders angebrachte Aussparungen passen. Diese Kämme werden durch Röhre mit den verschiedenen Expansionsstufen des Dampfes verbunden, so daß auf den Kämme überall der gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Druck lastet wie auf den Laufrädern. Da indessen bei Anwendung einer Kondensation hierbei eine Druckdifferenz zwischen der Außenluft und den vom Vakuum beeinflussten letzten Kämme entstehen würde, die das Einströmen der Luft in die Zwischenräume dieser Kämme und ihrer Aussparungen herbeiführen könnte, so wird jenseits des letzten Kammes eine zweite Dampfkammer eingerichtet und dieser Dampf von einer dem Atmosphärendrucke entsprechenden Spannung zugeführt; die Füllung dieser Kammer wird durch den Reguliermechanismus der Turbine selbsttätig bewirkt.

Die Druckausgleichskämme führen gleichzeitig eine vorzügliche Abdichtung herbei, indem die mit Ausströmungstendenz behafteten Dampfteilchen infolge der Zentrifugalkraft zwischen den rotierenden Kämme und ihren Aussparungen

in der Zylinderwand festgehalten werden und so ein Dampfkeil bilden, welches das Ausströmen des Dampfes durch die Ausparungen verhindert (Labyrinth-Dichtung).

Die Trommelachse wird zweiseitig gelagert, und zwar in folgender Weise: Die Welle wird mit geringem Zwischenraume von einem freischwebenden Zylinder umgeben, der seinerseits in gleicher Weise von einem zweiten Zylinder umschlossen ist; in die Zwischenräume zwischen Welle, Zylinder und Lagerschalen wird Öl unter einem Drucke von $2\frac{1}{2}$ Atm. eingeführt, so daß eine direkte Berührung zwischen den Metallteilen nicht stattfindet und ein Warmlaufen nach Möglichkeit ausgeschlossen ist. Ein drittes, kleineres Außen-Kamm lager hat den Zweck, die Trommel gegen seitliche Verschiebungen zu schützen.

Die Regulierung der Turbine geschieht folgendermaßen: Das Einlassventil wird mittels eines an einer Stange angebrachten Kolbens in einem Zylinder geführt; oberhalb des Kolbens befindet sich eine Druckfeder, die das Ventil zu schließen sucht. Die Ventilkammer steht in Verbindung mit einem Zylinder, in dem ebenfalls ein Kolben sich zwangsläufig auf und ab bewegt, und zwar unter dem Einflusse eines Hebels, der von einem auf der Turbinewelle sitzenden Exzenter betätigt wird. Der Kolben in dem Zylinder schließt und öffnet dem Einlassdampfe einen Weg nach der Dampfkanne zwischen Lager und Dichtungskämmen. Wird dieser Weg geschlossen, so überwiegt der Dampfdruck unterhalb des Ventilkolbens den Federdruck über demselben, und das Ventil wird geöffnet; bei Öffnung des Weges dagegen überwiegt der Federdruck den Dampfdruck, und das Ventil wird geschlossen. Der Regulator beeinflusst die Höhenlage des Kolbens im Regulatorzylinder im Verhältnisse zur Ausströmungsöffnung und damit die Anzahl der Dampfzuführungen. Die Regulierung dieser Dampfturbinen soll so präzise wirken, daß die Tourenzahl bei plötzlicher völliger Entlastung von der Maximalbelastung aus nur um ca. $1\frac{1}{2}$ % der vorhergehenden Tourenzahl schwankt und diese Tourenänderung bereits nach etwa 3 Sekunden wieder ausgeglichen wird.

Die Turbine wird in Größen von 100 PS an bis zu solchen von mehreren tausend Pferdekraften Leistung gebaut und arbeitet sehr günstig. Der Dampfverbrauch entspricht demjenigen von Dreifachexpansionsmaschinen gleicher Leistung, die unter den nämlichen Verhältnissen arbeiten; er wird um so günstiger, je höher die Dampfspannung gewählt wird. Eine reichliche Überhitzung des Dampfes dürfte gerade bei dieser Turbine sehr zweckmäßig sein, weil durch eine solche die bei Verwendung von gesättigtem oder gar nassem Dampfe immerhin denkbare Abnutzung der Schaufeln, die zu Dampfverlusten Veranlassung geben würde, ausgeschlossen oder wenigstens auf das geringste mögliche Maß reduziert wird. Auch der Ölverbrauch ist bei dieser Turbine sehr gering; er beträgt nur etwa $\frac{1}{30}$ — $\frac{1}{10}$ desjenigen von Dampfmaschinen entsprechender Leistung. Im übrigen treffen die bei der Turbine von de Laval erwähnten Vorzüge, wie geringer Raumbedarf, kleine Fundamente und geringe Bedienungskosten sowohl auf diese Maschine als auch auf die anderen eingangs erwähnten Turbinenkonstruktionen zu.

e) Rotierende Dampfmaschinen.

Eine Erscheinung neuesten Datums auf dem Gebiete des Dampfmaschinenbaues bilden die rotierenden Dampfmaschinen. In diesen Maschinen wird zwar ähnlich wie in den Dampfturbinen die Energie des Dampfes zur direkten Erzeugung einer Rotationsbewegung benutzt; sie unterscheiden sich indessen von den Dampfturbinen prinzipiell dadurch, daß in ihnen die Rotationsbewegung lediglich durch Ausnutzung des Expansionsbestrebens des Dampfes herbeigeführt wird, während in den Dampfturbinen bekanntlich in erster Linie die Geschwindigkeit bzw. die lebendige Kraft des Dampfes zur Ausnutzung gelangt. Die Wirkungsweise des Dampfes ist daher in den Rotationsmaschinen durchaus analog derjenigen in Pendeldampfmaschinen; daher arbeiten dieselben mit wesentlich kleineren Tourenzahlen als die Dampfturbinen, so daß auch bei Maschinen von kleinerer Leistung eine Reduktion der Tourenzahl durch ein Zahnradvorgelege, wie bei der Turbine von de Lavale, nicht erforderlich ist. Für die Wahl der Dampfspannung gelten demgemäß bei den Rotationsmaschinen im wesentlichen dieselben Grundsätze wie bei den Einzylinder-Pendeldampfmaschinen. Steht hochgespannter Dampf zur Verfügung, so kann derselbe durch Vorschaltung einer Dampfturbine vor der Rotationsmaschine zweckmäßig ausgenutzt werden, wie dieses in der kombinierten Rotationsmaschine von Patzschke-Wilhelmi geschieht, die an zweiter Stelle besprochen werden wird. Wir wenden uns zuerst zu der Besprechung der einfacheren Rotationsmaschine von Hult, der bei seiner Konstruktion das Turbinenprinzip vollständig außer acht läßt.

a) Rotationsdampfmaschine von Hult.

Die Maschine besteht aus einer auf einer hohlen Welle sitzenden zylindrischen Walze F, welche von einem Hohlzylinder C exzentrisch derart umgeben ist, daß die Peripherie der Walze die Zylinderwandung an einer Stelle tangiert. Achse und Zylinder sind in je zwei Rollenlagern B und E separat gelagert. Die Walze besitzt eine, bei den neuesten Ausführungen drei in Rippen eingelassene Klappen, welche durch die Zentrifugalkraft gegen die Wandungen des Zylinders gepreßt werden. Die Dampfzuführung und -Abführung geschieht durch die Welle, deren Aushöhlung zu diesem Zwecke in der Mitte der Walze durch eine Einlage unterbrochen ist (Fig. 64).

Die Maschine arbeitet folgendermaßen: Sobald die Klappe die Berührungslinie zwischen Walze und Zylinder verlassen hat, wird dem Dampfe vermittelt der Steuerung der Zutritt zu dem Zylinderinnern durch den die Verbindung mit der Achsenaushöhlung herstellenden Kanal H geöffnet; infolgedessen tritt Frischdampf in den von der Walze, dem Zylinder und der Klappe gebildeten Raum, drückt auf die Klappe und bringt das System zur Rotation. Sobald genügend Frischdampf zugeführt ist, wird die Einströmung unterbrochen und nun expandiert der Dampf bis zur Beendigung der ersten Umdrehung. Nach dem zweiten Überschreiten der Tangentiallinie zwischen Walze und Zylinder befindet sich vor der Klappe expandierter Dampf, der ins Freie oder

in den Kondensator strömt, hinter ihr Frischdampf, und nun wiederholt sich das Spiel. — Infolge der Friktion zwischen Walze und Zylinder rotiert der letztere ebenfalls und zwar mit gleicher Geschwindigkeit wie die Walze; dadurch wird die Reibung zwischen den beiden Körpern auf ungefähr den achten Teil desjenigen Betrages reduziert, der bei feststehendem Zylinder entstehen würde. Durch Ausbildung der vier Lager als Rollenlager wird eine weitere Verminderung der Reibungsarbeit herbeigeführt.

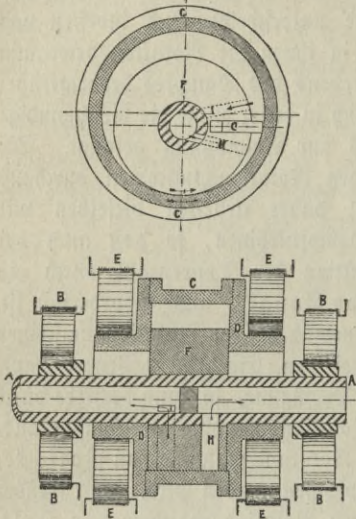


Fig. 64.

Die Zulassung des Dampfes erfolgt durch einen aus zwei Hülfen bestehenden, in der Hohlwelle befindlichen Dampfverteilungsapparat, der in der nebenstehenden schematischen Zeichnung nicht enthalten ist. Die Dampfzuführungshülse ist fest und am Maschinenstative angebracht, während die diese Hülse konzentrisch umschließende Futterhülse mit der Welle rotiert. Die Verteilungshülse hat eine Öffnung, welche durch drei in der Futterhülse in geeigneter Weise angebrachte Öffnungen in gewissen

Momenten mit dem Zylinderinnern korrespondiert und alsdann die Dampfeinströmung gestattet. Der Dampfaustritt ins Freie oder in den Kondensator geschieht durch zweckentsprechende Öffnungen in den Zylinderdeckeln, die in bestimmten Intervallen mit den in der Walze befindlichen Auspuffkanälen von geeigneter Form korrespondieren. Die Regulierung erfolgt durch einen Achsenregulator, dessen Ausschlag drehend auf das Regulatorventil wirkt; dadurch wird der Dampfzutritt früher bzw. später geschlossen. — Die Maschinen werden für Betrieb sowohl mit gesättigtem als auch mit überhitztem Dampfe geliefert. Eine Maschine von

3 PSe Leistung wiegt zirka	80 kg	und macht	1500 Touren	p. Min.
40—50 " " " "	1050 " " "	750 " " "		
100 " " " "	2600 " " "	525 " " "		

Aus diesen Angaben ersieht man, daß die Maschinen ein im Verhältnisse zu ihrer Leistung außerordentlich geringes Gewicht besitzen und daß sie sich bezüglich ihrer Tourenzahlen den normalen Dynamomaschinen gut anpassen. Als weitere Vorteile der Maschinen werden hervorgehoben der geringe Dampfverbrauch, die Einfachheit der Konstruktion, geringer Raumbedarf, sparsamer Ölverbrauch, präzise Regulierung und guter Wirkungsgrad.

β) Rotationsdampfmaschine von Patzschke.

Die Maschine besteht aus zwei krafterzeugenden Teilen, die mit der Achse fest verbunden sind, nämlich einem turbinenähnlichen Rotationskörper a, dem der

hochgespannte Dampf mittels Düsen zugeführt wird, und einer Kraftkurbel d , die in einem besonderen Zylinder, dem Expansionszylinder, durch den Druck des von der Turbine kommenden Dampfes in Rotation versetzt wird (Fig. 65). Der ganze Mechanismus befindet sich in einem allseitig geschlossenen, gegen Wärmeverluste vorzüglich isolierten Zylinder. Das Turbinenrad besteht aus einem gußeisernen Rotationskörper, der an seiner Peripherie mit muldenförmigen Schaufeln zur Aufnahme des Dampfdruckes versehen ist. In diesem Rade befindet sich ferner ein Achsenregulator b , dessen Fliehkörper Zahnstangenansätze haben, vermittelt deren sie ein Zahnrad in Drehung versetzen können, das ein rotierendes Admissionsventil e zum Expansionszylinder betätigt. Der ganze Reguliermechanismus und die Steuerung liegen daher zwischen Turbine und Expansionszylinder.

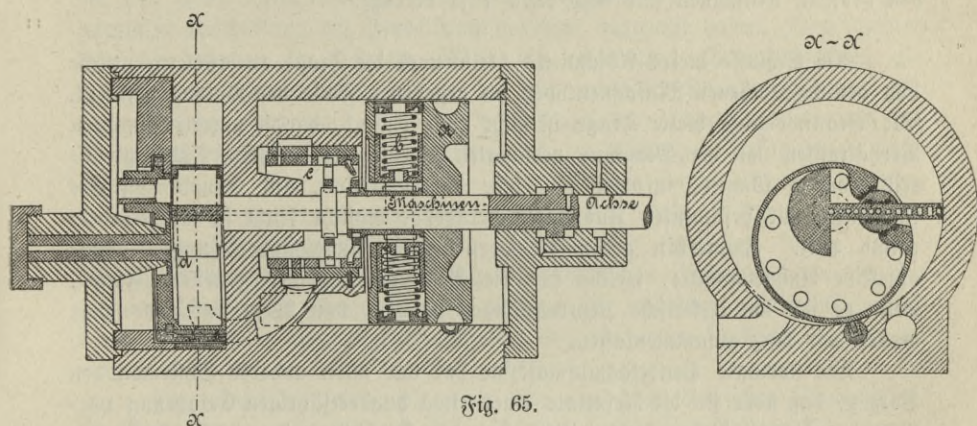


Fig. 65.

Die zu beiden Seiten der Turbine gelagerte Achse trägt an ihrem Ende die Kraftkurbel, deren Drehachse mit der Mittellinie des Expansionszylinders zusammenfällt und deren Länge gleich ist dem Radius dieses Zylinders. In dem Expansionszylinder befindet sich exzentrisch gelagert ein zweiter Zylinder, der Kraftverteiler, der von einem exzentrisch angeordneten, sich drehenden Bolzen infolge der Bewegung der Kurbel in gleichgerichtete Rotation versetzt wird; die Kurbel geht durch einen gabelförmigen Ausschnitt des Bolzens hindurch und gleitet an den Backen desselben bei der Drehbewegung. Der Dampf tritt in den sichelförmigen Raum des Expansionszylinders, der von dem Mantel des Kraftverteilers und des äußeren Zylinders gebildet wird, und wirkt hier in ähnlicher Weise, wie wir es bei der Hultschens Maschine gesehen haben. Bei niedrigen Dampfspannungen kommt die Turbine gewöhnlich in Wegfall. Die Maschine soll sich gleich gut eignen zum Betriebe mit nassem, gesättigtem und überhitztem Dampfe von allen Spannungen und sehr sparsam arbeiten; ihre Steuerung läßt eine Veränderung der Füllung von 0—80%, gegebenenfalls sogar bis 100% zu. Die Reibung ist auf ein sehr geringes Maß reduziert, der Wirkungsgrad beträgt 90—95%. Die Tourenzahl kann

in weiten Grenzen verändert werden; anderseits ist die Tourenschwankung bei Belastungsänderungen infolge der präzisen Regulierung sehr gering. Auch der Füllungsgrad kann von Hand verändert werden, so daß sich die Maschine für den Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen eignet. Der Überverbrauch ist, wie bei allen rotierenden Dampfmaschinen, unbedeutend, der Dampfverbrauch soll demjenigen erstklassiger Mehrfachexpansionsmaschinen entsprechen. Die Maschinen werden in Größen von zirka 10 PS Leistung an bis zu solchen von 6000 PS Leistung hergestellt. Die niedrigste Tourenzahl beträgt bei allen Modellen von der kleinsten bis zu der größten Leistung 350 pro Minute; dieselbe kann bei sämtlichen Maschinen unter gleichzeitiger Erhöhung der Leistung gesteigert werden, und zwar beträgt die Steigerungsfähigkeit bei den kleineren Maschinen etwa 100%, während sie mit den größeren Modellen sinkt und bei den größten Maschinen nur noch etwa 7% beträgt.

Am Schlusse dieses Abschnittes bleibt noch die Frage zu erörtern, welche von den besprochenen Maschinentypen im gegebenen Falle den Vorzug verdient. Die Beantwortung dieser Frage ist nicht ganz einfach, da die unter bestimmten Verhältnissen von der Maschine verlangten Eigenschaften mehrere Typen gleichzeitig haben können, infolgedessen hier die subjektive, auf Grund von Erfahrungen mit bestimmten Fabrikaten beruhende Ansicht leicht in den Vordergrund tritt. Immerhin geben die vorstehenden Auseinandersetzungen einige objektive Anhaltspunkte, welche für die Beantwortung der gestellten Frage, wenn es sich um elektrische Zentralanlagen handelt, von Wert sind, und diese wollen wir kurz zusammenfassen.

Die normale Pendeldampfmaschine hat vor allen anderen Systemen den Vorzug, daß über sie die Resultate einer etwa hundertjährigen Erfahrung vorliegen; während dieser langen Zeit hat die Maschine eine solche Höhe der Vollkommenheit erreicht, daß nach Ansicht vieler Autoritäten wesentliche Verbesserungen an ihr nicht mehr denkbar sind. Es handelt sich daher bei der Pendeldampfmaschine um einen Apparat, über dessen Arbeitsweise unter den verschiedensten Betriebsverhältnissen, Anlage-, Unterhaltungs- und Betriebskosten keine Zweifel bestehen. Die mit der Maschine gemachten Erfahrungen gewähren daher sowohl für die Projektierung absolut zuverlässige Grundlagen, als auch für die Ausführung und den Betrieb das Gefühl einer fast unbedingten Sicherheit. Anderseits bedingt die Pendeldampfmaschine wegen des größeren Raumbedarfes, der größeren Fundamente, des höheren Überverbrauches — die Differenzen in dem Dampfverbrauche sind, besonders bei Anwendung von überhitztem Dampfe, kaum von ausschlaggebender Bedeutung — und der vermehrten Bedienung unter Umständen wesentlich größere Anlage- und Betriebskosten, wie die Dampfturbinen oder rotierenden Dampfmaschinen. Die Pendeldampfmaschine wird daher stets in erster Linie in Betracht kommen, wenn die Rücksicht auf die unbedingte Betriebsicherheit diejenige auf die vorerwähnten Mehrkosten überwiegt. Dieses trifft insbesondere gewöhnlich zu auf die zuerst aufzustellenden Betriebsmaschinen elektrischer Zentralanlagen für

Stromlieferung an Gemeinwesen, da bei solchen Unternehmungen eine Unterbrechung oder Störung des Betriebes unter allen Umständen ausgeschlossen sein muß.

Die Dampfturbinen und rotierenden Dampfmaschinen sind, wie bereits erwähnt, Produkte des letzten Jahrzehntes, und wenn auch bei ihrer Herstellung alle mit der normalen Dampfmaschine im Laufe der Zeit gemachten Erfahrungen berücksichtigt und verwertet worden sind — hiervon legen die guten mit diesen neuen Typen erzielten Betriebsergebnisse Zeugnis ab —, so genügt die kurze Zeit der Erfahrung mit denselben doch kaum, um sie bezüglich der Betriebssicherheit der normalen Dampfmaschine als vollkommen gleichwertig an die Seite zu stellen. Es kommt hinzu, daß besonders die Dampfturbinen mit sehr hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten arbeiten, die zur Erhöhung der Betriebssicherheit zweifellos nicht beitragen, abgesehen davon, daß sie anormale Modelle der von ihnen anzutreibenden elektrischen Maschinen bedingen, die sich in ihrer normalen Entwicklung der Pendeldampfmaschine angepaßt haben. Dem letzteren Umstande werden in höherem Maße die rotierenden Dampfmaschinen gerecht, deren Tourenzahlen sich in den für normale Dynamomaschinen gültigen Grenzen bewegen. Endlich ist bezüglich der Dampfturbinen und der Rotationsdampfmaschinen zu bemerken, daß die seitherigen Erfahrungen nicht ausreichen, um über ihre Ökonomie beim Arbeiten unter den verschiedensten Belastungsverhältnissen, ferner über ihre Abnutzung und die damit zusammenhängenden Instandhaltungskosten ein abschließendes Urteil zu fällen. Diese Maschinen werden daher zweckmäßig bei elektrischen Zentralanlagen für den weiteren Ausbau in Frage kommen, nachdem für unbedingte Betriebssicherheit durch Anwendung von Pendeldampfmaschinen im ersten Ausbaue Sorge getragen ist.

Zum Schlusse geben wir noch eine von dem bergischen Dampfkessel-Revisionsverein veröffentlichte Tabelle über den erfahrungsmäßigen Ölverbrauch von Pendeldampfmaschinen:

System	Leistung in PS effektiv	Verbrauch in Pfennigen an		
		Zylinderöl	Maschinenöl	zusammen pro effektive PS-Stunde
Einzylindrig	7—20	0,177	0,116	0,293
„	21—40	0,150	0,125	0,275
„	41—70	0,100	0,094	0,194
„	71—120	0,074	0,097	0,171
Verbund	35—80	0,068	0,078	0,146
„	100—200	0,040	0,051	0,091
„	250—500	0,048	0,065	0,113
Dreifache Expansions- Maschine } .	400—1500	0,055	0,040	0,095
Lokomobile	25—70	0,226	0,244	0,470

B. Die Explosionsmotoren.

1. Die Viertaktmotoren.

Die Wirkung der Explosionsmotoren (Gasmotoren, Benzin-, Petroleum- und Spiritusmotoren) beruht, wie bereits erwähnt, darauf, daß ein mehr oder weniger hoch vorkomprimiertes Gemenge aus Gas und Luft in dem Arbeitszylinder der Maschine zur Verbrennung gelangt, und daß die infolge der Explosion auftretende Steigerung des Druckes zur Bewegung des Kolbens und damit in bekamter Weise zur Arbeitsleistung ausgenutzt wird. Wenn flüssiger Brennstoff — Benzin, Petroleum, Naphtha oder dergl. — zum Betriebe verwendet wird, so muß derselbe, wie wir später sehen werden, vorher in gasförmigen Zustand übergeführt werden.

Der offene Viertaktmotor, die einfachste Form der Explosionsmotoren, besitzt einen einseitig offenen Arbeitszylinder, der an dem anderen Ende mit einem die Steuerungsteile enthaltenden Verschlusskasten, dem Zylinderkopfe versehen ist. Der hohle Tauchkolben von beträchtlicher Länge ist mit Dichtungsringen ausgestattet und überträgt seine Bewegung gewöhnlich durch eine direkt an der Maschinenachse angreifende Kolbenstange auf die erstere. Bezüglich der Wirkung des Motors sind vier Arbeitstakte zu unterscheiden, die sich auf zwei volle Kurbelumdrehungen folgendermaßen verteilen:

- | | |
|---------------------|--|
| Erster Kolbenschub: | Ansaugen des Gas- und Luftgemenges. |
| Zweiter " | Kompression des angesaugten Gemenges. |
| Dritter " | Zündung und Explosion des Gemenges, sowie Expansion des verbrannten Gases. |
| Vierter " | Ausstoßen der Verbrennungsrückstände. |

Beim offenen, einfach wirkenden, einzylindrigen Viertaktmotor entfällt somit eine Arbeit leistende Explosion auf vier Kolbenschübe oder zwei volle Kurbeldrehungen. Die Folge davon ist eine sehr geringe Gleichförmigkeit des Ganges, die die Anwendung großer Schwungmassen für den Fall erforderlich macht, daß die Gasmotoren zum Antriebe von Dynamomaschinen dienen. Diese Schwungmassen, die an Größe die bei Dampfmaschinen erforderlichen weit übersteigen, bedingen ihrerseits die Anwendung wesentlich stärkerer Achsen und größerer Lager, außerdem führen sie eine beträchtliche Erhöhung der Reibungsarbeit herbei. Infolgedessen wird durch sie nicht allein die Herstellung der Maschine verteuert, sondern auch der mechanische Wirkungsgrad verkleinert; der letztere dürfte 70% kaum übersteigen¹⁾. Nichtsdestoweniger kommt diese Ausführungsform sehr oft, manchmal auch für Maschinen von großer Leistung — es existieren solche bis zu 1000 PS^e — zur Anwendung, da sie vor anderen Konstruktionen mancherlei Vorzüge besitzt.

¹⁾ Trotz des verhältnismäßig geringen mechanischen Wirkungsgrades gestatten die Explosionsmotoren beispielsweise beim Betrieb mit Sauggas eine wesentlich bessere Ausnutzung der in der Kohle enthaltenen Energie, als sie bei Dampfkraftanlagen möglich ist.

Als solche sind vor allem die Übersichtlichkeit und leichte Zugänglichkeit des offenen Arbeitszylinders und hohlen Tauchkolbens hervorzuheben, die eine ständige Kontrolle dieser beiden am ungünstigsten beanspruchten Teile der Maschine — besonders hinsichtlich ihres Dichtungszustandes — auch während des Betriebes gestatten und gegebenenfalls einen leichten und bequemen Ausbau des Kolbens ermöglichen. Ferner ist die Abkühlung des Kolbens bei diesen Maschinen eine vorzügliche, da sein Inneres mit der Außenluft fortwährend in Berührung steht. Dieser Umstand ist von um so größerer Bedeutung für einen sicheren Betrieb und die Haltbarkeit der Maschine, als durch die Verbrennung des Gasgemenges naturgemäß sehr hohe Temperaturen erzeugt werden, denen das Material ohne ausgiebige natürliche oder künstliche Kühlung nicht standzuhalten vermag. Die Zylinderwandungen erhalten deshalb Wasserkühlung, zu welchem Zwecke sie mit einem Kühlmantel umgeben werden; auch muß bei den später zu besprechenden Gasmotoren mit geschlossenen Arbeitszylindern dem Kolben Kühlwasser zugeführt werden, was eine wesentliche Komplikation in der Anordnung bedingt, beim offenen Viertaktmotor indessen nicht erforderlich ist. Zu erwähnen ist ferner als Vorzug des offenen Viertaktmotors der ruhige Gang des Gestänges, der auf den Umstand zurückzuführen ist, daß der auf dem Gestänge lastende Arbeitsdruck vorwiegend in derselben Richtung wirkt und nicht, wie es z. B. bei der Dampfmaschine zutrifft, bei jedem Kolbenschube die Richtung wechselt.

Der Nachteil der geringen Gleichförmigkeit des Ganges bei dem einzylindrigen offenen Viertaktmotor hat zu einer Vermehrung der Arbeitszylinder mit alternierenden Arbeitstakten geführt. So entstanden Zweizylindermotoren mit nebeneinander angeordneten und einander gegenüberliegenden Zylindern sowie zwei um 180° gegeneinander versetzten Kurbeln; bei diesen Maschinen erfolgt auf je eine volle Kurbeldrehung ein Explosionsstoß und die Gleichförmigkeit des Ganges wurde besser. Um den Ungleichförmigkeitsgrad weiter zu reduzieren, baute man ferner Vierzylindermotoren mit zwei einander gegenüberliegenden Zylinderpaaren, bei denen schon nach jeder halben Kurbeldrehung ein Explosionsstoß stattfindet. Auf diese Weise konnte die Gleichförmigkeit des Ganges zwar wesentlich verbessert und eine beträchtliche Reduktion der erforderlichen Schwungmassen herbeigeführt werden, andererseits aber gingen dabei die Hauptvorteile des einzylindrigen Motors, nämlich seine Einfachheit, Übersichtlichkeit und leichte Zugänglichkeit verloren, insofern die Ausführung von Gasmotoren mit mehr als zwei Arbeitszylindern vereinzelt geblieben ist.

Außer der Rücksicht auf die Verbesserung der Gleichförmigkeit war indessen noch ein zweiter Punkt für die Vermehrung der Arbeitszylinder maßgebend. Die einseitige und intermittierende Wirkung des Energieträgers nämlich bedingt im Verhältnisse zu der Leistung des Motors sehr große Abmessungen sowohl der Übertragungsteile zwischen Kolben und Achse, die bei zweiseitiger Beaufschlagung des Kolbens ohne weiteres die doppelte Leistung würden übertragen können, als auch ganz besonders des Zylinders, denen natürlich die

Zylinderköpfe, welche den Explosionsstößen direkt ausgesetzt sind, entsprechen müssen. Nun ist nicht nur die Form der letzteren, die als Verschlußdeckel oder Kammern mit der Zylinderwandung verschraubt werden, für die Beanspruchung durch hohe Drücke an sich sehr ungünstig, sondern es werden auch ihre Wandungen, die im Interesse einer ausgiebigen Kühlung ohnehin nicht allzu stark gewählt werden dürfen, noch durch die Ein- und Auslaßöffnungen für das Gasgemenge und seine Rückstände geschwächt. Infolgedessen ist die Widerstandsfähigkeit der Zylinderköpfe gegen die Explosionsdrücke um so kleiner, je größere Dimensionen sie erhalten. Hierin liegt ein wesentliches Moment für die Begrenzung der Leistung des offenen, einzylindrigen Viertaktmotors; mit Rücksicht darauf geht man neuerdings im Interesse der Betriebssicherheit nicht über eine Leistung von 250—300 PS hinaus und bevorzugt für größere Leistungen entweder die Anordnung zweier offenen Zylinder, oder man geht bei noch größeren Leistungen zu anderen Motorsystemen über, die bei vermehrten Explosionen geringere Zylinderabmessungen gestatten.

Hier ist nun zuerst der doppeltwirkende Viertaktmotor mit geschlossenem Arbeitszylinder zu erwähnen, dessen Zylinder gleichsam eine Vereinigung zweier offenen Viertaktzylinder darstellt, die an ihren offenen Enden miteinander verschraubt sind. Der Arbeitszylinder dieses Motors besitzt daher an jeder der beiden Stirnseiten einen Kopf mit je einer Einlaß- und Auslaßvorrichtung; die Stange des Kolbens geht durch den einen Zylinderkopf unter Anwendung einer Stopfbüchse hindurch, indem sie vermittelt Gradführung und Pleuelstange die Kraft auf die Kurbel überträgt. Bei dieser Anordnung arbeiten beide Zylinderseiten im Viertakte, so daß auf jede einfache Kurbeldrehung ein Explosionsstoß entfällt. Es hat deshalb ein solcher Motor bei gleichen Abmessungen des Arbeitszylinders und der Übertragungsteile nicht nur ungefähr die doppelte Leistung wie ein offener Viertaktmotor, sondern auch eine wesentlich bessere Gleichförmigkeit des Ganges. Dagegen ist dieser Motor in seiner Anordnung komplizierter, viel weniger übersichtlich und zugänglich und deshalb wohl kaum so betriebssicher wie der offene, einfachwirkende Viertaktmotor, weil jener die doppelte Anzahl der an sich diffizilen Zylinderköpfe und Steuerungsteile besitzt wie dieser, zu denen noch die einseitige Stopfbüchse sowie die Gradführung hinzukommen, die beim offenen Motor ganz fehlen. Ein weiterer Nachteil des geschlossenen Viertaktmotors ist in der geringen Selbstkühlung zu erblicken, die beim offenen Motor, bezüglich des Kolbens wenigstens, in ausgiebigster Weise vorhanden ist. Daher sind beim geschlossenen Motor nicht nur die Wandungen des Arbeitszylinders und seiner Köpfe mit Kühlmänteln und Wasserkühlung zu versehen, sondern es muß, wie bereits angedeutet, auch dem Innern des hohl auszuführenden Kolbens Kühlwasser zugeführt werden. Zu diesem Zwecke wird die Kolbenstange der ganzen Länge nach mit zwei Bohrlöchern versehen, deren eines zur Zuführung des Kühlwassers, das andere zu dessen Ableitung dient.

Die Regulierung geschieht sowohl beim offenen einfachwirkenden wie beim geschlossenen doppeltwirkenden Viertaktmotor entweder durch Veränderung der

mit dem wirksamen Gase zu mischenden Luftmenge, wobei das Volumen des explosiblen Gemenges stets konstant bleibt (Qualitätsregulierung), oder man läßt das Mischungsverhältnis konstant und ändert durch Drosselung das Volumen (Quantitätsregulierung), oder man vereinigt beide Methoden. Die Qualitätsregulierung ist der Quantitätsregulierung als die technisch vollkommener vorzuziehen, zumal bei der ersteren das Aussetzen von Explosionen mit feinen betriebsstörenden Begleiterscheinungen weit seltener vorkommt, als es bei Drosselung des Gemenges der Fall ist.

Die Steuerung geschieht wohl bei kleineren Motoren mit offenen Viertaktzylindern noch durch Schieber, die von einer Steuerwelle aus durch Exzenter direkt betätigt werden; meistens aber, bei größeren einfachwirkenden Viertaktmotoren und bei den geschlossenen doppeltwirkenden stets, wird sowohl für das Einlassen des Gasgemenges in den Zylinder als auch für das Auslassen der Verbrennungsrückstände aus denselben die Ventilsteuerung angewandt. Die Ventile werden durch unrunde Scheiben, schiefe Nocken oder dergl., die auf einer Steuerwelle sitzen, gehoben und durch Federkraft auf ihre Sitze niedergedrückt. Die Steuerschieber und Ventile werden an den Zylinderköpfen angebracht, und zwar die Ein- und Auslassventile gewöhnlich in Gegenüberstellung oben und unten, da sich diese Anordnung mit Rücksicht auf die Beanspruchung der Köpfe als die zweckmäßigste erwiesen hat.

Das Gasgemenge muß bei allen Explosionsmotoren — abgesehen von dem später zu besprechenden Diesel-Motor — nach erfolgter Kompression künstlich zur Entzündung gebracht werden; zu diesem Zwecke bedient man sich in den meisten Fällen des elektrischen Funken. Von anderen Methoden sind die Zündung mittels des elektrischen Glühdrahtes, ferner die Flammzündung und endlich die Glührohrzündung zu erwähnen.

Führt man der Maschine das Gas- und Luftgemenge in der vorgeschriebenen Zusammensetzung vermittelt einer Gas- und Luftpumpe unter Druck zu, so kann man die Anordnung so treffen, daß bei dem einen Kolbenschube die Einströmung und Kompression des Gemenges, bei dem nächsten die Explosion der Ladung und die Ausströmung der Verbrennungsrückstände stattfindet; ein solcher Motor arbeitet also im Zweitakte. Für die Zweitaktmotoren gibt es z. B. zwei Ausführungsformen, nämlich die Gaskraftmaschine von Öchelhäuser und diejenige von Gebr. Körting; diese sollen nachstehend beschrieben werden.

2. Der Zweitaktmotor von Öchelhäuser.

In dem geraden, an beiden Stirnseiten offenen Arbeitszylinder bewegen sich zwei Kolben von gleicher Länge in einander entgegengesetzten Richtungen und wirken auf eine dreifach gekröpfte Achse, deren mittlere Kurbel gegen die beiden äußeren um 180° versetzt ist. Die Stange des der Achse zunächst liegenden Kolbens treibt die Mittelkurbel direkt an, während die Stange des anderen Kolbens auf die beiden Außenkurbeln vermittelt zweier Pleuelstangen wirkt, die miteinander durch eine Traverse verbunden sind, wobei die Kolben-

stange im Mittelpunkt dieser Traverse angreift. Der Zylinder von etwa der vierfachen Länge eines Kolbens besitzt in seiner Wandung drei Schützkränze (Fig. 66), die sich auf seine Länge so verteilen, daß zwei derselben, mit kleineren Öffnungen versehene, in dem der Traverse zunächst liegenden ersten Viertel dicht nebeneinander, der dritte, mit größeren Öffnungen ausgestattete, im dritten Viertel der Zylinderlänge derart angeordnet sind, daß die inneren Kanten der Kolben, wenn sie sich in ihren äußeren Totpunktstellungen befinden, die drei Schützreihen gerade frei lassen. Zu dem Motor gehört noch eine kombinierte Gas- und Luftpumpe, die ihm das Gemenge in dem erforderlichen Mischungsverhältnisse liefert.

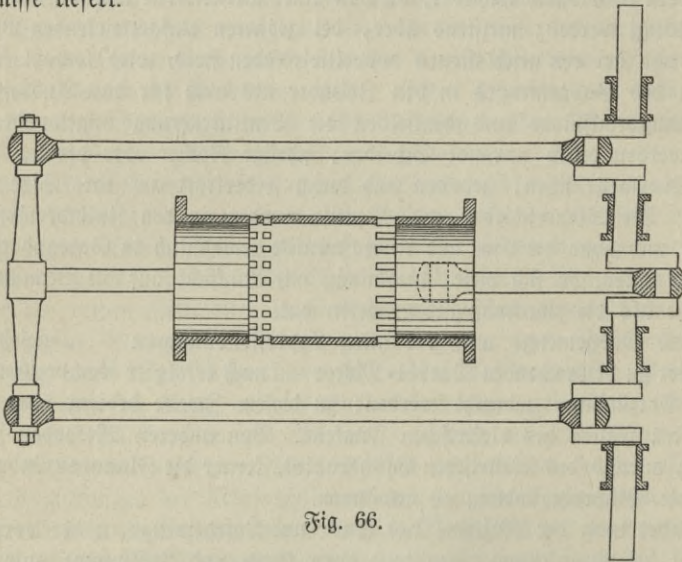


Fig. 66.

Die Maschine arbeitet folgendermaßen: Wenn sich die Kolben in ihrer inneren Totpunktstellung befinden, so wird das zwischen ihnen stehende, hoch komprimierte Gasgemenge entzündet, und die Kolben werden durch die Explosion auseinandergetrieben. Hierbei öffnet sich zuerst der der Achse zunächstliegende, mit großen Schlitzen versehene Kranz, durch den die verbrannten Rückstände ausströmen. Einen Augenblick später wird von dem anderen Kolben der mittlere Schützkranz geöffnet und durch diesen komprimierte Luft in den Zylinder geleitet; die Luft reinigt den Zylinder und kühlt ihn gleichzeitig in ausgiebiger Weise. Einen weiteren Moment später wird auch der der Traverse zunächst liegende Schützkranz geöffnet und durch diesen die frische Gasladung in den Zylinder eingeführt, die sich mit der Luft vermischt. Bei dem nun folgenden Kolbenrückgange schließen sich die Schützkränze in der umgekehrten Reihenfolge, und zwar so schnell, daß von dem zwischen den Kolben stehenden wirksamen Gasgemenge nur wenig oder nichts ins Freie gelangen und verloren gehen kann. Das Gemenge wird von den beiden Kolben während ihres Rückganges auf 8—10 Atm. komprimiert, und nun wiederholt sich das Spiel.

Der Motor zeichnet sich durch große Einfachheit, Übersichtlichkeit und leichte Zugänglichkeit aller Teile aus, da er Zylinderköpfe, Steuerorgane — abgesehen von einem kleinen Gaseinströmungsventile — Stopfbüchsen und Gradführung nicht besitzt. Hervorzuheben ist ferner die sehr günstige Beanspruchung der bewegten Teile der Maschine, da die entgegengesetzt gerichteten Drücke sich gegenseitig aufheben. Ein Hauptvorteil der Maschine liegt ferner in der vorzüglichen Kühlung des Zylinders und der Kolben, die nicht nur durch ihren steten Kontakt mit der atmosphärischen Luft, sondern auch durch die Ausspülung des Zylinderinnern mit frischer, komprimierter Luft nach jeder Explosion herbeigeführt wird. Endlich ist auf den allen Zweitaktmotoren gemeinsamen Vorzug der relativ geringen Zylinderabmessungen und der größeren Gleichförmigkeit des Ganges hinzuweisen, da auf jede volle Kurbeldrehung ein Explosionsstoß entfällt. Selbstverständlich hindert nichts daran, den Motor als Zweizylindermaschine auszuführen und dadurch nicht allein die Leistung, sondern auch die Gleichförmigkeit des Ganges entsprechend zu erhöhen.

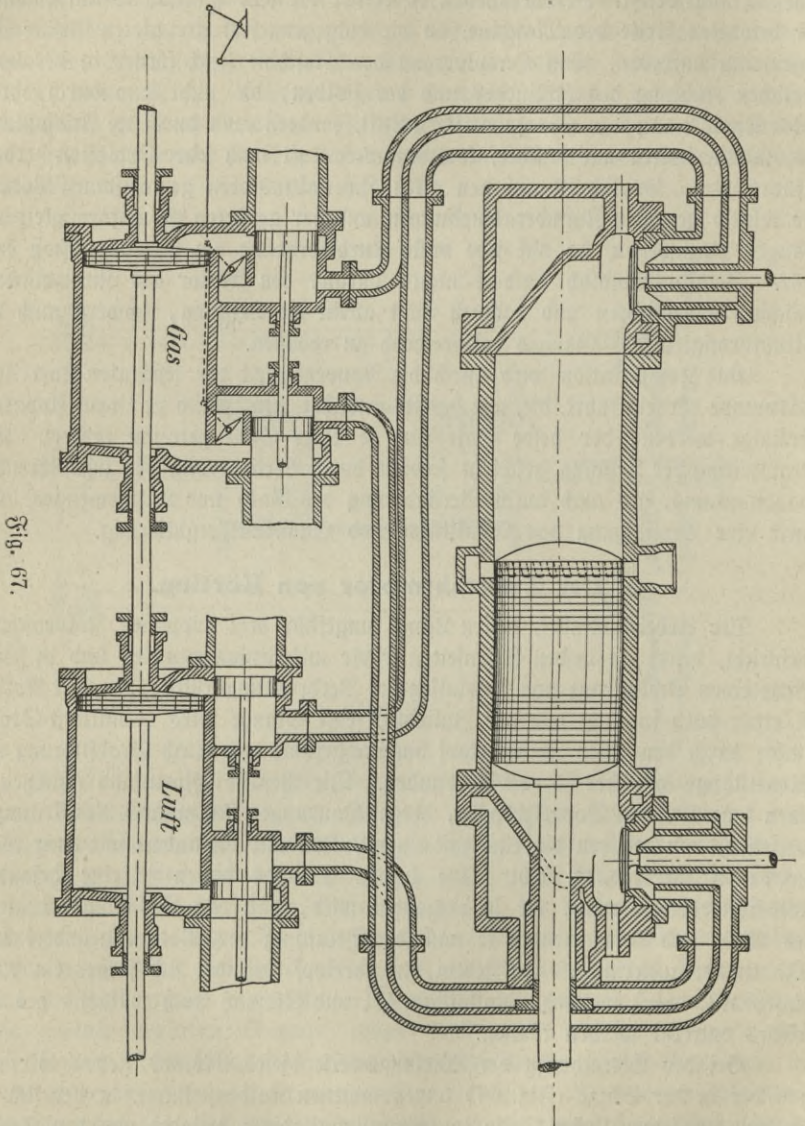
Eine Komplikation wird durch die Notwendigkeit der separaten Luft- und Gaspumpe herbeigeführt, die, wie bereits erwähnt, gewöhnlich zu einem Apparate vereinigt werden, der beide Gase auf je einer Seite getrennt fördert. Die Regulierung der Leistung geschieht sowohl durch Veränderung des zuzuführenden Gasquantums, als auch durch Veränderung des Gas- und Luftgemenges, also durch eine Vereinigung von Qualitäts- und Quantitätsregulierung.

3. Der Zweitaktmotor von Körting.

Der Arbeitszylinder, dessen Länge ungefähr dem doppelten Kolbenschub entspricht, besitzt an beiden Stirnseiten Köpfe mit Einlagventilen und in seiner Mitte einen Schlitzzang zum Auslassen der Verbrennungsrückstände. Der Kolben ist etwa halb so lang wie der Zylinder, seine Stange wird vermittelt Stopfbüchse durch den einen Zylinderkopf hindurchgeführt und durch Gradführung und Pleuellstange mit der Kurbel verbunden. Die Ventile öffnen und schließen je einen konzentrischen Doppelzylinder, deren Wandungen sich in zwei Rohrleitungen fortsetzen, von welchen die eine mit einer Luftpumpe, die andere mit einer Gaspumpe in Verbindung steht. Die beiden Pumpen haben je eine besondere Kolbenschiebersteuerung, die so eingestellt wird, daß das Mischungsverhältnis des Gas- und Luftgemenges je nach der Belastung des Motors geändert wird (Qualitätsregulierung). An jedem Zylinderkopf befindet sich ferner ein Ausblaseventil, durch welches überflüssiges Öl und Schmutz auch während des Betriebes entfernt werden können.

Bei der Betrachtung der Wirkungsweise dieses Motors gehen wir aus von der in der Skizze (Fig. 67) angenommenen Kolbenstellung, in der sich der Kolben auf seiner linken Seite im Expansionsstadium befindet und den Schlitzzang zu öffnen im Begriffe ist, während rechts vor ihm das frische, im Kompressionsstadium befindliche Gas steht. Sobald die linke Kolbenkante den Schlitzzang öffnet, entweichen durch denselben die Verbrennungsrückstände und gleichzeitig, also bevor noch der Kolben seine rechte Totpunktstellung erreicht,

öffnet sich das linke Einlassventil. Durch dieses strömt zuerst gepresste Luft in den Zylinder und fegt die letzten Rückstände des verbrannten Gasgemenges heraus; einen Moment später strömt dann durch dasselbe Ventil das Gas in



den Zylinder und vermischt sich mit der Luft in dem erforderlichen Verhältnisse. Unterdessen hat der Kolben seine rechte Totpunktstellung überschritten, wobei das vor ihm befindliche komprimierte Gas durch Zündung zur Explosion gebracht wurde, unter deren Druck er sich zurückbewegt. Hierauf schließt er

zuerst den Schlitzzang und gelangt alsdann in seine linke Totpunktstellung, indem er das links vor ihm befindliche Gas auf etwa 10 Atm. komprimiert. Hierauf wiederholt sich der Vorgang.

Von besonderem Interesse sind die beiden Pumpen, welche dem Motor das erforderliche Gas- und Luftgemenge liefern. Dieselben sind Kolbenpumpen und neben oder auch unter dem Motor so angeordnet, daß die Luftpumpe der Maschinenachse zunächst liegt und die Gaspumpe sich jenseits der Luftpumpe befindet. Die beiden Pumpen haben eine gemeinschaftliche Achse, welche die Kolben trägt und von einer auf der Motorachse sitzenden Kurbel angetrieben wird, die der Arbeitskurbel der Maschine um etwa 110° voreilt. Von den gleichliegenden Seiten der beiden Pumpenzylinder geht je eine Rohrleitung zu den beiden Einlaßventilen des Arbeitszylinders. Die Regulierung des Mischungsverhältnisses des wirksamen Gas- und Luftgemenges geschieht durch eine Kolbenschiebersteuerung, vermittelt deren jede Seite des Gaspumpenzylinders und des Luftpumpenzylinders sowohl mit der Gasleitung als auch mit der atmosphärischen Luft (Ansaugperiode), ferner mit den zu den Einlaßventilen führenden Druckkanälen (Einströmungsperiode) in Verbindung gesetzt wird. Gleichzeitig wird dafür gesorgt, daß die von der Luftpumpe gelieferte Luft, wie bereits erwähnt, einige Augenblicke früher durch die Einlaßventile in den Arbeitszylinder gelangt als das Gas und ihn von den Rückständen des verbrannten Gasgemenges reinigt, während nachher das Mischungsverhältnis des Gemenges, auf das die Steuerung eingestellt ist, konstant erhalten wird. Endlich ist noch eine an dem Schieberkasten der Gaspumpensteuerung befindliche, unter dem Einfluß eines Pendelregulators stehende Drosselklappe zu erwähnen, die eine direkte Verbindung des Gaspumpenzylinders mit den zu den Einlaßventilen führenden Gasdruckleitungen auch dann gestattet, wenn der Kolbenschieber die Verbindung dieses Zylinders mit der Gasanaugeleitung hergestellt hat; dadurch wird bewirkt, daß der Zeitpunkt, in dem das Gas zu der in das Einlaßventil strömenden Luft hinzutritt, verändert und so das Mischungsverhältnis variiert werden kann.

Der Motor, welcher in seinem Äußeren manche Ähnlichkeit mit einer Dampfmaschine hat, besitzt die gleichen Vorzüge vor den Viertaktmotoren wie der Schelhäusersche; ein Nachteil gegenüber dem letzteren ist vielleicht in der geringeren Zugänglichkeit des geschlossenen Zylinders und des Kolbens zu erblicken.

Alle Explosionsmotoren müssen künstlich in Gang gesetzt werden. Bei kleineren Maschinen kann dieses von Hand geschehen, indem man das Schwungrad so lange dreht, bis die ersten Zündungen erfolgt sind und der Motor von selbst weiter läuft. Größere Motoren werden gewöhnlich durch Druckluft in Betrieb gesetzt; zu diesem Zwecke wird ein kleiner Kompressor, der häufig elektrisch angetrieben wird, als zum Motor gehörig mitgeliefert. Manchmal geschieht das Ingangsetzen der Maschine auch durch Einführung von vergasstem Benzin in den Arbeitszylinder, welches in demselben zur Entzündung gebracht wird. Am einfachsten gestaltet sich die Inbetriebsetzung, wenn der Gasmotor

eine mit einer Akkumulatorenbatterie parallel geschaltete Dynamomaschine antreibt, da man alsdann mit Hilfe des Batteriestromes die Dynamomaschine als Elektromotor arbeiten lassen kann. Endlich kann man zur Inangabezung des Gasmotors auch einen kleinen Elektromotor verwenden, vorausgesetzt, daß zum Antriebe desselben stets eine Stromquelle vorhanden ist.

Was das Verwendungsgebiet der verschiedenen Gasmotoren, wenn es sich um den Antrieb von Dynamomaschinen handelt, anbelangt, so läßt sich darüber auf Grund der vorstehenden Ausführungen folgendes sagen:

Der einzylindrige offene Viertaktmotor wird wegen seiner Einfachheit und Betriebsicherheit vorteilhaft für Leistungen bis zu etwa 250 PS angewendet, wenn der durch Aufsetzen mäßiger Schwungmassen auf die Achse zu erzielende Ungleichförmigkeitsgrad für den in Frage kommenden elektrischen Betrieb ausreicht. Dies ist stets der Fall, wenn es sich um Gleichstromlichtbetrieb in Verbindung mit einer reichlich großen Akkumulatorenbatterie oder um reinen Motorenbetrieb durch Gleichstrom handelt, bei dem Betriebe von Motoren durch Wechselstrom jedoch nur dann, wenn nur ein von einem Gasmotor angetriebener Generator vorhanden, Parallelbetrieb mehrerer Wechselstromgeneratoren also ausgeschlossen ist.

Der zweizylindrige offene Viertaktmotor kommt für mittlere Leistungen bis etwa 500 PS in Frage, wenn an den Gleichförmigkeitsgrad höhere Anforderungen gestellt werden, wie es beispielsweise beim elektrischen Lichtbetrieb ohne Verwendung von Akkumulatoren zutrifft.

Der doppelt wirkende, geschlossene Viertaktmotor kommt als Einzylindermaschine in den nämlichen Fällen in Betracht, wie der zweizylindrige offene Viertaktmotor. Als Zweizylindermaschine wird er bis zu Leistungen von etwa 1000 PS auch in den Fällen Verwendung finden können, in welchen es sich um Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen handelt.

Die Zweitaktmotoren werden für Leistungen von etwa 500 PS an aufwärts in solchen Fällen in Frage kommen, in denen an die Gleichförmigkeit des Ganges höhere Anforderungen gestellt werden; dieselben werden für Leistungen bis zu mehreren tausend Pferdekraften gebaut.

4. Der Diesel-Motor.

In den vorstehend besprochenen Explosionsmotoren wird das Gasgemenge, wie wir sahen, bis zu einem gewissen Grade komprimiert. Die für die Kompression aufzuwendende Arbeit wird in dem Gemenge in Wärme umgesetzt, so daß seine Temperatur eine entsprechende Steigerung erfährt. Infolgedessen ist die Temperatur des Gemenges, nachdem dasselbe durch künstliche Entzündung zur Explosion gebracht worden ist, höher, als wenn keine vorherige Kompression stattgefunden hätte. Der thermische Wirkungsgrad der Maschine wird daher nach dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie durch die Kompression verbessert. Er wird offenbar um so mehr verbessert, je weiter man die Kompression treibt. In richtiger Erkenntnis dieser Tatsache steigerte Diesel die Kompression so hoch, daß lediglich infolge derselben die Verbrennungs-

temperatur des Gemenges erreicht wurde. Gleichzeitig erzielte er auf diese Weise eine wesentliche Vereinfachung der Maschine, da nimmehr die künstliche Entzündung des Gemenges in Wegfall kam.

Nachdem an einer Reihe von Ausführungsformen, deren Erörterung hier zu weit führen würde¹⁾, im Verlaufe mehrerer Jahre die notwendigen Erfahrungen gesammelt waren, erhielt der Motor folgende Gestalt, in der er eine stets zunehmende Verbreitung findet:

Die Maschine ist ein Viertaktmotor mit einseitig offenem Zylinder, in dem sich der als hohler Tauchkolben ausgebildete, mit Dichtungsringen versehene Arbeitskolben bewegt und mit seiner Stange direkt auf die Kurbelachse wirkt. Der Zylinder ist für sehr hohe Drücke gebaut und mit ausgiebiger Wasserkühlung versehen; er besitzt je ein Ventil für den Einlaß der Luft, die Zufuhr des Brennstoffes, den Auspuff und für das Anlassen des Motors vermittelst Druckluft, die sämtlich zwangsläufig gesteuert werden. Zu der Maschine gehört ferner eine Luftpumpe, die aus dem Arbeitszylinder die dort komprimierte Luft entnimmt, sie auf einen höheren Grad komprimiert, als dem höchsten im Arbeitszylinder vorhandenen Kompressionsdrucke entspricht und sie einem mit der Luftpumpe in Verbindung stehenden Druckluftbehälter zuführt. Diese Druckluft dient zum Anlassen des Motors und zur Einführung des Brennstoffes in den Arbeitszylinder der Maschine, zu welchem Zwecke das Einlaßventil für den Brennstoff mit dem Druckluftbehälter in Verbindung steht.

Der Motor arbeitet ähnlich wie ein offener Viertaktmotor und zwar folgendermaßen:

- | | |
|-------------------|--|
| Erster Kolbenhub: | Einsaugen der atmosphärischen Luft in den Arbeitszylinder. |
| Zweiter " | Kompression der Luft bis zur Entzündungstemperatur. |
| Dritter " | Allmähliche Einführung des Brennstoffes unter dem Einflusse der Luft des Druckluftbehälters, deren Druck größer ist, als der Gegendruck des Arbeitszylinders; Verbrennung des Gemenges; Expansion und Arbeitsleistung. |
| Vierter " | Auspuff. |

Die Maschine wird zur Zeit als Einzylindermotor für Leistungen von 8—125 PS, als Zweizylindermotor für solche von 30—250 PS hergestellt. Als Brennmaterial sind alle gasförmigen und flüssigen Brennstoffe, wie Leuchtgas, Generatorgas, Spiritus, Petroleum, Benzin, Naphtha und die aus diesen hergestellten Solaröle, gegebenenfalls auch feste Kohle in pulverisierter Form zu gebrauchen.

Die Regulierung geschieht in der Weise, daß die Dauer der Zuführung des Brennstoffes dadurch verändert wird, daß die vom Regulator beeinflusste Steuerwelle, welche die unrundern Scheiben bezw. Nocken zur Betätigung der Ventile trägt, je nach der Belastung der Maschine das Brennstoffzufuhrventil unter den Einfluß entsprechend gestalteter Nocken zu stellen gestattet.

¹⁾ Vergl. Z. d. V. d. S., Jahrg. 1897, Nr. 28 u. ff.

5. Betriebsmittel für die Explosionsmotoren.

Zum Betriebe der Explosionsmotoren eignen sich, wie bereits erwähnt, brennbare flüssige und gasförmige Kohlenstoffverbindungen, die vor ihrer Verbrennung mit atmosphärischer Luft vermischt werden. Die flüssigen Brennstoffe, in erster Linie Benzin und Petroleum, werden zuerst in dampfförmigen Zustand versetzt; bei dem leicht sich verflüchtenden Benzin ist dies einfacher und bequemer als beim Petroleum, dessen Dämpfe sich sehr schnell kondensieren. Auch hinterläßt das Benzin bei seiner Verbrennung weniger feste, den Maschinenzylinder verunreinigende Rückstände und nutzt ihn deshalb weniger rasch ab als das Petroleum. Die flüssigen Brennstoffe werden vorwiegend für den Betrieb von Kleinmotoren verwendet, während die gasförmigen für Maschinen von größerer Leistung sich besser eignen.

Zum Betriebe des Benzinmotors wird entweder mit Benzindämpfen gesättigte Luft verwendet, in welchem Falle der Motor einfach durch ein zum Teile mit Benzin gefülltes Gefäß atmosphärische Luft ansaugt, die sich mit den Benzindämpfen vermischt und ein explosibles Gasgemenge bildet; oder das Benzin wird mittelst einer Pumpe dem Luftsaugkanal des Motors in fein zerstäubtem Zustande zugeführt. Das zweite Verfahren ist das technisch vollkommenere, da es eine bessere Regulierung durch Veränderung der Benzinzufuhr (Qualitätsregulierung) bei Belastungsänderungen des Motors gestattet als das erste. Der Benzinverbrauch schwankt je nach der Größe des Motors und seiner Belastung; kleine Motoren verbrauchen etwa 0,5 kg, größere etwa 0,3 kg pro effektive Pferdekraftstunde bei voller Leistung.

Die Verwendung von Petroleum zum Betriebe der Motoren erfordert einen besonderen Verdampfungsapparat; dieser wird erhitzt und der Brennstoff gegen seine Wandungen gespritzt, wobei er verdampft. Da jedoch die Petroleumdämpfe bei Berührung mit kälteren Wänden sich sofort als Flüssigkeit niederschlagen, so ist eine ausgiebige Vorwärmung des Arbeitszylinders erforderlich. Der Verbrauch an Petroleum beträgt je nach der Größe des Motors und seiner Belastung 0,6—0,3 kg pro effektive Pferdekraftstunde.

Von den gasförmigen Brennstoffen kommt das Leuchtgas, ferner das Generatorgas, sowie bei Eisenhüttenwerken das Hochofengas in Betracht. Von diesen Gasarten ist das Leuchtgas wegen seines hohen Heizwertes von zirka 5000 Cal. bei weitem das wertvollste; seine Verwendung für den Betrieb von Motoren empfiehlt sich daher stets, wenn der Gaspreis es gestattet. Die Leistungsfähigkeit eines Gasmotors ist nämlich bei Leuchtgas, dem größeren Heizwerte entsprechend, eine wesentlich größere als bei den übrigen minderwertigen Gasarten, bzw. es genügt beim Betriebe mit Leuchtgas für die gleiche Leistung ein kleineres und deshalb billigeres Maschinenmodell. Außerdem wird bei der Verwendung von Leuchtgas die ganze Kraftanlage außerordentlich einfach und billig, weil nur der Motor beschafft und an die Gasleitung angeschlossen zu werden braucht. Der Betrieb ist ebenfalls sehr einfach und, abgesehen vom Gasverbrauche, mit wenig Unkosten verknüpft, zumal der Motor keiner ständigen

zu benutzen sind; die ersteren kommen hauptsächlich für Anlagen von größerer Leistung und in dem Falle in Betracht, daß an einen Generator mehrere gleichzeitig arbeitende Gasmotoren angeschlossen werden.

Eine Generatorgasanlage besteht im wesentlichen aus drei Teilen: dem Generator, dem Verdampfer und der Reinigungsanlage (Fig. 68).

Der Generator ist ein eiserner Fülllofen, dessen Füllschacht aus feuerfestem Materiale der Brennstoff durch den oben befindlichen Fülltrichter zugeführt wird; Kofst und Aschefasten sind unten angeordnet. Der Fülltrichter und der Aschefall werden während des Betriebes verschlossen und der Boden des Generators gewöhnlich mit Wasser bedeckt. Die Größe des Generators ist so zu bemessen, daß eine Brennstofffüllung für mehrstündigen Betrieb der angeschlossenen Gasmotoren ausreicht. Infolgedessen ist nur ein zeitweiliges Nachfüllen erforderlich, eine ständige Bedienung des Apparates aber

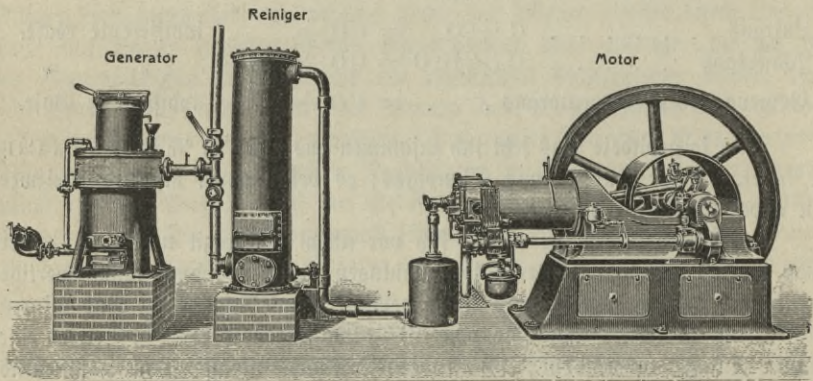


Fig. 68.

nicht notwendig; es kann deshalb die Überwachung des Generators von dem Bedienungspersonal für die Maschinen gewöhnlich mitbesorgt werden. Bei Sauggasanlagen wird der Generator mit einem Ventilator versehen, der bei kleineren Anlagen für Handbetrieb, bei größeren dagegen für mechanischen Antrieb eingerichtet wird; derselbe dient zum Ingangsetzen der Anlage, indem er so lange Luft durch den Generator bläst, bis der Brennstoffinhalt des Füllofens auf die zur Gaserzeugung erforderliche Temperatur erhitzt ist. Nach Schluß des Betriebes wird der Fülllofen verschlossen, alsdann glüht sein Brennstoffinhalt bis zur nächsten Inbetriebsetzung ohne wesentlichen Kofstverbrauch weiter; das Anblasen dauert in diesem Falle etwa $\frac{1}{4}$ Stunde, bis der Generator zu neuem Betriebe bereit ist. Wird dagegen der Generator neu angeheizt, so nehmen die Vorbereitungsarbeiten etwas längere Zeit in Anspruch. Der Anthrazitverbrauch des Generators beträgt pro Pferdekraftstunde vom Gasmotor geleisteter Arbeit etwa 0,5 kg; bei Verwendung von Kofst kann man etwa 0,75 kg für die gleiche Leistung rechnen.

Der Verdampfer wird entweder als ein besonderer Dampfkessel ausgeführt, der durch die Eigenwärme des erzeugten Gases geheizt wird, das vermittelst eines im Innern des Kessels befindlichen Heizrohrsystemes durch ihn hindurchgeleitet wird, oder er wird mit dem Generator konstruktiv verbunden, in welchem Falle er durch die strahlende Wärme der glühenden Füllschicht und des in dem Generator erzeugten Gases geheizt wird. Die Beimengung des Wasserdampfes zu der in den Generator strömenden Luft bewirkt, abgesehen von der bereits erwähnten Erhöhung der Heizkraft des Gases, eine wirksame Kühlung der Koflfläche.

Die Reinigungsanlage besteht aus einem oder mehreren nassen Reinigern (Skrubbern), denen noch trockene Reiniger (Sägemehltreiniger) hinzugefügt werden, wenn die Qualität des erzeugten Gases es erfordert. Zur Ausschcheidung der Wasserreste wird bei ausschließlich nasser Reinigung zwischen dem Skrubber und dem Motor noch ein Wasserabscheider eingeschaltet. Bei Druckgasanlagen wird außerdem zwischen dem Reiniger und dem Motor ein Flügelventilator angeordnet, der das Gas vom Generator absaugt und es dem Motor zuführt. Die Aufstellung eines Gassammlers (Gasmeters) ist bei großen Anlagen zu empfehlen; im übrigen wird ein solcher nur dann erforderlich, wenn das Gas außer zum Betriebe des Motors noch zu anderen Zwecken dienen soll.

Die Verwendung des Hochofengases für den Betrieb von Gasmotoren, besonders solcher von ganz großen Leistungen, hat seit einigen Jahren eine bedeutende Ausdehnung erlangt, so daß heute nur wenige größere Hüttenwerke vorhanden sein dürften, die nicht einen Teil ihrer Betriebskraft auf diese Weise erzeugten, oder wenigstens die Verwendung der Gase für motorische Zwecke ins Auge gefaßt hätten. Die von einem Hochofen gelieferte Gasmenge richtet sich nach seiner Größe und der Art der Beschickung; dieselbe wird bei einem Ofen mittlerer Größe auf ein Arbeitsäquivalent von 5000 Pferdekraften eingeschätzt. Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, daß trotz dieser enormen Gasproduktion ein einziger Hochofen zum konstanten Betriebe von Gasmotoren sich kaum eignet, weil die Zusammensetzung der Gase infolge der wechselnden Beschickung sehr schwankt und die Gaslieferung je nach dem Betriebsstadium des Ofens zeitweise sogar ganz unterbrochen wird; ferner kann es vorkommen, daß der Hochofen außer Betrieb gesetzt werden muß, während gleichzeitig Kraftbedarf vorhanden ist. Bei Benutzung der Gase eines allein stehenden Hochofens zum Betriebe von Gasmotoren müßte man deshalb mindestens einen reichlich großen Gassammler anlegen, um aus demselben den Betrieb in der Zeit, in welcher dem Ofen kein Gas entnommen werden kann, aufrecht zu erhalten und ein einigermaßen konstantes Gemenge zu bekommen; bei Außerbetriebsetzung des Ofens ist natürlich auch in diesem Falle der Kraftbetrieb unmöglich. Der Gassammler nimmt aber nicht nur einen großen Raum in Anspruch, der bei den meisten Hüttenwerken ohnehin sehr beschränkt ist, sondern er verteuert auch die Anlage wesentlich. Sind dagegen mehrere Hochöfen vorhanden, so fallen diese Bedenken weg und die direkte

Verwendung der Gase in Motoren tritt alsdann wegen der weit besseren Ausnutzung ihrer Energie, als die Verfeuerung unter Dampfesseln es gestattet, in den Vordergrund.

Auch die Koksogase eignen sich in hervorragender Weise für den Betrieb von Motoren, weshalb man in den Kreisen der Berg- und Hüttenleute dieser Betriebsart ein stets wachsendes Interesse entgegenbringt. Während indessen die Hochofengase, abgesehen von ihrer Verunreinigung durch Staub, von sonstigen Beimengungen frei sind, ist dies bei den Koks gasen nicht der Fall; infolgedessen müssen die letzteren zuerst von den chemischen Bestandteilen, die sich in den Zylindern der Motoren in fester Gestalt ablagern, befreit werden, da sonst eine rasche Abnutzung der Arbeitszylinder und Betriebsstörungen unvermeidlich sind.

Übrigens liegt auch bei Verwendung des Hochofengases zum Betriebe von Motoren eine möglichst sorgfältige Reinigung desselben von den beigemengten Staubteilchen sowie von seinem Gehalt an Wasserdampf nur im Interesse einer möglichst langen Lebensdauer der Maschinen und eines einwandfreien Betriebes. Die Reinigung des Gases kann nach dem nassen oder dem trockenen Verfahren geschehen; am sichersten geht man, wenn man beide Methoden hintereinander anwendet. Für die nasse Reinigung kommt der normale Skrubber in Frage, ein mit Koks oder gekreuzten Lattenschichten gefüllter Zylinder, dessen Inneres von der einen Seite reichliche Wasserberieselung erhält, während das zu reinigende Gas an der anderen Seite eintretend den Zylinder in der entgegengesetzten Richtung durchströmt und seine Beimengungen dabei abgibt. Für die trockene Reinigung empfiehlt sich die Verwendung von Sägemehltreinigern, gußeisernen, mit Sägemehl angefüllten Kästen, durch die das Gas unter Abgabe des Staubes an das Sägemehl hindurchgeleitet wird. Diese Methode ist indessen ziemlich kostspielig, weil die Kästen, abgesehen von ihren nicht unbedeutenden Anschaffungskosten, einen verhältnismäßig großen Raumbedarf haben; pro 100 PS Motorleistung muß man einen Reinigungskasten rechnen, der zirka 10 qm Bodenfläche in Anspruch nimmt. — Eine andere Methode der trockenen Reinigung besteht darin, daß man das Gas eine Anzahl Zickzack-Rohre durchströmen läßt, die an den unteren Winkeln mit Klappen zur Entfernung des Staubes versehen sind; der letztere prallt gegen die Rohrwandungen an und fällt infolge seiner Schwere nach unten.

Diese sämtlichen Methoden leiden an dem Übelstande, daß das Gas mit einem verhältnismäßig kleinen Überdrucke, also einer minimalen Geschwindigkeit, die Reinigungsapparate passiert, infolgedessen für die enormen, bei großen Gasmotoren in Betracht kommenden Gasmen gen — man rechnet zirka 3 cbm pro Pferdekraftstunde — sehr große Apparate erforderlich sind, um eine ausgiebige Reinigung des Gases zu erzielen. In richtiger Erkenntnis dieses Umstandes konstruierte Heißen einen Zentrifugaltreiniger, mit dem seither gute Resultate erzielt wurden, in folgender Weise:

In einem Eisenblechzylinder rotiert eine mit Flügeln ausgestattete, mechanisch angetriebene Zentrifugentrommel, die das unreine Gas durch

einen an der einen Stirnseite sitzenden Eingangsstutzen ansaugt und es zentrifugierend auf einen in entgegengesetzter Richtung durch den Zylinder geführten, an seiner Wandung in dünner Schicht zirkulierenden Wasserstrom preßt; um eine möglichst innige Verührung zwischen Gas und Wasser zu erzielen, wird der Zylindermantel innen mit einem Drahtgeflechte bedeckt. In der Nähe des Eingangsstutzens verdampft ein Teil des Waschwassers infolge der im Gase enthaltenen Wärme und dadurch wird eine Befeuchtung auch der feinsten Staubteilchen herbeigeführt; dieselben werden niedergeschlagen und bleiben im Wasser zurück. Das gereinigte Gas wird durch einen am anderen Ende des Zylinders sitzenden Ausgangsstutzen in die Saugleitung des Gasmotors geleitet. Theisen gibt die Dimensionen eines Apparates für die Reinigung von 1200 cbm Gas pro Minute zu 6700 mm Länge bei 3100 mm Durchmesser an. Die Analyse erwies bei einem Versuche vor der Reinigung einen Staubgehalt von 3,3425 g pro Kubikmeter, und nach derselben einen solchen von 0,010 g; ferner ergab sich eine Reduktion des Wassergehaltes des Gases von 36,21 g pro Kubikmeter auf 3,013 g.

Sechstes Kapitel.

Dynamomaschinen.

Dem Zwecke unseres Buches entsprechend, beschränken wir uns darauf, in den folgenden Abschnitten kurz die Wirkungsweise, die Einteilung und die wichtigsten Eigenschaften der Dynamomaschinen zu behandeln und nur auf diejenigen Fragen näher einzugehen, die bei der Prüfung und Behandlung elektrischer Maschinen in Betracht kommen.

„Generator oder Dynamo ist jede rotierende Maschine, die mechanische in elektrische Leistung verwandelt.“ (Normalien zur Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren.) Nach dieser Definition fällt eine Anordnung, bei der in einer Spule durch Hin- und Herbewegung eines Magnetstabes Wechselströme induziert werden, nicht unter den Begriff Dynamo in technischem Sinne.

Bei jeder Dynamo finden wir einen Anker, auch Induktor oder Armatur genannt, und ein Magnetsystem. Durch letzteres wird ein magnetisches Feld erzeugt. „Anker ist derjenige Teil der elektrischen Maschine, in dem durch die Einwirkung des magnetischen Feldes elektromotorische Kräfte erzeugt werden“ (Normalien).

I. Gleichstrommaschinen.

Wir wollen uns zunächst klar machen, wie die Stromerzeugung erfolgt, und zwar beginnen wir mit den zweipoligen Maschinen.

1. Der Ringanker. In Fig. 69 sei N der Nordpol, S der Südpol eines Magnets, etwa eines permanenten Stahlmagnets. Im magnetischen

Felde befindet sich der Anker, in unserem Falle ein Ringanker oder Grammescher Ring. Um einen möglichst kleinen Luftzwischenraum zwischen dem Anker und den Polen zu erhalten, sind die Pole zylindrisch ausgebreht. Der Kern des Ankers, von dem wir zunächst annehmen, daß er aus einem nichtmagnetischen

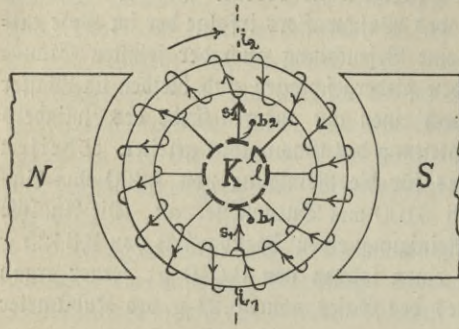


Fig. 69.

Material bestehe, ist mit einer fortlaufenden, in sich geschlossenen Wicklung aus isoliertem Kupferdrahte versehen. In unserer Figur ist jede zweite Windung durch einen Draht mit dem Kommutator K verbunden. Es bilden also je zwei Windungen eine Ankerspule. Der Kommutator, auch Kollektor genannt, besteht aus so vielen parallel zu seiner Achse verlaufenden Kupferstreifen (Lamellen, Segmenten)

wie Ankerspulen vorhanden sind; die Lamellen 1 sind durch Isoliermasse (Preßspan, Glimmer oder dergl.) gegeneinander und gegen die Achse isoliert. Ein von der Achse entfernter Kommutator ist in Fig. 70 abgebildet. Es sei schon jetzt darauf aufmerksam gemacht, daß man auch jede einzelne Windung des

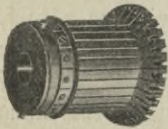


Fig. 70.

Grammeschen Ringes mit dem Kommutator in der angegebenen Weise verbinden kann; natürlich muß dann der Kommutator eine doppelt so große Anzahl Lamellen erhalten wie in der Figur. Andererseits kann jede einzelne Ankerspule aus einer größeren Anzahl von Windungen bestehen. Bei geringer Anzahl der Spulen bzw. Lamellen liefert die Maschine pulsierenden Gleichstrom, d. h. der Strom schwankt

beständig zwischen einem oberen und unteren Werte. Der Wellenstrom wird um so mehr geebnet, je größer die Anzahl der Lamellen ist.

Wird der Anker, der mit dem Kommutator bzw. mit der beiden Teilen gemeinsamen Achse starr verbunden sein muß, gedreht, etwa in dem durch den großen Pfeil angedeuteten Sinne, so werden die vom Nordpole zum Südpole verlaufenden Kraftlinien von den Drahtwindungen geschnitten; infolgedessen werden in den einzelnen Windungen elektromotorische Kräfte induziert. Hat das magnetische Feld in dem Raume zwischen den beiden Polen überall dieselbe Stärke und greifen wir eine ganz beliebige Windung heraus, so erfolgen die Änderungen der elektromotorischen Kraft in dieser Windung nach dem Sinusgesetze (s. S. 48): In dem Momente, in dem sich unsere Windung in i_1 befindet, ist die induzierte elektromotorische Kraft gleich Null; von jetzt an wächst die elektromotorische Kraft und hat ihren größten Wert, wenn die Windung die horizontale Lage eingenommen hat, nimmt dann wieder ab und ist in i_2 wieder Null. Bei weiterer Drehung wechselt die elektromotorische Kraft ihr Vorzeichen zc. Eine durch die Punkte i_1 und i_2 gelegte, die Kraftlinien unter einem

rechten Winkel schneidende Ebene nennt man die neutrale Zone. Die in den Windungen der linken Hälfte des Ringes induzierten elektromotorischen Kräfte treiben die Elektrizität in demselben Sinne durch die Windungen, addieren sich also wie die Spannungen hintereinander geschalteter Elemente. Entsprechendes gilt von den elektromotorischen Kräften der Windungen, die sich auf der rechten Ringhälfte befinden; jedoch haben die in diesen Windungen fließenden Ströme die entgegengesetzte Richtung wie die Ströme in der linken Ringhälfte. In der schematischen Fig. 69 sind die Stromrichtungen durch kleine Pfeile kenntlich gemacht. Die in den beiden Ringhälften induzierten Ströme fließen, wie man leicht erkennt, in dem Verbindungsdrahte s_1 , der sich gerade in der neutralen Zone befindet bzw. dessen Kollektorlamelle von der Bürste b_1 berührt wird, in derselben Richtung; sie verstärken sich also oder werden gleichgerichtet. Man kann sich also die Ringwicklung durch die neutrale Ebene in zwei Hälften zerlegt denken, die durch die Verbindungen der die neutrale Ebene passierenden Spulen mit dem Kommutator parallel geschaltet werden, während die Spulen jeder Hälfte in Serie geschaltet sind. Sind im ganzen n Windungen vorhanden, und nennen wir die mittlere elektromotorische Kraft einer Windung e , so ist die elektromotorische Kraft der Maschine $\frac{n}{2} \cdot e$.

Die Bürsten b_1 und b_2 stellen ruhende Verbindungen zwischen dem rotierenden Anker und dem mit den Bürsten zu verbindenden äußeren (in der Fig. 69 nicht gezeichneten) Stromkreise dar. Rotiert der Anker, so schleifen die Bürsten auf dem Kommutator und berühren nacheinander die einzelnen Lamellen l . Die Bürsten sind also immer mit denjenigen Spulen leitend verbunden, die sich in der neutralen Zone befinden oder in denen die Induktion gleich Null ist. Liegen die Bürsten nicht in der neutralen Zone, so wird ein Teil der in der einen Ringhälfte erzeugten elektromotorischen Kräfte durch die in der anderen Ringhälfte induzierten aufgehoben (s. auch Anker rückwirkung).

Wir haben eben gesehen, daß beide Ringhälften Ströme nach s_1 hinschicken. Die gesammelten Ströme fließen nach dem zugehörigen Segmente des Kollektors, von dort durch die Bürste b_1 , die Rückleitung, die Bürste b_2 , durch s_2 und schließlich in die beiden Hälften der Armatur (des Ankers). Beobachten wir, daß durch die Rückleitung ein Strom von J Ampere fließt, so schließen wir, daß durch die einzelnen Windungen des Ankers ein Strom von $\frac{J}{2}$ Amp. strömt.

Da der in einer bestimmten Windung des Ankers erzeugte Strom jedesmal seine Richtung ändert, wenn die betreffende Windung durch die neutrale Zone hindurchgeht, so ist unsere elektrische Maschine an und für sich eine Wechselstrommaschine. Die Maschine wird erst durch den Kommutator in eine Gleichstrommaschine umgewandelt.

Die Größe der elektromotorischen Kraft unserer Maschine ist proportional

1. der Stärke des magnetischen Feldes,
2. der Geschwindigkeit, mit der sich die Spulen durch das magnetische Feld bewegen, oder der Tourenzahl,
3. der Anzahl der hintereinandergeschalteten Ankerwindungen auf einer Ringhälfte.

Nr. 1 und Nr. 2 kann man zu dem Satze zusammenfassen: die elektromotorische Kraft ist proportional der Anzahl der Kraftlinien, die von einer Windung in 1 Sekunde geschnitten werden.

Wir hatten eben angenommen, daß der Ankerkern aus einem nichtmagnetischen Material bestehe, etwa ein Holzring sei. In Wirklichkeit wickelt man die Drähte auf einen Ring aus weichem Eisen. Durch die Einführung des Eisens in das magnetische Feld wird der Verlauf der Kraftlinien wesentlich verändert; sie werden von ihrem Wege abgelenkt, suchen den Ring auf und werden gleichsam konzentriert; die größte Kraftliniendichte herrscht in der neutralen Zone (s. Fig. 71). Die Gesamtzahl der Kraftlinien, die von einer Windung während einer halben Umdrehung geschnitten werden, ist größer

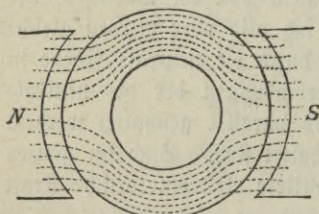


Fig. 71.

als in dem eben behandelten Falle und daher auch die mittlere elektromotorische Kraft der Windungen.

Die Frage, warum man einer Dynamomaschine, die Strom abgibt, mechanische Leistung (abgesehen von der zur Überwindung der Reibung erforderlichen) zuführen muß, ist schon in den Ausführungen auf S. 41 gegeben¹⁾. Die Kraft, mit der die Magnetpole auf die stromdurchflossenen Ankerdrähte einwirken, und zwar so, daß sie die Rotation des Ringes zu hemmen suchen, ist proportional der Stärke des magnetischen Feldes und der Ankerstromstärke. Um die Arbeit zu erhalten, hat man die Kraft, die während der Bewegung zu überwinden ist, mit dem Wege zu multiplizieren. Will man die Leistung bestimmen, so muß man den in 1 Sekunde zurückgelegten Weg in die Rechnung einführen. Dieser Weg aber ist bei gegebenem Durchmesser des Ringes proportional der Tourenzahl. Es ist also die mechanische Leistung, die der Anker aufnimmt, proportional

Tourenzahl \times Stärke des magnetischen Feldes \times Stromstärke.

Dieses Produkt ist noch, da die Pole auf jede Windung einwirken, mit der Anzahl der Ankerwindungen zu multiplizieren. Berücksichtigen wir nun, daß die elektromotorische Kraft proportional der Stärke des magnetischen Feldes, der Tourenzahl und der Anzahl der Ankerwindungen ist, so gelangen wir zu dem

¹⁾ Man kann dies auch in folgender Weise erklären. Dreht sich der Ring in Fig. 69 so, daß die Ströme in den Ankerdrähten die angeedeutete Richtung haben, so entsteht in dem Ringe bei i_1 ein Nordpol und bei i_2 ein Südpol. Auf diese Pole wirken die Pole der Feldmagnete anziehend bezw. abstoßend.

Resultate, daß die mechanische Leistung, die man der Maschine zuführen muß, proportional der elektromotorischen Kraft \times der Stromstärke ist.

2. Der Trommelanker. Wir denken uns zunächst auf der Oberfläche eines Zylinders zwei Drähte befestigt, die parallel zur Achse laufen und in demselben Achsenschnitte liegen (s. Fig. 72). Die vorderen Drahtenden sind mit den beiden Teilen a und b des Kollektors, die noch freien Enden 1' und 2' miteinander verbunden. Rotiert der Zylinder (Trommelanker) in einem magnetischen Felde, das aus einem Nordpole und einem diesem gegenüberliegenden Südpole besteht (wie in Fig. 69), so werden in beiden Drähten elektromotorische Kräfte induziert; der in 1,1' erzeugte Strom hat aber stets die entgegengesetzte Richtung wie der in 2,2' induzierte. Wie man aber aus der

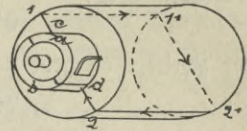


Fig. 72.

Figur ersieht, addieren sich die elektromotorischen Kräfte. Haben die Bürsten d eine solche Lage, daß sie von einem Kommutatortheile auf den anderen übergehen, wenn die Ebene des Drahtrechtecks senkrecht auf den Kraftlinien steht, so fließt durch eine an die Bürsten angeschlossene Leitung der elektrische Strom stets in derselben Richtung. Dadurch, daß wir die Anzahl der Drahtrechtecke und der Kollektorlamellen vergrößern, können wir die Stromschwankungen vermindern.

Wir wollen kurz den Fall behandeln, daß auf der Trommel 16 Drähte befestigt sind. Der große Kreis in Fig. 73 stelle die am Kommutator

liegende Endfläche des Ankers dar, die Enden der Drähte sind als kleine Kreise gezeichnet und mit 1—8 und 1'—8' bezeichnet. Die 16 Drähte sind auf dem Umfange der Trommel gleichmäßig verteilt. Bei der Notation des Ankers werden in allen Drähten, mit Ausnahme der durch die neutrale Zone hindurch-

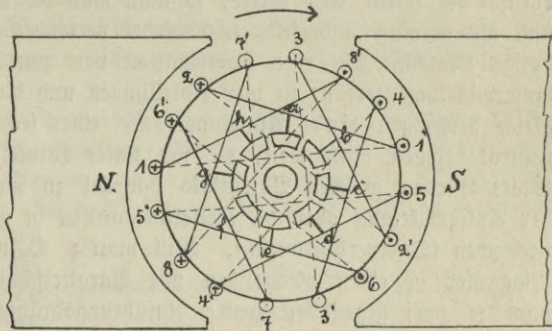


Fig. 73.

gehenden, elektromotorische Kräfte induziert. Die in den Drähten der linken Hälfte des Ankers erzeugten elektromotorischen Kräfte suchen Ströme hervorzurufen, die von dem Beschauer wegfließen; diese Ströme sind in der Figur mit einem Kreuze bezeichnet. Die in den anderen Drähten induzierten elektromotorischen Kräfte sind den eben erwähnten entgegengesetzt gerichtet (nach unten), was durch den Punkt in der Mitte des Drahtquerschnittes angedeutet werde.

Um eine geschlossene fortlaufende Wicklung zu erhalten, sind an jeder Endfläche des Ankers 8 Verbindungen herzustellen; diese sind, soweit sie an dem vorderen Ende des Ankers liegen, also sichtbar sind, als dicke, die übrigen (nicht sichtbaren) als gestrichelte Linien gezeichnet. Jeder der acht auf der

Kommutatorseite liegenden Verbindungsdrähte ist mit einer Kollektorlamelle verbunden. In den Drähten 3 und 7 ist die Induktion gleich Null; da diese Drähte mit den Kollektorlamellen b und f verbunden sind, so dürfen wir annehmen, daß die Bürsten auf den bezeichneten Lamellen liegen. Der bei b in die äußere Leitung fließende Strom gelangt aus der Leitung nach f, dort teilt er sich und durchfließt die beiden Armaturhälften; der erste Teil nimmt folgenden Weg:

6', 6, 5', 5, 4', 4, 3', 3 nach b,

der zweite Teil geht nach

7, 7', 8, 8', 1, 1', 2, 2' nach b zurück.

Die Wickelung besteht also auch hier aus zwei Hälften, die parallel geschaltet sind.

Mehrpolige Maschinen. Unseren seitherigen Betrachtungen lagen Maschinen mit zwei Polen zugrunde; bei Maschinen für größere Leistungen vermehrt man indessen die Anzahl der Magnetpole, so daß mit wachsender Leistung vier-, sechs- u. polige Maschinen mit alternierenden Polen entstehen. Bei einer vierpoligen Ringmaschine kann die Armatur in derselben Weise gewickelt werden wie bei einer zweipoligen Maschine. Eine solche Maschine hat zwei neutrale Zonen, die aufeinander senkrecht stehen, und es sind vier Bürsten erforderlich. Da die erste und dritte Bürste dasselbe Potential haben und ebenso die zweite und vierte, so kann man die ungeraden Bürsten einerseits und die geraden andererseits miteinander verbinden. Man kann also die vierpolige Maschine als eine Kombination von zwei zweipoligen ansehen: Die Ankerwicklung zerfällt in vier Abteilungen und die elektromotorische Kraft ist gleich derjenigen einer Abteilung. Bei einer sechspoligen Maschine sind drei neutrale Zonen vorhanden, die sich unter Winkeln von 60° durchkreuzen u. Statt Bürsten gleichen Potentials parallel zu schalten, kann man die Teile der Ankerwicklung oder die Kollektorlamellen in geeigneter Weise miteinander verbinden (Querverbindungen). Will man z. B. den in Fig. 69 dargestellten Ringanker in einen vierpoligen mit Parallelschaltung umwandeln, so muß man je zwei gegenüberliegende Zuführungsdrähte, z. B. s_1 und s_2 , durch einen Draht miteinander verbinden. Man kann jetzt eine positive und eine negative Bürste weglassen, so daß zwei Bürsten oder Bürstenreihen genügen (Norden-Schaltung). Da bei einer zweipoligen Maschine die Anzahl der Kollektorlamellen eine durch zwei teilbare Zahl sein muß, damit stets der Ring aus zwei Hälften mit gleicher Spulenzahl besteht, und die vierpolige Maschine als eine Kombination von zwei zweipoligen anzusehen ist, so ist bei einer vierpoligen Maschine die Anzahl der Kollektorlamellen ein Vielfaches von vier.

Soll ein Ringanker in einem sechspoligen Felde Verwendung finden und die Anzahl der Bürsten auf zwei reduziert werden, so sind die Zuführungsdrähte oder Kollektorlamellen leitend miteinander zu verbinden, die um je 120° voneinander entfernt sind. Da also je drei Zuführungsdrähte miteinander ver-

bunden sind, so muß die Anzahl der Kollektorlamellen eine durch drei teilbare Zahl sein.

Bei der mehrpoligen Maschine mit Parallelschaltung liefert jede Abteilung nur einen Teil des in den äußeren Stromkreis fließenden Stromes. Daher kann man den Ankerdrähten einen kleineren Querschnitt geben, so daß die Herstellung des Ankers erleichtert wird. Ferner kann das Funken an den Bürsten leichter vermieden werden; denn je schwächer die zu kommutierenden Ströme sind, um so leichter kann funkenloser Gang erzielt werden. Ein Nachteil der beschriebenen Konstruktion besteht darin, daß im Innern der Ankerwicklung infolge einer Ungleichmäßigkeit in der Feldstärke (wenn z. B. bei der vierpoligen Maschine die beiden Nordpole nicht die gleiche Kraftlinienzahl in den Anker senden) leicht Ströme entstehen können, die nicht in den äußeren Stromkreis gelangen (also durch die Querverbindungen fließen) und Energieverluste verursachen¹⁾.

Wir haben nur die mehrpolige Wicklung mit Parallelschaltung bei dem Ringanker besprochen; wir bemerken aber, daß man auch bei den Trommelankern die Parallelschaltung anwendet.

Bei mehrpoligen Maschinen, die größere elektromotorische Kräfte liefern sollen, wendet man die Reihenschaltung an: Die einzelnen Abteilungen werden so miteinander verbunden, daß sich die elektromotorischen Kräfte addieren. Die Zahl der Bürsten kann auch hier bis auf zwei vermindert werden.

Werden Reihen- und Parallelschaltung bei dem Anker einer mehrpoligen Maschine vereinigt, so erhält man die gemischte Schaltung; diese wird bei Maschinen für große Leistungen vielfach angewandt, um die Querschnitte der Ankerdrähte zu reduzieren.

Anmerkung: Die offene Ankerwicklung: Die bis jetzt erwähnten Wicklungen müssen wir als geschlossene bezeichnen: Die Wicklung bildet eine oder mehrere geometrisch in sich geschlossene Figuren, und es gehen an verschiedenen Stellen Leiter zum Kommutator. Die Bürsten liegen bei der geschlossenen Wicklung an denjenigen Stellen auf dem Kommutator, wo die Induktion gleich Null ist. Bei der offenen Wicklung (von Brush und Thomson-Houston) besteht die Wicklung aus mehreren Stromkreisen, und die Bürsten werden so angeordnet, daß nur diejenigen Spulen Strom abgeben, in denen die Induktion am größten ist, während alle anderen Spulen ganz ausgeschaltet sind. Zur Erläuterung diene die Fig. 74. Der Anker, ein Ringanker, ist mit vier Spulen bewickelt, von denen je zwei hintereinander geschaltet sind. Die freien Enden des Spulenpaares 1 sind mit den Segmenten s_1 , s_2 des Kommutators verbunden, die Enden von 2

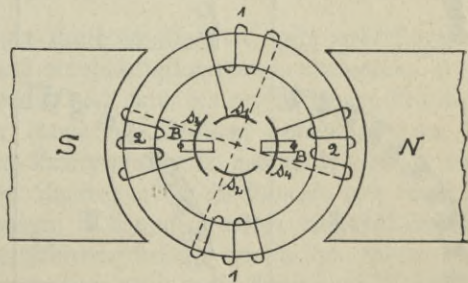


Fig. 74.

¹⁾ Näheres s. K a p p, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom. S. 119.

mit s_3, s_4 . Wie man sieht, ist in der durch die Figur fixierten Stellung das Spulenpaar 1 ganz ausgeschaltet. Haben die Bürsten B eine genügende Länge, so berühren sie die Segmente s_1, s_2 in dem Momente, in dem sie die Segmente s_3, s_4 verlassen. Die offenen Wicklungen werden nur für sogenannte Bogenlichtmaschinen verwendet.

Wir wenden uns jetzt zu einer kurzen Besprechung der einzelnen Hauptbestandteile einer Gleichstrommaschine.

Der Ankerkern wird aus möglichst weichem, kohlenstofffreiem Eisen angefertigt, um seinen magnetischen Widerstand auf ein Minimum zu reduzieren. Um die Verluste im Ankerkern, die durch die Wirbelströme¹⁾ und Hysteresis verursacht werden (s. S. 40), möglichst einzuschränken, stellt man, wie schon in einem früheren Kapitel erwähnt wurde, den Anker aus einzelnen durch Papierlagen oder Lackanstrich gegeneinander isolierten Eisenblechscheiben her, oder man setzt ihn aus Blechen zusammen, die an ihrer Oberfläche oxydiert sind.

Um die gebräuchlichen Spannungen zu erzeugen, muß man den Ankerdrähte, da man das magnetische Feld nicht nach Belieben, vielmehr nur so



Fig. 75.

lange verstärken kann, bis der Sättigungsgrad erreicht ist, eine große Rotationsgeschwindigkeit erteilen. Daher ist die Zentrifugalkraft der auf der Peripherie oder dicht an der Peripherie befindlichen Ankerdrähte eine ganz bedeutende. Außerdem üben die magnetischen Kräfte der Pole auf die stromdurchflossenen Ankerdrähte tangentiale Kräfte aus. Der Tendenz der Wicklung, den Anker zu verlassen oder sich auf dem Anker zu ver-

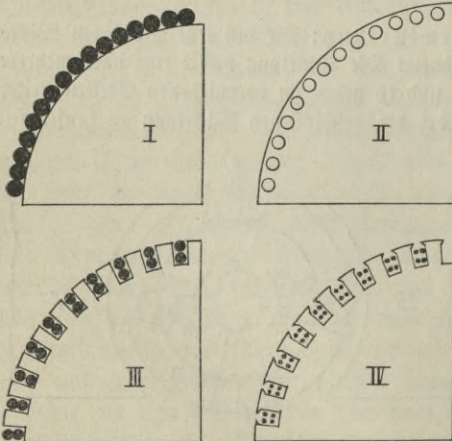


Fig. 76.

schieben, wird durch Anbringung von Bandagen (s. Fig. 75) oder durch Verlegung der Drähte in Löcher oder Nuten vorgebeugt.

Je nachdem man die Wicklung anbringt, unterscheidet man zwischen glattem Anker, Lochanker, Nuten- oder Zahnanker. Bei dem glatten Anker (s. Fig. 76, Nr. 1) liegen die Drähte auf der Oberfläche des Ankerkerns und müssen durch Bandagen festgehalten werden; der Luftzwischenraum zwischen den Polflächen und dem Ankerkern wird größer als bei den folgenden Ankern. Ein Vorzug

des glatten Ankers besteht darin, daß ein größerer Wicklungsraum zur Verfügung steht und die Kühlung der Ankerdrähte eine günstige ist. Füllen

¹⁾ Diese verlaufen senkrecht zu den Kraftlinien.

die Drähte Löcher aus, die in der Nähe der Peripherie, parallel zur Achse des Ankers, angebracht sind, so wird der Anker Lochanker genannt (Fig. 76, Nr. 2). Da die Drähte überall von Eisen umgeben sind, so ist die Selbstinduktion in den Spulen, die durch die Bürsten kurzgeschlossen werden, größer als bei den anderen Ausführungen. Bei den Nuten- oder Zahnankern (Fig. 76, Nr. 3 und 4) sind auf dem Anker parallel zur Achse oder wegen der Verzerrung des magnetischen Feldes infolge der Ankerwirkung etwas schräg zur Achse verlaufende Nuten angebracht, in die die Wicklung eingebettet wird. Bei IV verbreitern sich die Zähne an der Peripherie, so daß der magnetische Widerstand kleiner ist als bei III. Die Nutenanker werden am meisten hergestellt. Für die Isolation der Drähte gegen das Ankerisen (bei Nutenankern) verwendet man Preßspan oder Glimmer; Glimmer isoliert besser, zumal er weniger hygroskopisch ist.

Für die Wahl der Drahtquerschnitte ist die normale Stromstärke bzw. die mit Rücksicht auf die Isolation zulässige Erwärmung maßgebend. Da die Temperaturerhöhung von der Konstruktion (Größe der für die Wärmeausstrahlung in Betracht kommenden Oberfläche, Ventilation) abhängt, so läßt sich eine bestimmte Regel nicht aufstellen.

Die Wicklung wird entweder aus sorgfältig isoliertem Kupferdrahte hergestellt — jede Nutte nimmt dann eventuell mehrere Drahtwindungen auf (Drahtanker) oder für starke Ströme aus Kupferstäben (Stabanker, Fig. 77).



Fig. 77.

Um die Funkenbildung zu verringern, vermeidet man tunlichst große Windungszahl der Spulen, vergrößert lieber die Lamellenzahl des Kommutators; bei größeren Maschinen besteht die Spule gewöhnlich nur aus einer Windung.

Je größer die elektromotorische Kraft der Maschine, desto mehr Sorgfalt ist auf die Isolation der Drähte und der Kollektorlamellen zu verwenden. Eine Beschränkung des Isolationsquerschnittes wird durch den zur Verfügung stehenden Wicklungsraum bedingt; je mehr Raum die Isolation beansprucht, um so kleiner werden natürlich die wirksamen Kupferquerschnitte, und um so geringer wird die Leistung der Maschine. Bei der Anordnung der Wicklungen und der Verteilung der herzustellenden Verbindungen ist darauf zu achten, daß nicht Drähte, zwischen denen eine größere Potentialdifferenz besteht, unmittelbar neben- oder übereinander zu liegen kommen, weil sonst leicht durch überspringende Funken die Isolation zerstört werden kann.

Der Kommutator ist von der Welle abnehmbar, damit er ausgewechselt werden kann. Die Lamellen werden auf einer Büchse angebracht und gegen diese sorgfältig isoliert. Aus welchem Material die Lamellen hergestellt werden, hängt von der Wahl der Bürsten ab. Sollen Kupferbürsten ver-

wendet werden, so werden die Lamellen aus harter Bronze angefertigt, bei Verwendung von Kohlenbürsten aus hart gezogenem Kupfer. Das Isolationsmaterial (Preßspan, Glimmer) sollte sich in demselben Maße abnutzen wie die Lamellen. Die Stärke der Isolation zwischen den Lamellen richtet sich nach der Spannung der Maschine bezw. zwischen benachbarten Lamellen. Die Länge des Kommutators hängt von der Bürstenauflagefläche ab und diese wieder von der Stärke des abzunehmenden Stromes. Die Verbindung zwischen den Lamellen und den Ankerdrähten erfolgt durch Verlöten oder Verschrauben.

Zuweilen liegt das Bedürfnis vor, in derselben Maschine, zwei verschiedene Spannungen zu erzeugen. Für solche Fälle werden Gleichstrommaschinen mit zwei Kollektoren gebaut; auch Maschinen für sehr starke Ströme (Galvanoplastik) versteht man vielfach mit 2 Kollektoren.

Wenn der Anker richtig gelagert ist, so heben sich die von den einzelnen Polen auf das Ankereisen ausgeübten Kräfte gegenseitig auf. Ein magnetischer Zug kann aber durch Abnutzung des Lagers zustande kommen und führt zu einer Vergrößerung der Reibungsverluste. Bei Dampfmaschinen erleidet der Armaturmittelpunkt bei jedem Kolbenhube Verschiebungen, die einen starken magnetischen Zug zur Folge haben. Da die Lagerschalen auch bei guter Schmierung einer Abnutzung unterliegen, so sollten sie auswechselbar sein.

Das Magnetsystem: Die Form und das Eisen des Magnetsystems müssen so beschaffen sein, daß bei möglichst geringem Materialaufwand eine möglichst große Kraftlinienzahl in das Ankereisen eintritt; ferner müssen Reparaturen an der Wicklung leicht vorgenommen werden können. Um den magnetischen Widerstand zu verringern, macht man den Zwischenraum zwischen dem Anker und den Polen möglichst klein: die Pole werden entweder zylindrisch ausgedreht oder man versteht sie mit zylindrisch ausgedrehten Ansätzen aus weichem Eisen, den sogen. Polschuhen. Derjenige Teil eines Feldmagnets, der von den Drahtwindungen umgeben ist, wird mit Schenkel und der zwei Schenkel verbindende Teil mit Joch bezeichnet. Bei einer zweipoligen Maschine bilden die genannten Teile mit dem Luftzwischenraume und dem Anker den magnetischen Kreis. Dem Bestreben, den magnetischen Widerstand des ganzen Kreises durch Vergrößerung der Polschuhe zu verringern, wird ein Ziel gesetzt durch die Ankerrückwirkung (s. S. 166) und den Umstand, daß bei zu kleinem Abstände zwischen einem Nord- zum Südpol übertritt (s. Streuung). — Bei der Wahl des Materials, aus dem man das Magnetsystem herstellt, kommen in erster Linie die magnetischen Eigenschaften des Eisens in Betracht. Die gleiche Amperewindungszahl, die im Stahlguß pro 1 cm^2 Querschnitt 15 000 Kraftlinien hervorruft, erzeugt im Gußeisen nur 7500 pro 1 cm^2 . Wenn man also durch eine bestimmte Amperewindungszahl eine bestimmte Anzahl Kraftlinien erzeugen will, so muß man bei Verwendung von Gußeisen den Magneten den doppelten Querschnitt geben. Je größer ferner der Querschnitt der zu bewickelnden Teile ist, um so größer ist die Länge des Drahtes, den man nötig hat, um eine bestimmte Windungszahl zu erhalten. Die einzelnen Teile des magnetischen Kreises müssen an den

Paßstellen, d. h. an den Stellen, wo zwei Teile aneinander gesetzt werden, sorgfältig bearbeitet werden, damit die Kraftlinien keinen unnötigen Widerstand finden. Auf die zahlreichen und mannigfaltigen Formen, die die verschiedenen Firmen dem Magnetssystem geben bzw. gegeben haben, wollen wir nicht näher eingehen.

Die Wickelung wird aus technischen Gründen auf Hülsen aus Zinkblech, gepreßtem Karton oder Asbest, auf die sogen. Schenkelkästen, gelegt; die gewickelte Spule wird über die Schenkel geschoben (was natürlich nur möglich ist, wenn die Polschuhe später aufgesetzt werden, oder wenn Schenkel und Polschuhe aus einem Stücke hergestellt und an dem Magnetgestell durch Bolzen befestigt werden). Da sich die Spulen durch die Stromwärme nicht zu sehr erhitzen dürfen, so muß eine der Windungszahl, der Erregerstromstärke und dem Widerstande der Spule entsprechende luftberührte Oberfläche vorhanden sein.

Je nachdem die Pole den Anker umgeben, die Polschuhe also nach innen gerichtet sind, oder das Magnetssystem vom Anker umschlossen wird, nennt man die Dynamo Außenpol- oder Innenpolmaschine. Die Gleichstrommaschinen werden jetzt fast nur als Außenpolmaschinen gebaut.

Wenn der Anker ein Zahnanker ist, so entstehen bei seiner Rotation Fluktuationen des magnetischen Feldes; die Kraftlinien werden von den Zähnen gleichsam eine Strecke weit mitgenommen und dann losgelassen. Infolgedessen entstehen in dem Eisen der Feldmagnete Wirbelströme; diese sucht man durch Unterteilung des Eisens zu unterdrücken.

Streuung. Nicht alle in den Feldmagneten erzeugten Kraftlinien treten in das Ankereisen ein und sind an der Induktion in den Ankerdrähten beteiligt. Ein nicht unbedeutender Teil der Kraftlinien vielmehr geht durch die Luft hindurch direkt von einem Polschuhe zum anderen oder von einem Schenkel zu dem benachbarten zc. Nennen wir die Zahl der im ganzen erzeugten Kraftlinien K_s und der den Anker auffuchenden (die wirksame Strömung) K_a , so nennt man $K_s : K_a$ den Streuungskoeffizienten. Je geringer die Streuung ist, um so günstiger ist die magnetische Disposition der Maschine.

Bürsten. Kupferbürsten, aus Kupfergewebe (Gaze), seltener aus sehr dünnen Kupferblättern (Boudreau) zusammengesetzt, haben einen geringeren Ohmschen Widerstand und werden daher für Maschinen, deren Stromstärke im Vergleich zur Spannung groß ist, bevorzugt; sie greifen aber den Kommutator stärker an als Kohlenbürsten. Sind Kohlenbürsten zu hart, so wird der Kommutator zu stark angegriffen; sind sie zu weich, so wird er verschmiert, wodurch Funkenbildung und unter Umständen Kurzschluß hervorgerufen werden kann.

Die Größe der Auflagefläche richtet sich nach der Stärke des abzunehmenden Stromes; bei zu kleiner Auflagefläche werden Kommutator und Bürsten zu heiß, und es wird die Ablösung von Metallteilchen und daher auch die Funkenbildung (Feuern) begünstigt; bei zu großer Auflagefläche wird der Druck unnötig groß. Man rechnet

für Kupferbürsten	4 mm ²	Auflagefläche pro 1 Amp.,
„ Kohlenbürsten	15—20	„ „ „ 1 „

Der Übergangswiderstand, d. h. der Widerstand, den der Strom findet, wenn er aus dem Kommutator in die Bürste fließt, hängt von dem Auflagedrucke ab. Nach Arnold¹⁾ beträgt derselbe für einen Auflagedruck von $\frac{1}{8}$ kg pro 1 cm^2 und der oben angegebenen Stromdichte für Kohle 0,15—0,25 Ohm und für Kupfer 0,005 und 0,02 Ohm pro 1 cm^2 . Je größer die Auflagefläche, um so geringer ist der Übergangswiderstand. Wir werden später sehen, daß bei Kohlebürsten wegen des größeren Übergangswiderstandes die Funkenbildung geringer ist als bei Kupferbürsten.

In der Regel verwendet man statt einer Bürste mehrere nebeneinander angeordnete, so daß jede Bürste nur einen Teil des Stromes abnimmt. Diese Anordnung hat den Vorzug, daß der Kommutator gleichmäßiger abgenutzt wird und daß man bei derselben Auflagefläche eine größere Gesamtoberfläche und daher eine bessere Abkühlung der Bürsten erzielt.

Die Bürsten werden von einem federnden und gut leitenden Arme, dem Bürstenhalter, getragen. Der ganze Bürstenapparat wird meistens so angeordnet, daß man alle Bürsten gleichzeitig verschieben und auf funkenfreien Gang einstellen kann. Bei der Drehung bedient man sich eines Hebels, der mit einer Schraube zum Feststellen versehen ist. Bei sehr großen Maschinen geschieht die Verschiebung der Bürsten mittels Schnecke und Schneckenräder.

Zuweilen verwendet man Doppelbürsten. Der Bürstenhalter trägt eine Kupfergaze- und eine Kohlebürste, von denen die erstere in der Hauptsache zur Stromabnahme dient, während die Kohle die Neigung der Maschine zur Funkenbildung verringert und den Stromabgeber etwas schmirt, so daß er weniger leicht von der Gazebürste angegriffen wird.

Erregung und Schaltung. Bei den ersten elektrischen Maschinen bestand das Magnetsystem aus einem oder mehreren Stahlmagneten oder aus einem Elektromagneten, der durch eine besondere Stromquelle gespeist wurde. — Fremderregung. Später (1867) zeigte Werner Siemens, daß man für die Erregung der Feldmagnete den in der Maschine selbst erzeugten Strom verwenden könne, er erfand das sogenannte dynamoelektrische Prinzip. Die diesem Prinzip zugrunde liegende Idee soll bei Besprechung der Hauptstrommaschine dargelegt werden. Die Maschinen mit Selbsterregung werden je nach der Art der inneren Schaltung, d. h. je nach der Art, wie man der Elektromagnetwicklung oder dem Erregerkreise Strom aus dem Anker zuführt, eingeteilt in: Hauptstrom-, Nebenschluß- und Verbundmaschinen.

a) Bei den Hauptstrommaschinen, auch Hauptschluß-, Serien-, Reihenmaschinen genannt, sind Anker, Magnetwicklung und äußerer Stromkreis hintereinander geschaltet, es dient also der ganze aus dem Anker kommende Strom zur Erregung der Feldmagnete (s. Fig. 78). Wird die Maschine in Betrieb gesetzt, so ist der wirksame Magnetismus nur sehr schwach²⁾,

¹⁾ G.-Z. 3. 1899, S. 5.

²⁾ Maschinen, die zum erstenmal in Betrieb gesetzt werden, müssen meistens kurze Zeit fremd erregt werden, weil die Magnetschenkel noch keine ausgeprägten Pole haben.

er besteht nämlich nur aus dem sogenannten remanenten Magnetismus bezw. aus dem geringen Magnetismus, den gewöhnliches Eisen infolge der Einwirkung des Erdmagnetismus besitzt. Bei den ersten Touren, die der Anker macht, wird daher in seinen Windungen nur eine schwache elektromotorische Kraft induziert. Da aber der anfängliche, sehr schwache Strom in dem Eisen des Elektromagnets Magnetismus erzeugt, so wird das magnetische Feld stärker, und es wächst die elektromotorische Kraft des Ankers u. s. f. Die Maschine geht also, wie man sagt, von selbst an, vorausgesetzt, daß der äußere Stromkreis geschlossen ist. Wenn die Schaltung der Magnetwicklung nicht richtig gewählt ist, so schwächen die ersten Ströme das magnetische Feld, indem sie die Pole umzukehren suchen. Sobald der remanente Magnetismus vernichtet ist, hört die Stromerzeugung auf. Da man in einem solchen Falle die Drehrichtung im allgemeinen nicht umkehren kann, so muß man die Schaltung der Magnetwicklung ändern.

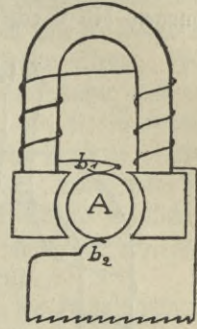


Fig. 78.

Bezeichnen wir den Widerstand im Anker mit w_a , denjenigen der Magnetwicklung mit w_m und den äußeren Widerstand mit r , nennen wir ferner die elektromotorische Kraft E und die Klemmspannung e , so ist

$$\begin{aligned} \text{Spannungsverlust im Anker} &= w_a \cdot J, \\ \text{'' in der Magnetwicklung} &= w_m \cdot J, \\ \text{'' in äußeren Stromkreise} &= r \cdot J = e \\ \text{und } E &= (w_a + w_m) \cdot J + e \text{ oder } e = E - (w_a + w_m) \cdot J. \end{aligned}$$

$w_a + w_m$ ist der innere Widerstand der Maschine; bezeichnen wir diesen mit R , so ist $e = E - J \cdot R$.

Wächst der Widerstand im äußeren Stromkreise, so wird J bei konstanter Tourenzahl aus zwei Gründen kleiner, nämlich erstens, weil der vergrößerte äußere Widerstand bei unveränderter elektromotorischer Kraft eine Abnahme der Stromstärke zur Folge hat, zweitens, weil die Erregung (das magnetische Feld) und mit ihr die elektromotorische Kraft schwächer wird. In Beleuchtungsanlagen, bei denen gewöhnlich der äußere Widerstand innerhalb weiter Grenzen schwankt, werden Hauptstrommaschinen nur selten verwendet; man findet sie, wenn eine größere Reihe von Vogenlampen gleichzeitig in Hintereinanderschaltung brennen (Beleuchtung eines Kanals, eines langen Quais).

Die Spannung kann durch einen parallel zur Magnetwicklung gelegten veränderlichen Widerstand reguliert werden (s. Stromverzweigung), ferner durch Veränderung der Tourenzahl (selten!) und Verschiebung der Bürsten. Von dem zuletzt genannten Mittel kann man nur bei Maschinen mit geringer Ankerückwirkung und großer Zahl der Kollektorlamellen Gebrauch machen, weil sonst die Funkenbildung zu groß wird.

Infolge der Erschütterungen auf dem Transport verliert das Magnetssystem seinen Magnetismus zuweilen; es muß dann ebenfalls eine Fremderregung zu Hilfe genommen werden.

b) Fig. 79 zeigt uns das Schema der Nebenschlußmaschine. Der im Anker erzeugte Strom teilt sich bei c ; ein Teil, den wir i_1 nennen wollen, fließt in der Richtung des kleinen Pfeiles durch die Windungen des linken Elektromagnetschenkels, den Regulierwiderstand $R.W.$, die rechtsseitigen Windungen des Erregerkreises und endlich durch die Bürste b_2 zum Anker zurück.

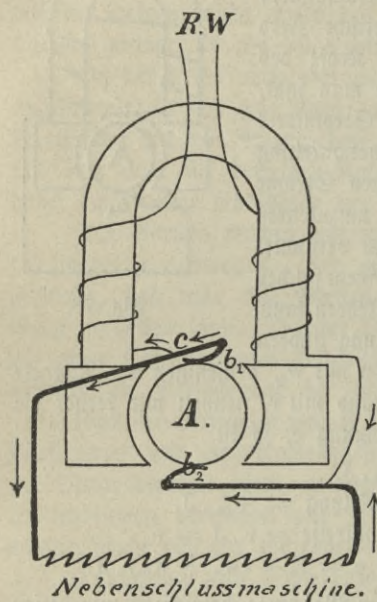


Fig. 79.

Der Hauptstrom i_2 durchfließt die Nutzleitung; diese und der Erregerkreis sind also parallel geschaltet. Nach den Gesetzen über Stromverzweigungen können wir uns den Widerstand in den beiden Stromkreisen (Erregerkreis und äußere Leitung) durch einen einzigen Widerstand

von der Größe $\frac{w_m \cdot r}{w_m + r}$ ersetzt denken,

wenn r wieder der äußere Widerstand und w_m der Widerstand in den Elektromagnetspulen und in $R.W.$ ist. Addiert man hierzu noch den Widerstand im Anker w_a , so erhält man den gesamten Widerstand. Ist wieder E die elektromotorische Kraft und e die Klemmspannung, so ist

$$J = i_1 + i_2 = E : \left(\frac{w_m \cdot r}{w_m + r} + w_a \right),$$

$$e = E - w_a \cdot J, \quad i_1 = \frac{e}{w_m}, \quad i_2 = \frac{e}{r}.$$

Verringert man bei einer bestimmten Klemmspannung den Widerstand $R.W.$ durch Drehen der Kurbel, so wächst i_1 (der Erregerstrom), und es wird, falls die Feldmagnete nicht schon vorher gesättigt waren, das magnetische Feld verstärkt, so daß die elektromotorische Kraft steigt. Umgekehrt kann man durch Vergrößerung von $R.W.$ die elektromotorische Kraft verringern. Da man mit Hilfe des Rheostates $R.W.$ die Spannung regulieren kann, so nennt man ihn Regulator. Die Spannungsregulierung kann in ziemlich weiten Grenzen vorgenommen werden; es ist dies ein Vorzug der Nebenschlußmaschine. Als weitere Vorzüge sind zu nennen die Eigenschaft der Maschine, bei plötzlichem Kurzschlusse stromlos zu werden (s. S. 71), die leicht auszuführende Parallelschaltung und der Umstand, daß die Maschine für die Ladung von Akkumulatoren geeignet ist. Auf den zuletzt genannten Punkt soll schon jetzt näher eingegangen werden. Da die Klemmspannung eines Akkumulators während der Ladung nicht unerheblich steigt, so muß die Spannung der Lademaschine allmählich erhöht werden, was, wie schon gezeigt, bei der Nebenschlußmaschine, ohne daß die Tourenzahl geändert wird, leicht geschehen kann. Nehmen wir ferner an, daß die elektromotorische Kraft der Maschine aus irgend einem Grunde, etwa

infolge Gleitens des Riemens, plötzlich so stark sinkt, daß sie kleiner wird als die Batteriespannung; es schießt dann die Batterie Strom in die Maschine. Denkt man sich nun in Fig. 79 die Nutzleitung durch eine Akkumulatorenbatterie ersetzt, deren positiver Pol mit der Bürste b_1 und deren negativer Pol mit b_2 verbunden ist, so erkennt man leicht, daß der durch die Elektromagnetwicklung fließende Batteriestrom dieselbe Richtung hat wie der von der Maschine selbst vor Eintritt der Störung in den Nebenschluß geschickte Strom. Die Feldmagnete ändern also ihre Polarität nicht¹⁾, und es behält daher auch die im Anker induzierte elektromotorische Kraft ihre Richtung bei; sie ist mithin stets der elektromotorischen Kraft der Batterie entgegengesetzt gerichtet. Hört die Störung auf, so wächst die induzierte elektromotorische Kraft und die Maschine schießt wieder Strom in die Batterie. (In der Praxis verhindert man übrigens, daß die Batterie Strom in die Maschine schießt dadurch, daß man einen Schwachstromautomat in die Ladeleitung schaltet.)

Bei sehr starken Belastungsänderungen, wenn z. B. die Hauptsicherung durchbrennt, kann sich in der Nebenschlußwicklung infolge der Selbstinduktion eine so hohe Spannung entwickeln, daß ihr die Isolation nicht standhalten kann (Durchschlagen).

c) Bei den Verbund- oder Compoundmaschinen, auch Maschinen mit gemischter Schaltung genannt, hat der Feldmagnet eine doppelte Wickelung (s. Fig. 80): Die eine besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes und bildet einen Nebenschluß, die andere wird von einer verhältnismäßig geringen Windungszahl eines dicken Drahtes gebildet und vom Hauptstrom durchflossen. Man kann auch hier in den Nebenschluß einen Regulierwiderstand einschalten. Sind die beiden Bewickelungen richtig gegeneinander abgeglichen, so hat die Klemmspannung bei den verschiedensten Belastungen und konstanter Umdrehungszahl ungefähr gleiche Größe. Steigt beispielsweise die Belastung, was der Fall ist, wenn der äußere Widerstand sinkt, so wird die mit der Nutzleitung in Serie geschaltete Hauptwicklung von einem stärkeren Strom durchflossen, und das bedeutet Feldverstärkung bezw. Vergrößerung der elektromotorischen Kraft. Andererseits hat der stärkere Strom eine Zunahme des Spannungsabfalles im Anker (s. auch Ankerrückwirkung), d. h. eine Abnahme der Spannung zur Folge. Wird die Vergrößerung der Amperewindungen durch die Zunahme des Spannungsabfalles kompensiert, so bleibt die Klemmspannung konstant, daher auch der durch den Nebenschluß fließende Strom. Die Compoundierung wird also lediglich durch den Hauptstrom bewirkt. Durch Vergrößerung der Anzahl der Hauptwindungen kann man erreichen, daß die Klemmspannung wächst, wenn der äußere Widerstand abnimmt; die Maschine ist dann übercompoundiert. Die Überspannung

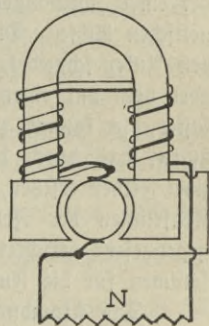


Fig. 80.

¹⁾ Es soll zuweilen doch eine Umkehrung der Polarität eingetreten sein.

kann dazu dienen, den mit der Belastung wachsenden Spannungsverlust in der Leitung zu decken.

Compoundmaschinen sind in Anlagen mit stark schwankender Belastung am Platze, bei denen Akkumulatoren keine Anwendung finden; sie werden daher in reinen Kraftverteilungsanlagen, Straßenbahnzentralen u. a., bei denen Stromschwankungen sehr schnell erfolgen, viel verwendet.

Für die Ladung von Akkumulatoren sind Compoundmaschinen weniger geeignet. Gibt nämlich die Batterie Strom an die Dynamo ab, so werden die Magnete entmagnetisiert und es kann, da die elektromotorische Kraft der Maschine verschwindet, ein außerordentlich starker Strom zustande kommen. Die Gefahr, daß durch einen Rückstrom die Maschine entmagnetisiert wird, ist nicht vorhanden, wenn man die Ladeleitung direkt von den Bürsten der Maschine abzweigt.

Endlich sind noch zu erwähnen die Maschinen mit Fremderregung, die zuweilen Verwendung finden. Sie haben den Vorzug, daß die Spannung auch bei stark schwankender Belastung konstanter bleibt als bei Selbsterregung. Da man ferner die Spannung durch Verringerung des Erregerstromes leicht weit unter die normale bringen kann, so sind sie als Zusatzmaschinen bei der Ladung von Akkumulatoren sehr geeignet.

Anker rückwirkung oder Ankerreaktion. Wir haben gesehen, daß bei einer zweipoligen Maschine die neutrale Achse senkrecht steht auf der magnetischen Achse. Die Bürsten müssen dort aufliegen, wo die neutrale Achse den Anker schneidet. Dies gilt aber nur so lange, als die Maschine keinen oder doch nur einen sehr schwachen Strom abgibt. — Wird die Maschine belastet, so kommt zu dem bereits vorhandenen magnetischen Felde ein neues hinzu, das durch den Ankerstrom erzeugt wird. Dieses kann man sich durch zwei Felder ersetzen, nämlich durch ein Feld, dessen Kraftlinien senkrecht zu den Kraftlinien der Feldmagnete stehen, und ein Feld, dessen Kraftlinien entgegengesetzt gerichtet den Kraftlinien der Feldmagnete sind. Erstere Kraftlinien kommen für die Funkenbildung in Betracht, letztere schwächen das Feld.

Der stromdurchflossene Anker übt also eine rückwirkende Kraft auf das ursprüngliche Feld aus (Anker rückwirkung). Infolge der Anker rückwirkung erleidet zunächst die neutrale Zone eine Verschiebung. Die Bürsten dürfen daher nicht in den Punkten i_1 und i_2 (Fig. 69, S. 152) den Kollektor berühren, sondern müssen um einen gewissen Winkel, und zwar im Sinne der Drehung des Ankers, verschoben werden, wenn die Maschine funkenlos laufen soll. Der Winkel, um den man die Bürsten verschieben muß, wächst bis zu einem gewissen Grade mit der Belastung. Die Schwächung des ursprünglichen Feldes hat zur Folge, daß die Kleinspannung sinkt. Um die Abnahme der Spannung zu kompensieren, muß man bei der Nebenschlußmaschine die Felderregung durch Ausschalten von Widerstand im Nebenschlußregulator verstärken. Wie groß die Spannungsänderungen sind, kann aus folgendem Beispiel ¹⁾ entnommen

¹⁾ Herzog u. Feldmann, Handbuch der elektr. Beleuchtung. S. 263.

werden: Eine moderne Nebenschlußmaschine für 220 Volt und 150 Ampere bei 750 Touren in der Minute hatte bei Leerlauf ihre normale Klemmspannung, wenn der Erregerstrom gleich 2,4 Amp. war. Wurde der Maschine plötzlich der volle Strom entnommen, so fiel die Klemmspannung um 13 Volt, obgleich die Tourenzahl konstant blieb. Von diesen 13 Volt entfallen 4,4 Volt auf den Anker — Spannungsverlust im Anker. Um die Klemmspannung von 220 Volt wieder zu erreichen, mußte die Erregerstromstärke durch Ausschalten von Widerstand um 0,2 Amp. erhöht werden. Wird jetzt die Maschine, ohne daß man den Nebenschlußwiderstand ändert, entlastet, so steigt die Klemmspannung bis zu 237 Volt.

Um die Ankerrückwirkung zu verringern, sind verschiedene Mittel in Vorschlag gebracht worden, von denen wir nur das folgende erwähnen. Man bringt zwischen den eigentlichen Feldmagneten kleine Pole an, deren Wicklung so geschaltet ist, daß sie den Kraftlinien des Ankers entgegenwirken (Kompensationsmagnet). Die Wicklung wird nach der Anordnung von Swinburne vom Hauptstrome durchgeschlossen. Eine Verschiebung der Bürsten aus der neutralen Zone ist nicht erforderlich. Durch eine von Fischer-Hinnen¹⁾ getroffene Anordnung wird eine besondere Wicklung für die Hilfspole überflüssig.

Die Funkenbildung an den Bürsten ist, wie schon angedeutet wurde, auf die Selbstinduktion in derjenigen bzw. in denjenigen Spulen zurückzuführen, die durch die Bürsten kurzgeschlossen werden. Es wird nämlich durch die neutrale Zone der Ring in zwei Hälften geteilt, die wir als rechte und linke unterscheiden wollen. Geht eine Spule aus der rechten Hälfte des Ringes in die linke über, so berührt die Bürste (b_1 in Fig. 69) gleichzeitig die beiden Kollektorlamellen, mit denen die betreffende Spule verbunden ist; sie wird also kurzgeschlossen. Vor dem Kurzschlusse fließt ein Strom von der Stärke $\frac{J}{2}$ Ampere durch die Spule in der einen Richtung, nach dem Kurzschlusse in der entgegengesetzten Richtung. Diesen plötzlichen und starken Änderungen der Stromintensität $\left(\text{von } +\frac{J}{2} \text{ bis } -\frac{J}{2}\right)$ widersteht sich die Selbstinduktion der Spule, und es entstehen die sogen. Extraströme.

Die Stärke der Funkenbildung hängt von verschiedenen Umständen ab, von denen wir erwähnen: Die Stromstärke und die Zahl der Ankerwindungen, die auf 1 Kollektorlamelle kommt. Die Funkenbildung wird dadurch verringert bzw. der Kommutationsvorgang beschleunigt, daß man den Bürsten eine solche Lage gibt, daß in der kurzgeschlossenen Spule durch die Einwirkung der Feldmagnete eine elektromotorische Kraft induziert wird, die derjenigen der Selbstinduktion entgegenwirkt. Es geschieht dies durch Verschieben der Bürsten in dem früher angegebenen Sinne. Da bei Ringankern die Neigung zu stärkerer Funkenbildung größer ist als bei Trommelankern, so ist die vorzunehmende

¹⁾ Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion elektr. Gleichstrom-Maschinen von Fischer-Hinnen. Zürich, 1899.

Verschiebung der Bürsten bei ersteren im allgemeinen größer als bei letzteren. Ferner lehrt die Erfahrung im Einklang mit der Theorie, daß bei kleiner Anfangsgeschwindigkeit des Kommutators funkenloser Gang leichter zu erzielen ist als bei großer.

Änderung der Klemmspannung mit der Belastung. Da sich die Spannung der Compoundmaschine mit der Belastung nur wenig ändert, so brauchen wir uns hier nur mit der Hauptstrom- und Nebenschlußmaschine zu beschäftigen. Bei großem äußeren Widerstande ¹⁾ ist die Klemmspannung der Serienmaschine klein, weil die Maschine nur schwach erregt wird und infolgedessen die elektromotorische Kraft klein ist. Verringert man bei gleichbleibender Tourenzahl den äußeren Widerstand allmählich, so wächst die Stromstärke und mit ihr die Amperewindungszahl der Feldmagnete, so daß die elektromotorische Kraft steigt. Andererseits hat die vergrößerte Stromstärke einen größeren Spannungsabfall im Anker zur Folge, außerdem wirkt sie infolge der Ankerrückwirkung schwächend auf das magnetische Feld. Da jedoch zunächst das Anwachsen der elektromotorischen Kraft schneller erfolgt als die Zunahme des Spannungsabfalles der Maschine, so steigt die Klemmspannung (s. Fig. 81). Hat der äußere Widerstand eine gewisse untere Grenze erreicht, so hat die Klemmspannung ein Maximum, und von jetzt an ist die Schwächung der elektromotorischen Kraft infolge der Ankerrückwirkung, vermehrt um den Spannungsverlust in der Maschine, größer als die auf die

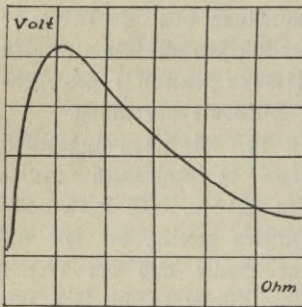


Fig. 81.

verstärkte Erregung zurückzuführende Zunahme der elektromotorischen Kraft. Es ist nämlich noch zu berücksichtigen, daß der Magnetismus des Eisens anfänglich proportional der Amperewindungszahl wächst, später aber in einem verlangsamten Tempo und schließlich konstant wird.

Ganz anders verhält sich die Nebenschlußmaschine. Läuft die Maschine leer (oder bei offenem Stromkreise), ist also der äußere Widerstand unendlich bzw. sehr groß, so hat die elektromotorische Kraft ihren größten Wert ²⁾. Der Ankerstrom hat nur eine geringe Stärke; er ist nämlich gleich dem Strome, der durch den Nebenschluß fließt, dessen Widerstand verhältnismäßig groß ist. Nun ist der Spannungsabfall im Anker, der zugleich den Spannungsabfall in der Maschine darstellt, gleich der Ankerstromstärke mal dem Ankerwiderstande. Der Widerstand im Anker beträgt aber in guten Dynamomaschinen nur Bruch-

¹⁾ In der Praxis mißt man zwar nicht den äußeren Widerstand, sondern die Stromstärke und Klemmspannung, aber die Darstellung wird einfacher, wenn wir von dem äußeren Widerstande ausgehen.

²⁾ Wir nehmen an, daß der Nebenschlußwiderstand und die Tourenzahl konstant gehalten werden.

teile eines Ohms. Mithin ist das Produkt $w_a \cdot J$ klein, und man kann praktisch die Klemmspannung einer Nebenschlußmaschine bei geöffnetem Stromkreise gleichsetzen der elektromotorischen Kraft. Wird der äußere Stromkreis durch einen großen Widerstand geschlossen, so fällt die Klemmspannung nur wenig ab, weil Ankerückwirkung und Spannungsabfall im Anker nur um einen geringen Betrag wachsen (s. Fig. 82). Verringert man den äußeren Widerstand oder erhöht man die Stromstärke, so erhöht sich der Einfluß der die Klemmspannung herabdrückenden Faktoren. Die Abnahme der Klemmspannung hat eine Verringerung der elektromotorischen Kraft zur Folge; denn der Erregerstrom ist ja gleich der Klemmspannung, dividiert durch den Widerstand in der Magnetwicklung inkl. Widerstand im Regulator. Daher wird bei steigender Belastung das magnetische Feld geschwächt. Um das Feld zu verstärken, kann man einen Teil des Regulators ausschalten (dies kann auch automatisch geschehen). Bei Verringerung des äußeren Widerstandes nimmt die Klemmspannung, wie man aus der Figur ersehen kann, zuerst langsam, später schnell ab.

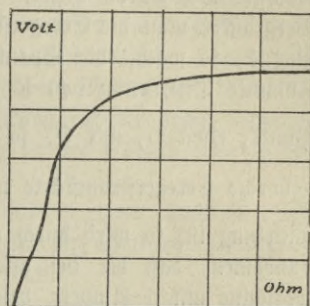


Fig. 82.

Wenn eine Nebenschlußmaschine, die für eine gewisse Spannung gebaut ist, dadurch, daß man mittels des Nebenschlußregulators den Erregerstrom stark schwächt, bei offenem Stromkreise nicht bis zu ihrer normalen Spannung erregt wird, so fällt die Klemmspannung, sobald man die Maschine belastet, stark ab, und es tritt starkes Feuer am Kollektor ein, auch wenn man der Maschine einen verhältnismäßig schwachen Strom entnimmt. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß sich die Rückwirkung des Ankers auf das magnetische Feld um so mehr geltend macht, je schwächer das magnetische Feld ist.

Charakteristik. Jede Magnetwicklungsart (Serienmaschine u.) hat ihre besonderen Eigentümlichkeiten, durch die die Maschine gleichsam charakterisiert ist. Unter Charakteristik im engeren Sinne versteht man eine Kurve, durch die die charakteristischen Eigenschaften einer Wicklungsart graphisch dargestellt wird. Man hat aber den Namen Charakteristik auch auf andere Kurven übertragen. Charakteristik im weiteren Sinne ist eine Kurve, durch die die Beziehung zwischen zwei elektrischen Größen (elektromotorische Kraft, Klemmspannung, Erregerstromstärke, Ankerstromstärke, Widerstand) oder einer elektrischen Größe und der Tourenzahl bildlich dargestellt wird. Wir dürfen daher die in den Fig. 81 und 82 dargestellten Kurven als Charakteristiken bezeichnen. Für die Beurteilung einer Maschine ist die Magnetisierungskurve, auch Leerlaufcharakteristik genannt, die die Abhängigkeit der erregenden Amperewindungen (bezw. der Erregerstromstärke) mit der Spannung wiedergibt, die wichtigste, weil man aus ihr die anderen Kurven konstruieren kann. Diese Charakteristik kann vorausbestimmt werden, d. h. man kann aus den Konstruktionsdaten der Maschine mit Hilfe der Hopkinson'schen Sättigungskurven für Schmiede- oder Gußeisen Punkte der

Kurve festlegen. Wir beschränken uns hier darauf, an einem Beispiele zu zeigen, wie man aus der Charakteristik Schlüsse über das Verhalten der Maschine ziehen kann.

Fig. 83¹⁾ sei die Charakteristik einer Nebenschlußmaschine, bezogen auf die Erregerstromstärke und die elektromotorische Kraft oder die Klemmspannung bei Leerlauf für eine bestimmte Tourenzahl. Der erste Teil der Kurve ist eine gerade Linie, woraus wir schließen, daß anfänglich mit wachsendem Erregerstrom die Spannung proportional der Erregerstromstärke wächst. Die Kurve beginnt nicht in O wegen des remanenten Magnetismus. Vergrößert man die Erregerstromstärke über den durch OA dargestellten Betrag hinaus, so wächst die Spannung langsamer. Für die Praxis kommt der gekrümmte Teil, etwa von K an, in Betracht. Verbindet man einen beliebigen Punkt, etwa D, mit O, so ist $\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{i}$, wo i die zur Spannung E zugehörige Erregerstromstärke ist. Da anderseits $\frac{E}{i}$ der Widerstand der Magnet-

wicklung ist, so wird durch $\operatorname{tg} \alpha$ dieser Widerstand gegeben. Wir wollen jetzt annehmen, daß die bei offenem Stromkreise bis zur Spannung E erregte Maschine mit J Ampere belastet werde; es fragt sich, wie sich die Maschine dann verhält. Zunächst sinkt die Klemmspannung um den Betrag $w_a \cdot J$, um einen weiteren Betrag, der proportional der Stromstärke angenommen werden darf, sinkt die Spannung infolge der Ankerückwirkung. Mehr können wir über den Spannungsabfall infolge der Ankerreaktion nicht voraussagen. Aber wenn wir ihn auch nur (angenähert) schätzen, also einer gewissen Willkür Spielraum geben, so behalten doch die allgemeinen Schlüsse, die wir ziehen, Gültigkeit, und wir gewinnen einen Einblick in das Verhalten der Maschine. Wir wollen annehmen, daß der zweite Summand des ganzen Spannungsabfalles, den wir e nennen wollen, auch gleich $w_a \cdot J$ sei. Macht man $OH = e$ und zieht durch H eine Parallele zu OD , so ist, wie man beweisen kann, das zwischen

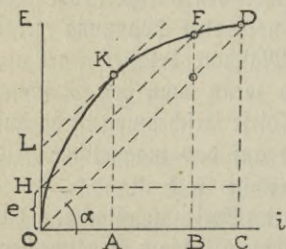


Fig. 83.

OD und OC liegende Stück des von F auf die Abszissenachse gefällten Lotes (FB) die Klemmspannung der Maschine bei der Stromstärke J (Beweis s. Fischer-Hinnen S. 183). Aus dem Verlauf der Charakteristik kann man schließen, daß der einer bestimmten Stromstärke J entsprechende Spannungsabfall um so größer wird, je geringer der Sättigungsgrad ist, eine Erscheinung, auf die wir schon früher aufmerksam gemacht haben. Man erkennt dies, wenn man für einen zwischen K und D liegenden Punkt, durch dessen Ordinate die Spannung vor der Belastung gegeben ist, in derselben Weise wie eben den Spannungsabfall bestimmt (man verbinde diesen Punkt mit O und ziehe durch H eine neue Parallele).

¹⁾ Nach Fischer-Hinnen, Gleichstrommaschinen.

Wir wollen wieder annehmen, daß $E = BC$ die ursprüngliche Spannung sei. Verschieben wir die Gerade HF sich selbst parallel nach oben, so entspricht diese Verschiebung einer allmählichen Vergrößerung der Ankerstromstärke. Die Schnittpunkte zwischen der Geraden und der Kurve rücken bei der Parallelverschiebung einander immer näher, und schließlich erhalten wir eine Tangente (LK).

OL ist also der größtmögliche Spannungsabfall, und diesem entspricht eine gewisse Stromstärke, die wir als die maximale bezeichnen müssen. Man kann also einer Nebenschlußmaschine nicht einen beliebig starken Strom entnehmen, die Maschine legt gleichsam selbst ein Beto gegen zu starke Belastung ein, wenn nicht dieses Beto schon vorher von den Ankerdrähten eingelegt ist, indem sie durchschmelzen, wenn die Steigerung der Stromstärke allmählich erfolgt. Im vorstehenden ist zugleich eine Erklärung für die höchst wertvolle Eigenschaft der Nebenschlußmaschine gegeben, daß sie bei plötzlich eintretendem Kurzschlusse nahezu stromlos wird.

Die Gerade HF schneidet die Charakteristik in zwei Punkten. Wir schließen daraus, daß die Nebenschlußmaschine für die nämliche Stromstärke mit zwei verschiedenen Klemmspannungen laufen kann.

Leistung der Gleichstrommaschinen. Unter der Leistung einer Dynamo ist die an den äußeren Stromkreis abgegebene zu verstehen¹⁾. Sie ist also bestimmt durch das Produkt aus der Klemmspannung und der Stärke des durch das Hauptkabel (Sammelschiene, Hauptamperemeter) fließenden Stromes. Die Leistung ist in Kilowatt anzugeben. Beispiel: Das mit den Klemmen der Maschine verbundene Voltmeter zeige 110 Volt an, das Hauptamperemeter 50 Ampere; Leistung = 5,5 KW.

Da in Zentralen die Spannung im allgemeinen auf derselben Höhe bleibt, so wächst die Leistung mit der Stromstärke. Jeder Stromstärke entspricht aber bei genügend langer Betriebsdauer eine bestimmte Temperaturerhöhung der in der Maschine befindlichen Leiter. Erreicht die Endtemperatur einen zu hohen Betrag, so kann die Isolation der Drähte Schaden leiden. Dieser Schaden macht sich meistens nicht sofort bemerkbar, er besteht in einer Strukturänderung des Isolationsmaterials. Eine Dynamo darf daher dauernd nur eine bestimmte Leistung abgeben; diese nennt man die normale Leistung. Sie hängt — abgesehen von den mechanischen Verhältnissen — von der Geschwindigkeit ab, mit der die Wärmeabgabe seitens der Drähte und des Kommutators an die Umgebung erfolgt und wird auch durch die Funkenbildung am Kommutator begrenzt. Die normale Leistung wird auf einem Schild, dem Leistungsschild, angegeben, das auf dem Gehäuse der Maschine angebracht ist. Meistens sind auf demselben Schild die Umdrehungszahl, die Spannung und die Stromstärke ebenfalls verzeichnet.

Wenn eine elektrische Maschine ihre normale Leistung beliebig lange

¹⁾ Wir benutzen in diesem Abschnitte vielfach die „Normalien zur Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren“. Verlag von Jul. Springer. — Siehe auch G.-T. 3. 1902, S. 504.

abgibt (Dauerbetrieb), so dürfen die Temperaturzunahmen der Wicklungen und des Kollektors nach den „Normalien“ folgende Grenzen nicht überschreiten:

bei Baumwollisolierung	50°,
„ Papierisolierung.	60°,
„ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate	80°.

Für ruhende Wicklungen (Elektromagnetbewicklung bei den meisten Gleichstrommaschinen) sind um 10° höhere Werte zulässig.

Die Temperatur in den Erregerspulen wird aus der Widerstandszunahme nach der früher beschriebenen Methode gemessen (s. S. 25), bei allen anderen Teilen mittels Thermometer.

„Als Lufttemperatur gilt jene der zuströmenden Luft oder, wenn keine entschiedene Luftströmung vorhanden ist, die mittlere Temperatur der die Maschine umgebenden Luft in Höhe der Maschinenmitte, wobei in beiden Fällen in etwa 1 m Entfernung von der Maschine zu messen ist.“

Wirkungsgrad. Die Reibung in den Lagern der Maschine¹⁾, die von der Beschaffenheit des verwendeten Materials, von dem Lagerdrucke, der Lagerkonstruktion, der Art der Schmierung und der Temperatur abhängig ist, die Reibung zwischen den Bürsten und dem Kollektor, die Reibung zwischen dem rotierenden Teile und der Luft, die Entstehung von Wirbelströmen und die Hystereseis²⁾ haben in jeder Dynamo Effektverluste zur Folge, die durch die Betriebsmaschine gedeckt werden müssen. Hierzu kommen noch die Verluste durch Joulesche Wärme im Anker und im Erregerkreise, sowie die in den Funken, die sich zwischen Kollektor und den Bürsten bilden, in Wärme (und Licht) umgesetzte Energie. Zieht man alle genannten Verluste, auf die Sekunde bezogen, von der zugeführten Leistung ab, so erhält man den nutzbaren Effekt, d. h. denjenigen elektrischen Effekt, über den man außerhalb der Maschine nach Belieben verfügen kann.

Man nennt das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung den Wirkungsgrad:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} = \eta.$$

Die zugeführte Leistung ist offenbar gleich der abgegebenen Leistung + den Verlusten in der Maschine.

¹⁾ Sind die Pole nicht gleichmäßig auf die Peripherie des Ankers verteilt, oder heben sich die Anziehungen zwischen Ankereisen und den Polen nicht gänzlich auf, so kann die Reibung in den Lagern eine beträchtliche Größe annehmen.

²⁾ Verfolgt man einen Querschnitt des Grammeschen Ringes während einer Umdrehung, so erkennt man, daß sich die Zahl und die Richtung der durch ihn fließenden Kraftlinien beständig ändert. Die Kraftlinienzahl ist in der neutralen Zone am größten (vergl. Fig. 70). Wir haben also ähnliche Verhältnisse wie die auf S. 39 beschriebenen. Auf zwei Polwechsel unseres Eisenquerschnittes oder unserer dünnen Eisenscheibe kommt ein Magnetisierungszyklus. Der durch Hystereseis verursachte Armaturverlust hängt außer von der Beschaffenheit des Eisens von dem Kubikinhalte des Ankereisens, von der Tourenzahl und der Polzahl der Maschine ab.

Unter zugeführter Leistung ist die von der Antriebsmaschine (Dampfmaschine zc.) auf die Dynamo übertragene sekundliche Arbeit zu verstehen. Diese wird gewöhnlich in Pferdekraften angegeben. Sind Betriebsmaschine und Dynamo zusammengebaut (Dampfdynamo), so ist die zugeführte Leistung gleich der effektiven Leistung der Betriebsmaschine; bei Riemenantrieb ist die zugeführte Leistung gleich der effektiven Leistung des Motors, vermindert um den Riemenverlust. — Es sei die auf die Dynamo übertragene Leistung gleich 100 PS, die Klemmspannung betrage 110 Volt und die Stromstärke 600 Amperes; dann ist, da 1 PS = 736 Watt, der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{110 \cdot 600}{736 \cdot 100} = 0,9.$$

Wir erhalten also

pro 1 Watt zugeführte Leistung 0,9 Watt nutzbare Leistung
 oder " 100 " " " 90 " " "

Der Wirkungsgrad beträgt also in unserem Falle 90%. Seine Höhe hängt von der Güte der Maschine in konstruktiver Hinsicht, von der Beschaffenheit des Materials und der Belastung ab. Der Wirkungsgrad kann bei sehr großen, normal belasteten Dynamos eine Höhe von 90–93% erreichen, während er für kleine Maschinen von etwa 1 bis zu 10 PS zwischen 70 und 80% liegt.

Da die Lagerreibung und die Verluste durch Joulesche Wärme von der Temperatur der in Betracht kommenden Maschinenteile abhängig sind und zwar mit der Temperatur wachsen (s. S. 12), so soll sich die Angabe des Wirkungsgrades auf die dem normalen Betriebe entsprechende Erwärmung beziehen.

Bestimmung des Wirkungsgrades. Die Bestimmung des Wirkungsgrades ist, wenn es sich um größere Objekte handelt, eine ziemlich komplizierte Arbeit und wird am besten bei der „Abnahme“ in dem Laboratorium der betreffenden Firma vorgenommen. Beträgt die normale Leistung e. J Watt, so ist der

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{e \cdot J}{e \cdot J + \text{Verlusten.}}$$

a) Leerlaufsmethode. Die normale Leistung ist leicht zu messen; daher kann man den Wirkungsgrad bestimmen, wenn man die Verluste kennt. Da die Verluste durch Reibung, Hysteresis und Wirbelströme mit der Tourenzahl wachsen¹⁾, so muß ihre Messung bei der normalen Tourenzahl der Maschine und überhaupt möglichst unter den Bedingungen des praktischen

¹⁾ Durch eingehende Versuche hat Dettmar nachgewiesen (G.-Z. 3. 1899, S. 203, 380), daß die Verluste durch Reibung (p_r) nicht, wie man früher annahm (Rapp), proportional der Tourenzahl wachsen, sondern in einem schnelleren Tempo ($p_r = c \cdot v^{1,5}$). Die durch Hysteresis verursachten Effektverluste werden proportional der ersten Potenz und die durch Wirbelströme verursachten proportional dem Quadrate der Tourenzahl angenommen. — Eine an die „Normalien“ sich anschließende Arbeit über Wirkungsgradbestimmungen findet man in Gl. A. 1902, Nr. 55 ff.

Betriebes vorgenommen werden. Ferner ist zu beachten, daß die Felderregung die normale Größe hat. Wie man die genannten Verluste ermitteln kann, soll an einem Beispiele erläutert werden. Die Dynamo sei eine Nebenschlußdynamo für 110 Volt normal. Die Verbindung zwischen Anker und Magnetbewicklung wird aufgehoben; die Klemmen des Nebenschlusses werden mit einer fremden Stromquelle (Akumulatoren) von 110 Volt Klemmspannung verbunden, so daß also der Erregerstrom die vorgeschriebene Größe hat. Verbindet man die Hauptklemmen der Maschine jetzt unter Zwischenschaltung eines veränderlichen Widerstandes mit der vorhandenen Stromquelle, so läuft die Maschine als Motor; durch Regulierung des in den Anker geleiteten Stromes wird sie auf die normale Tourenzahl gebracht. Das Produkt aus der Spannung an den Hauptklemmen der Maschine und der Stromstärke gibt diejenige Energie an, die den Reibungs-, Wirbelstrom- und Hysteresisverlusten entspricht. Die im Anker erzeugte Joulesche Wärme kann, da der Ankerstrom bei den Versuchen nur schwach sein wird, vernachlässigt werden. Die betreffenden Messungen sind vorzunehmen, nachdem die Maschine längere Zeit bei normaler Tourenzahl gelaufen ist. Zu diesen Verlusten sind hinzuzurechnen der Verlust in der Wicklung der Feldmagnete inkl. Nebenschlußregulator, und der Verlust im Anker nebst Bürsten bei voller Stromstärke. Letzterer Verlust wird durch elektrische Messungen und Unrechnungen ermittelt¹⁾.

b) Die indirekte Bremsmethode. Diese ist anwendbar, wenn ein Motor vorhanden ist, dessen Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen bekannt ist. Man verbindet diesen Motor mechanisch, etwa durch Riemen, mit dem Generator und führt ihm aus einer fremden Stromquelle elektrische Energie zu. Ist der Motor stark genug, so läßt man den Generator seine normale Leistung abgeben. Nach hinlänglich großer Zeit wird die dem Motor zugeführte Energie gemessen; sie sei gleich $e_1 \cdot J_1$. Ist η_1 der Wirkungsgrad des Elektromotors, so ist $E_1 \cdot J_1 \cdot \eta_1$ die vom Motor abgegebene Leistung. Hier- von ist der Verlust im Riemen p abzuziehen, so daß also die der Dynamo zugeführte Leistung gleich $E_1 \cdot J_1 \cdot \eta_1 - p$ ist. Die vom Generator abgegebene Leistung wird aus seiner Klemmspannung und der Stromstärke ermittelt. Nennen wir sie $E_2 J_2$, so ist

$$\eta_2 = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1 \eta_1 - p}$$

Dieses Verfahren wird die indirekte Bremsmethode genannt, weil der Generator auf den Elektromotor bremsend einwirkt.

c) Indirekte elektrische Methode. Es seien zwei Maschinen gleicher Leistung und Type vorhanden, z. B. zwei Außenpolmaschinen, vierpolig, mit Trommelanker für 50 KW. Man darf offenbar annehmen, daß der Wirkungsgrad der beiden Maschinen bei gleicher Belastung der gleiche ist. Die kongruenten Maschinen mögen mit A und B bezeichnet werden. Wird A Strom zugeführt, etwa aus einer Akkulatorenbatterie, und ist A mit B mechanisch

¹⁾ Näheres s. G.-T. 3. 1903, S. 661.

gekuppelt, so läuft A als Motor und treibt die Maschine B als Generator. Den in B erzeugten Strom führt man dem Motor zu. Man braucht also nur die den Verlusten in beiden Maschinen entsprechende Energie dem Motor aus der fremden Stromquelle zuzuführen. Der Betriebszustand ist so einzu-regulieren, daß der Mittelwert zwischen der dem Motor zugeführten und der vom Generator abgegebenen Energie so nahe als möglich gleich ist der normalen Leistung der einzelnen Maschinen. Wird also dem Motor A im ganzen, nämlich aus der fremden Stromquelle und dem Generator B, der Effekt $E_1 \cdot J_1$ zugeführt und gibt der Generator den Effekt $E_2 \cdot J_2$ ab, so soll

$$\frac{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2}{2} \text{ gleich der normalen Leistung des Generators B}$$

sein. $E_1 J_1 - E_2 J_2$ ist die zur Deckung der Verluste in beiden Maschinen erforderliche Energie; diese muß die Batterie abgeben. Das System bleibt so lange im Betriebe, bis sich der stationäre Zustand ausgebildet hat. Die Hälfte der aus der fremden Stromquelle zugeführten Energie ist der gesamte Verlust in einer der beiden Maschinen, wenn sie ihre normale Leistung abgibt. Ist bei diesen Messungen Riemenantrieb nicht zu vermeiden, so sind die dadurch verursachten Verluste zu berücksichtigen.

d) Indikatormethode. Bei Riemenantrieb kann man den Wirkungsgrad ermitteln, wenn man den Verlust im Riemen mit hinreichender Genauigkeit angeben kann. Man läßt nach Entfernung des Riemens die Dampfmaschine leer laufen, nimmt mittels des Indikators ein Diagramm auf und ermittelt die Leerlaufarbeit der Dampfmaschine. Nachdem der Motor und die Dynamo mechanisch gekuppelt worden sind, wird die Dynamo so stark belastet, daß sie ihre normale Leistung abgibt. Mit Hilfe eines neuen Diagramms bestimmt man die Arbeit, die der Dampf jetzt leisten muß; sie betrage Q PS. Zieht man von Q die Leerlaufarbeit der Dampfmaschine und den Riemenverlust ab, so erhält man die auf die Dynamo übertragene Arbeit. Diese Methode liefert keine ganz zuverlässigen Resultate, weil ihr die Annahme zugrunde liegt, daß die Arbeitsverluste in der Dampfmaschine von ihrer Belastung unabhängig seien, was nicht der Fall ist.

Wird der Generator durch eine Dampfmaschine direkt angetrieben, und ist er nicht abkuppelbar, so kann man natürlich nur die Summe der Reibungsverluste in den beiden Maschinen bestimmen, so daß eine genaue Bestimmung des Wirkungsgrades nach der Montage ausgeschlossen ist.

Die Prüfung einer Dynamo erstreckt sich außerdem auf die Messung des Isolationswiderstandes und der Stärke der Isolation gegen Durchschlagen (Durchschlagsprobe). Wie die erstere Messung auszuführen ist, dürfte sich aus dem Kapitel 9 ergeben. Die Durchschlagsprobe wird mit einer 100% höheren Spannung als der normalen durchgeführt und erstreckt sich auf eine Prüfung der Wicklung gegen das Gestell und der Wicklung in sich.

Betriebsanleitung für Gleichstrommaschinen. — a) Aufstellung. Der Raum, in dem die Dynamo Aufstellung finden soll, muß trocken, staubfrei und mäßig temperiert sein.

Größere Maschinen werden auf einem festen Fundamente montiert. Um gute Isolierung gegen Erde zu erzielen, werden vielfach die Maschinen nicht unmittelbar auf das Steinfundament gestellt, sondern auf imprägnierte Holzschwellen, die als isolierende Zwischenlage dienen.

Es ist von großer Wichtigkeit, daß die Maschine so sicher aufgestellt wird, daß sie während des Betriebes nicht zittert.

Alle Teile der Maschine, auf jeden Fall aber die Bürsten und der Kollektor, müssen leicht zugänglich sein.

Bei Riemenantrieb ist es zweckmäßig, die Maschine auf Gleitschienen zu stellen, so daß Nachspannen des schlaff gewordenen Riemens leicht vorgenommen werden kann (Riemenspannvorrichtung). Beim Auflegen des Riemens ist darauf zu achten, daß er weder zu stark gespannt ist, weil sonst der Lagerdruck zu groß wird, noch zu lose, weil er sonst nicht gleichmäßig zieht und infolge Gleitens des Riemens Schwankungen im Lichte verursacht werden. Der Riemen soll überall gleich stark sein; er darf deshalb nur genähte oder geleimte Verbindungsstellen besitzen. Ferner ist darauf zu achten, daß der Riemen genau auf der Mitte der Riemenscheibe läuft, zu welchem Zwecke die Riemenscheibe ballig zu drehen ist.

b) Schmierölen der Lager. Die Lager der Dynamomaschinen werden zweckmäßig mit Ringschmierung versehen. Diese ist so eingerichtet, daß die im Lager laufenden Achsenenden mit losen Ringen umgeben werden, die in einem Ölbad laufen, das sich im unteren Teile des Lagers befindet. Die Ringe geraten mit der Achse in Rotation und schmieren so den Achsenstumpf in ausgiebiger Weise. Es findet also während des Ganges der Maschine eine fortwährende Ölzirkulation durch die Lager statt. — Vor dem ersten Anlassen nach der Montage werden die Lager durch Petroleum gereinigt, bevor man das Schmieröl eingießt. — In den ersten Betriebswochen ist das Öl öfters, etwa alle drei Tage, zu erneuern; später füllt man wöchentlich einmal nach, läßt etwa monatlich das Öl ab, reinigt es durch Filtrieren und ergänzt es durch frisches Öl.

Während des Betriebes dürfen die Lager nur mäßig warm werden; ein Heißlaufen der Lager deutet darauf hin, daß die Schmierung nicht ordnungsmäßig funktioniert, oder daß die Lager verschmutzt sind oder der Riemen zu stark gespannt ist.

c) Pflege des Stromabnehmers. Da der Kommutator der empfindlichste und zugleich auch der am stärksten in Anspruch genommene Teil der Gleichstrommaschine ist, so muß ihm eine sorgfältige Pflege zuteil werden, andernfalls sind rasche Abnutzung und Betriebsstörungen unvermeidlich. Der Kommutator muß glatt und vollkommen rund sein, weil sonst stärkere Funkenbildung erfolgt, die zu einer frühen Zerstörung führt. Es empfiehlt sich, ihn vor jeder Inbetriebsetzung der Maschine mit Schmirgelleinen unter Benutzung eines Holzes, das der Rundung des Stromabgebers angepaßt ist, ablaufen zu lassen, und zwar so lange, bis er völlig eben und rein ist. Wenn er stark angegriffen ist, muß grobes Schmirgelleinen genommen werden; jedoch soll eine

Abreibung mit feinstem Schmirgelpapier stets folgen, so daß die Oberfläche wie poliert erscheint. Es ist ratsam, bei dieser Arbeit die Bürsten abzuheben und die Schmirgelleinwand mit Maschinenöl oder Petroleum anzufeuchten. Besonders beim Ingangsetzen nach längerer Ruhepause darf das Abschmirgeln nicht versäumt werden, weil möglicherweise die Isolationen zwischen den Lamellen hervorgetreten sind, was bei feuchter Luft bisweilen vorkommt. Um bei Maschinen mit Kupfergewebebürsten die Bildung von Kupferstaub möglichst zu verhindern, empfiehlt es sich, den Kollektor regelmäßig vor dem Anlassen der Maschine und während des Betriebes von Zeit zu Zeit, etwa alle 2—3 Stunden, mit einem faserigen Lappen, der mit gutem Maschinenöl etwas eingefettet ist, abzureiben, so daß er mit einem ganz leichten Hauch des Schmiermittels überzogen wird. Bei den meisten Metallbürsten tritt ohne Schmierung nach kurzer Zeit ein „Fressen“ ein. Nach Messungen von H. Hellmund¹⁾ ist es wahrscheinlich, daß durch schwaches Öl der Übergangswiderstand nicht erhöht wird, daß aber auf jeden Fall, wenn eine Erhöhung des Widerstandes erfolgt, diese durch die Verringerung der Reibungsverluste aufgewogen wird. — Zuweilen wird günstigere Kommutierung (Verringerung der Funkenbildung) durch Erhöhung des Widerstandes an den Bürsten herbeigeführt. Man verwendet dann Schmiermittel, durch die die Reibung verringert, der Übergangswiderstand aber erhöht wird. Bei Verwendung von Kohlenbürsten kann man den Kollektor ab und zu mit etwas Vaselin bestreichen (übersflüssig bei guten Kohlenbürsten). Kupferstaub, der sich beim Abschmirgeln oder bei Benutzung von Kupfergewebebürsten während des Betriebes bildet, muß sorgfältig mittels Borstenpinsels oder Blasebalges entfernt werden.

Hat der Stromabnehmer seine runde Form verloren, so muß er abgedreht werden. Dieses geschieht in der Regel mittels Support und Drehstahl unter langsamer Drehung des Ankers. Bei kleineren Maschinen kann man das Abdrehen bewerkstelligen mittels einer Metallseite, die mit dem einen Ende fest gegen den Lagerraum gedrückt wird, so daß sie eine tangentielle Richtung beibehält. Beim Abdrehen des Kommutators ist mit der größten Vorsicht zu verfahren und nach dem Abdrehen nachzusehen, ob sich kein Grat an den einzelnen Lamellen gebildet hat, der vielleicht die Isolation zwischen ihnen überdeckt.

d) Bürsten. Sämtliche Bürsten sollen so gegeneinander versetzt sein, daß der ganze Stromabnehmer von ihnen bestrichen wird. Sind z. B. zwei Bürstenreihen vorhanden, so sollen die Bürsten der zweiten Reihe diejenigen Zonen (Ringe) des Kollektors bestreichen, die von den Bürsten der ersten Reihe nicht berührt werden. Man erzielt so einen gleichmäßigen Verschleiß des Kollektors in seiner ganzen Länge. — Die Bürsten sollen an ihrem unteren Ende abgeschrägt sein, und zwar soll die schräge Endfläche mit der Längsseite einen Winkel von etwa 45° bilden. Die Bürsten dürfen nicht mehr als zwei Lamellen gleichzeitig berühren. Die ganze Schrägfläche soll auf dem

¹⁾ E.-L. Z. 1902, S. 824.

Kollektor liegen; die Spitzen der Bürsten einer Reihe müssen eine gerade Linie bilden. Der Abstand der Bürstenspitzen einer Reihe von denen der folgenden Reihe muß gleich sein dem Umfange des Kollektors geteilt durch die Polzahl. Bei der Einstellung kann man sich eines Papierstreifens bedienen, dessen Länge gleich ist dem Bürstenabstande. — Die Bürsten sind so einzustellen, daß die Funkenbildung eine minimale ist. Über die Verschiebung der Bürsten während des Betriebes haben wir schon gesprochen (s. Ankerrückwirkung). — Ist die Maschine in normalem Betriebe und erfolgt noch Funkenbildung trotz vorgenommener Verschiebung der Bürsten, so versuche man, den Nest der Funken dadurch zu beseitigen, daß man die einzelnen auf demselben Bolzen sitzenden Bürsten gegeneinander verschiebt oder den Druck gegen den Kommutator vergrößert (oder eine andere Bürstensorte wählt). — Die Gewebebürsten müssen bei täglichem Betriebe jede Woche einmal herausgenommen und in Benzin gewaschen werden; nachdem sie wieder abgetrocknet sind, schneidet man mit einer Schere den an der Vorderkante entstandenen Grat ab und setzt wieder sorgfältig ein. — Beim Einsetzen neuer Kohlenbürsten werden diese der Rundung des Stromabgebers dadurch angepaßt, daß man zwischen die Kohle und den Kollektor ein Stück Schmirgelpapier, das mit der rauhen Seite der Kohle zugewendet ist, schiebt und dieses hin und her zieht. — Die Bürstenhalter müssen sich leicht auf dem Bolzen drehen lassen; die Federn, welche die Bürsten andrücken, dürfen nicht zu lose, aber auch nicht zu fest gespannt sein; es muß zwar ein guter Kontakt, aber kein unnötig starker Druck vorhanden sein. Man prüft durch Aufheben der Bürsten mit dem Finger den von ihnen auf den Kommutator ausgeübten Druck und achtet darauf, daß alle Bürsten den gleichen mäßig starken Druck ausüben. — Von den Bürsten eines und desselben Bolzens darf man während des Betriebes die Bürsten einzeln abheben, um sie von Schmutz zu reinigen und, falls sie abgesehlfen sind, vorzuschieben oder zu erneuern. Ein gleichzeitiges Abheben sämtlicher Bürsten eines Bolzens darf dagegen während der Stromlieferung nicht erfolgen, da der durch die Stromunterbrechung entstehende Lichtbogen Bürsten und Kommutator verbrennen und außerdem eine starke Spannungsschwankung erfolgen würde.

Sind einzelne Lamellen stärker von Funken angegriffen und abgenutzt als die übrigen, so ist dies ein Zeichen, daß die Drähte, die vom Anker zum Kollektor führen, mit den betreffenden Lamellen nicht fest verschraubt oder nicht genügend verlötet sind oder daß an einer anderen Stelle der Wicklung eine Verbindungsstelle mangelhaft ist.

Müssen während des Betriebes Arbeiten vorgenommen werden (z. B. Einstellen der Bürsten), so muß man namentlich bei Maschinen für hohe Spannungen darauf achten, daß man mit den Händen nicht einen zweiten stromführenden Teil oder das Maschinengestell berührt, weil man sonst einen „elektrischen Schlag“ erhalten kann. Es ist ratsam, unter die Füße isolierendes Material, z. B. ein trockenes Brett ohne Nägel, zu legen.

II. Wechselstrommaschinen.

Da wir in dem theoretischen Teile das Prinzip der Wechselstrommaschinen schon besprochen haben und ein Teil der Darlegungen über Gleichstrommaschinen auf Wechselstrommaschinen übertragen werden kann, so können wir uns in dem folgenden Abschnitte kurz fassen.

Bei Gleichstrommaschinen ist die Zahl der Ankerspulen, auch wenn nur zwei Pole vorhanden sind, eine große; bei Wechselstrommaschinen sind nur so viele Spulen vorhanden wie Pole. Während ferner bei Gleichstrommaschinen eine Spule nach der anderen zur vollen Wirkung kommt, ist bei Wechselstrommaschinen die Induktion in allen Spulen zu derselben Zeit gleich stark.

Wenn die Magnetpole, die gewöhnlich auf einem gußeisernen Rade befestigt sind, rotieren, so sind Vorrichtungen zur Abnahme der im feststehenden Anker induzierten Ströme nicht erforderlich; es genügt, die Enden der Ankerwicklung mit der äußeren Leitung zu verbinden. Rotiert der Anker, so müssen die Ströme durch Bürsten, die auf Ringen schleifen, abgenommen werden. Diese letztere Anordnung findet man seltener und im allgemeinen nur bei Maschinen für große Tourenzahlen, wenn z. B. die Dynamo durch eine Dampfturbine angetrieben wird. Der Kollektor kommt also in jedem Falle ganz in Wegfall, und deshalb kann man in Wechselstrommaschinen, zumal sie mit feststehendem Anker ausgerüstet werden können, Ströme von sehr hoher Spannung erzeugen. Da indessen die Erzeugung von sehr hohen Spannungen in der Maschine ihre Schattenseiten hat und man in den sehr betriebssicheren Transformatoren bei geringem Verluste die Spannung beliebig erhöhen kann, so geht man zweckmäßig über eine Maschinenspannung von zirka 7500 Volt nicht hinaus. Durch die Zwischenschaltung des Transformators wird das Kabelnetz, in dem infolge von Resonanzerscheinungen sehr starke Überspannungen (s. S. 273) entstehen können, von der Maschine vollständig getrennt. Um diese Trennung zu erzielen, schaltet man manchmal zwischen das Kabelnetz und die Maschine einen Transformator mit dem Übersetzungsverhältnisse 1 : 1.

Wie bei Gleichstromdynamos unterscheidet man auch hier zwischen Innenpol- und Außenpolmaschinen. Bei den Innenpolmaschinen rotiert fast immer das Magnetsystem, und es sind nur Schleifringe und Bürsten erforderlich, um der rotierenden Magnetwicklung den niedrig gespannten Gleichstrom zuzuführen. In unserer schematischen Fig. 84 sind N und S zwei sich gegenüberstehende Pole des Magnetrades, w ist die Ankerwicklung.

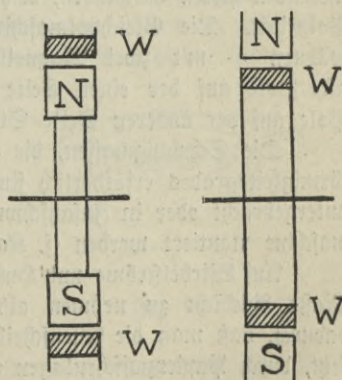


Fig. 84.

Fig. 85.

Bei den Außenpolmaschinen rotiert in der Regel der Anker (s. Fig. 85); jedoch kann man das Magnetsystem auch hier so anordnen, daß es in Rotation

verfetzt werden kann (s. Fig. 87). Da man in diesem Falle einen größeren Durchmesser des rotierenden Teiles erhält, so wird das natürliche Schwun-

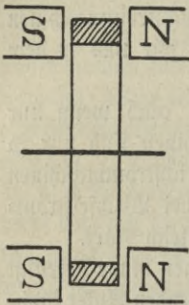


Fig. 86.

moment größer bzw. der Ungleichförmigkeitsgrad kleiner als bei den in Fig. 84 u. 85 skizzierten Anordnungen. Ferner ist noch folgender Umstand in Erwägung zu ziehen: Die Pole üben auf das Ankereisen anziehende Kräfte aus und umgekehrt; befinden sich die rotierenden Pole außerhalb des Ankers, so wirken diese Kräfte der Zentrifugalkraft entgegen, bei den Innenpolmaschinen aber in demselben Sinne. Bei den Außenpolmaschinen mit rotierendem Magnetkranz wird aber das Fundament

stark einseitig (auf Biegung) beansprucht; man findet daher diese Art der Ausführung bei neueren Maschinen nicht mehr.

Mit Rücksicht auf das magnetische Feld unterscheidet man zwischen Wechseipol- und Gleichpoltypen. Bei den ersteren bewegen sich die Spulen des Ankers, von dem wir annehmen, daß er der rotierende Teil sei, durch ein Magnetfeld, das sich von einem positiven Maximum (vor dem Nordpol), durch den Wert Null zu einem negativen Maximum (vor dem Südpol), wieder durch Null zu einem zweiten positiven Maximum zc. ändert. Schwankt das Feld zwischen einem Höchstwerte und einem Minimum, das entweder gleich Null oder gleich dem Felde des remanenten Magnetismus ist, so gehört die Maschine zur Gleichpoltype (Induktions- oder Induktortype). Meistens werden die Maschinen als Wechseipolmaschinen gebaut. Bei diesen ist nur ein Polkranz mit alternierenden Polen vorhanden, d. h. nebeneinanderstehende Pole haben verschiedene Polarität. Die Gleichpolmaschinen sind — um nur eine Anordnung zu erwähnen — mit zwei Magnetkränzen ausgerüstet, die sich gegenüberstehen; alle Pole auf der einen Seite des Ankers sind Nordpole (s. Fig. 86), alle Pole auf der anderen Seite Südpole¹⁾.

Die Schwungmassen, die zur Erzielung eines genügend kleinen Ungleichförmigkeitsgrades erforderlich sind, werden entweder in den Magneträdern selbst untergebracht oder in Zusatzschwungräder gelegt, die auf die Achse der Antriebsmaschine montiert werden (s. Kap. 5).

Auf Wirbelströme und Hysteresis ist bei Wechselstrommaschinen in höherem Maße Rücksicht zu nehmen als bei Gleichstrommaschinen; es geschieht dies dadurch, daß man die Eisenscheiben, aus denen man den Ankerkern zusammensetzt, durch Papierzwischenlagen zc. sorgfältig gegeneinander isoliert.

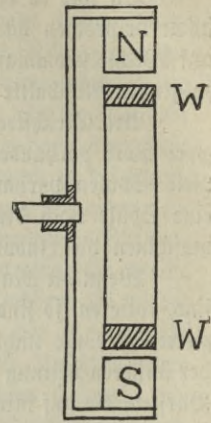


Fig. 87.

¹⁾ Kingdon hat eine Wechselstrommaschine gebaut, bei der alle Drähte, Magnetwicklung und Ankerwicklung, in Ruhe sind, die also weder Bürsten noch Schleifringe hat; hier ist der einzige sich drehende Teil ein Rad mit unterteilten Eisenvorsprüngen.

Die uns schon bekannten Unterschiede zwischen Ring- und Trommelanker, sowie zwischen glattem Anker, Loch- und Nutenanker finden wir hier wieder. Außerdem ist der Pol- oder Zackenanker zu erwähnen, der wie ein Magnetstern eine Reihe von Nuten aus Eisen aufweist, um die die Ankerwicklung gelegt wird. Am beliebtesten sind die Nutenanker wegen der Möglichkeit, eine gute mechanische Befestigung der Ankerdrähte und gute Isolation zu erzielen. Meistens wird auf dem Anker Spule an Spule gereiht, und zwar so, daß sie nebeneinander liegen oder übergreifen (Spulenanker, s. Fig. 88, in der ein Teil eines Drehstromankers abgebildet ist).

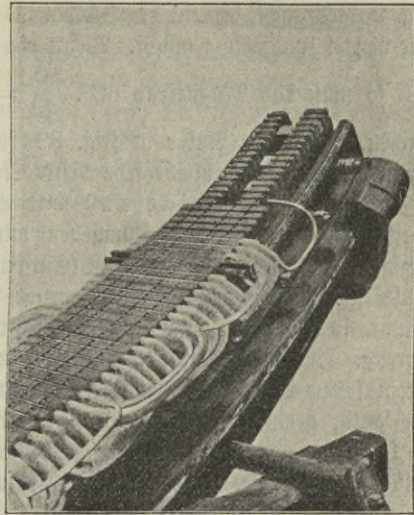


Fig. 88.

Die Drehstrommaschinen unterscheiden sich, wie sich schon aus den theoretischen Darlegungen in Kapitel 4 ergeben dürfte, von den Einphasenstrommaschinen nur durch die Wicklung des Ankers. Dieser besitzt drei Windungsgruppen, die so angeordnet sind, daß die in den einzelnen Gruppen induzierten Ströme um 120° , d. h. um $\frac{1}{3}$ Periode gegeneinander verschoben sind. In Fig. 89 ist der Anker R einer Drehstrommaschine und das Magnetrad M mit acht Polen dargestellt, beide ohne Drahtwicklung. Die Zahl der Nuten ist dreimal so groß wie die Anzahl der Pole. Aus

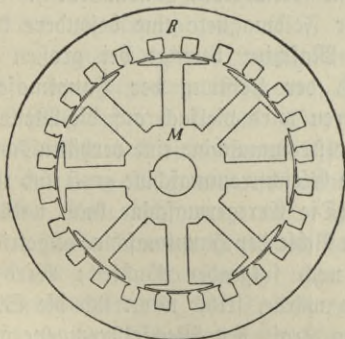


Fig. 89.

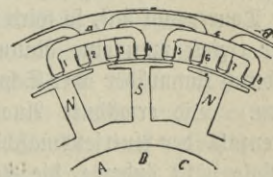


Fig. 90.

der Fig. 90 kann erschen werden, wie die Wicklungen gelegt werden. Die Nuten sind mit den Ziffern 1, 2, 3 etc. bezeichnet. Die Nuten 1 und 4 nehmen eine Wicklung auf (erste Phase, mit a bezeichnet), ebenso 3 und 6, 5 und 8 etc. Die in den Windungen a und d induzierten Ströme befinden sich in Phasengleichheit, schaltet man daher a und d hintereinander, so addieren sich die betreffenden

elektromotorischen Kräfte algebraisch. Gleiches gilt für die Wickelungen b und e, jedoch sind die in ihnen erzeugten Ströme um $\frac{1}{3}$ Periode gegen die ebenerwähnten Ströme verschoben; denn die Periode ist gleich der Zeit, die der Pol A in Fig. 90 gebraucht, um in die Stellung C einzurücken oder in der das Magnetrad eine viertel Umdrehung macht. Wenn die Periodenzahl 50 pro Sekunde betragen soll, so muß das Magnetrad $60 \cdot \frac{50}{4} = 750$ Umdrehungen in der Minute machen. Soll der Anker in Fig. 89 für die Erzeugung von Einphasenstrom gewickelt werden, so bleibt jede dritte Rute frei.

Die Erregerwicklung wird entweder in der Weise angeordnet, daß jeder Pol mit Windungen umgeben wird, oder daß für alle Pole nur eine einzige Erregerspule vorhanden ist (Einspulenmagnet). Obschon man im letzteren Falle mit einer geringeren Kupfermenge und einer kleineren Erregerenergie auskommt, so gibt man doch aus technischen Gründen der ersteren Anordnung den Vorzug. Für die Bewickelung benutzt man entweder isolierten Draht, der von einem festen Spulenkasten aufgenommen wird, oder sie besteht aus einer blanken, hochkantig gewickelten Kupferspirale; man macht also in dem Produkte $n \cdot J = \text{Amperewindungen}$ entweder n groß oder J groß. Es genügt im letzteren Falle eine geringe Isolation, weil zwischen benachbarten Windungen nur eine ganz kleine Potentialdifferenz besteht.

Den in der Wechselstrommaschine erzeugten Strom kann man nicht ohne weiteres für die Erregung der Feldmagnete verwenden, da die Feldmagnete ihre Polarität nicht ändern dürfen und diese ja von der Stromrichtung abhängig ist. Will man keine fremde Stromquelle für die Erregung zu Hilfe nehmen, so muß man den in einer oder mehreren Spulen des Ankers erzeugten Wechselstrom mittels eines Kommutators in Gleichstrom umwandeln¹⁾. Fast immer benutzt man für die Erregung der Feldmagnete eine besondere kleine Gleichstrommaschine. Die Leistung dieser Maschine beträgt bei großen Generatoren 1–2%, bei kleineren 2–4% der Leistung der Hauptmaschine. Die Erregermaschine größerer Generatoren wird vielfach auf die Welle der Wechselstrommaschine gesetzt. Da die Wechselstrommaschine eine verhältnismäßig kleine Tourenzahl hat, so wird die aufgesetzte Gleichstrommaschine groß und teuer. Dafür erzielt man eine Raumersparnis. (Die Erregermaschine kann natürlich auch durch Zahnräder oder Schnecken von der Achse der Hauptmaschine angetrieben werden.) Die erwähnte Anordnung hat noch folgenden Nachteil: Wird die Tourenzahl der Antriebsmaschine kleiner, so würde, selbst wenn sich die Stärke der Pole nicht änderte, die elektromotorische Kraft des Wechselstromgenerators abnehmen. Da nun infolge der verringerten Tourenzahl gleichzeitig der Erregerstrom schwächer wird, so wird die Spannungsabnahme des Wechselstromes noch vergrößert. Vielfach wird für den Antrieb der Erregermaschine ein besonderer Motor vorgesehen, eine kleine Dampfmaschine oder ein Elektromotor, dem von den Hauptammelschienen Wechselstrom zugeführt wird; in anderen

¹⁾ Näheres s. Handbuch der Elektrotechnik, Bd. 4 S. 126 ff.

Fällen verwandelt man einen Teil des Wechselstromes in einem Umformer in Gleichstrom. Ist die Gleichstromdynamo auf die Welle des Generators gesetzt, so daß jede Wechselstrommaschine ihre separate Erregung hat, so verwendet man als Erregermaschine zweckmäßig eine Serienmaschine. Sollen sämtliche Generatoren eine gemeinsame Erregerstromquelle (Zentralerregung) haben, so ist die Nebenschlußmaschine geeigneter; in Neuanlagen bevorzugt man die Nebenschlußmaschine, weil man bei ihrer Verwendung zugleich die Zentrale mit Gleichstrom beleuchten kann. Endlich erwähnen wir noch den einfachsten Fall, nämlich die Stromzufuhr aus einer vorhandenen Akkumulatorenbatterie. Da der ganze Betrieb gestört ist, wenn die Erregermaschine versagt, so muß eine genügende Reserve vorgesehen werden.

Regulierung der Spannung. Da die in den einzelnen Spulen bei konstanter Tourenzahl induzierten elektromotorischen Kräfte von der Feldstärke abhängen, so kann man die Wechselstromspannung dadurch erhöhen oder erniedrigen, daß man den Erregerstrom verstärkt oder schwächt. Benutzt man als Erregermaschine eine Hauptstrommaschine, so legt man einen Regulierwiderstand zwischen die Erregermaschine und die zu speisenden Feldmagnete der Wechselstrommaschinen; man reguliert also direkt nur die Stromstärke. Bei Verwendung der Nebenschlußmaschine reguliert man mittels des Nebenschlußwiderstandes die Spannung und schaltet noch zwischen die Erregermaschine und die Feldmagnete einer jeden Wechselstrommaschine zwecks feinerer Regulierung einen Rheostat ein.

Man hat Vorrichtungen erfunden, durch welche die Kurbel der Regulierwiderstände selbsttätig gedreht wird. Durch ein Relais wird, sobald die Spannung einen gewissen oberen oder unteren Wert erreicht hat, ein neuer Stromkreis geschlossen, in dem ein kleiner Motor liegt. Dieser betätigt die Kurbel des Regulators.

Wenn für die Erregung ein Umformer benutzt wird, so kann man mit Hilfe der folgenden Anordnung die Wechselstromspannung bei induktionsfreier Belastung konstant halten. Der Generator hat zwei Magnetwickelungen, wie die Compound-Gleichstrommaschine. Die Hauptwicklung wird durch irgendeine Gleichstromquelle gespeist, während in die Hilfswickelung der Umformer Strom schickt. Dem Umformer wird aus einem Transformator Strom zugeführt, durch dessen primäre Wickelung der ganze Wechselstrom fließt. Mit steigender Belastung des Generators steigt die primäre und daher auch die sekundäre Klemmspannung E_2 des Transformators. Das Wachsen von E_2 hat zur Folge, daß an der Gleichstromseite des Umformers die Spannung E_3 in die Höhe geht; denn es besteht, wie wir später sehen werden, zwischen E_2 und E_3 ein ganz bestimmtes, konstantes Verhältnis. Wenn E_3 aber größer wird, so wächst auch der durch die Hilfswickelung des Generators fließende Strom, so daß die Erregung verstärkt wird. Diese Art der Compoundierung ist schon an und für sich kompliziert. Es kommt aber noch eine Schwierigkeit hinzu, wenn die Belastung eine induktive ist und sich der Wert des Leistungsfaktors ändert. Die Compoundierung muß dann so eingerichtet sein, daß sie nicht nur auf die

Wattströme, sondern auch auf die wattlosen Ströme reagiert. Deblanc und Steinmetz haben Methoden erfunden, dieser Schwierigkeit Herr zu werden; über die praktische Verwendung dieser Methoden ist jedoch wenig bekannt geworden.

Auf die Verwendung von Transformatoren mit abschaltbaren Spulen und von Zusatztransformatoren zur Spannungsregulierung des Netzes sei hier nur aufmerksam gemacht.

Ankerückwirkung. Daß eine Ankerückwirkung bei Gleichstrommaschinen vorhanden ist, sieht man leicht ein; dagegen ist es nicht ohne weiteres klar, daß die in einem Anker erzeugten Wechselströme einen Einfluß auf das magnetische Feld ausüben können. In jeder Ankerpole ändert der Strom während einer Umdrehung der Maschine so oft seine Richtung, wie Pole vorhanden sind. Der Kraftlinienfluß einer jeden Spule ändert also fortwährend seine Stärke und Richtung; er ist mit der Stromstärke stets in Phasegleichheit. Wirkt der Strom in einer bestimmten Spule auf einen Pol magnetisierend, so wirkt er auf den folgenden Pol nach $\frac{1}{2}$ Periode ebenfalls magnetisierend; denn es ist zu berücksichtigen, daß der Strom mittlerweile seine Richtung geändert hat. Befindet sich der Ankerstrom mit der elektromotorischen Kraft in derselben Phase, so sind gerade so viele Pulsationen des Kraftlinienflusses vorhanden, die auf das Feld der Magnete verstärkend wirken, wie Pulsationen, durch die das Feld geschwächt wird. Nähert sich nämlich eine Spule einem bestimmten Pole, etwa einem Nordpole, und wirkt sie schwächend auf den Magnetismus, so wirkt sie, wenn sie sich von unserem Pole entfernt, verstärkend auf den Magnetismus, weil der Strom, sobald sich die Spule vor dem Pole befindet, seine Richtung ändert. Schon wegen der Selbstinduktion im Anker ist der Strom gegen die Spannung verschoben. Wird die Selbstinduktion durch eine im Stromkreise vorhandene Kapazität nicht aufgehoben, so hat der Strom Nachheilung, d. h. es ändert sich die Stromrichtung nicht in dem Momente, in dem unsere Spule einem Pole gerade gegenübersteht, sondern später. Wie man leicht nachweisen kann, wirkt der Ankerstrom jetzt schwächend auf das magnetische Feld, und zwar um so mehr, je größer der Phasenverschiebungswinkel ist. Diese Rückwirkung hat natürlich einen Spannungsabfall zur Folge, so daß man den Erregerstrom verstärken muß. — Gilt der Strom der elektromotorischen Kraft voraus, so wird das magnetische Feld verstärkt. Es gilt also die Regel: Nacheilender Strom wirkt schwächend, voreilender verstärkend auf das magnetische Feld der Maschine. Wird eine Wechselstrommaschine kurz geschlossen, so ist, da der Ankerwiderstand ziemlich klein ist, die Phasenverschiebung nahezu gleich 90° ; fast der ganze Ankerstrom ist also wattlos, so daß die Ankerückwirkung sehr stark ist. Dies hat eine starke Abnahme der Klemmspannung zur Folge. Die Kurzschlußstromstärke ist nahezu proportional der Erregerstromstärke.

Die Leistung einer Einphasenstrommaschine ist bei induktionsfreier Belastung gleich der effektiven Klemmspannung multipliziert mit der effektiven Stromstärke. Bei induktiver Belastung hat man das Produkt noch mit $\cos \varphi$

zu multiplizieren (näheres s. S. 64). Die Leistung ist wie bei Gleichstrommaschinen durch die zulässige Erwärmung der Ankerdrähte begrenzt; hierbei besteht ein Unterschied zwischen Wattströmen und wattlosen Strömen nicht. Wenn also eine Maschine dauernd bei induktionsfreier Belastung J Ampere im Maximum abgeben kann, so darf man ihr auch bei induktiver Belastung dauernd nicht mehr als J Ampere entnehmen. Durch Selbstinduktion im Stromkreise wird also die wirkliche Leistung der Maschine verringert.

Ist eine Selbstinduktion von L Henry mit einem induktionsfreien Widerstand von w Ohm hintereinander geschaltet, so gibt die Maschine bei einer bestimmten elektromotorischen Kraft die größte Leistung an den betreffenden Stromkreis ab, wenn die Beziehung besteht $w = 2\pi \cdot n \cdot L$, wo n die Periodenzahl ist. Die Phasenverschiebung ist in diesem Falle, da $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi n L}{w} = 1$, gleich 45° .

Bezüglich der Leistung einer Drehstrommaschine verweisen wir auf das 5. und 9. Kapitel.

Wirkungsgrad. Außer den bei den Gleichstrommaschinen aufgezählten Verlusten kommt noch der auf die Erregermaschine übertragene Effekt hinzu. Sitzt die Erregermaschine direkt auf der Welle des Generators, so ist die Erregerenergie schon in der dem Generator zugeführten Leistung enthalten. Bei gleicher Leistung haben Drehstrommaschinen einen höheren Wirkungsgrad als Einphasenmaschinen. Ist nämlich ein Maschinengestell gegeben, so kann es als Einphasen- oder Drehstromanker gewickelt werden; im ersten Falle beträgt die Leistung etwa 60—75% derjenigen der Dreiphasenmaschine. Die prozentualen Reibungsverluste sind also bei Drehstrommaschinen kleiner. Ferner muß eine Einphasenmaschine bei gleicher Leistung und gleicher Spannung einen stärkeren Strom abgeben wie die Drehstrommaschine; die Joulesche Wärme, Ankerückwirkung und Streuung werden infolgedessen größer. Der Wirkungsgrad der Wechselstromgeneratoren, besonders der Drehstrommaschinen, erreicht sehr hohe Werte und ist noch sehr günstig, auch wenn die Belastung weit unter der normalen bleibt. Moderne Drehstrommaschinen für 700—800 Kilowatt Leistung haben bei voller induktionsfreier Belastung einen Wirkungsgrad von etwa 95%; bei halber Belastung kann man noch immer mit etwa 90% rechnen.

Der Wirkungsgrad wird beeinflusst durch den Wert, den $\cos \varphi$ (Leistungsfaktor) hat, oder durch die Selbstinduktion im ganzen Stromkreise. Denn die Grenze, bis zu der man die Maschine belasten darf, ist, wie schon gezeigt, durch die Stromstärke gegeben. Je kleiner nun $\cos \varphi$ ist, um so größer ist bei der maximal zulässigen Stromstärke die wattlose Komponente oder um so kleiner ist die wirkliche Leistung. Der Verlust im Anker (Joulesche Wärme, Wirbelströme, Hysteresis) ist aber vollständig unabhängig von dem Werte des Leistungsfaktors.

Vorzüge und Nachteile. Hier sollen auch die Vorzüge und Nachteile der Wechselströme selbst aufgezählt werden. Außer den schon erwähnten Vorzügen, nämlich der Möglichkeit, in der Maschine selbst hohe Spannungen zu erzeugen, und dem Wegfalle des Kollektors, sind zu erwähnen die Transformations-

fähigkeit und bei Kraftübertragungen mittels Drehstrom eine Kupferersparnis von zirka 25% bei $\cos \varphi = 1$. Diesen Vorzügen stehen folgende Nachteile gegenüber: 1. Wechselströme sind zum Laden von Akkumulatoren und für elektrolytische Prozesse nicht geeignet, 2. die Parallelschaltung der Generatoren ist mit Schwierigkeiten verknüpft, 3. die Belastung des Netzes durch wattlose Ströme infolge der Selbstinduktion und Kapazität der Generatoren, der Leitungen und Motoren, daher schlechte Ausnutzung des Materials und Vergrößerung der Generatoren, 4. die geringere Ökonomie der Wechselstrombogenlampen gegenüber den Gleichstromlampen, 5. die Tourenregulierung der Motoren ist nicht innerhalb so weiter Grenzen möglich als bei Gleichstrom, 6. die den Einphasenstrommotoren anhaftenden Mängel; endlich ist noch zu erwähnen, daß die Induktionswirkungen auf Telegraphen- und Telephonleitungen größer sind.

Die sogenannten asynchronen Wechselstromgeneratoren wollen wir erst dann behandeln, wenn wir uns mit den Eigenschaften der Wechselstrommotoren näher vertraut gemacht haben.

III. Die Parallelschaltung von Dynamomaschinen.

Nur selten wird in einer elektrischen Zentrale der Stromkonsum durch eine einzige Dynamomaschine gedeckt; es werden vielmehr meistens zwei oder mehrere Maschinen vorgesehen. Wenn nämlich nur eine einzige Dynamomaschine auf das Netz arbeitet, so muß diese und natürlich auch ihre Antriebsmaschine so groß gewählt werden, daß sie, wenn wir von der Verwendung der Akkumulatoren absehen, dem Maximalverbrauche gewachsen ist. Das Maschinenaggregat wird daher während eines großen Teiles des Tages, besonders wenn die Stromabgabe der Zentrale für Beleuchtungszwecke überwiegt, nur schwach belastet sein und mit ungünstigem Wirkungsgrade arbeiten. Ferner würde, wenn an einer Maschine eine Reparatur vorgenommen werden muß, die Stromlieferung ganz ausgesetzt werden müssen.

Sind zwei oder mehrere Dynamos vorhanden, so wird, sobald die arbeitende Maschine an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angelangt ist und eine Steigerung des Konsums zu erwarten ist, eine zweite Dynamo parallel geschaltet. Wir betrachten zunächst die

1. Parallelschaltung von Gleichstrommaschinen. a) Nebenschlußmaschinen. Das Schaltungschema ist aus der Fig. 91 zu ersehen. M_1 ist die schon im Betrieb befindliche Maschine, M_2 die Maschine, die parallel geschaltet werden soll. Die Maschinen müssen zunächst richtig mit den Sammelschienen S verbunden sein. Wenn Zweifel über die Polarität besteht, so ist eine Prüfung in der im Kapitel 12 beschriebenen Weise vorzunehmen. Sind die Maschinen bei der Montage richtig angeschlossen worden, und wird der Drehungssinn der Dynamomaschine nicht geändert, so braucht später eine Polprüfung nicht mehr stattzufinden. Ist richtiger Anschluß vorhanden, so wird die Maschine M_2 bei geöffnetem Schalter mittels des Magnetregulators so stark erregt, daß die vom Voltmeter V_2 angegebene Spannung mit der Klemmspannung der Maschine M_1

übereinstimmt. Man muß also während der Regulierung die beiden Voltmeter V_1 und V_2 beobachten. Sind die Spannungen einander gleich, so wird M_2 mittels des Hebels H_2 auf das Netz geschaltet. (Das in der Zeichnung horizontale Stück von H_1 ist natürlich gegen die anderen Teile des Schalters isoliert, ebenso bei H_2 .) Nach dem Einschalten verteilt man die Belastung dadurch, daß man entweder die elektromotorische Kraft von M_2 erhöht oder diejenige von M_1 erniedrigt. Da im ersten Falle die Netzspannung steigt, im zweiten fällt, so wird man am besten abwechselnd die Belastung der einen Maschine vergrößern und die der zweiten erniedrigen.

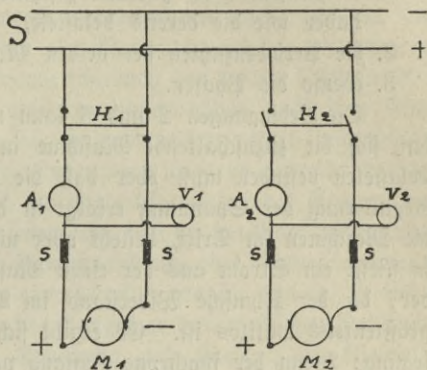


Fig. 91.

Sind die Spannungen verschieden, so fließt aus der Maschine mit der höheren Klemmspannung ein Strom in die zweite Dynamo. Durch diesen Strom wird die Klemmspannung der ersten Maschine erniedrigt und die der zweiten erhöht, weil bei der ersten Maschine der Spannungsverlust im Anker und die Ankerückwirkung größer und bei der zweiten kleiner werden. Der Strom nimmt nun eine solche Stärke an, daß die beiden Klemmspannungen einander gleich werden — Ausgleichstrom.

Soll eine Maschine ausgeschaltet werden, so wird sie zuerst durch Verringerung der Klemmspannung entlastet, weil sonst infolge der Selbstinduktion eine starke Funkenbildung erfolgt und eventuell die Isolation der Maschine beschädigt werden kann; außerdem würde ein plötzliches Ausschalten ungünstig auf die andern Maschinen einwirken. Man kann das Durchschlagen im Nebenschluß durch Kurzschließung der Magnetwicklung verhindern.

b) Compoundmaschinen. Man verbindet diejenigen Bürsten bzw. Klemmen, von denen die Compoundwicklungen (Hauptstromwicklungen) abzweigen und die gleiche Polarität haben, durch eine Leitung miteinander. Wird diese Leitung, die Ausgleichsleitung, nicht gezogen, so sendet diejenige der parallel geschalteten Maschinen, die die höhere elektromotorische Kraft hat, einen Strom nach der anderen Maschine, der durch die Compoundwicklung der letzteren in entgegengesetztem Sinne wie der normale Strom fließt. Wird in die Ausgleichsleitung ein Ausschalter gelegt, was im allgemeinen nicht nötig ist, so ist dieser zuerst zu schließen. Hierauf reguliert man mittels des Nebenschlußregulators die Spannung der zuzuschaltenden Maschine so lange, bis sie gleich oder $1-1\frac{1}{2}\%$ kleiner als die der im Betrieb befindlichen ist und schaltet dann parallel.

Vor dem Ausschalten wird mittels des Nebenschlußregulators oder durch Verringerung der Tourenzahl die Leistung allmählich so weit vermindert, daß sie nahezu Null wird.

Ungleich schwieriger als bei Gleichstrommaschinen gestaltet sich

2. die Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen¹⁾. Bevor man die Parallelschaltung vornimmt, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. die Maschine, die parallel geschaltet werden soll, muß dieselbe Spannung haben wie die bereits belastete,
2. die Periodenzahlen der beiden Maschinen müssen übereinstimmen,
3. ebenso die Phasen.

Die Bedingungen 2 und 3 kann man zusammenfassen zu der Forderung, daß sich die zuzuschaltende Maschine in Synchronismus mit den schon belasteten befinden muß oder daß die Maschinen im Tritt sein müssen. Die Regulierung der Spannung erfolgt in der früher beschriebenen Weise. Sind die Maschinen im Tritt, besteht aber nicht Übereinstimmung in der Spannung, so fließt ein Strom aus der einen Maschine in die andere (Ausgleichsstrom), der, da der Ohmsche Widerstand im Vergleich zur Selbstinduktion klein ist, größtenteils wattlos ist. Es ergibt sich dies auch schon durch folgende Überlegung: Wenn der synchrone Zustand vorhanden ist, so hat die zuzuschaltende Maschine M_1 ihre richtige Tourenzahl, ihr Gang kann also durch einen aus M_1 ihr zufließenden Strom weder beschleunigt noch verzögert werden. Daher leistet der Ausgleichsstrom keine mechanische Arbeit.

Haben die Maschinen gleich viele Magnetpole, so ist die Forderung 2 erfüllt, wenn die Tourenzahlen die gleichen sind; ist das nicht der Fall — was wohl als Ausnahme anzusehen ist —, so muß das Produkt aus Tourenzahl und Polzahl für beide Maschinen denselben Wert haben.

Die elektromotorischen Kräfte befinden sich in derselben Phase, wenn bei gleicher Periodenzahl das positive Maximum der elektromotorischen Kraft bei beiden Maschinen in demselben Momente vorhanden ist.

Wenn die Maschinen nicht im Tritt sind, wenn z. B. die Maschinen Ströme von verschiedener Periodenzahl liefern, so fließt in das Netz ein unregelmäßiger Strom; die resultierende Kurve der elektromotorischen Kraft hat hohe Wellenberge und niedrige.

Wir wollen vorläufig annehmen, daß die Parallelschaltung richtig vorgenommen ist. Nun wissen wir, daß während jeder Umdrehung der Antriebsmaschine, die eine Dampfmaschine sein möge, Änderungen in der Umfangsgeschwindigkeit vorkommen. Es wird also während jeder Umdrehung Momente geben, in denen der Gang der Maschine M_1 schneller ist als der Gang von M_2 , und es wird während jeder Umdrehung Momente geben, wo das Umgekehrte der Fall ist. Da die Erregungen konstant bleiben, so werden während jeder Umdrehung Ungleichheiten in der Spannung vorkommen, und zwar wird die schneller laufende Maschine die größere elektromotorische Kraft haben. Infolgedessen zirkulieren Ausgleichsströme zwischen den beiden Maschinen. Diese wirken auf die langsamer laufende Maschine beschleunigend, während der Gang der schneller

¹⁾ Eine ausführliche Behandlung des Gegenstandes findet man in: Der Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen von Dr. G. Benischke. Braunschweig. 1902.

laufenden Maschine, da sie an die langsamere Arbeit abgibt, verzögert wird; der Synchronismus wird wiederhergestellt. Die infolge der Ungleichförmigkeit des Ganges der Antriebsmaschinen auftretenden Ausgleichsströme sind also größtenteils Wattströme; sie werden dann am stärksten sein, wenn die Parallelschaltung gerade in dem Momente vorgenommen wird, in dem die Kurbelgeschwindigkeit der einen Maschine ein Maximum und die der anderen ein Minimum ist oder wenn die Phasenverschiebung der beiden Kurbeln 90° beträgt. Die Ausgleichsströme sind nicht nur unmittelbar nach dem Einschalten vorhanden — sie wiederholen sich vielmehr während jeder Umdrehung; es werden durch sie zwar Geschwindigkeitsänderungen während einer Umdrehung verursacht, dagegen kann durch sie nicht die Ungleichförmigkeit des Ganges der Antriebsmaschine beseitigt werden. Wir sehen also, daß bei der Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen, die durch Dampfmaschinen oder Gasmotoren angetrieben werden, auch die Kurbelstellung einen Einfluß ausübt. Da bei Riemen- oder Seilantrieb die Ungleichförmigkeiten des Ganges in dem elastischen Zwischengliede durch stärkere oder schwächere Spannung und Gleiten des Riemens oder Seiles ausgeglichen werden, so gilt das eben Gesagte nur bei direktem Antriebe.

Bevor wir auf das Verfahren bei der Parallelschaltung näher eingehen, wollen wir auf die Wirkungsweise der Dampfmaschinenregulatoren noch einmal zurückkommen.

Der Zentrifugalregulator tritt in Tätigkeit, wenn sich die Tourenzahl der Maschine ändert; da letzteres der Fall ist, wenn die Belastung größer oder kleiner wird, so dürfen wir auch sagen, daß die Wirkungsweise des Regulators von der Belastung der Maschine abhängig ist, d. h. wenn ein Regulator auf eine bestimmte Tourenzahl einregulieren soll, so muß die Maschine eine ganz bestimmte Belastung haben. Es ergibt sich, daß man schon vor dem Parallelschalten den Regulator beeinflussen muß und daß dieses auch geschehen muß, wenn man die Belastung nach vorgenommener Parallelschaltung verteilen will. Nehmen wir, um bei der Belastungsverteilung zu verweilen, an, daß M_1 vollbelastet und M_2 zwar schon parallel geschaltet ist, aber noch keine Energie an das Netz abgibt. Bei den Gleichstrommaschinen kann man Belastung auf M_2 übertragen, wenn man die elektromotorische Kraft von M_2 erhöht. Dieses Mittel genügt hier nicht. Soll nämlich M_2 Belastung übernehmen, so muß eine verstärkte Dampfzufuhr erfolgen, der Regulator muß in Tätigkeit treten, die Dampfmaschine — und mit ihr M_2 — müßte also, damit erhöhte Dampfzufuhr erfolgen kann, langsamer laufen. M_2 ist aber mit M_1 elektrisch gekuppelt und diese Kuppelung wirkt wie eine mechanische, starre Verbindung. Da M_1 die Tourenzahl von M_2 aufrecht hält, so kann der Regulator nicht funktionieren.

Soll also eine Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen erfolgen, so müssen wir Mittel zu Hilfe nehmen, die eine verstärkte oder verminderte Dampfzufuhr gestatten, ohne daß eine Änderung der Tourenzahl erfolgt. Diese Mittel (Veränderung der Spannung einer Feder oder Verschiebung eines Laufgewichtes)

genauer zu beschreiben, überschreitet den Rahmen dieses Buches. Verstellt man in einer Gruppe parallel geschalteter Maschinen den Regulator einer der antreibenden Maschinen, so wird bewirkt, daß sich deren Leistung entweder erhöht oder erniedrigt, da ihre Umdrehungszahl durch das Bestreben der Wechselstrommaschinen, im Synchronismus zu verharren, im großen und ganzen dieselbe bleibt.

Die Verstellung des Dampfmaschinenregulators muß vom Schaltbrette aus erfolgen, da Meßapparate zu beobachten und auch der Magnetregulator zu bedienen ist. Man nimmt daher kleine Elektromotoren zu Hilfe.

Wir wollen jetzt zusehen, wie man sich vergewissern kann, ob die Bedingung 3 (nämlich die Phasengleichheit) erfüllt ist. Man bedient sich hierbei des Phasenzeigers, Phasenindikators. Als solchen benützt man entweder ein Voltmeter oder eine Glühlampe bzw. mehrere hintereinander geschaltete Glühlampen. Ist das Phasenvoltmeter zwischen den Schalthebel H_2 (s. Fig. 91) eingeschaltet, sind also die beiden Punkte links durch einen Draht überbrückt und die beiden Punkte rechts mit dem Voltmeter verbunden, so daß es auch bei geöffnetem Schalter mit den Sammelschienen verbunden ist, so kann zunächst aus M_1 Strom in das Voltmeter gelangen, aber auch aus M_2 , denn die beiden Sammelschienen werden überbrückt durch die eingeschalteten Lampen oder Motoren oder die Ankerwicklung von M_1 . Sind die beiden Maschinen vollständig im Synchronismus, und sind die maximalen Werte der beiden elektromotorischen Kräfte und daher auch die effektiven Spannungen einander gleich, so fließt durch das Voltmeter kein Strom; denn es ist zu beachten, daß sich die beiden nach dem Voltmeter hinfließenden Ströme in jedem Momente bekämpfen.

Wenn die Maschinen vom synchronen Gange entfernt sind, so führt der Zeiger des Voltmeters periodische Bewegungen aus. Denn es wechseln dann Momente, in denen sich die elektromotorischen Kräfte aufheben, mit solchen, in denen sie sich addieren, und die zwischen dem Maximum und dem Werte Null der resultierenden elektromotorischen Kraft liegende Zeit hat eine relativ große Dauer. Da es keine Geschwindigkeitsregulatoren gibt, die längere Zeit konstante Tourenzahl aufrecht erhalten, so dauert der synchrone Zustand vor dem Einschalten nur kurze Zeit. Man muß daher in dem Augenblicke, in dem der Zeiger des Voltmeters die kleinste Ablenkung hat bzw. bei Null steht, rasch einschalten. Wenn der richtige Moment verpaßt wird, so können beträchtliche, die Netzspannung beeinflussende Ausgleichsströme in die langsamer laufende Maschine fließen. Man schaltet dann aber nicht wieder aus, da sich die Maschinen in kurzer Zeit von selbst synchronisieren.

Statt des Phasenvoltmeters kann man, wenn es die Maschinenspannung zuläßt, eine oder zwei hintereinander geschaltete Glühlampen (Phasenlampen) verwenden. Der Synchronismus ist erreicht, wenn die Glühlampe erlischt.

Ob schon aus dem Vorhergehenden schon entnommen werden kann, wie die Parallelschaltung erfolgt, so soll doch das Verfahren kurz im Zusammenhang beschrieben werden. Mittels der am Regulator der Dampfmaschine angebrachten Verstellvorrichtung wird die Tourenzahl so reguliert, daß der

Bedingung 3 (Gleichheit der Periodenzahlen) möglichst Genüge geleistet wird. Hierauf wird die Maschine M_2 mit Hilfe des Magnetregulators so stark erregt, daß die Spannung, die das Voltmeter V_2 (s. Fig. 92) angibt, mit der an V_1 abgelesenen übereinstimmt. Sodann wird unter Beobachtung des Phasenindikators dadurch, daß man den Geschwindigkeitsregulator beeinflusst, der synchrone Gang herbeigeführt.

Ändert sich hierbei infolge der Beschleunigung oder Verzögerung der Antriebsmaschine die Spannung, so wird die Erregung geändert. Endlich wird, sobald bei gleicher Spannung Synchronismus vorhanden ist, durch Drehung des Schalters M_2 an das Netz angeschlossen. In unserem Schema ist eine Phasenlampe PL in Parallelschaltung mit einem Voltmeter (PV) angeordnet; der Phasenvergleich ist mit gleichnamigen Polen verbunden. Der Weg des Stromes ist, wenn wir annehmen, daß M_1 die höhere Spannung hat, folgender:

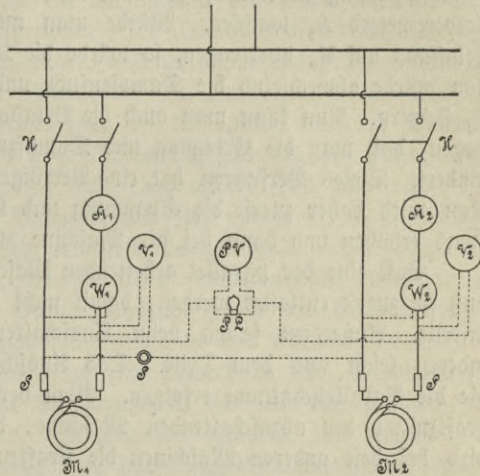


Fig. 92.

Positiver Pol von M_1 , der in dem betrachteten Momente der links gelegene sei, durch die untere Verbindungsleitung, in der sich die Sicherung S befindet, durch die Maschine M_2 , durch die Sicherung S, durch PV bzw. PL nach dem negativen Pole von M_2 . Durch die Sicherung S in der Verbindungsleitung wird die Phasenlampe vor dem „Durchbrennen“ geschützt.

Nach dem Einschalten erfolgt die Verteilung der Belastung. Wir wissen schon, daß eine Vergrößerung der Spannung von M_2 nicht den gewünschten Erfolg hat und nur bewirkt, daß ein Ausgleichsstrom aus M_2 nach M_1 fließt. Es muß dafür gesorgt werden, daß die Dampfzufuhr erhöht wird, ohne daß M_2 eine andere Tourenzahl annimmt. Andererseits genügt eine Erhöhung der Dampfzufuhr allein auch nicht, der Maschine M_2 Belastung aufzuzwingen; M_2 würde schneller laufen als M_1 und infolgedessen einen Ausgleichsstrom nach M_1 schicken, der so stark ist, daß die beiden Maschinen im Tritt bleiben. Steigerung der Dampfzufuhr und der Erregung müssen also möglichst gleichzeitig erfolgen. Wenn zwischen den Maschinen ein wattloser Strom verkehrt und M_2 gibt keine Energie an das Netz oder an M_1 ab, so schlägt nur das Amperemeter A_2 aus, nicht auch das Wattmeter W_2 . Wird daher M_2 , ohne daß man den Dampfmaschinenregulator beeinflusst, etwas stärker erregt, so zeigt das Amperemeter A_2 Strom an. Lassen wir jetzt mehr Dampf zuströmen, so daß M_2 Belastung übernimmt, so steigt der Zeiger des Wattmeters W_2 und der von W_1 fällt. Gleichzeitig wird der wattlose Ausgleichsstrom kleiner bzw. er ver-

schwindet ganz, weil dadurch, daß man M_2 belastet, die Klemmspannung sinkt. Um zu prüfen, ob der Ausgleichsstrom ganz verschwunden ist, erhöht man durch Drehung des Magnetregulators die Klemmspannung von M_2 ein wenig und erniedrigt sie gleich darauf. War anfänglich kein Ausgleichsstrom vorhanden, so muß er bei der Erhöhung sowohl wie bei der Verringerung der Klemmspannung auftreten; es muß also in beiden Fällen der Ausschlag des Amperemeters A_2 wachsen. Würde man nur in der beschriebenen Weise die Belastung auf M_2 übertragen, so würde die Netzspannung größer werden, denn man würde abwechselnd die Dampfzufuhr und die elektromotorische Kraft von M_2 steigern. Nun kann man auch die Belastung von M_1 auf M_2 dadurch übertragen, daß man die Erregung und Dampfzufuhr des ersten Aggregates vermindert. Dieses Verfahren hat eine Verringerung der Netzspannung zur Folge. Man wird daher zuerst die Spannung und Kraftzufuhr bei der Maschine M_2 etwas erhöhen und dann bei der Maschine M_1 etwas erniedrigen.

Soll eine der parallel arbeitenden Maschinen ausgeschaltet werden, so muß sie zuerst entlastet werden, damit nicht zu starkes Feuer am Ausschalter auftritt. Außerdem fallen beim Ausschalten einer belasteten Maschine die anderen leicht aus dem Tritt. Das Ausschalten wird in umgekehrter Weise wie die Parallelschaltung erfolgen. Man verringert also ganz langsam die Kraftzufuhr der abzuschaltenden Maschine, dann die Erregung. Gleichzeitig wird bei den anderen Maschinen die Kraftzufuhr und die Erregung verstärkt.

Das Pendeln parallel geschalteter Wechselstrommaschinen¹⁾. Man beobachtet zuweilen bei Wechselstrommaschinen, die durch Dampfmaschinen direkt angetrieben werden, nachdem sie eine Zeitlang gut zusammen gearbeitet haben, eine eigentümliche Erscheinung, die man das Pendeln nennt. Man bemerkt, daß die Ampere- und Wattmeter Schwingungen ausführen und schließt daraus, daß elektrische Energie oder Wattströme zwischen den Maschinen hin und her wogen. Unter Umständen können stärkere Spannungsschwankungen im Netze vorkommen, die Sicherungen durchbrennen und die Maschinen außer Tritt fallen. Aus dem Umstande, daß man das Pendeln nie bei Dynamos beobachtet, die durch Turbinen oder von einer Dampfmaschine mittels Riemens angetrieben werden, kann man schließen, daß die Ursache des Pendelns in der Antriebsmaschine zu suchen ist. Da ferner die Erfahrung gelehrt hat, daß zuweilen Dynamos, deren Dampfmaschinen einen sehr geringen Ungleichförmigkeitsgrad haben, stärker pendeln als solche, deren Dampfmaschinen einen größeren Ungleichförmigkeitsgrad haben, so folgt, daß das Pendeln auf die Wechselwirkung zwischen Dampfmaschine und Dynamo zurückzuführen ist.

Wir denken uns neben dem Schwungrade einer einzylindrischen Dampfmaschine ein zweites, gleichgroßes Rad angebracht, das mit genau konstanter

¹⁾ Wir benutzen hier die schon erwähnte Schrift von Dr. Benischke, ferner die Arbeiten von G. Kapp, *G.-L. Z.* 1899, S. 134, Franke, *G.-L. Z.* 1901, S. 887. Außerdem machen wir den Fachmann aufmerksam auf die Aufsätze von H. Görgeß (*G.-L. Z.* 1900, S. 186) und von Rosenbergs (*G.-L. Z.* 1902, S. 425, 450 *zc.*).

Winkelgeschwindigkeit (mit konstanter Umfangsgeschwindigkeit) rotiert und zwar in demselben Sinne wie das Schwungrad; die Tourenzahlen der beiden Räder sollen genau übereinstimmen. Wir denken uns ferner in einem bestimmten Momente einen Punkt der Peripherie des einen Rades, etwa den höchsten, mit dem korrespondierenden Punkte des zweiten Rades (dem höchsten) durch einen dehnbaren Stab oder ein Gummiband verbunden. Dieses Band würde, wenn der Ungleichförmigkeitsgrad der Dampfmaschine unendlich klein wäre, stets eine horizontale Lage haben, und seine Spannung würde weder zu- noch abnehmen. Da aber in Wirklichkeit die Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrades während jeder Umdrehung ein Maximum und ein Minimum hat, so wird das Band während jeder Umdrehung zweimal eine schräge Lage haben, und zwar wird einmal das linke, das andere Mal das rechte Ende das tiefer liegende sein. Das Band verhält sich genau so wie ein Wagebalken, der schwingt und zugleich vorwärts bewegt wird. Wir dürfen also sagen, daß das Schwungrad der Dampfmaschine Schwingungen ausführt. In dem behandelten Falle ist die Schwingungszahl gleich der Umdrehungszahl des Schwungrades; bei einer Zweizylindermaschine mit Kurbeln, die um 90° gegeneinander versetzt sind, kommen auf eine Umdrehung zwei Schwingungen. Diese Schwingungen (erzwungene Schwingungen) sind es nun zunächst, die zum Pendeln Veranlassung geben. Nehmen wir nämlich, um nur den einfachsten Fall zu behandeln, an, es seien zwei Wechselstrommaschinen parallel geschaltet, von denen die eine, M_1 , mit genau konstanter Geschwindigkeit rotiere, während die Antriebsmaschine der anderen, M_2 , einen gewissen Ungleichförmigkeitsgrad habe. Die Dynamos sollen in ihrem Baue vollständig übereinstimmen, und der rotierende Teil sei das Magnetsystem. Zwei korrespondierende Pole P_1 und P_2 der beiden Maschinen werden sich bei genau gleicher Tourenzahl nicht immer in korrespondierenden Stellungen befinden, vielmehr wird P_1 im Vergleich zu P_2 bald eine Voreilung, bald eine Nacheilung haben. Denken wir uns den Mittelpunkt von P_2 in jedem Momente auf die Ebene des Magnetrades der Maschine M_1 durch eine Senkrechte projiziert, so führt die Projektion Schwingungen aus, und zwar bildet der Mittelpunkt der Polfläche P_1 den Mittelpunkt des Schwingungsbogens. Die Amplitude dieser Schwingungen hängt von dem Ungleichförmigkeitsgrade der M_2 antreibenden Dampfmaschine ab. Die Folge dieser Schwingungen ist, daß die Phasengleichheit der beiden elektromotorischen Kräfte gestört wird; durch die Phasenunterschiede aber werden Ausgleichsströme hervorgerufen, und diese bewirken, daß die Maschine M_2 abwechselnd beschleunigt und verzögert wird. Da die Ausgleichsströme den Synchronismus aufrecht zu erhalten suchen, so können wir die Wechselwirkung zwischen diesen Strömen und den Magnetpolen kurz die synchronisierende Kraft nennen. Diese würde, wenn sie allein auf das Magnetrad von M_2 wirkte, den Pol P_2 in einen ganz bestimmten Schwingungszustand versetzen (Eigenschwingung). Die beiden Schwingungen haben im allgemeinen eine verschiedene Schwingungsdauer; in diesem Falle stören sie sich gegenseitig, und die Maschinen bleiben im Tritt. Das Pendeln tritt ein, wenn die Schwingungszahlen der

beiden Schwingungen nahezu einander gleich (Resonanz) und die Amplituden nicht zu klein sind; die Schwingungen vereinigen sich zu einer Resultierenden, die allmählich ansteigt und einem Maximum zustrebt. Wenn dieses Maximum so groß ist, daß der betrachtete Magnetpol P_2 aus dem Bereiche derjenigen Spule kommt, die mit der dem Pole P_1 gegenüberliegenden korrespondiert, und in den Bereich einer der gekennzeichneten benachbarten gelangt, so sind die elektromotorischen Kräfte nicht mehr gegeneinander, sondern hintereinander geschaltet, und die Maschinen fallen aus dem Tritt.

Wenn eine der parallel geschalteten Wechselstrommaschinen mit dem Antriebsmotor direkt gekuppelt ist, so empfiehlt sich auch für die zweite die direkte Kuppelung. Sind die Antriebsmaschinen einander gleich und ebenso die elektrischen Maschinen, so kann ein Pendeln nicht eintreten, wenn die Parallelschaltung bei gleicher Kurbelstellung ausgeführt wird. Denn in diesem Falle bleibt, da die erzwungenen Schwingungen bei beiden Maschinen stets phasengleich sind, der Synchronismus bestehen, ohne daß Ausgleichsströme auftreten (Kurbelsynchronismus).

Bei den Praktikern besteht allgemein die Ansicht, daß sich Kraftmaschinen mit größerem Ungleichförmigkeitsgrade für den Antrieb von parallel arbeitenden Wechselstrommaschinen nicht eignen. Indes wird von bewährten Fachmännern betont, daß sowohl Maschinen mit kleinem als auch mit großem Ungleichförmigkeitsgrade sich sehr wohl parallel schalten lassen¹⁾.

Von den Mitteln, das Pendeln zu verhüten, erwähnen wir dasjenige, das sich bis jetzt am besten bewährt hat. Es besteht nach dem Vorschlage von Leblanc darin, daß man um jeden Pol des Magnetrades einen Kupferring legt. In den Kupferringen werden Ströme induziert, wenn die Pole Schwingungen ausführen. Diese Ströme haben eine solche Richtung, daß sie die schwingende Bewegung, der sie ihre Entstehung verdanken, zu hemmen suchen. Man wird natürlich diese Ringe nicht von vornherein bei jeder Wechselstrommaschine anbringen, die für Parallelbetrieb bestimmt ist, sondern erst dann, wenn sich durch den Betrieb die Notwendigkeit herausstellt.

Bei der Parallelschaltung von Drehstrommaschinen muß außer den früher genannten Bedingungen noch die vierte erfüllt sein, daß die Drehfelder sämtlicher Maschinen dieselbe Drehrichtung haben. Wenn ein asynchroner Drehstrommotor zur Verfügung steht, so kann man die Prüfung der Drehfeldrichtung folgendermaßen vornehmen. Man setzt den Motor nach Abschaltung von M_2 in Betrieb und beobachtet die Drehrichtung; dann schaltet man M_1 ab und setzt M_2 in Betrieb. Stimmt jetzt die Drehrichtung mit der vorigen überein,

¹⁾ Franke weist darauf hin, daß man in dem Bestreben, den Ungleichförmigkeitsgrad durch Anbringung großer Schwungmassen zu verringern, nicht zu weit gehen dürfe. Je schwerer nämlich die Schwungmassen sind, um so mehr haben die Räder das Bestreben ihre Umfangsgeschwindigkeit beizubehalten; um so langsamer wird daher bei Belastungsänderungen die Regulierung erfolgen, und um so stärker werden die Ausgleichsströme.

so sind M_1 und M_2 richtig angeschlossen; ist das nicht der Fall, so werden von den drei Maschinenleitungen des Generators M_2 zwei beliebige miteinander vertauscht. Nach vorgenommener Vertauschung ist der Versuch zu wiederholen¹⁾.

Wenn kein Drehstrommotor vorhanden ist, so benutzt man für die Prüfung Glühlampen. Man ersetzt bei der zuzuschaltenden Maschine M_2 jede der drei Hauptsicherungen durch 2, bei Hochspannungsmaschinen durch 3 hintereinander geschaltete Glühlampen für 110 Volt. Nachdem man jede der beiden Maschinen möglichst genau auf ihre richtige Umdrehungszahl gebracht hat, erregt man sie bis zur gleichen Spannung; diese muß jedoch so niedrig gewählt werden, daß ein Durchbrennen der Glühlampen nicht zu befürchten ist. Unter Umständen wird schon der remanente Magnetismus genügen, die Lampen zum Glühen zu bringen. Beobachtet man, daß die drei Lampengruppen gleichzeitig aufleuchten und dunkel werden, so ist der Anschluß richtig ausgeführt. Sieht man aber, daß die Gruppen nacheinander aufleuchten, so ist, wie eben angedeutet wurde, zu verfahren.

In Fig. 93 ist ein Schaltungsschema für den Fall wiedergegeben, daß zwei Drehstrommaschinen in Parallelschaltung arbeiten und für jede Maschine nur ein Wattmeter Verwendung findet. Die Spannungsspule des Wattmeters

ist mit dem neutralen Punkte und mit derjenigen Leitung verbunden, deren Strom durch die Stromspule des Wattmeters geht. Vor dem Phasenvergleich P liegt ein Umschalter U . Ist die Maschine M_1 angeschlossen und soll M_2 parallel geschaltet werden, so legt man den Hebel des Umschalters U auf den Kontakt 2; sind die Potentiale an den Punkten a und b verschieden, besteht also keine Phasengleichheit, so fließt ein der Potential-

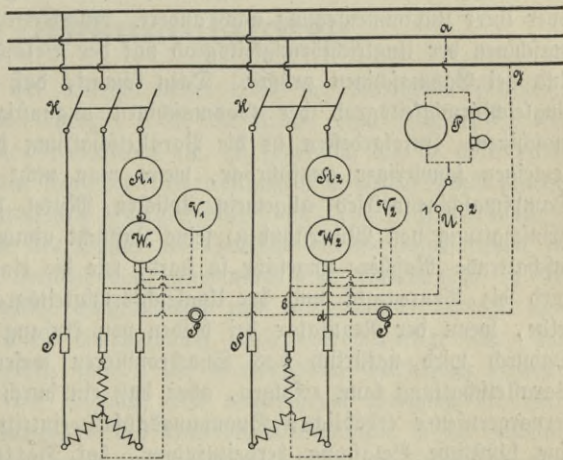


Fig. 93.

Strom durch das Phasenvoltmeter bzw. durch die Glühlampen. Der Zweck der Leitung d g wird uns klar, wenn wir beachten, daß der von einer Maschine abgegebene Strom zu der Maschine zurückkehren muß. Ist Maschine M_1 angeschlossen und geht von b ein Strom aus, so nimmt derselbe folgenden Weg: von b nach 2, durch P nach a , von a durch die Sammelschiene nach M_1 , von dort nach d

¹⁾ Bei Wechselstrommaschinen kann man an dem Verlauf der Wicklungen erkennen, welche Klemmen der parallel zu schaltenden Maschinen sich entsprechen.

und endlich zurück zur Maschine M_2 . Wenn die Maschinen vom synchronen Gange weit entfernt sind, oder die Phasenspannungen sehr verschieden sind, so kann der durch d_g fließende Strom eine bedeutende Stärke annehmen. Daher schaltet man in die genannte Leitung Sicherungen S ein.

Bei Hochspannung wendet man für die Voltmeter und den Phasenvergleich schon seit längerer Zeit kleine Transformatoren an (Meßtransformatoren). Von Dr. Benischke¹⁾ wurde die Umformung der Hochspannung mittels Stromwandler auch für die Ampere- und Wattmeter eingeführt: Von diesen Stromwandlern geht ein Strom niedriger Spannung zu den eigentlichen Meßinstrumenten. Auf diese Weise ist es möglich geworden, Schalttafeln für Hochspannungsanlagen zu bauen, die auf der Vorderseite und in den Apparaten feinerlei Hochspannung führen.

Den vorhergehenden Betrachtungen, die sich auf den Fall bezogen, daß die Antriebsmaschinen Dampfmaschinen sind, wollen wir einige Bemerkungen über die Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen hinzufügen, die mit Gas- kraftmaschinen direkt gekuppelt sind. Bei Gasmaschinen, die mit aussetzenden Zündungen arbeiten, ist der Ungleichförmigkeitsgrad bei Leerlauf weit größer als bei Volllast; das Umgekehrte gilt für Gasmaschinen, bei denen man das in den Zylinder strömende Gasgemisch, die Ladung, nur ihrer Größe, nicht aber ihrer Zusammensetzung nach ändert. Allerdings variiert auch bei Dampfmaschinen der Ungleichförmigkeitsgrad mit der Belastung, aber die Unterschiede sind bei Gasmaschinen größer. Dazu kommt, daß auch an und für sich der Ungleichförmigkeitsgrad der Gasmaschinen ungünstiger ist als bei Dampfmaschinen. Infolgedessen ist die Parallelschaltung der Gasdynamos im allgemeinen schwieriger ausführbar, wenn man nicht zu dem früher auch bei Dampfmaschinenbetrieb allgemein üblichen Mittel der künstlichen Belastung (Einschaltung von Widerständen) seine Zuflucht nimmt. Belastet man die zuzuschaltende Maschine ungefähr so stark, wie die eingeschaltete belastet ist, so wird die Tourenzahl und der Ungleichförmigkeitsgrad beider Maschinen derselbe, wenn der Regulator bei beiden von Anfang an gleich eingestellt war. Dadurch wird natürlich das Synchronisieren wesentlich erleichtert und die Parallelschaltung kann erfolgen, ohne daß ein durch stärkere Ausgleichsströme hervorgerufenen erheblicher Spannungsabfall eintritt. Ein einfaches Mittel, eine künstliche Belastung herbeizuführen, hat Dettmar²⁾ angegeben (Gebr. Rürting). In unmittelbarer Nähe der Peripherie des Schwungrades befindet sich ein Elektromagnet, der seine Polfläche der Außenseite des Rades zuwendet. Rotiert das Schwungrad, so werden seine einzelnen Schichten von den Kraftlinien geschnitten, und es entstehen in dem Eisen Wirbelströme, die nach dem Lenzschen Gesetze die Bewegung zu hemmen suchen. Die Wirbelströme und Hysteresisverluste verursachen eine Erwärmung des Schwungrades, die aber wegen der großen Oberfläche des Rades und seiner günstigen Ventilation infolge

¹⁾ G.-L. Z. 1899, S. 82.

²⁾ Siehe G.-L. Z. 1899, S. 728.

der großen Geschwindigkeit nicht schädlich ist, zumal die künstliche Belastung nicht lange andauert. Variiert wird die durch die Wirbelstrombremse hervorgerufene Belastung dadurch, daß man die Stärke des durch die Elektromagnetwicklung fließenden Stromes vergrößert oder verringert. Nach vorgenommener Parallelschaltung verkleinert man die künstliche Belastung allmählich; es steigt dann die Leistung der betreffenden Wechselstrommaschine. Soll ein Generator abgeschaltet werden, so wird die Kraftmaschine zuerst künstlich belastet, wodurch eine Verringerung der Stromabgabe seitens der Dynamo erzielt wird.

Nach Rosenbergs, der in der bereits zitierten Arbeit eine große Anlage beschreibt, in der 6 mit Gasmotoren à 300 PS direkt gekuppelte Drehstrommaschinen in Parallelschaltung arbeiten, wird bei einem Ungleichförmigkeitsgrad von $\frac{1}{150}$ ein tadelloser Parallelbetrieb erzielt; die Parallelschaltung erfolgt unter Benutzung der Wirbelstrombremse von Dettmar und kann bei jeder Kurbelstellung vorgenommen werden.

Siebtens Kapitel.

Die Akkumulatoren.

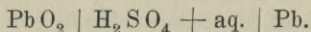
Die Aufspeicherung der Energie bildet eines der wichtigsten Probleme der Technik. Sie bezweckt, Energie, z. B. die Arbeit einer Wasserkraft, für die man augenblicklich keine Verwendung hat, zu sammeln, um sie später nach Belieben auszunutzen zu können. Man nennt Vorrichtungen, die diesem Zwecke dienen, Akkumulatoren. Die bekanntesten Energiebehälter sind die Heizmaterialien ¹⁾, in denen strahlende Energie der Sonne als chemische Energie aufgespeichert ist.

Unter Akkumulator versteht man gewöhnlich eine Anordnung, in der elektrische Energie in chemische umgewandelt und als chemische Energie aufbewahrt werden kann. Diese Umwandlung muß eine derartige sein, daß sie rückgängig gemacht werden kann. Die Verwandlung elektrischer Energie in chemische nennt man die Ladung, den umgekehrten Vorgang die Entladung. Während des Ladungsprozesses wird der Akkumulator in ein galvanisches Element verwandelt; während der Entladung verliert er diesen Charakter allmählich. Da ein Akkumulator von vornherein keinen elektrischen Strom liefert, vielmehr durch Zufuhr von elektrischer Energie zuerst in ein galvanisches Element umgewandelt werden muß, so gehört er zu den sekundären Elementen. Die gekennzeichneten Sammler im engeren Sinne kann man zur Unterscheidung von anderen Akkumulatoren, zu denen z. B. ein über der Erde befindliches und mit Wasser angefülltes Reservoir gerechnet werden kann, elektrochemische Sammler nennen.

¹⁾ Die Versuche, Elektrizität direkt aus Kohle zu gewinnen, haben bis jetzt keine günstigen Resultate gezeitigt.

Von den elektrochemischen Akkumulatoren¹⁾ verdient das meiste Interesse der Bleiakкумуляtor; von untergeordnetem Interesse ist einstweilen der von Edison erfundene Sammler.

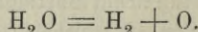
Theorie des Bleiakкумуляtors²⁾. Ein Akkumulator in seiner einfachsten Gestalt besteht aus zwei Bleiplatten, die in verdünnte Schwefelsäure vom spezifischen Gewichte 1,1—1,2 eingetaucht sind. Verbindet man die Platten, die Elektroden, mit einer Stromquelle von 2,5—3 Volt Klemmspannung, so werden die Bleiplatten an ihrer Oberfläche chemisch verändert: Die mit dem positiven Pole der Stromquelle verbundene Elektrode bedeckt sich mit einer sehr dünnen Schicht aus braunem Bleisuperoxyd (PbO_2), an der negativen Platte wird Bleioxyd, das sich vor dem Eintauchen durch Einwirkung des Luftsaauerstoffes gebildet hatte, zu reinem, metallischem Blei reduziert. Schaltet man nach einiger Zeit die Stromquelle ab, so haben wir also die Kombination vor uns:



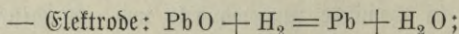
Nun bilden Bleisuperoxyd und Blei in verdünnter Schwefelsäure ein galvanisches Element, ähnlich wie Zink und Kupfer in verdünnter Schwefelsäure.

Die elektromotorische Kraft unseres primitiven Akkumulators beträgt anfänglich etwas mehr als 2 Volt, sinkt aber bei Stromentnahme sehr schnell.

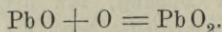
Planté, der Erfinder des Bleiakкумуляtors, nahm an (1886), daß die Elemente des Wassers, nämlich Wasserstoff und Sauerstoff, allein an den chemischen Prozessen beteiligt seien, die sich bei der Stromzufuhr und Stromentnahme an den Elektroden abspielen. Die Vorgänge bei der Ladung wären dann etwa folgende: Fließt der Strom durch die verdünnte Schwefelsäure, so wird Wasser zersetzt:



Der Wasserstoff wandert mit dem Strome, also nach der negativen Elektrode hin und verwandelt dort Bleioxyd (PbO) in metallisches Blei:



durch den Sauerstoff, der an der positiven Platte in Freiheit gesetzt wird, wird PbO in PbO_2 übergeführt nach der Gleichung:



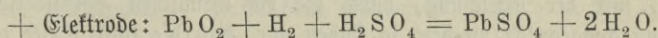
Da das durch den Strom, also primär, zersetzte Wassermolekül durch den chemischen Umsatz (sekundär) wiedererzeugt ist, so würde der ganze Ladungsprozess gewissermaßen nur darin bestehen, daß Sauerstoff von der einen Elektrode zur anderen übergeführt wird. Das spezifische Gewicht der Säure dürfte sich also während der Ladung nicht ändern. Die Erfahrung lehrt uns aber, daß das nicht der Fall ist, daß vielmehr die Säuredichte während der Ladung wächst.

¹⁾ Zu diesen gehören auch die Gaselemente.

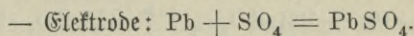
²⁾ Ein vorzügliches Buch, in dem der Akkumulator vom Standpunkte des Elektrochemikers behandelt wird, ist das Werk von Dolezalek: Die Theorie des Bleiakкумуляtors.

Diese Beobachtung, die Planté zwar auch gemacht, aber nicht für die Theorie verwertet hatte, wurde von den englischen Forschern Tribe und Gladstone weiter verfolgt und führte zur Aufstellung der Sulfattheorie. Diese Theorie zählt die meisten Forscher zu ihren Anhängern, weil sehr viele Gründe für ihre Richtigkeit sprechen und kaum eine Erscheinung bei Akkumulatoren bekannt geworden ist, die man nicht mit ihrer Hilfe hätte zwanglos erklären können. Da noch immer Versuche gemacht werden, die Sulfattheorie zu stürzen, so wollen wir ihr eine eingehendere Darlegung widmen.

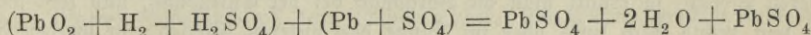
Wird der Akkumulator entladen, so tritt der Strom an der negativen Elektrode in die Säure ein; der Strom fließt also in der Säure von der negativen zur positiven Platte. In der Stromrichtung wandert der Wasserstoff, den wir uns durch die Zersetzung von 1 Molekül Schwefelsäure entstanden denken können. An der positiven Platte angekommen, reduziert der Wasserstoff (H_2) im Verein mit einem Molekül H_2SO_4 Bleisuperoxyd zu Bleisulfat:



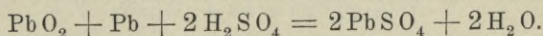
Das durch die Zersetzung der Schwefelsäure entstandene SO_4 -Radikal, das an der negativen Elektrode frei wird, verbindet sich mit Pb zu Bleisulfat.



Wenn wir unsere beiden Gleichungen addieren, so erhalten wir:



oder kürzer:



In dieser Gleichung sind alle chemischen Vorgänge zusammengefaßt, denen wir die Entstehung des Stromes verdanken. — Wir sehen auf den ersten Blick, daß während der Entladung Schwefelsäure verbraucht wird und Wasser entsteht. Unsere Gleichung trägt also der bekannten Tatsache Rechnung, daß die Säurekonzentration während der Entladung abnimmt.

Nach der eben entwickelten Theorie befindet sich bei einem entladenen Akkumulator auf beiden Elektroden Bleisulfat. Bei der Ladung verbindet man den positiven Pol der Stromquelle mit der positiven Elektrode (der Bleisuperoxydplatte) und den negativen Pol der Stromquelle mit der negativen Platte, man verbindet also die gleichnamigen Pole miteinander (s. Fig. 94). Da der Ladestrom in entgegengesetzter Richtung durch die Säure fließt wie der Entladestrom, so wird jetzt Wasserstoff an der negativen Elektrode frei. Dieser

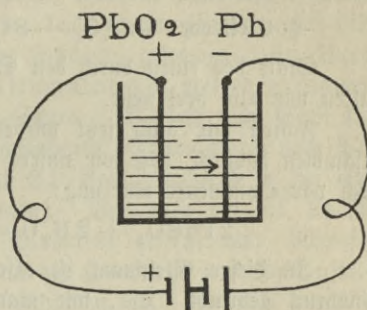
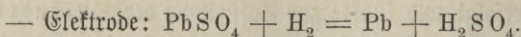
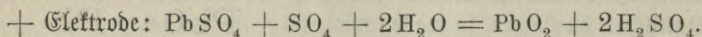


Fig. 94.

entreißt dem PbSO_4 das Radikal SO_4 und verbindet sich mit ihm zu Schwefelsäure:

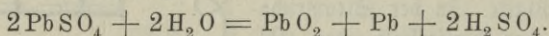


An der positiven Elektrode wird SO_4 frei; dieses wirkt im Verein mit 2 Molekülen Wasser auf 1 Molekül Bleisulfat unter Bildung von Bleisuperoxid und Schwefelsäure:



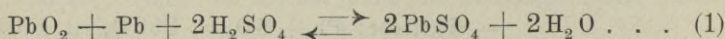
Statt des einen durch den Strom zerlegten Moleküls Schwefelsäure erhalten wir also drei neue.

Fassen wir auch jetzt wieder die Vorgänge an den beiden Elektroden zusammen dadurch, daß wir unsere beiden Gleichungen addieren, so ergibt sich nach vorgenommener Kürzung:



In dieser Gleichung ist also die ganze Arbeit des Ladestromes zum Ausdruck gebracht. Da, wie man sieht, während der Ladung Wasser verbraucht, Schwefelsäure aber erzeugt wird, so muß die Säuredichte (das spez. Gew. der Säure) während der Ladung zunehmen.

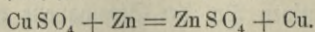
Vergleichen wir die Gleichung, die den Vorgängen bei der Entladung entspricht, mit der Gleichung, durch die die chemischen Veränderungen bei der Ladung ausgedrückt werden, so finden wir, daß die linke Seite der ersten Gleichung die rechte Seite der zweiten Gleichung ist und umgekehrt. Wir können daher die beiden Gleichungen zu einer einzigen vereinigen:



Liest man also diese Gleichung von links nach rechts oder im Sinne des oberen Pfeiles, so erhält man die Vorgänge bei der Entladung, und liest man sie von rechts nach links oder im Sinne des unteren Pfeiles, so werden die chemischen Veränderungen, die sich bei der Ladung abspielen, zum Ausdruck gebracht.

In dieser Gleichung tritt die von den meisten Forschern als richtig anerkannte Behauptung äußerlich zutage, daß der Akkumulator ein umkehrbares Element¹⁾ sei.

¹⁾ Wir wollen kurz auseinandersetzen, was man sich unter einem umkehrbaren Elemente vorzustellen hat. Als Beispiel wählen wir das Daniell-Element: Cu in Kupfersulfatlösung (CuSO_4) und Zink in Zinksulfatlösung (ZnSO_4). Gibt das Element, dessen elektromotorische Kraft ungefähr 1,1 Volt beträgt, Strom ab (Entladung), so geht Zink in Lösung unter Bildung von Zinksulfat, und Kupfer schlägt sich auf dem Kupferpole nieder. Der stromliefernde Prozeß kann also kurz durch die Gleichung dargestellt werden:



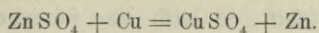
Hat man dem Elemente i Coulomb entnommen, so hat es, wenn wir von der Jouleschen Wärme im Elemente absehen, $1,1 \cdot i$ Watt an den äußeren Stromkreis abgegeben, und es ist eine gewisse, nach dem Faradayschen Gesetze leicht bestimmbare

Für die Richtigkeit unserer Gleichung (1) ist eine ganze Reihe von Beweisen beigebracht worden, von denen der wichtigste derjenige ist, der auf energetischen Berechnungen beruht. Wir müssen es uns wegen Raum Mangels versagen, auf diese Beweise näher einzugehen¹⁾.

Seitens der Gegner der Sulfattheorie wird vielfach folgender Einwand erhoben: Wenn der Akkumulator ein unkehrbares Element ist, so muß sein Nutzeffekt (s. S. 213) nahezu 100 % betragen, während man in der Praxis nur 75—80 % Nutzeffekt erzielt. Es ist nun leicht, diesen Einwand mit Hilfe der Sulfattheorie zu widerlegen. Wie schon Planté gefunden hatte, steigt die elektromotorische Kraft eines Akkumulators mit der Säuredichte nicht unerheblich an. Hat die Säure z. B. das spez. Gew. 1,4, so ist die elektromotorische Kraft des vollgeladenen Akkumulators nach Verschwinden der Gaspolarisation nahezu gleich 2,2 Volt, während sie bei einer Säuredichte von 1,03 nur 1,8 Volt beträgt. Nun wird bei der Ladung des Akkumulators an beiden Elektroden Bleisulfat zerlegt und Schwefelsäure gebildet. Dieser Vorgang spielt sich an der Oberfläche der Platten selbst und in den unmittelbar darunterliegenden Schichten ab. Es sinkt zwar die schwerere Schwefelsäure zu Boden, aber sie entsteht ja auch während der Ladung fortwährend von neuem. Die unter der Oberfläche oder in den Poren der aktiven Masse — so nennt man die an dem chemischen Umsatz beteiligte Schicht der Elektroden — entstandene Schwefelsäure wird in den Poren fest-

Menge Zink aufgelöst und eine gewisse Menge Kupfer abgeschieden worden; diese Mengen wollen wir mit Z und K bezeichnen.

Führen wir jetzt dem Elemente elektrische Energie zu, indem wir die Kupferelektrode mit dem positiven und die Zinkelektrode mit dem negativen Pole einer fremden Stromquelle verbinden, so geht Kupfer in Lösung, und es bildet sich aus Zinksulfat metallisches Zink; letzteres schlägt sich auf dem Zintpole nieder. Die beiden Vorgänge kann man durch die Gleichung ausdrücken:



Die Vorgänge bei der Ladung sind also genau die umgekehrten wie die Vorgänge bei der Entladung. Man kann also ein Daniell-Element, das Strom abgegeben hat, durch Stromzufuhr wieder in seinen Anfangszustand zurückversetzen. — Hat das Element einen unendlich kleinen inneren Widerstand — was wir schon oben angenommen haben (indem wir nämlich sagten, daß in dem Elemente keine Joulesche Wärme erzeugt werden möge) — so kann der Unterschied zwischen der elektromotorischen Kraft der Ladestromquelle und der elektromotorischen Kraft des Daniell-Elementes als ein verschwindend kleiner angesehen werden; wir dürfen also praktisch die für die Ladung erforderliche Spannung gleich 1,1 Volt setzen. Sollen bei der Ladung Z Gramm Zink niedergeschlagen und zugleich K Gramm Kupfer in Lösung gehen, so müssen wir dem Elemente i Coulomb zuführen. Um also das Element durch Zufuhr von elektrischer Energie in seinen ursprünglichen Zustand zurückzuversetzen, bedarf es eines Aufwandes von 1,1 · i Watt, d. h. einer gerade so großen Energiemenge, wie wir ihm bei der Entladung entnommen haben.

¹⁾ Man findet diese Beweise in dem schon erwähnten Buche von Dolzalek.

gehalten (Kapillarität) und kann nur durch Diffusion¹⁾ in die außerhalb der Elektroden befindliche Säure gelangen. Die Diffusion aber ist ein Vorgang, der sich nur sehr langsam abspielt. Kurze Zeit nach Beginn der Ladung ist also die Säure in den Poren der aktiven Masse und in unmittelbarer Nähe der Elektrodenoberflächen stark konzentriert. Wenn aber die Akkumulatorplatten von stark konzentrierter Schwefelsäure benetzt werden, so ist die elektromotorische Kraft größer als in verdünnter Säure. Daher steigt kurze Zeit nach Beginn der Ladung die Spannung des Akkumulators an und ist auch, wenn mit normaler Stromdichte geladen wird, größer als sie sein würde, wenn die Konzentrationsänderung an den Elektroden nicht erfolgt. Da nun in jedem Momente während der Ladung die augenblickliche elektromotorische Kraft des Akkumulators von dem Ladestrome überwunden werden muß, so ist die durchschnittliche Ladepannung oder die durchschnittliche Klemmspannung des Akkumulators während der Ladung anormal groß.

Das Umgekehrte gilt für die Entladung. Da jetzt nach Gleichung (1) Schwefelsäure verbraucht wird und diese natürlich zunächst der Flüssigkeit in den Poren und in der nächsten Nähe der Elektrodenoberfläche entnommen wird, so sinkt dort die Konzentration der Säure. Dazu kommt noch, daß an der positiven Elektrode Wasser gebildet wird. Die Konzentrationsunterschiede zwischen der Säure in den Platten und außerhalb derselben können sich nicht schnell genug ausgleichen. Die Elektroden werden daher kurze Zeit nach Beginn der Entladung von einer Säure geringerer Konzentration berührt und sind mit einer solchen imprägniert, so daß die elektromotorische Kraft des Akkumulators während der Entladung kleiner ist, als wenn die Konzentrationsänderungen nicht erfolgten. Dieser Umstand führt abermals zu einer Verringerung des Nutzeffektes.

Wenn die eben entwickelte Ansicht über den Nutzeffekt richtig ist, so muß der Unterschied zwischen der mittleren Lade- und Entladepannung um so kleiner, der Nutzeffekt also um so größer werden, je geringer die Stromdichte ist. Denken wir uns nämlich einen Akkumulator mit sehr schwachem Strome geladen und entladen, so wird eine störende Konzentrationsänderung kaum zustande kommen können, und der Unterschied zwischen der Lade- und Entladepannung muß dann verschwindend klein sein. Diesbezügliche Versuche, die zuerst von Dolezalek ausgeführt wurden, haben die Richtigkeit dieser Ansicht bewiesen.

Der Umstand also, daß der Nutzeffekt des Bleisammlers bei normalem Betriebe weit unter 100 % liegt, zwingt uns durchaus nicht, anzunehmen, der Akkumulator sei ein nicht umkehrbares Element; er läßt sich vielmehr aus unserer Gleichung (1) und mit Hilfe der bekannten Tatsache, daß die elektromotorische Kraft des Akkumulators von der Säurekonzentration abhängig ist, zwanglos erklären. Wir schließen uns vielmehr Dolezalek an, wenn er die These aufstellt, daß nur diejenigen Theorien einer streng wissenschaftlichen Prüfung stand-

¹⁾ Auf die Rolle, die die Konzentrationsströme spielen, wollen wir nicht eingehen.

halten können, nach denen der Bleiakкумуляtor ein umkehrbares Element im Sinne unserer Gleichung (1) ist.

Um einer irrtümlichen Auffassung vorzubeugen, bemerken wir, daß wir keineswegs der Ansicht sind, als ob die von uns mitgeteilte Ableitung der Gleichung die allein richtige sei. Wir haben den betretenen Weg nur deshalb gewählt, weil wir auf die anderen und zwar auf den neueren elektrochemischen Ansichten beruhenden Theorien (Leblanc und G. Liebenow) hier nicht eingehen können¹⁾.

Ladung und Entladung. In den ersten Minuten nach Beginn der Ladung mit konstanter Stromstärke steigt die Ladespannung, d. h. die Klemmspannung des Akkumulators, schnell bis zu etwa 2,15 Volt, sinkt dann aber sofort innerhalb weniger Minuten bis zu 2,1 Volt. Von jetzt an wächst die Klemmspannung langsam und gleichmäßig zunächst bis zu 2,2 Volt und gegen

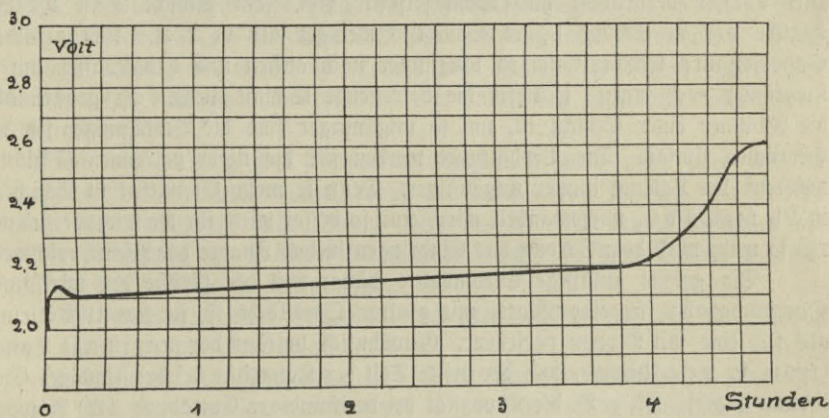


Fig. 95.

Ende der Ladung in kurzer Zeit auf 2,5—2,7 Volt (s. Fig. 95). Der kleine Spannungsabfall kurze Zeit nach Beginn der Ladung scheint durch eine Verringerung des inneren Widerstandes verursacht zu werden. Während der der Ladung vorausgegangenen Ruhepause bedecken sich die Elektroden wahrscheinlich mit einer sehr dünnen Schicht von schlecht leitendem Bleisulfat. Dieses wird, wenn die Ladung beginnt, in Pb bezw. PbO_2 umgewandelt.

Gleichzeitig mit dem starken Anstiege der Spannung beginnt stärkere Gasbildung, der Akkumulator „kocht“. Eine ganz schwache Gasbildung erfolgt übrigens während der ganzen Ladung. Die Gase, die emporsteigen, sind die Elemente des Wassers, also Wasserstoff und Sauerstoff, und zwar entweicht der Sauerstoff an den positiven Platten und der Wasserstoff an den negativen. Die stärkere Gasbildung ist ein Zeichen, daß der chemische Umsatz an den dem Strom zu-

¹⁾ Einen längeren Aufsatz über die neueren Theorien des Bleiakкумуляtors von Dr. Vermbach findet man im Gl. N. 1901, Nr. 1 ff.

gänglichen Teilen der aktiven Masse nahezu vollendet ist. Wenn der Akkumulator anfängt zu gasen, so setzt man gewöhnlich die Stromstärke auf die Hälfte bis ein Drittel des normalen Ladestromes herab.

Die Stromdichte darf bei der Ladung einen gewissen oberen Grenzwert nicht überschreiten, weil sonst die Umwandlung nur oder größtenteils an der Oberfläche der Platten vor sich geht, ferner schon kurz nach Beginn der Ladung Wasserstoff und Sauerstoff in größerer Menge frei werden, was einem unnützen Energieaufwande gleichkommt, weil drittens die Ladenspannung einen zu großen Wert hat (s. Nulleffekt) und endlich der Zusammenhang zwischen der aktiven Masse und dem festen Bleitträger gelockert wird. Auf den zuerst angeführten Grund soll noch näher eingegangen werden. Wir denken uns die aktive Masse in eine größere Reihe von sehr dünnen Schichten zerlegt, die wir, an der Oberfläche beginnend, mit 1, 2, 3 zc. bezeichnen wollen. Bei dem chemischen Umfaze wird Wasser verbraucht und Schwefelsäure frei. In Schicht 2 ist weniger Wasser als in Schicht 1, in Schicht 3 weniger als in 2 zc. Die gebildete Schwefelsäure wandert um so langsamer nach außen und das Wasser um so langsamer nach innen, je tiefer die betreffende Schicht liegt. Je größer also die Nummer einer Schicht ist, um so ungünstiger sind die Bedingungen für den chemischen Umsatz. Die Verhältnisse werden für die tiefer gelegenen Schichten während der Ladung immer ungünstiger. Denn je mehr Bleisulfat in Schicht 1 in Pb bezw. PbO_2 umgewandelt wird, um so besser wird ihr Leitungsvermögen, um so mehr wird dem Strome das Eindringen in das Innere der Platte erschwert.

Die größte zulässige Stromdichte hängt von der Größe der wirksamen Oberfläche ab; für eine Platte mit glatter Oberfläche ist sie natürlich kleiner als für eine mit Rippen versehene. Gewöhnlich beträgt der maximale Ladestrom so viele Ampere, wie der dritte Teil der Kapazität bei dreistündiger Entladung angibt. Ist z. B. die Kapazität bei dreistündiger Entladung 120 Amperestunden, so ist die maximale Ladestromstärke gleich 40 Ampere.

Verschiedene Firmen schreiben vor, daß die von ihnen gelieferten Akkumulatoren ab und zu nach Beginn der lebhaften Gasentwicklung noch einige Zeit, etwa $\frac{1}{2}$ Stunde lang, weiter geladen werden sollen. Der Zweck der Überladung, die im allgemeinen schädlich ist, weil durch die entweichenden Gase Teilchen der aktiven Masse abgerissen werden, ist hauptsächlich folgender. Es kommt oft vor, daß einzelne Zellen einer Batterie gegen die anderen zurückbleiben. Bei den franken Zellen erfolgt die Umwandlung von Bleisulfat in Blei bezw. Bleisuperoxyd langsamer als bei den übrigen, die sich in normalem Zustande befinden. Während der Überladung geht nun die chemische Umwandlung in den franken Zellen noch weiter vor sich, so daß ihnen Gelegenheit gegeben wird, sich zu erholen. Ferner werden durch die während der Überladung entweichenden Gasblasen schwache Strömungen in der Säure hervorgerufen, durch die die Konzentrationsunterschiede ¹⁾ verringert werden.

¹⁾ Während der Ladung sinkt, wie man an Zellen mit Glasgefäßen beobachten kann, konzentrierte Schwefelsäure zu Boden (Schlieren).

Über die Ladung von Akkumulatoren bei konstanter Spannung hat Professor Heim eingehende Versuche ausgeführt¹⁾. Einer Reihe von Ladungen mit konstanter Stromstärke, wie sie für 3—4stündige Ladung vorgeschrieben ist, d. h. von normalen Ladungen, folgten Ladungen mit konstanter Spannung von 2,4 Volt, später von 2,5 Volt pro Zelle. Bei den letzteren Ladungen ist die Stromstärke anfänglich eine verhältnismäßig große; es ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Zellen bei Beginn der Ladung eine große Aufnahmefähigkeit besitzen. Jede Zelle nimmt in jedem Augenblicke diejenige Elektrizitätsmenge, die ihrem Ladestate angemessen ist. Es ergab sich, daß der Nutzeffekt „beim Laden mit konstanter Spannung von 2,4—2,5 Volt und einer Ladezeit von etwa $\frac{1}{2}$ Stunde nicht sehr wesentlich ungünstiger ausfällt, als man ihn bei $3\frac{1}{2}$ bis 4stündigen Ladungen und 3stündigen Entladungen mit konstantem Strome erzielt“. Ferner ergab sich, daß durch eine $1\frac{1}{2}$ stündige Ladung bei konstanter Spannung von 2,4 Volt die Zellen nicht ganz, bei 2,5 Volt dagegen fast so weit geladen werden, wie durch $3\frac{1}{2}$ —4stündige Ladungen mit konstanter Stromstärke. Durch $\frac{1}{2}$ stündige Ladung bei 2,4 Volt erreicht man die Hälfte, durch $\frac{1}{2}$ stündiges Laden bei 2,5 Volt zwei Drittel der beim Laden mit konstanter Stromstärke erzielten Kapazität.

Von der Ladung mit konstanter Spannung wird man aber nur in Ausnahmefällen Gebrauch machen, wohl nur dann, wenn die Zeit, die für die Ladung zur Verfügung steht, knapp bemessen ist, da der Anwendung die schnellere Abnutzung der Platten und vielfach auch der hohe Betrag der anfänglichen Stromstärke im Wege steht.

Für die Ladung einer Akkumulatorenbatterie eignet sich, wie wir gesehen haben, am besten die Nebenschlußmaschine.

Nennen wir die elektromotorische Kraft der Lademaschine zu einer bestimmten Zeit E_1 , diejenige der Batterie E_2 , so ist die Ladestromstärke

$$J = \frac{E_1 - E_2}{w},$$

wo w der Widerstand in der Maschine, in den Zuleitungen und in der Batterie ist. Da w klein ist, so hat J schon bei geringem Unterschiede zwischen E_1 und E_2 den gewünschten Betrag. Kleine Änderungen der elektromotorischen Kraft der Dynamomaschine bewirken daher größere Änderungen der Stromstärke. Ist z. B. $w = \frac{1}{5}$ Ohm und soll $J = 50$ Amp. sein, so muß $E_1 - E_2 = 10$ Volt sein. Nimmt die elektromotorische Kraft der Dynamo infolge veränderter Tourenzahl für einen Augenblick um 1 Volt ab, so wird $E_1 - E_2 = 9$ Volt und J sinkt von 50 Amp. auf 45 Amp. Die Schwingungen des Amperemeterzeigers, die man während der Ladung einer Batterie oft beobachtet, finden in vorstehenden ihre Erklärung. Bei der Ladung der Batterie kann man also in einfacher Weise feststellen, ob die Antriebsmaschine (Dampfmaschine zc.) einen gleichmäßigen Gang hat.

Wenn eine Dynamo vorhanden ist, die nur die für den normalen Betrieb nötige Spannung, z. B. 110 Volt, liefern kann, so wird in vielen Fällen

¹⁾ Siehe G.-Z. B. 1900 Nr. 14 ff.

eine Zusatzdynamo verwendet, die mit der Hauptmaschine hintereinander geschaltet wird und die fehlende Spannung liefert. Meistens wird die Zusatzdynamo durch einen Elektromotor angetrieben, dem Strom von den Sammelschienen (also von der Hauptmaschine) zugeführt wird (s. auch Projektierung).

Wenn eine Zusatzmaschine nicht vorhanden ist bzw. nicht nachträglich aufgestellt werden kann und die Hauptmaschine nur die für die Speisung der Lampen und Motoren nötige Spannung liefert, so kann man die Batterie in zwei Hälften laden. Besteht z. B. die Batterie aus 62 Zellen, so werden zwei Gruppen von je 31 Zellen gebildet. Nennen wir die positiven Pole der beiden so erhaltenen Batterien p_1 , p_2 und die negativen q_1 , q_2 , so sind p_1 und p_2 mit der positiven, q_1 und q_2 mit der negativen Klemme der Lademaschine zu verbinden. Soll oder muß die Maschinenspannung konstant 110 Volt betragen, so muß bei Beginn der Ladung ein Widerstand zwischen Batterie und Maschine geschaltet werden, weil sonst der Ladestrom einen zu hohen Betrag annehmen würde. Denn anfänglich genügt eine Ladenspannung, die weit unter 110 Volt liegt. Je mehr die Spannung jeder Zelle steigt, um so mehr Widerstand wird ausgeschaltet. Sobald die Ladung der Batterie beendet ist, werden die beiden Gruppen wieder hintereinander geschaltet. Parallel- und Hintereinanderschaltung der beiden Batteriehälften werden mittels eines Umschalters bewerkstelligt. Selbstverständlich ist die Ladung in der beschriebenen Weise mit großen Energieverlusten verknüpft, so daß sie für Neuanlagen kaum in Betracht kommen wird.

Wird nach Beendigung der Ladung die Dynamomaschine ausgeschaltet, so fällt die elektromotorische Kraft des Akkumulators, auch wenn man keinen Strom entnimmt, zuerst schnell und dann langsam bis zu dem der Säurekonzentration entsprechenden Werte (2—2,1 Volt). Gewöhnlich gibt man als Grund für den Spannungsabfall der offenen Zelle das Verschwinden der Gas-polarisation an; man nimmt also an, daß die mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff beladenen Elektroden in verdünnter Schwefelsäure eine größere elektromotorische Kraft liefern als die gasfreien. Der Hauptgrund für die erwähnte Erscheinung dürfte aber der folgende sein. Wird die Lademaschine abgeschaltet, so hört natürlich die Bildung von Schwefelsäure in den Poren der aktiven Masse auf, und es erfolgt, begünstigt durch das Entweichen der offkludierten Gase¹⁾, der Hauptausgleich der Säurekonzentration und damit schnelles Sinken der Spannung. Später gleichen sich die Konzentrationsunterschiede nur ganz langsam aus, die Spannung sinkt also nur langsam. Gibt der Akkumulator Strom ab, so fällt die Klemmspannung zuerst ziemlich schnell, bis zu etwa 1,9 Volt. Von jetzt an bleibt die Spannung längere Zeit nahezu konstant. Ist die Spannung bis zu 1,85 Volt gesunken, so fällt sie schneller ab. Gewöhnlich unterbricht man die Entladung, wenn die Klemmspannung bei Stromentnahme 1,83—1,8 Volt beträgt, und zwar aus folgenden Gründen:

¹⁾ Die Elektroden, besonders die Bleiplatten, absorbieren Gase (Okklusion). Die Gase werden gleichsam durch den Strom in die Elektroden hineingebrückt.

Bei weiterer Entladung würde die elektromotorische Kraft so schnell sinken, daß eine Konstanthaltung der Netzspannung mit Schwierigkeiten verbunden wäre; denn mit fortschreitender Entladung wird das Eindringen der für die Bleisulfatbildung nötigen Säure in das Innere der Platte immer schwieriger. Ferner müßte man, wenn man bei der Entladung noch unter 1,8 Volt heruntergehen wollte, die Anzahl der Elemente vergrößern. Wollte man beispielsweise bei 110 Volt Netzspannung bis zu 1 Volt entladen, so müßte man eine Batterie von mindestens 110 Zellen vorsehen. Sodann wird, wenn man einen Akkumulator bis zur völligen Erschöpfung entlädt, die folgende Ladung erschwert und der Nutzeffekt ungünstig beeinflusst. Endlich ist eine zu weit getriebene Entladung dem Akkumulator schädlich.

Als Grund für das Sinken der Spannung während der Entladung haben wir die Bildung von Wasser in den Poren der aktiven Masse und an der Oberfläche der Elektroden kennen gelernt. Die Abnahme der elektromotorischen Kraft macht sich natürlich in der ersten Zeit der Entladung besonders stark bemerkbar, und sie ist um so größer, je stärker die Entladestromstärke ist. Das Sinken der Spannung im weiteren Verlaufe der Entladung ist auf die Abnahme der Säuredichte innerhalb der ganzen Zelle zurückzuführen. Wie groß diese mittels des Aräometers meßbare Abnahme der Säuredichte ist, kann allgemein nicht angegeben werden. Man kann sie jedoch aus der Kapazität und dem Volumen der eingegossenen Schwefelsäure leicht berechnen. Bei Abgabe von 1 Ampere-Stunde werden ca. 3,8 g Schwefelsäure verbraucht und etwa 0,7 g Wasser gebildet.

Bei der Entladung darf eine gewisse Stromstärke nicht überschritten werden, weil sich die Platten bei zu starker Stromentnahme krümmen („werfen“) und die aktive Masse abbröckeln kann. Durch das Werfen kann ferner innerhalb der Zelle ein Kurzschluß entstehen, der zu einem frühen Tode des Akkumulators führt. Die maximale Entladestromstärke, die von der Konstruktion der Platten und der Größe ihrer benetzten Oberfläche abhängt, wird von den Fabriken für die einzelnen Typen angegeben und ist meistens gleich der maximalen Ladestromstärke.

Vorgänge in der offenen Zelle. a) Für die Wichtigkeit der Annahme, daß die Abnahme der Klemmspannung bei der Entladung auf die Verzerrung des Elektrolyten im Innern der aktiven Masse an Säure zurückzuführen ist, spricht auch diejenige Erscheinung, die man als Erholung bezeichnet. Sie besteht darin, daß nach Verringerung der Belastung, besonders nach Unterbrechung des Stromkreises, die Spannung innerhalb einiger Minuten zuerst schnell, dann langsamer auf den der Säuredichte entsprechenden Betrag steigt.

b) Selbstentladung. Läßt man einen geladenen Akkumulator unbenutzt stehen, so nimmt seine Kapazität von Tag zu Tag ab. Diese Abnahme beträgt unter normalen Verhältnissen 1—2% der augenblicklichen Kapazität. Die langsame Entladung kann durch mangelhafte Isolation, Verunreinigungen der Säure und durch Sauerstoff verursacht werden. Die mangelhafte

Isolation wird besonders bei Batterien für hohe Spannungen eine Rolle spielen. Es fließt dann ein schwacher Strom von der positiven Klemme durch die Säure, über die (feuchte) Glas- oder Holzwand, das Gestell, in die Erde zc. bis zum negativen Pol. Der Sauerstoff der Luft wird in geringer Menge von der Säure absorbiert, kommt mit Blei in Berührung und oxydiert dieses; das Bleioxyd verbindet sich mit Schwefelsäure zu Bleisulfat. Da sich ferner während der Gasentwicklung die Säure in der Nähe der positiven Platten mit Sauerstoff sättigt, so wird durch Diffusion ein Teil des absorbierten Sauerstoffes nach den Bleiplatten gelangen; dort verbindet er sich mit Blei zu Bleioxyd, das durch Schwefelsäure in Bleisulfat umgewandelt wird. Besonders schädlich sind dem Akkumulator metallische Verunreinigungen der Säure. Hier kommen besonders Platin und Eisen, weniger Kupfer in Betracht. Bei Anwesenheit von ganz minimalen Mengen Platin in der Säure kann die Abnahme der Kapazität durch Selbstentladung bis zu 50% und noch mehr in einem Tage betragen. „Sehr auffallend ist auch die Beobachtung von Kugel, daß Metalle, die allein nur eine schwache Wirkung hervorrufen, eine starke Selbstentladung herbeiführen können, wenn sie zu mehreren gleichzeitig in der Säure vorhanden sind. Eine Erklärung für diese Beobachtung läßt sich zur Zeit noch nicht geben.“ (Dolezalek, Theorie des Bleiakkumulators, S. 75). Bei der Ladung werden die in der Säure gelösten Metallteilchen auf der Bleiplatte abgeschieden und bilden dann mit Blei ein kleines Element (Lokalelement), es wird Wasserstoff in Freiheit gesetzt und Blei in Bleisulfat umgewandelt. Von der Richtigkeit dieser Ansicht überzeugt man sich, wenn man mit einem unten umgebogenen Platindrahte eine Bleiplatte eines Akkumulators innerhalb der Säure berührt. Man beobachtet dann lebhaftere Gasentwicklung¹⁾. Geringe Mengen von Platin können schon bei der Fabrikation in die Schwefelsäure gelangen, wenn nämlich die Abdampfung der Säure in Platintiegeln vorgenommen wird. Auch Verunreinigungen der Säure, die leicht oxydierbar sind, können Selbstentladung verursachen. Beobachtet man bei einer Zelle, daß die negativen Platten noch längere Zeit nach Beendigung der Ladung gasen, daß also Selbstentladung stattfindet, so müssen die negativen Platten durch neue ersetzt werden.

Da die Selbstentladung der positiven Elektrode so gering ist, daß sie für die Praxis nicht in Betracht kommt, so können wir von einer Besprechung derselben absehen.

c) Sulfatisierung. Läßt man einen entladenen Akkumulator längere Zeit stehen, ohne ihm Strom zuzuführen, so beobachtet man, daß sich auf der Oberfläche der Platten weißliche Flecke bilden, die im Laufe der Zeit an Größe zunehmen; schließlich ist die ganze Oberfläche mit einer weißlichen Schicht bedeckt. Die chemische Analyse ergibt, daß der Überzug aus Bleisulfat besteht,

¹⁾ Ein analoger Versuch ist folgender: Taucht man einen Zink- und einen Kupferstab in verdünnte Schwefelsäure ein, und bringt man die Stäbe innerhalb der Säure zur Berührung, so entweicht Wasserstoff.

und man nennt daher den betreffenden Vorgang Sulfatisierung, Sulfatierung oder Sulfation. Schließt man die sulfatierte Zelle an ein Voltmeter an, so findet man, daß ihre elektromotorische Kraft nahezu Null ist. Die folgende Ladung ist mit erheblichen Schwierigkeiten verknüpft, weil der innere Widerstand der Zelle ein ungewöhnlich großer ist. Die starke Zunahme des inneren Widerstandes ist einestheils auf die Verarmung des Elektrolyts an Schwefelsäure, besonders aber darauf zurückzuführen, daß die Sulfatschichten dem Ladestrome das Eindringen in die Flüssigkeit erschweren. Ist die Sulfatierung nicht gar zu weit fortgeschritten, so nimmt der innere Widerstand einige Zeit nach Beginn der Ladung langsam wieder ab. Meistens ist die Sulfatierung mit einer Krümmung der Platten verbunden.

Wir haben früher gesehen, daß sich bei jeder Entladung Bleisulfat bildet, und es fragt sich daher, welcher Unterschied zwischen der bei der Sulfatierung entstehenden und der bei jeder Entladung sich bildenden Bleisulfatschicht besteht. Die Sulfatierung ist auf eine physikalische Veränderung des schwefelsauren Bleies zurückzuführen, wie in folgendem näher dargelegt werden soll. Die Löslichkeit des Bleisulfates in verdünnter Schwefelsäure nimmt mit der Temperatur schnell zu. Nun unterliegt die Temperatur des Raumes, in dem sich der Akkumulator befindet, und daher auch die Temperatur der Säure fortwährenden Schwankungen. Steigt die Temperatur (am Tage), so geht neues, an den Elektroden vorräufiges Bleisulfat in Lösung; sinkt die Temperatur (gegen Abend und in der Nacht), so scheidet sich ein Teil des gelösten Sulfates in kristallinischem Zustande ab. Bei dem folgenden Temperaturanstieg geht wieder Bleisulfat in Lösung. Da sich aber das strukturlose, bei der vorhergegangenen Entladung entstandene Sulfat leichter löst, so nehmen die schon vorhandenen Kristallnadeln nur wenig an Größe ab. Bei der nächsten Abkühlung geht wieder Bleisulfat aus der Lösung heraus. Die sich ausscheidenden Moleküle lagern sich den kleinen Kristallen an. So wachsen also die Kristallnadeln im Laufe der Zeit auf Kosten des fein verteilten Sulfates, „bis schließlich die ganze Oberfläche mit einer dicht zusammenhängenden, für Flüssigkeiten fast undurchdringlichen Kruste von kristallinischem Bleisulfat bedeckt ist“ (Els, Die Akkumulatoren).

Die Erfahrung lehrt, daß bei einem Akkumulator mit sulfatisierten Platten die „Ladung mit Ruhepausen“ von Vorteil ist; man lädt also kurze Zeit, schaltet die Stromquelle ab, setzt nach einiger Zeit die Ladung fort zc.¹⁾

Auf den ersten Blick hat es den Anschein, als ob bei einer Zelle, die ein Glied einer Akkumulatorenbatterie bildet, Sulfatierung ausgeschlossen sei, wenn die Batterie nach Vorschrift geladen und entladen wird. Wir wollen daher kurz erklären, wie einzelne Zellen in einen schlechten Zustand geraten können. Bei einer Zelle, die wir mit X bezeichnen wollen, möge eine leitende Verbindung zwischen einer positiven und einer negativen Platte entstanden sein, sei es durch abgebrochene aktive Masse, sei es durch einen in die Zelle gelangten Fremd-

¹⁾ Der Vorteil dieses Verfahrens kann mittels der Liebnow'schen Theorie leicht erklärt werden.

körper. Es fließt dann ununterbrochen Strom von der positiven Elektrode zur negativen, so daß sich die Zelle vollständig entladen kann. Erfolgt die nächste Ladung, so fließt der Ladestrom in Zelle X größtenteils durch die leitende Verbindung zwischen der positiven und negativen Platte, so daß nur geringe Mengen von Blei und Bleisuperoxyd gebildet werden. Nach der Ladung entlädt sich die Zelle sehr schnell. Die Zelle befindet sich also fast immer im entladenen Zustande, wodurch die Sulfatierung begünstigt wird.

Wenn die Kapazität einer Zelle aus irgend einem Grunde kleiner geworden ist als die Kapazität der anderen Zellen, so kann ebenfalls Sulfatierung erfolgen. Die betreffende Zelle wird dann bei jeder Entladung der Batterie zu stark beansprucht, und da sie früher als die anderen Elemente bis zur Endspannung entladen ist, so ist die zwischen normaler Entladung und Ladung liegende Zeit bei ihr größer als bei den übrigen Zellen.

Da die Löslichkeit des Bleisulfates mit der Säuredichte sehr schnell ansteigt, so nimmt die Sulfatierung mit der Säuredichte in hohem Maße zu. Das Minimum der Löslichkeit des Bleisulfates und daher dasjenige der Sulfatierung scheint bei 13—19% Schwefelsäure zu liegen. Dieses würde vorzüglich mit den Beobachtungen von Heim übereinstimmen, wonach zur dauernden Erhaltung der Kapazität einer Zelle es am zweckmäßigsten ist, dieselbe mit Säure von 16% H_2SO_4 zu füllen, gemessen im normal entladenen Zustande.

Kapazität. Wird von der Kapazität eines Akkumulators ohne einen Zusatz gesprochen, so ist diejenige Elektrizitätsmenge, ausgedrückt in Amperestunden¹⁾, gemeint, die der Akkumulator abgeben kann. Wird z. B. ein Element mit einer Stromstärke von 10 Ampere entladen und ist nach 6 Stunden die Spannung so weit gesunken, daß man die Entladung als beendet ansehen muß, also bis zu 1,83 Volt, so ist die Kapazität des betreffenden Akkumulators bei 6stündiger Entladung 60 Amperestunden. Offenbar hängt die Kapazität unter sonst gleichen Umständen von der Größe der Oberfläche der Elektroden ab. Würde man nun bei Zellen großer Leistung nur 1 positive und 1 negative Elektrode benutzen, so würde die Zelle unförmlich große Dimensionen annehmen. Man vereinigt daher in einer Zelle immer mehrere positive und mehrere negative kleinere Platten und verbindet die positiven Platten durch Bleistreifen miteinander und ebenso die negativen (s. Fig. 101, S. 221). Bei den inneren Platten sind beide Seiten in gleichem Maße an der Stromlieferung beteiligt, während die Außenseiten der ersten und letzten Platte nur wenig ausgenutzt werden, weil der Strom den kürzesten Weg bevorzugt.

Die Verwendung mehrerer Positiven und Negativen gewährt noch einen anderen Vorteil. Wenn man bei einem Akkumulator nur 2 Elektroden benutzt, so sind fast nur die beiden sich gegenüberliegenden Oberflächen an der Stromlieferung beteiligt, es werden also nur etwa 50% der Gesamtoberfläche ausgenutzt. Besteht der Akkumulator aber aus einer positiven Platte und zwei

¹⁾ 1 Ampere Stunde = derjenigen Elektrizitätsmenge, die während 1 Stunde in Bewegung ist, wenn die Stromstärke = 1 Amp.

negativen, so sind von 6 Seiten nur zwei in beschränktem Maße an den chemischen Prozessen beteiligt, d. h. etwa nur $33\frac{1}{3}\%$ usw.

Die Anzahl der negativen Platten ist immer um Eins größer als die der positiven Platten. So sind z. B., wenn der Akkumulator aus 5 Platten besteht, 2 positive und 3 negative vorhanden. Man hat die angedeutete Anordnung getroffen, weil sich die Kapazität der positiven Elektrode, wie später gezeigt werden soll, im Laufe der Zeit im Vergleich zur negativen vergrößert.

Die Kapazität eines gegebenen Akkumulators hängt in hohem Maße von der Entladestromstärke ab. Denn bei größerer Stromdichte (Amperezahl pro qdem) kann die für den chemischen Umsatz nötige Säure nicht schnell genug in das Innere der aktiven Masse eindringen; es werden dann hauptsächlich nur die oberen Schichten der aktiven Masse in Bleisulfat umgewandelt. (Über einen diesbezüglichen Versuch von Liebenow s. Ztschr. für Elektrochem. 1897, S. 61.) Die Kapazität bei 3stündiger Entladung und die Kapazität bei 10stündiger Entladung verhalten sich zueinander angenähert wie 26 : 35. — Die gesamte Elektrizitätsmenge, die man einem Akkumulator entnehmen kann, ist selbstverständlich durch das Gewicht der vorhandenen Menge von Bleischwamm und Bleisuperoxyd in der aktiven Masse gegeben. Nach dem Faradayschen Gesetze werden bei der Entladung, mag die Stromdichte groß oder klein sein, durch 1 Ampere-Stunde 3,86 g Blei und gleichzeitig 4,45 g Bleisuperoxyd in Bleisulfat umgewandelt. Soll nun ein Akkumulator bei 10stündiger Entladung 100 Ampere-Stunden abgeben, so müssen auf der negativen Elektrode mindestens 386 g Bleischwamm und auf der positiven mindestens 445 g Bleisuperoxyd angehäuft sein. In Wirklichkeit müssen aber größere Mengen vorhanden sein, da auch bei 10stündiger Entladung die aktive Masse nur zum Teil in Bleisulfat umgewandelt wird. Wäre unser Akkumulator vor Beginn der Entladung 3 Stunden lang mit 25 Ampere geladen worden, so würde er vielleicht einmal bei 10stündiger Entladung 100 Ampere-Stunden abgeben können, indem dann aktive Masse, die bei der vorhergegangenen Entladung nicht in Bleisulfat umgewandelt worden ist, sich an der Stromlieferung beteiligen kann. Abgesehen von der Entladestromstärke, hängt die Kapazität von der Dicke der aktiven Schicht, der Säuredichte und der Temperatur ab. Ist das Bleisuperoxyd bezw. der Bleischwamm als sehr dünner Überzug auf einer großen Oberfläche verteilt, so kann die für die Bleisulfatbildung nötige Säure leichter in das Innere eindringen, als wenn die wirksame Masse eine dickere Schicht mit kleinerer Oberfläche bildet. Über den Einfluß der Säuredichte hat zuerst Heim eingehende Untersuchungen angestellt. Er fand, daß die Kapazität zunächst mit wachsender Konzentration steigt, ein Maximum erreicht und dann wieder abnimmt. Nach Heim liegt das Maximum der Kapazität bei einer Säuredichte von 1,1, nach den später von Carle vorgenommenen Messungen bei 1,22—1,27. Da bei der Dichte 1,22 verdünnte Schwefelsäure das Maximum der Leitfähigkeit besitzt, so darf man die Kapazität als eine Funktion des Leitungsvermögens der Säure ansehen. Die Stromlinien dringen um so tiefer in das Innere der aktiven Masse ein, je besser die Säure leitet. Der Einfluß der Temperatur

auf die Kapazität ist ein nicht unerheblicher. Heim¹⁾ fand, daß bei einer Type die Kapazität pro 1° Temperaturerhöhung innerhalb der Grenzen 14° und 45° um 2,6% des Betrages bei 19° stieg. Die Zunahme der Kapazität mit der Temperatur kann durch den rascheren Ausgleich der Konzentrationsänderungen und die Zunahme des Leitungsvermögens der Säure erklärt werden. In der Praxis dürfte eine Kapazitätssteigerung durch Erwärmung des Elektrolyten ausgeschlossen sein wegen der von der Akkumulatoren-Fabrik Akt.-Ges. Hagen i. W. konstatierten vorzeitigen Abnutzung der Platten.

Eine Kapazitätsprobe wird bei der Abnahme einer gelieferten Batterie ausgeführt und sollte außerdem von Zeit zu Zeit vorgenommen werden, damit man sich ein Bild über den Zustand der Batterie entwerfen kann. Die Prüfung ist eine sehr einfache. Will man die Kapazitätsprobe für 3stündige Entladung machen, so wird die Batterie zunächst voll geladen. Kurze Zeit nach der Ladung soll die Entladung beginnen. Man reguliert die Stromstärke so, daß sie die von der Fabrik für 3stündige Entladung angegebene Höhe hat und sieht zu, ob die Spannung der einzelnen Zellen nicht unter den vorgeschriebenen Wert sinkt.

Beobachtet man, daß die Kapazität eines Akkumulators zurückgegangen ist, so ist es von Wichtigkeit zu wissen, ob die Ursache an der positiven oder negativen Platte liegt. Um zu prüfen, ob die Kapazität der positiven oder der negativen Platte abgenommen hat, bedient man sich der Fuchs'schen Methode, über deren Verwendung in der Akkumulatorentechnik C. Liebenow in der Zeitschrift für Elektrochemie berichtet²⁾: Man bedient sich bei dieser Methode einer sogen. Hilfsselektrode, am einfachsten eines amalgamierten Zinkstäbchens oder eines Kadmiumblechs. Die Hilfsselektrode bildet in verdünnter Schwefelsäure sowohl mit Bleisuperoxyd wie mit Bleischwamm ein galvanisches Element. Die elektromotorischen Kräfte e_1 und e_2 beitragen bei der gebräuchlichen Säuredichte 2,17 bzw. 0,16 Volt, wenn der Akkumulator vollgeladen ist und eine Zinkelektrode benutzt wird. $e_1 - e_2$ ist, wenn die Zelle keinen Strom abgibt, mit großer Annäherung gleich der elektromotorischen Kraft der Zelle. Entnimmt man dem Akkumulator Strom, so ändern sich e_1 und e_2 etwas, und es ist jetzt die Differenz $e_1 - e_2$ gleich der Klemmspannung. Man macht während der Entladung eine größere Reihe von Messungen und trägt die Werte für e_1 , e_2 und die Klemmspannung auf Millimeterpapier nach der Zeit auf, d. h. man wählt die Zeiten als Abszissen und die Spannungen als Ordinaten. Man erhält so drei Kurven, die den Verlauf der Klemmspannung und der elektromotorischen Kräfte der beiden Kombinationen: Blei | verdünnte Schwefelsäure | Hilfsselektrode und Bleisuperoxyd | verdünnte Schwefelsäure | Hilfsselektrode anzeigen. Die beiden elektromotorischen Kräfte e_1 und e_2 müssen sich bei fortschreitender Entladung einander immer mehr nähern, da ja die positive und negative Platte einander ähnlicher werden. Bei gleicher Kapazität der beiden Platten müssen also die Kurven für e_1 und e_2 zur selben Zeit, nämlich wenn

¹⁾ G.-Z. 3. 1901, S. 811.

²⁾ Siehe Zeitschrift für Elektrochemie 1902, Nr. 44.

die Klemmspannung anfängt abzufallen, stark umbiegen, die eine nach unten, die andere nach oben. — Der Hilfselektrode muß man eine solche Lage geben, daß sie von den Stromlinien im Akkumulator möglichst wenig getroffen wird und der innere Widerstand der genannten Kombinationen möglichst klein ist. Man legt sie am besten, gegen die Platten isoliert, auf die oberen Kanten der Elektroden. Über die Abnahme der Kapazität im Betriebe s. S. 220.

Nutzeffekt, Güteverhältnis, Wirkungsgrad. Diese drei Wörter werden in der Literatur vielfach in demselben Sinne gebraucht. Der Ausdruck Güteverhältnis kann leicht zu Irrtümern Veranlassung geben; denn die hiermit bezeichnete Zahl ist nicht immer ein Maß für die Güte des Fabrikates, sie wird vielmehr durch äußere Umstände, durch die Behandlung des Akkumulators im Betriebe, besonders durch die Stromdichte bei der Ladung und Entladung in hohem Maße beeinflusst.

Wenn man einerseits die dem Akkumulator während der Ladung zugeführte, andererseits die von der Zelle im ganzen abgegebene Elektrizitätsmenge in Coulomb oder in Amperestunden mißt, und die zweite Zahl durch die erste dividiert, so erhält man den Wirkungsgrad, bezogen auf die Elektrizitätsmenge. Wird der Akkumulator mit einer so geringen Stromdichte geladen, daß keine nennenswerte Gasbildung erfolgt, so wird die ganze zugeführte Elektrizitätsmenge für die Bildung von Bleischwamm bzw. Bleisuperoxyd verbraucht. Erfolgt kurze Zeit nach beendigter Ladung die Entladung, so ist bei geeigneter Stromdichte das eben definierte Verhältnis nahezu gleich 1 oder der Wirkungsgrad ist nahezu gleich 100%. Bezüglich der Gasbildung bei der Ladung ist zu beachten, daß für jedes Molekül Wasser, das in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt wird, eine gewisse Elektrizitätsmenge verbraucht wird, die man bei der Entladung nicht wieder gewinnen kann.

Liegt zwischen Ladung und Entladung ein größerer Zeitraum, so liegt der Wirkungsgrad tief unter 100%, und er ist um so kleiner, je mehr die Säure verunreinigt ist (s. Selbstentladung).

Wiel wichtiger als das eben definierte Verhältnis ist für die Praxis der Wirkungsgrad, bezogen auf die elektrische Arbeit; man nennt ihn den Nutzeffekt. Man versteht darunter den Quotienten, den man erhält, wenn man die vom Akkumulator während der Entladung abgegebene Energie, gemessen in Wattstunden, durch die dem Akkumulator zugeführte Energie in Wattstunden dividiert. Beispiel: Ein Akkumulator wurde mit 20 Ampere etwa 6 Stunden lang geladen; die Ladungsspannung hatte den Mittelwert 2,2 Volt; die dem Akkumulator zugeführte Energie w_1 betrug

$$w_1 = 2,2 \cdot 121,5 \text{ Wattstunden} = 267 \text{ Wattstunden.}$$

Der Akkumulator wurde kurze Zeit nach der Ladung (nach etwa $\frac{1}{2}$ Stunde) mit 20 Ampere entladen; nach ungefähr $5\frac{3}{4}$ Stunden war die Entladung beendet. Da die mittlere Spannung, wie die Messungen ergaben, jetzt 1,9 Volt betrug, so belief sich die vom Akkumulator abgegebene Leistung w_2 auf

$$w_2 = 115 \cdot 1,9 = 218,5 \text{ Wattstunden.}$$

Mithin war in diesem Falle der Nutzeffekt gleich

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{218,5}{267} = 0,80 \text{ oder } 80\%.$$

Bei Ladung und Entladung im Laboratorium mit sehr geringen Stromdichten kann man einen Wirkungsgrad von 90% und noch mehr erzielen. Für die Praxis ist meistens 4—5stündige Ladung und Entladung maßgebend, und es beträgt unter normalen Betriebsverhältnissen der Nutzeffekt 75—80%. Auf die Rolle, die die zwischen Ladung und Entladung liegende Zeit spielt, ist schon aufmerksam gemacht worden.

Der geringere Nutzeffekt ist nicht etwa darauf zurückzuführen, daß bei größerer Stromdichte der innere Widerstand des Akkumulators stark ansteigt; er ist vielmehr eine Folge der schon besprochenen Konzentrationsänderungen der Säure in unmittelbarer Nähe der Platten und in den Poren der aktiven Masse, die um so mehr zur Geltung kommen, je größer die Stromdichte ist. Überhaupt ist die durch den inneren Widerstand bei der Entladung verursachte Spannungsabnahme und bei der Ladung verursachte Spannungserhöhung $J \cdot w$ auch bei kleineren Akkumulatoren ziemlich klein. Beträgt doch der innere Widerstand selbst bei den kleinsten in der Starkstromtechnik verwendeten Typen noch nicht $\frac{1}{100}$ Ohm. Die Energieverluste infolge des inneren Widerstandes ($w \cdot J^2$) dürften gewöhnlich kaum mehr als 3% betragen.

Die in dem Akkumulator erzeugte Wärme ist daher nur zu einem geringen Bruchteile als Joulesche Wärme aufzufassen; größtenteils ist sie auf die Konzentrationsausgleiche zurückzuführen. Diese letzteren Verluste hängen, wie aus einer von Dolezalek abgeleiteten Formel hervorgeht, u. a. von dem mechanischen Bau der Platten (Porosität) und der Leitfähigkeit der Säure ab, und zwar sind sie der Leitfähigkeit umgekehrt proportional. Da nun Säure vom spezifischen Gewichte 1,221 (30% Schwefelsäure) das Maximum der Leitfähigkeit besitzt¹⁾, so ist der Nutzeffekt bei dieser Säuredichte am größten.

Die Leistung einer gegebenen Zelle hängt zunächst von der Lade- und Entladestromstärke ab; denn wir haben gesehen, daß sich die chemische Umwandlungen um so gründlicher vollziehen, je schwächer der Strom ist (Kapazitätserhöhung), und daß bei einer Entladung mit größerer Stromdichte wegen der Konzentrationsänderungen die elektromotorische Kraft stärker abfällt. Die mittlere Klemmspannung ist also bei rascher Entladung kleiner, als wenn mit geringer Stromdichte entladen wird. Außerdem kommt noch wegen der Selbstentladung die zwischen Ladung und Entladung liegende Zeit in Betracht. Man kann daher über die Leistung nur dann genaue Angaben machen, wenn man die eben erwähnten Faktoren kennt. Ist die Entladefurve gegeben, so kann man die mittlere Klemmspannung leicht finden. Andernfalls hat man aus einer größeren Anzahl von Messungen das arithmetische Mittel zu bilden. Für eine angenäherte Berechnung kann man als mittlere Entladenspannung 1,9 Volt annehmen.

¹⁾ Der Widerstand eines Würfels von 1 ccm Inhalt der betreffenden Schwefelsäure hat einen Widerstand von zirka 1,4 Ohm.

Wenn man die Leistung einer Batterie, bei der Schaltzellen vorgesehen sind, bestimmt, so ist zu beachten, daß die mit dem Zellenhalter verbundenen Zellen nicht ganz ausgenutzt werden.

Anzahl und Größe der Zellen. Die Anzahl der Elemente, die zu einer Batterie vereinigt werden müssen, ist durch die Gebrauchsspannung, den maximalen Spannungsverlust in der Leitung und die untere Grenze der Entladungsspannung, d. h. der Klemmspannung bei voller Stromentnahme, bestimmt; letztere beträgt, wie schon gesagt, 1,83—1,8 Volt. Sollen die Lampen mit 110 Volt Spannung brennen und beträgt der Spannungsverlust bei normaler Belastung 10 Volt, so sind $120 : 1,83 = 66$ Zellen erforderlich.

Die Größe der zu wählenden Zellen bzw. die Kapazität hängt von verschiedenen Umständen ab, vor allem von der Art und der Einrichtung des Betriebes. Die verschiedenen Fälle werden in dem Kapitel Projektierung näher besprochen. In größeren Anlagen beträgt die Leistung der Akkumulatorenbatterie, wie man aus der Statistik der Elektrizitätswerke in Deutschland¹⁾ ersehen kann, meistens 25—40%, bei kleinen 50—75% der normalen Maschinenleistung inkl. Reserve.

Für Anlagen, in denen eine Wasserkraft ausgenutzt wird, ist eine Batterie von bedeutend größerer Kapazität zu wählen als bei Dampfmaschinenbetrieb.

Nutzen der Akkumulatoren. Obschon durch die Anschaffung einer Akkumulatorenbatterie das Anlagekapital nicht unbedeutend erhöht wird und für die Unterhaltung der Batterie (Akkumulatorenversicherung, Amortisation) ein verhältnismäßig großer Betrag in den Etat zu setzen ist, so bieten die Akkumulatoren andererseits für eine Reihe von elektrischen Anlagen so wesentliche Vorteile, daß sie als geradezu unentbehrlich bezeichnet werden müssen.

Ohne Batterie würde die Spannung an den Lampen bei Belastungsänderungen schwanken, so daß die Lampen bald mit zu starkem, bald mit zu schwachem Strome oder, kurz gesagt, unruhig brennen würden. Diese Schwankungen werden durch die Batterie, die mit der Dynamo parallel geschaltet wird, ausgeglichen, so daß die Lampen ein gleichmäßiges Licht ausstrahlen. Ferner kann man bei Verwendung einer Akkumulatorenbatterie die Ansprüche, die man an die Antriebsmaschine bezüglich des Gleichförmigkeitsgrades und der Regulierungsfähigkeit stellt, herabsetzen. Von großem Nutzen können die Akkumulatoren sein, wenn es sich darum handelt, Wasserkräfte für Beleuchtungszwecke nutzbar zu machen.

Sodann ermöglichen die Akkumulatoren eine ökonomische Ausnutzung der Maschinen. Bekanntlich nämlich arbeiten Dampfmaschinen und Dynamos mit dem günstigsten Wirkungsgrade, wenn sie voll belastet sind. Ist nun der Stromkonsum gering, so kann die Dynamo Strom an die Batterie abgeben. Wird der Stromverbrauch so groß, daß eine Dynamo zu stark und zwei zu schwach belastet sein würden, so gibt die Batterie so lange Strom ab, bis es sich lohnt, die zweite Dynamo in Betrieb zu setzen. In den frühen Morgen-

¹⁾ Siehe G.-L. Z. 1902, S. 1100.

und späten Abendstunden ist die Energieabgabe der Zentrale meistens so gering, daß eine Dynamomaschine verhältnismäßig schwach belastet sein würde. Man überträgt dann der Batterie die Stromlieferung. Hierdurch wird nicht nur eine nicht unbedeutende Ersparnis an Betriebsmaterial, sondern auch eine einfachere und billigere Bedienung ermöglicht. Bei kleineren Anlagen können die Akkumulatoren im Sommer die Speisung der Lampen zc. eventuell ganz übernehmen. Die stete Bereitschaft der Akkumulatoren kann unter Umständen von unschätzbarem Nutzen sein (Momentreserve). Man braucht sich nur die schlimmen Folgen auszumalen, die ein durch eine Betriebsstörung verursachtes, plötzliches Erlöschen des Lichtes in Räumen, in denen sich viele Menschen angesammelt haben, begleiten würden, um zu der Einsicht zu gelangen, daß die Mehrkosten, die die Anschaffung einer Akkumulatorenbatterie verursacht, in vielen Fällen gar nicht ins Gewicht fallen.

Plattenkonstruktionen. Planté benutzte für seine Untersuchungen glatte Bleiplatten; die positive und negative Elektrode wurden durch Kautschuk-

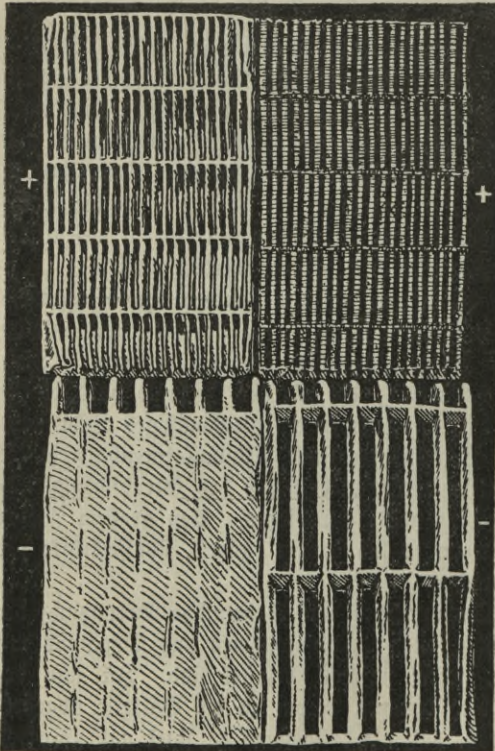


Fig. 96.

bänder voneinander getrennt und aus dem Plattenpaare eine Spirale gebildet. Um die Kapazität zu erhöhen und die Formationszeit abzukürzen, trug Faure auf die Bleiplatten einen aus Bleisalzzen (Mennige, Bleioxyd oder Bleiglätte) und Schwefelsäure hergestellten dicken Brei auf. Die Schicht wurde durch einen Überzug aus Filz, Leinwand oder dergl. festgehalten. Eine bedeutende Vereinfachung und Verbesserung der Faureschen Methode erzielte Volckmar dadurch, daß er als Träger der Masse Bleiplatten benutzte, in denen sich rechteckige oder quadratische Löcher befanden. Die Füllmasse (Paste) wird als Brei in die Gitter eingetragen und erhärtet, indem sich die Schwefelsäure mit dem Bleisalze chemisch verbindet. In Fig. 96 ist unten links ein Gitter der

Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft Hagen i. W. ohne, rechts unten mit Füllmasse dargestellt. Man nennt jetzt allgemein Platten, die aus einem

Bleikerne oder einem Bleigerüste und einer in Vertiefungen, Zwischenräumen zwischen Leisten, Zähnen 2c. befindlichen Füllmasse bestehen, Gitter- oder Faure-Platten. Solche Platten werden von fast allen Fabriken als negative Elektroden benutzt. Die Gitter werden meistens aus reinem Blei gegossen, zuweilen wird dem Blei etwas Antimon zugesetzt, um größere Härte zu erzielen. Das Bleigerüst muß bei genügender Festigkeit so beschaffen sein, daß der Strom den verschiedensten Stellen der Füllmasse leicht zugeführt und die aktive Masse dauernd festgehalten wird. Um das Herausfallen der Masse zu verhindern, verwenden verschiedene Firmen Doppelgitter. Das Correns-Gitter (Akkumulatorenwerke G. Boese, Berlin) z. B. besteht aus zwei einfachen Gitterplatten mit quadratischen Feldern, die gegeneinander verkezt sind. Ähnlich sind die alten Gitterplatten der Kölner Akkumulatorenwerke, G. Hagen in Kalk bei Köln.

Das Bestreben, bei möglichst geringem Gewichte eine möglichst große Kapazität zu erreichen, führte zur Konstruktion der Großoberflächenplatten. Man versteht die Platten mit Leisten, Rippen oder Lamellen, deren Abstand möglichst klein gemacht wird. Vorbildlich für viele Konstruktionen sind die positiven Großoberflächenplatten der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft Hagen gewesen. Ein Muster dieser Platte nach dem Gusse ist in Fig. 96 oben links dargestellt und daneben nach der Formation. Die Bleisuperoxydschicht, die die ganze Oberfläche bedeckt, ist hart und mit dem Bleikerne fest verwachsen, so daß ein Herabfallen von Teilchen nur in ganz geringem Maße erfolgt. Im Betriebe bildet sich aus dem Bleikerne neues Superoxyd. Die abgewickelte, d. h. die für den chemischen Umsatz in Betracht kommende Oberfläche ist 4—5mal so groß wie die projizierte (Produkt aus Länge und Breite).

Obwohl die sogenannten Masseplatten in der Starkstromtechnik wenig Verwendung finden, so sollen sie der Vollständigkeit halber doch kurz charakterisiert werden. Sie bestehen aus einem Hartbleirahmen mit ziemlich großen Feldern (einem Fensterrahmen ähnlich), in die Füllkuchen eingesetzt werden. Sie haben, wenn die Entladung langsam und mit längeren Ruhepausen erfolgt, eine sehr große Kapazität im Vergleich zu dem Gewichte.

Es dürfte angebracht sein, den vorhergegangenen Darlegungen einige Bemerkungen über Fabrikate bekannter Firmen hinzuzufügen. Die Akkumulatorenfabrik, Aktiengesellschaft, Hagen, deren zielbewußtem Vorgehen die deutsche Akkumulatorenindustrie ein gut Teil ihres Vorsprunges vor fast allen anderen Industriestaaten zu danken hat, ist neuerdings zu einer neuen Konstruktion der negativen Platte übergegangen. Sie setzt der Füllmasse, bevor sie in das Gitter eingetragen wird, eine Substanz in fein verteiltem Zustande zu, durch die das Schrumpfen (s. S. 220) verhindert wird. Die eingetragene Masse schwillt später an; deshalb werden die einzelnen Höhlungen des Gitters nicht ganz ausgefüllt. Um das Herausfallen der aktiven Masse zu verhindern, wird das Gitter auf beiden Seiten mit einer dünnen, vielfach durchlöchernten Platte abgesperrt. Von den verschiedenen Ausführungsweisen sei die folgende

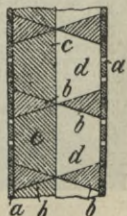


Fig. 97.

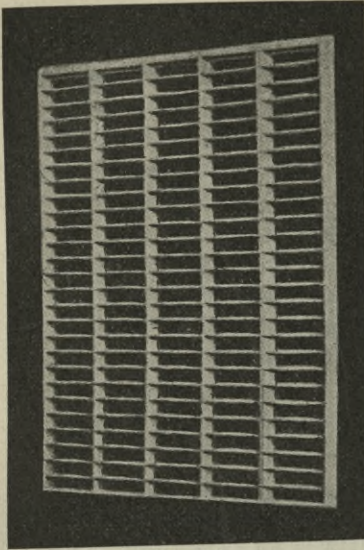


Fig. 98.

platten vollkommen gleich, hat eine etwa achtmal so große Oberfläche als seine ebene Projektion. Als leeres Gitter mit nach Planté formierten Rippen

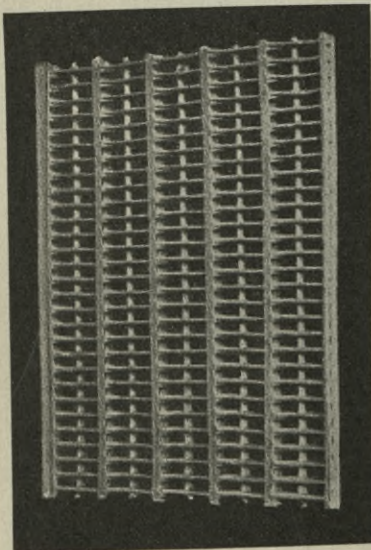


Fig. 99.

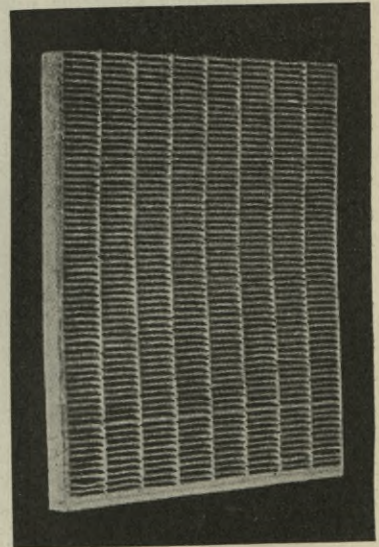


Fig. 100.

ergibt die Platte bei dreistündiger Entladung dieselbe Kapazität wie als pastierte Platte; dagegen besitzt sie bei den im normalen Lichtbetriebe vor-

¹⁾ Zentralblatt für Akkumulatoren Nr. 97.

erwähnt ¹⁾. Nach Fig. 97 wird die Elektrodenplatte aus zwei gleichen, auf der einen Seite mit einer durchlöchernten Platte a versehenen Gittern gebildet, deren Stäbe b sich gegenüberstehen. Es werden nur die Höhlungen der einen Platte mit wirksamer Masse c ausgefüllt, während die der anderen leer bleiben.

Für stationäre Akkumulatoren verwenden die Kölner Akkumulatorenwerke G. Hagen die in den Fig. 98—100 abgebildeten Gitter, und zwar Gitter Fig. 98 lediglich für negative Platten, Gitter Fig. 99 für positive, die normal nicht schneller als in drei Stunden entladen werden, während Gitter Fig. 100 nur für ganz starke Beanspruchungen benutzt wird. Das engste Gitter, das in seinem Aussehen den Großoberflächen-

kommenden langsameren Entladungen erheblich geringere Leistungen als Gitter Fig. 99 mit Füllmasse.

Die Gitter werden aus reinstem Weichblei in Metallformen gegossen und nach dem Gusse von Hand mit chemisch reinen, in der Fabrik selbst hergestellten Salzen pastiert. „Die Verwendung von Gitterplatten für negative und positive Platten hat den Vorzug, daß die Kapazität beider Plattenarten gänzlich unabhängig von der Sorgfalt bei der Formation wird und stets die gleiche bleiben muß, da alle Platten derselben Art und Größe stets die gleiche Menge wirksamer Salze enthalten.“

Formation. Wenn man als Elektroden eines Akkumulators reine Bleiplatten benutzt und die Zelle lädt, so erfolgt schon nach kurzer Zeit Gasentwicklung. Sobald sich nämlich die positive Platte mit einer sehr dünnen Schicht von Bleisuperoxyd bedeckt hat, hört die Einwirkung des Stromes auf die positive Elektrode auf, da das metallisch leitende Bleisuperoxyd den darunterliegenden Bleikern vor der Einwirkung des Stromes schützt. Um nun die Kapazität der Bleiplatten zu erhöhen, lockerte Planté die Platten an der Oberfläche auf, so daß auch unmittelbar unter der Oberfläche liegende Schichten der Stromwirkung zugänglich wurden. Das angewandte Formierungsverfahren war folgendes: Das Element wurde kurze Zeit geladen, dann nach einer Ruhepause entladen, hierauf wieder geladen u. s. f. Bei den verschiedenen Ladungen, deren Dauer allmählich vergrößert wurde, wurde der Strom bald in der einen, bald in der anderen Richtung durch die Zelle geschickt, da nur diejenige Platte angegriffen wird, die bei der Ladung positive Elektrode ist. Der Zweck der Ruhepausen wurde später von Gladstone und Tribe aufgeklärt. Bei der Ladung bildet sich auf der positiven Elektrode Bleisuperoxyd. Die einzelnen Superoxydteilchen bilden mit den unter ihnen liegenden Bleiteilchen kleine, kurzgeschlossene Elemente, oder außerordentlich kleine Akkumulatoren (Lokalelemente, s. Selbstentladung). Diese entladen sich während der Ruhepause; hierbei werden Blei- und Superoxydteilchen in Bleisulfat umgewandelt. Bei der folgenden Ladung kann daher eine größere Bleisulfatmenge in Bleisuperoxyd übergeführt werden.

Auf die Mittel, welche die Fabriken anwenden, um eine beschleunigte Planté-Formation zu erzielen (Ladung mit verringerter Spannung, dadurch, daß man die zu formierende Beiplatte mit einer geladen positiven Akkumulatorplatte in verdünnter Schwefelsäure kurzschließt, Erwärmung des Elektrolyten, Zusatz von geeigneten Säuren und Salzen), können wir nicht näher eingehen.

Bei der Formation der Faure- oder Gitterplatten handelt es sich darum, die in der aufgetragenen Paste enthaltenen bezw. aus ihr entstandenen Bleiverbindungen (basisches und neutrales Bleisulfat) in Bleisuperoxyd einerseits und Bleischwamm andererseits umzuwandeln.

In dem Elektrolyt, den man für die Formation benutzt, geht Bleisulfat in Lösung. Bei der Formation der negativen Platten kommt es darauf an, die Abscheidung des Bleies aus der Lösung zu beschleunigen und die gleichzeitig erfolgende Wasserstoffbildung möglichst einzuschränken. Ersteres erreicht

man dadurch, daß man die an und für sich sehr geringe Löslichkeit des Bleisulfates steigert oder dafür sorgt, daß die Anzahl der in der Lösung befindlichen „Bleitionen“¹⁾ wächst. Als geeignetes Mittel sei der Zusatz von Natriumazetat erwähnt. Die Wasserstoffbildung wird verringert, wenn man einen Elektrolyt benutzt, in dem sich nur wenig Wasserstoffionen durch Dissoziation bilden. Die Formation geht also in der Lösung eines neutralen Sulfates schneller vor sich als in verdünnter Schwefelsäure. Bei der Formation der positiven Elektroden handelt es sich darum, die Bleisuperoxydbildung (die Abscheidung der Bleisuperoxydionen) zu beschleunigen. Die Theorie lehrt uns, daß auch hier eine neutrale Lösung (von Magnesium- oder Aluminiumsulfat) vorzuziehen ist. Wird bei der Formation eine solche Lösung benutzt, so bildet sich freie Säure; diese muß neutralisiert werden.

Die Lebensdauer der positiven Platte ist abhängig von der Zeit, bis zu welcher das Blei der Rippen bezw. des Bleifersens allmählich durch Umwandlung in Bleisuperoxyd aufgebraucht ist. Im Betriebe fällt PbO_2 infolge der Säurezirkulation und der Gasentwicklung ab, allerdings nur in ganz geringem Maße. Die Teilchen ergänzen sich aus dem Blei der Rippen bei den Ladungen und infolge der Lokalaktion (s. Formation). Die Rippen werden also allmählich dünner. Die Menge des festen Bleies ist also in hohem Grade maßgebend für die Lebensdauer der positiven Platte. — Bei den älteren negativen Platten, besonders bei den sogen. Masseplatten, bilden sich im Bleischwamme Risse, und dieser löst sich zuweilen von der Unterlage. Man nennt diese Erscheinung Schrumpfen, Sintern, Schwund oder Verbleimung. Beim Schrumpfen wird die aktive Masse fester und die Poren verengen sich; daher kann die Säure nicht mehr in die wirksame Masse eindringen, so daß die Kapazität abnimmt. Durch Zusatz gewisser indifferenten Substanzen in fein verteilterm Zustande zu dem Breie, den man in die Gitter schmiert, soll die Verbleimung verhindert bezw. verlangsamt werden. Nach G. Sieg ist die Lösung der Aufgabe, das Sintern zu verhindern, noch nicht in befriedigender Weise gelungen²⁾. Durch zu weit getriebene Entladungen scheint das Schrumpfen befördert zu werden. Es empfiehlt sich daher, die Kapazität der negativen Platten von vornherein größer zu wählen als diejenige der positiven, indem dann eine Überanstrengung der ersteren ausgeschlossen ist. Wenn dem Elektrolyt, um eine beschleunigte Formation zu erzielen, Stoffe zugesetzt werden, die das Blei chemisch angreifen oder lösen, so kann die Lebensdauer auch unter günstigen Betriebsverhältnissen und bei sachgemäßer Behandlung stark abnehmen. Es ist nämlich sehr schwer, die bleißenden Chemikalien in ihren letzten Resten aus den Platten, in deren Inneres sie durch Diffusion bei der Formation gelangen, zu entfernen, so daß geringe Mengen der schädlichen Stoffe in die Akkumulator säure gelangen.

¹⁾ Diese entstehen durch Dissoziation des $PbSO_4$. Dieses spaltet sich in der Lösung von selbst in das positiv geladene Bleiion (Pb^{++}) und in das negativ geladene SO_4^- -Ion ($\overline{SO_4}$).

²⁾ G. Sieg, Die Akkumulatoren, S. 60.

Abgesehen davon, daß das Blei des Trägers der aktiven Masse im Laufe der Zeit „angefressen“ wird, können auch starke Krümmungen der negativen Platten hervorgerufen werden. Sind die Platten einer Zelle ungleich stark formiert worden, so krümmt sich die weniger leistungsfähige, da sie bei jeder Entladung zu stark beansprucht wird, außerdem kann bei einer solchen Platte leicht Sulfatierung eintreten.

Montage und Aufstellung. Der Raum, in dem die Akkumulatoren-batterie untergebracht wird, soll kühl, trocken und vor allem gut ventiliert sein, damit die Säure nicht zu stark verdunstet, die Außenwände der Zellen trocken gehalten werden können und die bei der Ladung sich bildenden Gase, von denen Säureteilchen mitgerissen werden, schnell entweichen können. Während der Ladung dürfen brennende oder glühende Körper in dem Akkumulatorenraume nicht geduldet werden, weil sich bei schlechter Ventilation eventuell vorhandenes Knallgas entzünden kann. — Die Elemente müssen so aufgestellt werden, daß man zu jeder Zelle freien Zutritt hat und eine Besichtigung leicht vorgenommen werden kann; daher dürfen von kleineren Zellen nicht mehr als zwei Reihen nebeneinander und übereinander auf demselben Gestelle stehen; größere Zellen sollten auf dem Boden nebeneinander aufgestellt werden. Die Gänge zwischen den einzelnen Reihen oder Gestellen müssen bei Batterien für hohe Spannungen (300 und mehr Volt) so breit sein, daß eine unbeabsichtigte gleichzeitige Berührung zweier Pole, zwischen denen eine höhere Potentialdifferenz besteht, ausgeschlossen ist. — Der Fußboden, den man zweckmäßig mit einem Lattenlaufboden versieht, muß so solide sein, daß trotz der großen auf ihm ruhenden Last Senkungen nicht vorkommen können; ihn zu asphaltieren, ist sehr zu empfehlen.

Die positiven Platten einerseits, die negativen andererseits werden durch Bleistreifen miteinander verbunden. Beim Löten bedient man sich einer Wasserstoff- oder Knallgasflamme. Um den inneren Widerstand zu verringern, macht man den Abstand zwischen den einzelnen Platten möglichst klein; andererseits darf der Abstand nicht zu klein sein, weil sonst leicht ein Kurzschluß in der Zelle durch Volumänderungen oder schwaches Krümmen der Platten oder durch abgefallene aktive Masse entstehen kann. Zwischen die einzelnen Platten schiebt man Glasröhren.

Die Platten dürfen ferner den Boden des Gefäßes nicht berühren; es soll vielmehr ein Raum zwischen dem Boden und den unteren Plattenkanten frei bleiben, in dem sich abgebröckelte aktive Masse sammeln kann, ohne daß ein innerer Kurzschluß entsteht. Werden die Platten mittels der sogen. Fahnen an dem oberen Rande des Gefäßes auf-

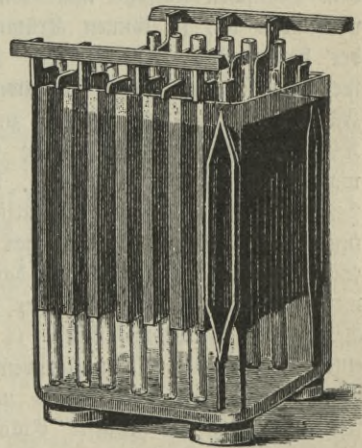


Fig. 101.

gehängt, so werden sie durch federnde Bleistreifen gegeneinander gedrückt (s. Fig. 101).

Bei kleineren Zellen (Typen) verwendet man als Behälter Glasgefäße, weil diese billiger sind und eine Beschädigung des Innern der Zelle leicht ermöglicht; für größere Typen benutzt man Holzkästen, die mit Blei ausge schlagen werden.

Große Sorgfalt ist auf die Isolation zu verwenden, da die Außenwände auch bei guter Bedienung nicht ganz trocken bleiben. Die einzelnen Zellen sind gegen das Gestell und dieses gegen die Erde durch Glasisolatoren zu isolieren. Bei hoher Batteriespannung verwendet man Ölisolatoren, deren oberer Teil größer ist als der untere, so daß die etwa herabfließende Säure über den oberen Teil hinwegtropft, der untere Teil des Isolators also trocken bleibt.

Die Gestelle werden aus sorgfältig geteerten oder mit Paraffinöl getränkten Balken hergestellt. Der Gebrauch von Nägeln oder Schrauben aus Eisen ist zu verwerfen, da diese durch die Säure angegriffen werden; die Verbindung der einzelnen Teile des Gestelles muß daher durch Holzpflocke geschehen.

Kupferdrähte, die zur Schalttafel führen, müssen zum Schutze gegen die Säuredämpfe mit säurefester Farbe angestrichen werden und an Porzellandoppelglocken befestigt werden.

Vorschriften für die Behandlung der Akkumulatoren.

a) Säure. Die Säure muß mindestens 1 cm hoch über den Platten stehen; vor allem darf es nicht vorkommen, daß obere Teile der Platten aus der Säure herausragen; da nämlich die nicht benetzten Teile der Platten an dem chemischen Umfaze nicht teilnehmen und dieser mit Volumenänderungen verbunden ist, so können Krümmungen vorkommen; auch ist die Kapazität der betreffenden Zelle kleiner. Ferner muß die Säure das vorgeschriebene spezifische Gewicht haben und zwar nach Beendigung der Ladung 1,18—1,20. Ist die Dichte der Säure zu hoch, so tritt leicht Sulfatierung ein. Die Konzentration der Säure ist mittels Aräometers zu prüfen. Findet man durch Aräometermessung, daß die Säuredichte bei der Ladung nicht steigt, so ist die Zelle sorgfältig zu revidieren, da sich wahrscheinlich ein innerer Kurzschluß gebildet hat oder Sulfatierung eingetreten ist. Muß Säure nachgefüllt werden, so darf nur verwendet werden destilliertes Wasser, wenn die Säuredichte nach der Ladung größer als 1,2 ist, oder verdünnte chemisch reine Schwefelsäure (1,18). Diese bezieht man zweckmäßig von einer seitens der Akkumulatorenfabrik angegebenen Firma. Das destillierte Wasser muß frei von Chlor- und Stickstoffverbindungen (salpetriger Säure) sein. Enthält das Wasser Chlorverbindungen, so werden dieselben bei der nächsten Ladung zerlegt, und das an der positiven Elektrode freigewordene Chlor bildet mit Blei eine lösliche Verbindung. Bei der Entladung wird das Chlor wieder abgetrieben u. Es können so selbst minimale Spuren von Chlorverbindungen im Laufe der Zeit zu einer Zerstörung des metallischen Bleies führen. Wird beim Nachfüllen Flüssigkeit verschüttet, so ist die Außenwand der betreffenden Zelle sofort abzureiben.

b) **Ladung.** Über die maximale Ladestromstärke haben wir schon gesprochen. Jede Ladung ist so lange fortzusetzen, bis in sämtlichen Elementen an den positiven und negativen Platten Gase emporsteigen. Der Betriebswärter muß sich daher bei jeder Ladung vergewissern, ob in allen Zellen lebhaft Gasentwicklung erfolgt. Es ist darauf zu achten, daß die mit dem Zellenhalter verbundenen Elemente nicht zu lange überladen werden. Findet man, daß eine Zelle nicht gast, so ist zu untersuchen, ob sich ein Kurzschluß gebildet hat. Ferner ist es notwendig, ab und zu alle Zellen mit einer tragbaren Glühlampe abzuleuchten, um etwa im Entstehen begriffene Kurzschlüsse u. dergl. zu entdecken und sofort zu beseitigen.

c) **Entladung.** Die von der Firma angegebene maximale Entladestromstärke darf nicht überschritten werden; ferner darf die Entladung nicht zu weit getrieben werden. Als äußeres und sicherstes Kennzeichen dafür, daß die Grenze der zulässigen Entladung erreicht ist, gilt das Sinken der Spannung bei voller Entladestromstärke unter die normale Lichtspannung oder die Abnahme der Säuredichte. Kennt man den oberen und unteren Wert der Säuredichte eines Elementes, so kann man aus den Zwischenwerten für die folgenden Entladungen erkennen, bis zu welchem Grade die Entladung fortgeschritten ist.

Im entladenen Zustande darf die Batterie nicht länger als 24 Stunden stehen, weil sonst leicht Sulfatierung erfolgen kann. Wird die Batterie voraussichtlich längere Zeit außer Betrieb gesetzt, so muß sie vor dem Abschalten voll geladen werden. Endlich schreiben verschiedene Firmen (z. B. die Akkumulatoren-Fabrik Akt.-Ges.) vor, daß alle drei Monate einmal eine Aufladung mit Ruhepausen vorgenommen werden soll; durch eine solche wird eine eventuell eingetretene Sulfatierung rückgängig gemacht.

Neuere Akkumulatoren ¹⁾.

Da der von Edison erfundene Akkumulator sich noch keinen Eingang in die Praxis zu verschaffen gewußt hat, obschon seit den ersten Veröffentlichungen mehr als zwei Jahre verflossen sind, so soll er nur ganz kurz behandelt werden. Edison verwendet als Elektroden Stahlplatten von 0,6 mm Dicke, in denen sich rechteckige Löcher befinden (Fensterrahmen). In diese Löcher werden kleine Büchsen oder Kästchen eingesetzt, in die die aktive Masse in Brikettform eingelegt wird (entsprechen also den Fensterscheiben). Die Büchsen sind mit zahlreichen kleinen Löchern versehen, damit eine Berührung zwischen der aktiven Masse und dem Elektrolyten herbeigeführt wird. Die Briketts für die negativen Platten werden aus einem Gemenge von Eisenverbindungen und kleinen Graphitblättchen ²⁾ hergestellt. Der Graphit ist an dem chemischen Umsatze bezw. der Stromlieferung nicht beteiligt, er dient nur dazu, das Leitungsvermögen der Briketts zu erhöhen.

¹⁾ Siehe Gl. N. 1901, Nr. 47, 49 u. 51. E.-T. Z. 1901, S. 354 u. 489. Helios 1901, Nr. 28.

²⁾ Nach einem neueren Patente wird Quecksilber und Kupfer zugesetzt; die Spannung soll dann langsamer abnehmen.

Die für die positiven Platten bestimmten Briketts enthalten außer Graphit eine Nickelverbindung. Die Eisen- und Nickelverbindungen sind wahrscheinlich Oxide. Als Elektrolyt wird 20—30prozentige Kalilauge verwendet. Bei der Ladung wird die Nickelelektrode mit dem positiven Pole der Stromquelle verbunden und die Eisenelektrode mit dem negativen Pole. An der negativen Platte wird die Eisenverbindung durch Wasserstoff¹⁾ zu schwammigem, metallischem Eisen reduziert und die Nickelverbindung in eine höhere Oxydationsstufe umgewandelt, wahrscheinlich zu Nickeloxyd Ni_2O_3 . Der Effekt wäre also derselbe, wie wenn Sauerstoff von der Eisenverbindung abgegeben und, nachdem er durch den Elektrolyten gewandert ist, von der Nickelverbindung aufgenommen wird. Bei der Entladung wird das Eisen oxydiert und das Ni_xO_y reduziert (zu Nickeloxydul NiO). Der Sauerstoff wandert also im umgekehrten Sinne wie bei der Ladung. Die Zelle wird daher als Sauerstofftransporteur bezeichnet.

Da weder bei der Ladung noch bei der Entladung KOH verbraucht bzw. zurückgebildet wird, der Elektrolyt also als Ganzes betrachtet seine Konzentration nicht ändert, so genügt eine geringe Menge des Elektrolyten. Das Gewicht der Lauge beträgt etwa 14% des Gewichtes der ganzen Zelle (beim Bleiakkumulator zirka 25% des Gesamtgewichtes der Zelle).

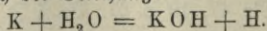
Die Volumveränderungen der Briketts sollen sich innerhalb solcher Grenzen bewegen, daß guter elektrischer Kontakt immer erhalten bleibt. [Aus neueren Patenten scheint hervorzugehen, daß sich in dieser Hinsicht Schwierigkeiten ergeben haben²⁾.] Die geladene Zelle hat anfänglich eine elektromotorische Kraft von 1,5 Volt; wird sie mit normaler Stromdichte, nämlich 0,93 Ampere pro Quadratdezimeter, entsprechend der dreistündigen Entladung, beansprucht, so beträgt die Klemmspannung zuerst etwa 1,4 Volt, nach drei Stunden aber nur noch 1 Volt. Die mittlere Entladespannung wird zu 1,14 Volt angeben.

Über das Verhalten des Akkumulators bei der Ladung fehlen nähere Angaben. Wahrscheinlich aber wird die Klemmspannung kurze Zeit nach Beginn der Ladung 1,5 Volt betragen und im weiteren Verlaufe der Ladung noch höher steigen.

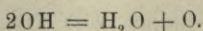
Der Unterschied zwischen der elektromotorischen Kraft und der Klemmspannung, in Prozenten der elektromotorischen Kraft ausgedrückt, ist erheblich größer als bei dem Bleiakkumulator, weil der Widerstand des Elektrolyten und der Elektroden größer ist.

Auf jeden Fall hat der Edison-Akkumulator einen geringeren Nutzeffekt als der Bleiakkumulator.

¹⁾ Wird Kalilauge (KOH) elektrolysiert, so wird an der negativen Elektrode Kalium und an der positiven das Hydroxyl (OH) in Freiheit gesetzt. Das Kalium verbindet sich mit Wasser nach der Gleichung:



Ferner



²⁾ Siehe Helios 1903, Nr. 21.

Unstreitig ist ein Vorzug des Eisen-Nickel-Akkumulators sein im Vergleich zum Blei-Akkumulator geringes Gewicht. Ein Blei-Akkumulator wiegt 75,5 bis 113,4 kg pro Kilowattstunde, ein Eisen-Nickel-Akkumulator aber nur 32,4 kg pro Kilowattstunde.

Nachteile sind: 1. der geringere Nutzeffekt, 2. die kleinere Klemmspannung, 3. die relativ starke Abnahme der Klemmspannung, so daß das Konstanthalten der Spannung umständlicher ist — größere Sorgfalt bei der Bedienung, größerer Zellschalter, 4. die Aufnahme von Kohlenensäure der Luft seitens des Elektrolyten unter Bildung von kohlenstoffsaurem Kali.

Ungefähr gleichzeitig mit Edison oder vielleicht schon früher hat der schwedische Chemiker Jungner den Nickel-Kadmium-Akkumulator erfunden, bei dem ebenfalls Kalilauge als Elektrolyt verwendet wird. Dieser Akkumulator verhält sich genau so wie der Edison'sche.

M. H. Schöop hat über den Jungner-Edison'schen Akkumulator eine Arbeit veröffentlicht¹⁾, in der hauptsächlich ein Vergleich gezogen wird zwischen dem Blei-Akkumulator und seinem neuen Konkurrenten auf Grund von Untersuchungen im Laboratorium. Bei gleichem Gewichte war die Leistung in Wattstunden bei den gebräuchlichen Entladestromstärken bei dem Jungner'schen Akkumulator um etwa 6% größer als bei dem Blei-Akkumulator, während bei sehr langsamer Entladung der Blei-Akkumulator dem Jungner'schen bedeutend überlegen war.

Pufferbatterien.

Batterien, die den Zweck haben, die Stöße, die durch starke und schnell wechselnde Belastungsschwankungen auf die Maschinen ausgeübt werden, von den letzteren fernzuhalten, nennt man Pufferbatterien. Bei elektrischen Bahnen mit kleiner Wagenzahl können stärkere Belastungsänderungen durch das Halten bezw. Anfahren der Wagen und durch stärkere Steigungen verursacht werden. Die Pufferbatterie soll, wenn die Klemmspannung der Dynamo infolge stärkeren Wachstums der Netzstromstärke J abzufallen beginnt, Strom in die Leitung schicken und Strom aufnehmen, wenn J unter den normalen Betrag sinkt. Könnte die Batterie ihre Aufgabe in vollkommener Weise erfüllen, so müßte der von der Dynamo abgegebene Strom und daher auch ihre Klemmspannung bei jedem an das Netz abgegebenen Effekte auf derselben Höhe bleiben. Dynamo und Dampfmaschine würden dann stets gleichmäßig belastet sein und mit dem günstigsten Wirkungsgrade arbeiten.

Soll die Batterie nur die Belastungsschwankungen ausgleichen, so gibt sie im Laufe eines Tages so viel Strom ab, wie ihr zugeführt wird. Wählt man die Batterie so groß, daß sie im Notfalle eine oder mehrere Maschinengruppen vertreten kann oder regelmäßig bei schwachem Konsumte den Strombedarf deckt, so wird sie zur Kapazitätsbatterie.

Wir wollen jetzt untersuchen, ob und inwieweit die Batterie den An-

¹⁾ G. Z. 3. 1903, S. 619.

forderungen, die man an sie stellt, gerecht wird. Die Punkte, in denen die Batterie mit den Hauptleitungen verbunden ist, seien A und B. Die Belastungsänderungen denken wir uns durch schnelle Änderungen des äußeren Widerstandes hervorgerufen. Die Batterie gibt keinen Strom ab, wenn ihre elektromotorische Kraft E_2 gleich ist der Spannung E_1 zwischen A und B. Das möge bei der Stromstärke J_1 der Fall sein. Sobald E_1 kleiner wird als E_2 , gibt die Batterie Strom ab. Durch Verringerung des äußeren Widerstandes möge der Verbrauchstrom auf $J_2 = J_1 + i_1$ steigen. Gäbe nun nach wie vor die Dynamo den Strom J_1 ab, so würde sich auch nicht ihre Klemmspannung ändern, die Potentialdifferenz der Punkte A und B würde wieder E_1 sein und die Batterie könnte keinen Strom abgeben. Die Klemmspannung der Dynamo muß also, wenn sich die Batterie an der Stromlieferung beteiligen soll, abfallen. Da nun endlich eine Verringerung der Klemmspannung erst dann erfolgt, wenn die Dynamo einen Strom abgibt, der stärker als J_1 ist, so folgt, daß einen Teil von i_1 die Dynamo und den Rest die Batterie abgeben muß.

Compoundmaschinen sind also für den Parallelbetrieb mit Pufferbatterien nicht geeignet; am besten benutzt man Nebenschlußmaschinen mit stark abfallender Charakteristik, weil bei diesen schon kleinere Änderungen der Ankerstromstärke ein stärkeres Abfallen der Klemmspannung verursachen. Sind bereits vorhandene Nebenschlußmaschinen für das Zusammenarbeiten mit einer Batterie nicht geeignet, so kann man folgende von Dr. Gijig¹⁾ empfohlene Anordnung treffen. Man wickelt auf die Feldspulen einige Windungen von starkem Drahte und schließt diese so an den einen Pol des Akkumulators an, daß dessen Strom die Windungen durchfließt, während im übrigen die Schaltung wie üblich hergestellt wird. Findet Ladung statt, so wird durch die dicke Wickelung das Feld verstärkt und die Spannung der Maschine erhöht, während bei Entladung der aus der Batterie fließende Strom dem Nebenschlußstrom entgegenwirkt und die Spannung herabdrückt.

Es fragt sich, in welchem Umfange die Dynamo an den Stromänderungen beteiligt ist. G. Brandt²⁾ gelangte auf Grund eingehender Untersuchungen zu dem Resultate, daß die Anteile der Dynamoanlage und der Batterie an den Stromstößen im umgekehrten Verhältnisse ihrer charakteristischen Widerstände stehen. Unter dem charakteristischen Widerstande versteht Brandt folgendes: Wenn bei einer Dynamo oder Batterie der Stromstärke J_1 die Klemmspannung E_1 und dem größeren Strome J_2 die Klemmspannung E_2 entspricht, so ist der charakteristische Widerstand w_1 für die betreffende Belastungsänderung

$$w_1 = \frac{E_1 - E_2}{J_2 - J_1}.$$

Für die Dynamoanlage ist der Einfluß der Trägheit des Dampfmaschinenregulators in w_1 einbegriffen. Hat eine Batterie in der Ruhe ($J_1 = 0$)

¹⁾ G.-Z. 3. 1902, S. 609.

²⁾ G.-Z. 3. 1899, S. 730.

500 Volt, bei Ladung mit 200 Ampere nach 1 Minute 530 Volt Klemmspannung, so ist der charakteristische Widerstand gleich $\frac{30}{200} = 0,15$ Ohm. In

Wirklichkeit ist natürlich der Widerstand kleiner als 0,15 Ohm, da ja die Spannung während der Ladung ansteigt, der Spannungsverlust in der Batterie also kleiner als 30 Volt ist. Hätte aber die Batterie am Ende der Ladung einen Widerstand von 0,15 Ohm, so würde die Klemmspannung bei unveränderter elektromotorischer Kraft $500 + 200 \cdot 0,15 = 530$ Volt betragen.

Wir wollen jetzt auf das Verhalten der Batterie bei Stromstößen näher eingehen. Der Strom möge wieder von J_1 bis zu $J_1 + i_1$ anwachsen. Es sind nun zwei Fälle zu unterscheiden: 1. Der Strom $J_1 + i_1$ ist nur während einer sehr kurzen Zeit, einige Sekunden lang, vorhanden, 2. der Strom $J_1 + i_1$ dauert längere Zeit an. In jedem Falle hat man bei den Überlegungen auf den Ladezustand der Zellen Rücksicht zu nehmen; denn eine Zelle, die nahe bis zur Gasentwicklung geladen ist, verhält sich, wenn man sofort zur Entladung übergeht, ganz anders wie eine Zelle, die zum Teil entladen ist. Bei einem gewissen Entladezustande kann man, wenn die Entladung nur sehr kurze Zeit dauert, von den Konzentrationsänderungen und der durch sie verursachten Abnahme der elektromotorischen Kraft wohl ganz absehen, und es ist dann nur der innere Widerstand der Batterie zu berücksichtigen. Je kleiner der innere Widerstand der Batterie ist, um so mehr Strom gibt sie ab, wenn die Klemmspannung der Dynamo abfällt. In dem obenerwähnten zweiten Falle macht sich nach einiger Entladezeit die Änderung der elektromotorischen Kraft der einzelnen Zellen infolge des Säureverbrauchs in der aktiven Masse bemerkbar; d. h. der Teil von i_1 , der auf die Batterie entfällt, wird allmählich kleiner, und der Teil von i_1 , den die Dynamo noch außer J_1 abgeben muß, wird größer.

Was die Stromaufnahme bei abnehmendem Konsumstrom anbelangt, so liegen die Verhältnisse ungünstiger als bei der Stromabgabe seitens der Batterie. Denn bei der Ladung ändert sich die Spannung der Zelle im allgemeinen schneller als bei der Entladung.

Oft wird sich an eine Periode schwächeren Konsums (als J_1) eine Periode stärkeren Stromverbrauchs (als J_1) direkt anschließen. Da die Zellenspannung während der Ladung im allgemeinen stark ansteigt, so wird sie bei der Entladung schon bei geringer Stromabgabe schnell abfallen.

Bezüglich der mittleren Zellenspannung fand Brandt (l. c.), daß sie für die günstigste Pufferwirkung bei den verschiedensten von ihm untersuchten Plattenkonstruktionen stets dieselbe Größe hat, und zwar betrug sie 2,07 Volt. Es ist dies die elektromotorische Kraft des vollgeladenen Akkumulators bei normaler Säuredichte, wenn er etwas Strom abgegeben hat.

M. H. Schoop¹⁾ hat das Verhalten eines Planté-Akkumulators und eines Faure-Akkumulators bezüglich der Pufferwirkung eingehend untersucht und gelangt zu folgenden Ergebnissen: Bei positiven Planté-Platten ist die

¹⁾ G.-T. Z. 1903, S. 214.

Säurediffusion (Ausgleich der Konzentrationsänderungen) erleichtert, so daß bei raschen Ladungen und Entladungen die aktive Masse mehr ausgenutzt werden kann als bei Faure-Platten. Dieser Vorteil wird jedoch dadurch wieder reichlich aufgehoben, daß der innere Widerstand eines Faure-Akkumulators gleiche Kapazität, Säuredichte und Plattenabstand vorausgesetzt, geringer ist als derjenige eines Planté-Akkumulators und daß dementsprechend der Faure-Akkumulator hinsichtlich der Bufferfähigkeit dem Planté-Akkumulator unstreitig überlegen ist. — Leider sind die Kurven, in denen die Resultate der Untersuchung veranschaulicht sind, in einem so kleinen Maßstabe in dem Aufsätze wiedergegeben, daß sich der Leser kaum ein eigenes Urteil bilden kann.

Bei der Bestellung einer Pufferbatterie werden zweckmäßig bezüglich der Spannungsänderungen der einzelnen Zellen bestimmte Bedingungen festgesetzt. Meistens wird der Spannungsabfall vorgeschrieben, der eintreten darf, wenn der Akkumulator zuerst eine bestimmte Anzahl von Sekunden mit der höchstzulässigen Stromstärke geladen und gleich darauf mit dem der 1stündigen Entladung entsprechenden Strom entladen wird. Die Akkumulatoren-Fabrik A. G. gibt für ihre Elemente an, daß bei einer Entladung mit dem einständigen Entladestrome während $\frac{3}{5}$ Minuten und einer Ladung während 1 Minute mit höchstzulässigem Ladestrom die Spannung zwischen Ende der Entladung und Ende der Ladung zwischen 1,89 und 2,23 Volt schwankt ¹⁾.

Bei der Wahl der Batterie spielt die höchste zulässige Spannungsänderung in der Zentrale eine wichtige Rolle. Denn eine verhältnismäßig kleine Batterie kann großen Spannungsänderungen nicht folgen; d. h. ihre Nennspannung wird schon gleich der Zentralspannung, ohne daß sie den gewünschten Strom abgibt. In kleinen Bahnanlagen kann es vorkommen, daß alle Wagen gleichzeitig halten. Die Batterie muß dann mindestens so groß sein, daß sie die mittlere Maschinenleistung aufnehmen kann, wobei man nach Dr. G. Sieg ²⁾ den 2stündigen Entladestrom als höchsten zulässigen Ladestrom annimmt. Der Entladestrom soll im allgemeinen bei längere Zeit dauernden Stößen den der einständigen Entladung entsprechenden Strom nicht überschreiten. Allerdings wird es sich in kleineren Anlagen nicht vermeiden lassen, daß die Batterie für sehr kurze Zeit (einige Sekunden) das 2—3fache dieses Stromes abgibt.

Nach Appenborn (Kalender) wählt man, falls nicht andere Gründe für größere Kapazität der Batterie sprechen, diese so groß, daß der einständige Entladestrom der Batterie das 1—1,6 fache der Maschinenleistung beträgt.

Zellenschalter.

Wir haben gesehen, daß bei der Entladung eines Akkumulators die Spannung allmählich abnimmt; die Spannung an den Lampen und Motoren aber muß auf gleicher Höhe gehalten werden. Will man beispielsweise

¹⁾ G.-Z. 3. 1902, S. 609.

²⁾ G.-Z. 3. 1900, S. 226.

110 Volt Spannung haben, so genügen, wenn die Akkumulatoren voll geladen sind, 55 Zellen für den Betrieb, wenn wir als anfängliche Entladenspannung rund 2 Volt rechnen dürfen. Da aber die Spannung in jeder Zelle bald sinkt, so werden nach einiger Zeit der Beanspruchung die eingeschalteten 55 Zellen die erforderliche Spannung nicht mehr haben; man muß daher Reservezellen zu Hilfe nehmen. Ist z. B. die Spannung jeder Zelle auf 1,9 Volt gesunken, so fehlen 5,5 Volt Spannung, und es müssen drei Reservezellen hinzugeschaltet werden. Die Schaltzellen werden natürlich nicht so stark in Anspruch genommen wie die beständig an der Stromabgabe beteiligten Elemente. Das Umgekehrte gilt für die Ladung. Wir wollen annehmen, daß sich die Spannung der Dynamomaschine so hoch steigern läßt, daß die ganze Batterie in einer Reihe geladen werden kann. Die letzten Zellen sind, da sie weniger Strom abgegeben haben, früher geladen und müssen, wenn sie einige Zeit gestagt haben, abgeschaltet werden; zuerst die letzte Zelle, etwas später die vorletzte Zelle 2c.

Derjenige Apparat, der es ermöglicht, nach Bedarf Zellen ab- oder hinzuschalten, heißt Zellenwechsel. Das Prinzip dieses Apparates wird durch

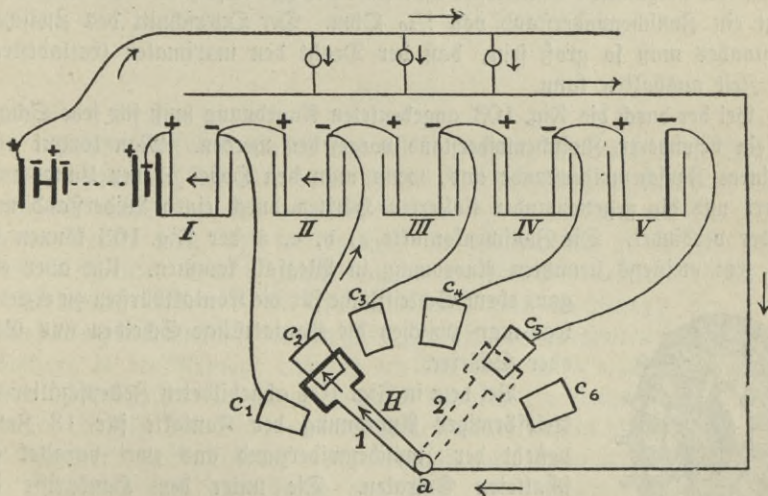


Fig. 102.

Fig. 102 erläutert. Die fünf letzten Zellen sind durch Drähte mit den Kontaktstücken c_1 bis c_5 des Zellenwechselers verbunden. Diese und der Schleifkontakt H sind auf einer gut isolierenden Unterlage montiert. Die Anzuleitung ist mit dem positiven Pole der Batterie und dem Hebel verbunden. Befindet sich H in der Lage 1, so fließt der Strom durch die Anzuleitung, die Lampen nach a, über c_2 zum negativen Pole der Schaltzelle II. Die Schaltzellen III, IV, V sind also an der Stromlieferung nicht beteiligt. Dreht man H in die Lage 2, so sind alle Zellen eingeschaltet.

Soll der Strom während des Hinzus- oder Abschaltens einer Zelle nicht unterbrochen werden, so muß der Schleifkontakt H den folgenden Kontakt schon berühren, bevor er den vorhergehenden verläßt. Liegt nun H beispielsweise zugleich auf c_2 und c_3 , so ist die Zelle III kurz geschlossen, denn der Strom dieser Zelle fließt nach c_2 , durch den Schleifkontakt nach c_3 und von dort zur negativen Platte. Der Kurzschluß schadet sowohl der Zelle als auch dem

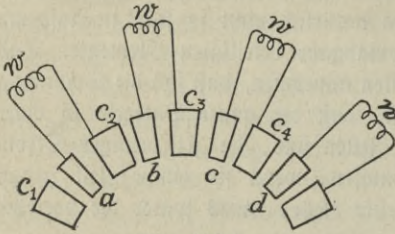


Fig. 103.

Apparate, letzterem, weil sich bei der Unterbrechung ein starker Funke bildet. Um den Kurzschluß zu vermeiden, schaltet man zwischen die Kontakte c_1, c_2 zc. kleinere Kontaktstücke a, b, c, d , die sogenannten Zwischenkontakte, und verbindet, wie es aus der Fig. 103 zu ersehen ist, die Zwischenkontakte und die Hauptkontakte durch Widerstände. Natürlich darf der Schleifkontakt nicht so breit sein, daß er C_1 und gleichzeitig C_2 berührt. Die Größe der Zwischenwiderstände richtet sich nach der maximalen Entladestromstärke. Beträgt diese z. B. 100 Ampere, so genügt ein Zwischenwiderstand von $\frac{1}{50}$ Ohm. Der Querschnitt des Zwischenwiderstandes muß so groß sein, daß der Draht den maximalen Entladestrom kurze Zeit aushalten kann.

Bei der durch die Fig. 103 angedeuteten Anordnung muß für jede Schaltzelle ein besonderer Zwischenwiderstand vorgesehen werden. Man kommt aber mit einem Zwischenwiderstand aus, wenn man den Hebel H der Länge nach halbiert und die gegeneinander isolierten Hälften durch einen Widerstand miteinander verbindet. Die Zwischenkontakte a, b, c, d der Fig. 103 können bei dieser jetzt meistens benutzten Anordnung in Wegfall kommen. Um aber eine ganz ebene Schleiffläche für die Kontaktbürsten zu erzielen, legt man zwischen die Kontaktstücke Scheiben aus Glas oder Schiefer.

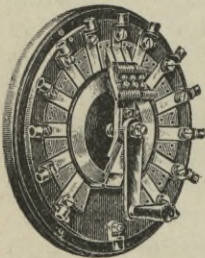


Fig. 104.

Bei dem in Fig. 104 abgebildeten Zellschalter mit kreisförmiger Anordnung der Kontakte für 13 Zellen besteht der Zwischenwiderstand aus zwei parallel geschalteten Spiralen. Die unter dem Handgriffe der Kurbel liegende Klemme steht in Verbindung mit dem inneren Metallringe, auf dem eine zweite Kupferbürste schleift. Die eben genannte Klemme wird mit der äußeren Leitung verbunden.

Bei geradliniger Anordnung der Kontakte (s. Fig. 105) benutzt man statt eines drehbaren Schleifkontaktes (Kontakthebel) einen Kontaktschlitten, der mittels eines Handrades oder einer mit Arretierungsvorrichtung versehenen Kurbel verschoben werden kann. An die Klemme k_1 wird die Leitung angeschlossen.

Um die Kontaktbürsten und die Gleitkontakte gegen vorzeitige Zerstörung durch die bei der Unterbrechung auftretenden Funken zu schützen, wird an den

Apparaten für größere Stromstärken (200 Amp. und mehr) eine besondere Unterbrechungsvorrichtung (Funkenentziehung) vorgesehen. Das Prinzip dieser Vorrichtung besteht darin, daß man die Funken zwischen zwei leicht auswechselbaren Kontaktstücken entstehen läßt.

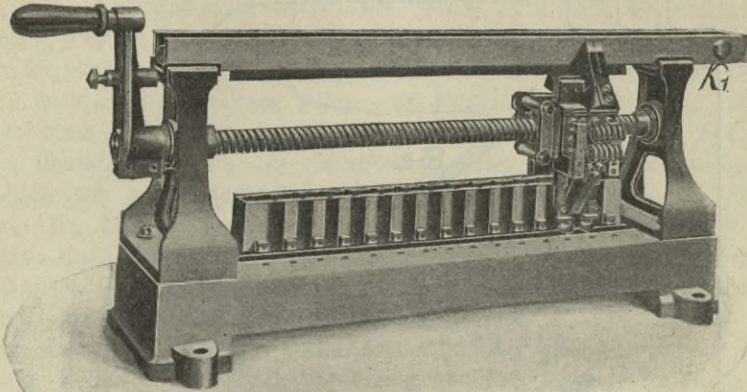


Fig. 105.

Doppelzellenschalter. Da bei der Ladung der Batterie die Spannung der Nebenschlußmaschine viel höher ist als die Netzspannung, so nimmt man am einfachsten den Strom, der während der Ladung an Lampen und Motoren abgegeben werden muß, aus der Batterie. In diesem Falle ist die Zahl der Elemente, die geladen werden, verschieden von der Zahl der Elemente, die Strom in die Rückleitung schicken. Soll also die Ladung ganz unabhängig von der Entladung erfolgen können, so müssen zwei Zellenschalter vorhanden sein. Eine Vereinfachung in der Montage und bei der Bedienung wird erzielt, wenn man die beiden Zellenschalter zu einem einzigen Apparate vereinigt — Doppelzellenschalter. In Fig. 106 sind die beiden Zellenschalter einzeln schematisch gezeichnet. Die Maschine ist auf „Ladung“ geschaltet, und zwar haben wir angenommen, daß der Ladestrom noch alle Zellen durchfließt. Der Netzstrom fließt von dem positiven Pole der Schaltzelle 5 durch den Schalthebel S_2 , die Lampen zum negativen Pole der letzten Zelle der Batterie. Nennen wir den Netzstrom J_2 und den Maschinenstrom J_1 , so ist der Ladestrom für die Zellen I—IV gleich J_1 und für die übrigen Zellen $J_1 - J_2$. Würde der Maschinist den Maschinenstrom so regulieren, daß $J_1 - J_2$ gleich dem maximalen Ladestrome der Zellen ist, so würden die Zellen I—IV oder allgemeiner die zwischen den beiden Schalthebeln S_1 und S_2 liegenden Elemente mit zu starkem Strome geladen werden. Ist aber $J_1 - J_2$ gleich dem maximalen Ladestrome, so dauert die Ladung, wenn während der Ladung im Netze ein stärkerer Strom verbraucht wird, zu lange. Es empfiehlt sich daher, bei den angegebenen Betriebs-

verhältnissen für die Schaltzellen Elemente von größerer Kapazität zu wählen.

Ist die Ladung der Batterie beendet, so wird umgeschaltet, indem man den Kontakt 1 mit dem Kontakte 3 verbindet.

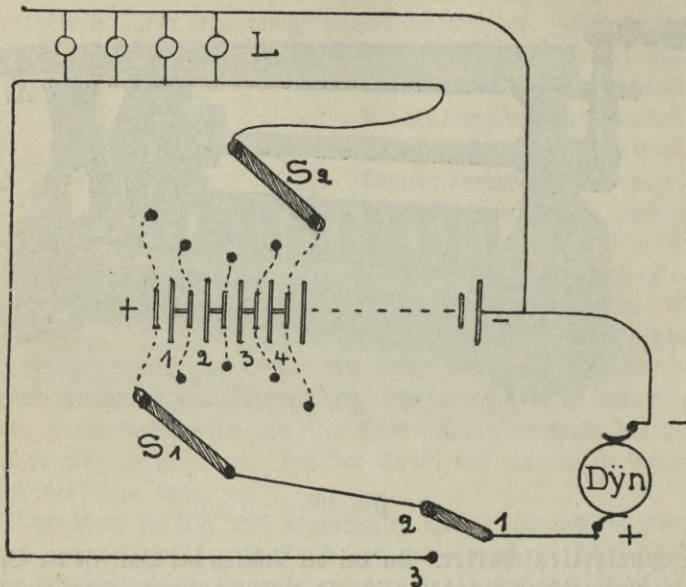


Fig. 106.

In unserer schematischen Fig. 106 haben wir die Kontaktstücke für den Ein- und Auswechsler getrennt gezeichnet, in der Praxis werden sie vereinigt, und zwar wählt man entweder kreisförmige oder geradlinige Anordnung, wie bei den Einfachzellenschaltern.

Selbsttätige Zellenwechsler¹⁾. 1. Selbsttätiger Antrieb des Entladekontaktes wird insbesondere dann angewandt, wenn eine ununterbrochene Aufsichtigung der Anlage nicht stattfinden kann, indem bei Abwesenheit des Bedienungspersonals der selbsttätige Zellenwechsler die normale Lichtspannung aufrechterhält. Die elektrischen Teile des Apparates sind ein Spannungsrelais, die Schalmagnete und der Elektromotor. Das Spannungsrelais besteht entweder aus einer Spule und einem von der Spule eingeschlossenen Eisenkerne, der sich auf- oder abwärts bewegt, wenn die Lichtspannung steigt oder sinkt, oder aus einem sogen. Kontaktvoltmeter. Durch das Relais wird, wenn die Lichtspannung eine bestimmte obere oder untere Grenze erreicht, ein Hilfsstromkreis geschlossen. Je nachdem die Spannung die obere oder untere

¹⁾ Eine kurze, aber klare Übersicht über die verschiedenen Prinzipien findet man in einer Arbeit von J. Thieme. *G.-L. Z.* 1902, S. 174.

Grenze erreicht, fließt durch den einen oder den anderen Schaltmagnet (Elektromagnet) Strom. Im ersteren Falle veranlaßt der Schaltmagnet einen Elektromotor zu einer Drehung in solcher Richtung, daß durch den Kontaktschlitten, auf den die Drehung des Elektromotors übertragen wird, eine Zelle abgeschaltet wird.

Eine Komplikation in mechanischer Hinsicht wird durch die folgende Anforderung bedingt, die man an jeden selbsttätigen Zellenschalter stellen muß. Beim Verschieben des Zellenschalterschlittens von einem Kontakte zum benachbarten wird, wie wir gesehen haben, die dazwischen liegende Zelle vorübergehend durch den Zwischenwiderstand geschlossen. Eine dauernde Berührung zweier Kontaktstücke durch den Schleifkontakt hätte natürlich eine baldige Erschöpfung und unter Umständen eine Zerstörung der betreffenden Zelle zur Folge. Um dies zu vermeiden, muß eine selbsttätige Vorrichtung, die zum Antriebe eines Zellenschalters dient, so beschaffen sein, daß sie den Schlitten des letzteren stets um einen Weg verschiebt, der genau mit der mittleren Entfernung zweier Zellenkontakte übereinstimmt, gleichgültig, ob der Impuls, durch den die Bewegung eingeleitet wurde, fortbauert oder nicht.

2. Selbsttätiger Antrieb des Entladekontaktes bezweckt die Abschaltung derjenigen Zellen, die voll geladen sind. Das Kontaktvoltmeter (Spannungsrelais) wird durch den Zellenschalter selbst mit den Polen der letzten im Ladestromkreise eingeschalteten Zelle verbunden. Hat diese Zelle die höchste Spannung bei der Ladung erreicht, so wird der Zellenschalter in dem Sinne in Bewegung gesetzt, daß die Zelle abgeschaltet und das Kontaktvoltmeter gleichzeitig mit den Polen der nächsten Zelle verbunden wird. Eine Überladung der Zellen, die ab und zu erfolgen soll, ist demnach nicht durchführbar, es sei denn, daß man den selbsttätigen Antrieb ausschaltet. Da übrigens der Wärter während der Ladung der Batterie anwesend sein muß, so wird er die wenig Zeit beanspruchende Abschaltung der Zellen von Hand besorgen können.

Achtes Kapitel.

Transformatoren und Umformer.

Wenn bei einer elektrischen Kraftübertragung zwischen zwei Orten A und B der elektrische Strom einen sehr großen Weg zurückzulegen hat, so muß man, um die Verluste in der Fernleitung herabzudrücken, zu hochgespannten Strömen seine Zuflucht nehmen. Da man nun Gleichstrommaschinen für hohe Spannungen aus verschiedenen Gründen nicht baut bzw. nicht bauen kann, so ist man schon aus diesem Grunde auf Wechselstrom angewiesen. In vielen Fällen wird aber auch die höchste für Wechselstrommaschinen zulässige Spannung für die Kraftübertragung nicht ausreichen. Es liegt also das Bedürfnis vor, den in Wechselstrommaschinen erzeugten Strom von niedriger Spannung in Strom von höherer

Spannung umzuwandeln, ihn zu transformieren. An dem Verbrauchsorte B dagegen muß aus verschiedenen Gründen Strom von geringer Spannung zur Verfügung stehen: Die Bogenlampen brennen bei etwa 30 Volt, Glühlampen werden für höchstens 250 Volt hergestellt; durch die Forderung einer sorgfältigen Isolation in den Häusern zc. wird die Installation bei Verwendung hoher Spannung verteuert und vor allem würden Unglücksfälle bei Berührung blanker oder schlecht isolierter Leitungen leicht vorkommen. Man muß daher am Verbrauchsorte den durch die Fernleitung geflossenen Strom in Strom von niederer Spannung umwandeln (hinabtransformieren). Die erwähnten Umwandlungen werden in ruhenden Apparaten vorgenommen, den sogen. Transformatoren.

Oft stellt sich das Bedürfnis ein, die Art oder das System eines in einer Zentrale erzeugten Stromes zu ändern. In dem städtischen Elektrizitätswerke der Stadt Köln z. B., das an der Peripherie der Stadt liegt, wird wegen der großen Ausdehnung des Leitungsnetzes Wechselstrom von 2000 Volt Spannung erzeugt. Für den Betrieb der elektrischen Bahn aber bedurfte man des Gleichstromes. Statt eine neue Zentrale für Gleichstrom zu errichten, die man in das Zentrum der Stadt, wo Grund und Boden teuer sind und außerdem eine Dampfkranlage nicht gebildet werden durfte, hätte verlegen müssen, ging man zu der Umformung des Wechselstromes in Gleichstrom über. Diese Umwandlung geschieht in rotierenden Maschinen, den sogen. Umformern.

1. Transformatoren. Transformator ist ein Apparat für Wechselströme ohne bewegte Teile zur Umwandlung elektrischer Energie. Er hat den Zweck, Wechselströme niedriger Spannung und großer Stromstärke in Wechselströme hoher Spannung und kleiner Stromstärke umzuwandeln oder umgekehrt. Wir wollen zunächst die Transformatoren für einphasigen Wechselstrom kurz besprechen. In Fig. 107 ist ein Kerntransformator schematisch dargestellt. Er besteht aus einem zerteilten Eisenkern E und zwei Drahtwickelungen P und S. Wir wollen annehmen, daß durch die dickdrähtige Wickelung der zu transformierende Wechselstrom geschickt wird, daß also die Enden der dickdrähtigen Wickelung mit der Leitung verbunden seien.

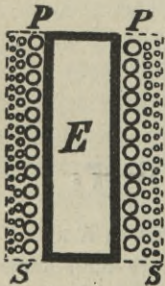


Fig. 107.

Wir nennen dann P die primäre Wickelung und S die sekundäre. In der Regel liegt die dickdrähtige Wickelung auf dem Eisenkern — natürlich gegen diesen sorgfältig isoliert. Da zwischen den primären und sekundären Windungen große Spannungen vorkommen, so müssen auch die beiden Wickelungen durch geeignete Materialien sorgfältig gegeneinander isoliert werden. Nach den Vorschriften des Verb. Deutscher Elektrotechniker muß die Isolation so stark sein, daß sie $\frac{1}{2}$ Stunde lang die doppelte höchste Betriebsspannung aushält, ohne daß zwischen der primären und sekundären Wickelung oder zwischen der Wickelung und dem Eisenkörper ein Durchschlagen erfolgt. Übersteigt die Höchstspannung 5000 Volt, so genügt bei der

Prüfung eine Überspannung von 5000 Volt. — Fließt durch die primäre Wicklung ein Wechselstrom, so wird ein wechselndes magnetisches Feld erzeugt, d. h. ein Feld, das bezüglich der Stärke und der Richtung der Kraftlinien ähnlichen Variationen unterworfen ist, wie der das Feld hervorrufoende Strom. Da die sekundären Windungen fortwährend von Kraftlinien geschnitten werden, so wird in ihnen eine elektromotorische Kraft erzeugt. Verbindet man daher die sekundären Klemmen mit einem Leiter, so fließt durch diesen ein Wechselstrom. Die Periodenzahl des sekundären Stromes stimmt offenbar mit derjenigen des primären überein.

Wenn die sekundäre Spule keinen Strom abgibt — Leerlauf —, so verhält sich der Transformator wie ein Elektromagnet bezw. wie eine Drosselspule. Es ist dann die Selbstinduktion so groß, daß kein starker Strom zustande kommen kann, und der Transformator verbraucht nur diejenige Energie, die den Wirbelstrom- und Hysteresisverlusten, sowie der, übrigens geringen Jouleschen Wärme entspricht. Man nennt die diesen Verlusten entsprechende Energie die Leerlaufarbeit.

Wenn der Transformator leer läuft, so werden in dem Eisenkerne Kraftlinien erzeugt, deren Anzahl und Richtung sich beständig ändert. Nennen wir den maximalen Leerlaufstrom i_1 und die Anzahl der primären Windungen N_1 , so ist die Anzahl der während einer halben Periode und daher auch während einer Sekunde erzeugten Kraftlinien proportional $N_1 \cdot i_1$. Diese Kraftlinien schneiden erstens die primären Windungen und rufen in jeder eine gegen elektromotorische Kraft ins Leben, deren maximaler und daher auch effektiver Wert proportional der in der Sekunde erzeugten Kraftlinienzahl ist, vorausgesetzt, daß, was wir annehmen wollen, alle Kraftlinien zur Wirkung kommen. Nun kann man aber, da bei Leerlauf i_1 klein ist, die zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes nötige Spannung praktisch vernachlässigen, d. h. die gegen elektromotorische Kraft gleich der Klemmspannung setzen. Es ist also die primäre Klemmspannung E_1 gleich $C \cdot (N_1 \cdot i_1) \cdot N_1$. Die durch den primären Strom erzeugten Kraftlinien schneiden zweitens die sekundären Windungen. Kommen auch hier alle Kraftlinien zur Geltung, so ist die in einer sekundären Windung erzeugte elektromotorische Kraft proportional $N_1 \cdot i_1$. Die in den einzelnen Windungen induzierten elektromotorischen Kräfte addieren sich. Mithin ist die sekundäre maximale und daher auch die effektive elektromotorische Kraft E_2 proportional $N_2 \cdot (N_1 \cdot i_1)$. Also

$$E_1 = C \cdot (N_1 \cdot i_1) \cdot N_1,$$

$$E_2 = C \cdot N_2 \cdot (N_1 \cdot i_1).$$

Durch Division ergibt sich

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Es verhalten sich also bei Leerlauf die elektromotorischen Kräfte wie die Windungszahlen der beiden Wicklungen; daselbe gilt für die Klemmspannungen, da diese bei Leerlauf den elektromotorischen Kräften gleich gesetzt werden dürfen.

Man nennt $\frac{E_1}{E_2}$ das Übersetzungsverhältnis oder die Übersetzung.

Wird der Transformator belastet, verbinden wir also die sekundären Klemmen mit einem Belastungswiderstande, so entsteht ein neues Feld, das sekundäre Feld, das dem primären Felde entgegenwirkt. Die beiden Felder kann man sich durch einziges, das resultierende Feld ersetzt denken, und dieses ist in jedem Momente gleich der Differenz der beiden Felder. Da nun die Selbstinduktion durch das wechselnde magnetische Feld hervorgerufen wird, so folgt, daß bei Belastung der sekundären Spule die Selbstinduktion der primären Wicklung abnimmt. Bleibt also die primäre Klemmspannung konstant, so wird der primäre Strom um so stärker, je größer die sekundäre Belastung ist. Der Transformator nimmt außer der Leerlaufarbeit noch so viel Energie auf, wie der Nutzleistung im sekundären Stromkreise entspricht. Zu beachten ist noch, daß die Joulesche Wärme sowohl in der primären wie in der sekundären Wicklung mit der Belastung wächst. Daß E_2 nicht wesentlich abnimmt, obschon das primäre Feld durch das sekundäre bekämpft wird, ist darauf zurückzuführen, daß mit der Belastung der primäre Strom zunimmt.

Das Transformationsverhältnis ist nun nicht genau durch das Verhältnis der Windungszahlen gegeben, weil sowohl in der primären als auch in der sekundären Wicklung ein Teil der Spannung für die Überwindung des Ohmschen Widerstandes verbraucht wird. Es ergibt sich leicht, daß sich das Übersetzungsverhältnis etwas mit der Belastung ändern wird. Es gibt noch einen zweiten Grund für diese Änderung, nämlich die magnetische Streuung. Ein kleiner Teil der Kraftlinien der Primärspule wird durch die in entgegengesetzter Richtung strömenden Kraftlinien der Sekundärspule „seitwärts herausgedrückt, ohne einen Beitrag zur sekundären elektromotorischen Kraft zu liefern“. (Kapp, Elektrische Wechselströme, S. 52.) Diese Streuung, die bei Leerlauf natürlich nicht vorhanden ist, wächst mit der Belastung. Bei guten Transformatoren betragen, konstante Primärspannung vorausgesetzt, die Änderungen der Sekundärspannung etwa 3–4%.

Da das Verhältnis der elektromotorischen Kräfte mit großer Annäherung gleich ist dem Verhältnisse der Windungszahlen, so hat man es in der Hand, eine gegebene primäre Spannung in eine bestimmte sekundäre umzuwandeln. Beträgt z. B. die primäre Spannung 100 Volt und soll die sekundäre Spannung gleich 1000 Volt werden, hat ferner die primäre Wicklung 30 Windungen, so muß die sekundäre Wicklung aus 300 Windungen bestehen.

Sehen wir von den Verlusten im Transformator und von der Phasenverschiebung ab, so gilt folgendes: Die vom Transformator an die sekundäre Leitung abgegebene Leistung, die Nutzleistung, ist gleich der dem Transformator zugeführten Leistung. Sind also die Klemmspannungen E_1 und E_2 und die Stromstärken J_1 und J_2 , so ist $E_1 \cdot J_1 = E_2 \cdot J_2$, oder es gilt angenähert die Beziehung

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{E_2}{E_1}.$$

Da $\frac{E_2}{E_1}$ nahezu konstant, so folgt, daß J_1 und J_2 in demselben Verhältnisse zu- und abnehmen. Mit Rücksicht auf die Erwärmung der Drähte

kann ein gegebener Transformator nur bis zu einer gewissen Grenze belastet werden — Maximalbelastung. Diese wird in Kilowatt angegeben: Ist der eben als Beispiel gewählte Transformator ein 10 KW-Transformator und ist er voll belastet, so ist $J_1 = 100$ Amp. und $J_2 = 10$ Amp.

Wir wollen jetzt die Annahme, daß keine Phasenverschiebung auf-
trete, fallen lassen. Bezeichnen wir die primäre Klemmspannung mit E_1 ,
den primären Strom mit J_1 und den Phasenverschiebungswinkel zwischen
Strom und Spannung mit φ_1 , bezogen auf den Leerlauf, so ist die wirkliche
Leerlaufarbeit gleich $E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1$. Bei Belastung nimmt φ_1 ab, denn die
wattlose Komponente bleibt konstant, während die Wattkomponente wächst, und
es ist ja $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\text{wattlose Komp.}}{\text{Wattkomp.}}$ (s. Fig. 35, S. 65). Damit wir einen

Einblick in das Verhalten des Transformators bei Leerlauf und Belastung
gewinnen, wollen wir ein von Cl. F. Feldmann¹⁾ gewähltes Beispiel den
Betrachtungen zugrunde legen. Ein 10 KW-Transformator sei an ein Wechsel-
stromnetz von 2000 Volt angeschlossen; bei Leerlauf nimmt der Transformator
nur 0,14 Amp., bei Vollbelastung ungefähr 5 Amp. auf. Im ersten Falle
verhält sich der Transformator, als ob er einen Widerstand von $\frac{2000}{0,14}$, d. h.

von ungefähr 14000 Ohm, im zweiten, als ob er einen Widerstand von
400 Ohm besäße. Mittels des Wattmeters findet man, daß die wirkliche
Leerlaufarbeit zirka 200 Watt beträgt. Mithin ist die Wattkomponente²⁾

gleich $\frac{200}{2000} = 0,1$ Amp. und der Winkel der Phasenverschiebung gleich 45° ;

denn $\cos \varphi = \frac{0,1}{0,14} = 0,7$. Wenn aber bei einem rechtwinkligen Dreieck ein
spitzer Winkel gleich 45° ist, so sind die beiden Katheten einander gleich. Mithin
ist bei Leerlauf die wattlose Komponente des Stromes gleich der Wattkomponente,
also auch gleich 0,1 Amp. (Zu beachten ist, daß der gemessene Strom gleich
sein muß $\sqrt{0,1^2 + 0,1^2}$).

Wird der Transformator belastet und bleibt die
Netzspannung konstant, so bleibt auch der Leerstrom, der von der primären
elektromotorischen Kraft des Transformators abhängt, konstant. Die Phasen-
verschiebung wird daher, wie schon oben gezeigt wurde, kleiner. Schon bei
 $\frac{1}{10}$ Belastung, der ein Wattstrom von 0,5 Amp. entspricht, ist der
primäre Gesamtstrom $\sqrt{0,5^2 + 0,14^2} = 0,51$ nur um 2% größer als die
Wattkomponente und der Leistungsfaktor bereits $\frac{0,5}{0,51} = 0,98$, so daß der

Primärstrom nur noch $11-12^\circ$ gegen die Spannung verzögert ist. Bei Voll-
belastung ist die Phasenverschiebung fast Null. Ist eine größere Anzahl von
Transformatoren an ein Netz angeschlossen, so wird die Leitung, auch wenn

¹⁾ Über wattlose Ströme. E.-L. Z. 1902, S. 376.

²⁾ Feldmann schlägt hierfür die Bezeichnung „wattverzehrende Komponente“ vor.

keine elektrische Energie in Lampen zc. verbraucht wird, durch wattlose Ströme belastet (s. S. 65).

Unter dem Wirkungsgrad eines Transformators versteht man das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung. Die ganze dem Transformator zugeführte Energie besteht aus der von den sekundären Klemmen abgenommenen Leistung und den sämtlichen Verlusten im Transformator. Letztere setzen sich zusammen aus:

1. der Stromwärme in der primären und sekundären Wickelung ($w_1 J_1^2 + w_2 J_2^2$),
2. aus den Wirbelstrom- und Hysteresisverlusten.

Ist der Transformator voll belastet, so kann man die zugeführte Leistung mittels Spannungs- und Strommessers bestimmen, da dann der Leistungsfaktor ($\cos \varphi_1$) nur sehr wenig von 1 verschieden ist. Die sekundäre Leistung mißt man am besten mittels eines Wattmeters. Aus den früheren Betrachtungen ergibt sich, daß der Wirkungsgrad, der wie bei den Dynamomaschinen in Prozenten der zugeführten Leistung angegeben wird, mit der Belastung wächst. Gute, große Transformatoren haben bei Vollbelastung einen Wirkungsgrad von 97—98 %.

Wenn ein Transformator dauernd an ein stets unter Strom stehendes Netz angeschlossen ist, so beträgt die auf ein Jahr bezogene Leerlaufarbeit einen relativ großen Prozentsatz der jährlich abgegebenen Leistung.

Wir wollen dieses für einen bestimmten Fall zeigen. Ein 5 KW-Transformator gebe 1000 Stunden jährlich seine volle Leistung ab. Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung betrage 95 %, die Leerlaufarbeit 3 % der Vollbelastung.

Der Transformator gibt ab 1000 · 5 Kilowattstunden = 5000 KW-St, er nimmt auf

1. während der Belastung $\frac{5000}{0,95} = 5260$ KW-St,
2. während des Leerlaufs stündlich $5 \cdot 0,03 = 0,15$ KW-St, im ganzen also, da er 7760 Stunden nicht belastet ist, 1184 KW-St.

Der Wirkungsgrad, bezogen auf ein Jahr, beträgt also

$$\frac{5000}{5260 + 1184} = 0,78 \text{ oder } 78\%.$$

Vielfach wird der Wirkungsgrad noch ungünstiger sein, da eine Vollbelastung, besonders in Lichtanlagen, von 1000 Stunden selten ist.

Wenn im Elektrizitätszähler die primäre Leistung registriert wird, so muß der Konsument die Kosten für die Leerlaufarbeit tragen, im anderen Falle das Elektrizitätswerk.

Um die Leerlaufverluste zu vermeiden, bedient man sich des Hochspannungsfernschalters, durch den die primäre Leitung vom Transformator abgeschaltet wird, wenn in der sekundären Leitung des betreffenden Transformators kein Strom verbraucht wird und natürlich eingeschaltet wird, sobald Strom abgegeben werden soll (vergl. Kap. 13).

Wir wollen uns noch kurz mit der Einteilung der Transformatoren beschäftigen, wobei nur die wichtigsten Ausführungsformen berücksichtigt werden sollen. Man unterscheidet mit Rücksicht auf den magnetischen Kreis zwischen offenen und geschlossenen Transformatoren. Der in Fig. 107 schematisch gezeichnete Transformator gehört zu den offenen. Die an dem Nordpol austretenden Kraftlinien müssen durch die Luft gehen, um zu dem Südpol zu gelangen. Da die Kraftlinien in der Luft gleichsam einen großen Widerstand zu überwinden haben, so ist die Leerlaufarbeit hier verhältnismäßig groß; denn der früher definierte Strom i , erzeugt eine geringere Kraftlinienzahl; die gegenelektromotorische Kraft der primären Wickelung ist also kleiner, so daß der Magnetisierungsstrom größer wird. Aus zwei offenen Transformatoren erhält man einen geschlossenen — auch wohl pollosen genannt —, indem man die Enden der Kerne durch Eisenplatten, die Joche, miteinander verbindet. Die beiden primären Wickelungen können hintereinander oder parallel geschaltet werden, ebenso die sekundären. Die Kraftlinien bewegen sich fast ausschließlich durch die Kerne und die Joche.

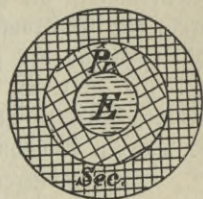


Fig. 108.

Bei den Kerntransformatoren liegt das Eisen im Innern, so daß die Windungen das Eisen umgeben, wie es die schematische Fig. 108, die einen Querschnitt darstellt, zeigt.

Bei den Manteltransformatoren umhüllt das Eisen die beiden Spiralen.

Drehstromtransformatoren bestehen aus drei einphasigen Transformatoren, die aber zu einem Apparate vereinigt werden; sie werden meistens

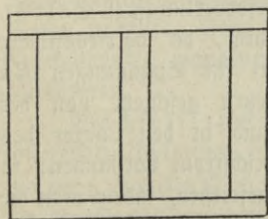


Fig. 109.

als Kerntransformatoren gebaut. In Fig. 109 sind die drei Kerne ohne Wickelung, durch Joche miteinander verbunden dargestellt. Man kann statt dessen natürlich auch die Kerne auf der Peripherie eines Kreises oder als Ecken eines Dreiecks anordnen und sie durch ringförmige Joche miteinander verbinden. Da die drei Phasen miteinander verkettet sind, so müssen die primären und sekundären Wickelungen entweder nach der Dreieckschaltung oder nach der Sternschaltung ausgeführt werden. Bei der Sternschaltung

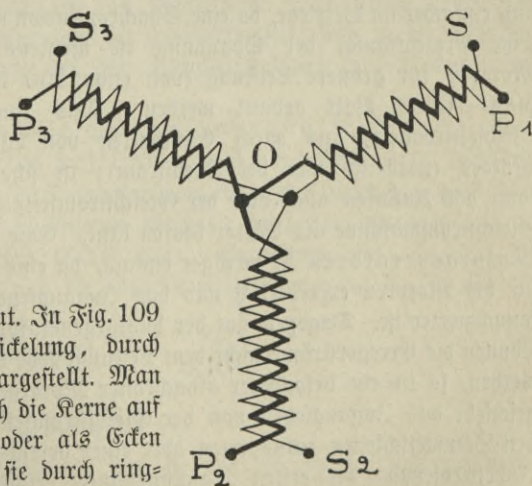


Fig. 110.

kommt man mit kleineren Windungszahlen aus, da die Leitungsspannung nur mit 58% wirksam ist (s. S. 75), dieselbe wird daher bevorzugt. Wie man aus der Fig. 110, in der die beiden Wickelungen schematisch dargestellt sind, ersieht, hat ein Drehstromtransformator 6 Klemmen, drei primäre (P_1, P_2, P_3) und drei sekundäre (S_1, S_2, S_3).

Erhöhung oder Erniedrigung der Spannung bei Gleichstrom. Man schickt den Strom, den man umformen will, in einen Elektromotor, der mit einer Gleichstrommaschine gekuppelt ist. Elektromotor und Gleichstrommaschine sind so zu wählen, daß der Generator bei der Tourenzahl des Elektromotors die gewünschte Spannung liefert. Bezeichnen wir den Wirkungsgrad des Elektromotors mit γ_1 und den der Dynamo mit γ_2 , so ist der Wirkungsgrad des ganzen Umformers, den man Motorgenerator nennt, gleich $\gamma_1 \cdot \gamma_2$. Ist z. B. $\gamma_1 = 0,85$ und $\gamma_2 = 0,9$, so ist der Wirkungsgrad des Motorgenerators gleich $0,85 \cdot 0,9 = 0,765$; der Energieverlust beträgt also bei unseren Annahmen zirka 24%.

Von größerer Bedeutung für die Praxis als der vorige Fall ist die Umformung von Einphasenstrom oder Drehstrom in Gleichstrom und umgekehrt.

a) Mittels Motorgenerators. Ein Wechselstromelektromotor wird mit einer Gleichstrommaschine gekuppelt. Bei dieser Anordnung kann die Gleichstromspannung ganz unabhängig von der vorhandenen Wechselstromspannung gewählt werden. Ferner ist die Regulierung der Gleichstromspannung leicht zu bewerkstelligen. Als Antriebsmotor kann ein asynchroner oder ein synchroner Motor verwendet werden. Die asynchronen Motorgeneratoren¹⁾ sind einfacher im Betriebe, da eine Synchronisation nicht erforderlich ist (s. S. 188). Eine Erniedrigung der Spannung ist meistens unnötig, da betriebssichere Motoren für größere Leistung (von etwa 150 PS an) für Spannungen von 5000—6000 Volt gebaut werden. Das Ingangsetzen geschieht von der Wechselstromseite aus durch Einschalten von Widerstand in den Läufer des Motors (natürlich nur bei Drehstrom); ist schon Gleichstrom vorhanden, so kann das Anlassen auch von der Gleichstromseite aus geschehen, indem man die Gleichstrommaschine als Motor laufen läßt. Eine Unterstation mit synchronen Motorgeneratoren ist weniger einfach, da eine besondere Gleichstromerregung für die Motoren erforderlich und das Ingangsetzen wegen der Synchronisation komplizierter ist. Dagegen hat der Motorgenerator einen besseren Wirkungsgrad. Können die Erregerströme nicht dem Leitungsneze oder einer Batterie entnommen werden, so ist ein besonderer asynchroner Motorgenerator vorzuziehen. Meistens geschieht das Ingangsetzen von der Gleichstromseite aus. Der Gleichstrom wird den Sammelschienen entnommen oder einer besonderen Anlaufgruppe, die für die Inbetriebsetzung des ersten Maschinensatzes erforderlich ist; der Wechselstrommotor läuft dann zunächst als Generator, und es gelten hier dieselben Betriebsanleitungen wie für die Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen. Steht

¹⁾ Gl. N. 1903, Nr. 52.

Gleichstrom beim Anlassen nicht zur Verfügung, so bedient man sich für den Anlauf eines besonderen Motors.

Die Nachteile des Motor-Generators bestehen, abgesehen von dem höheren Preise, in der größeren Raumbanspruchung, dem geringeren Wirkungsgrade und der größeren Gefahr der Betriebsstörung, da zwei Maschinen vorhanden sind.

b) Mittels rotierenden Umformers. „Umformer ist eine Maschine, bei der die Umformung in einem gemeinsamen Anker erfolgt,“ so lautet die Definition in den Normalien des B. D. C. Wir wollen zunächst annehmen, daß der in Gleichstrom umzuformende Wechselstrom einphasiger von 100 Volt effektiver Spannung sei. Man erhält den betreffenden Umformer aus einer Gleichstrommaschine, indem man auf der Ankerachse zwei Schleifringe anbringt und diese in geeigneter Weise mit der Ankerwicklung verbindet. Ist z. B. der Anker ein Ringanker in einem zweipoligen Felde, so sind zwei Punkte der Wicklung, die sich diametral gegenüberliegen, mit je einem Schleifringe zu verbinden. Auf den Schleifringen liegen Bürsten, die mit den Wechselstromleitungen zu verbinden sind. Man kann die Maschine in elektrischer Beziehung als eine Vereinigung eines Synchronmotors mit einer Gleichstrommaschine ansehen. Wie wir nun später sehen werden, genügt es nicht, einen Synchronmotor mit der Leitung zu verbinden, um ihn in Gang zu setzen; man muß also den Umformer künstlich anlassen. Dieses kann entweder von der Wechselstromseite aus geschehen (wie es im Kap. 6 näher beschrieben ist) oder von der Gleichstromseite aus, wenn ein anderer Maschinenatz schon im Betriebe ist oder eine Gleichstromquelle zur Verfügung steht. Da die erstere Art des Anlassens komplizierter ist, so läßt man den Umformer, wenn eben möglich, als Gleichstrommotor anlaufen, oder man nimmt für das Ingangsetzen einen kleinen asynchronen Motor zu Hilfe. Beim Anlaufen von der Gleichstromseite sind wieder dieselben Gesichtspunkte maßgebend, wie bei der Parallelschaltung von Wechselstromgeneratoren.

Wechselstrom- und Gleichstromspannung stehen bei einem rotierenden Umformer in einem bestimmten Verhältnisse zu einander, und zwar ist dieses Verhältnis für Einphasenstrom theoretisch gleich $\sqrt{\frac{1}{2}} = 0,707$. Da die Wechselstromspannung in unserem Beispiele 100 Volt betragen soll, so ist die Gleichstromspannung $100 : 0,707$ Volt. Bezeichnen wir allgemein die Wechselstromspannung mit E_1 und die Gleichstromspannung mit E_2 , so gilt die Beziehung

$$E_2 = E_1 : \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{E_1}{0,707}$$

oder

$$E_1 : E_2 = 0,707 : 1.$$

Es ist dies dieselbe Beziehung, wie sie für die effektive und maximale Spannung des Wechselstromes gilt.

Sehen wir ferner von der Phasenverschiebung ab, nehmen wir also an, daß die wattlose Komponente des Wechselstromes gleich Null sei, vernachlässigen wir ferner die Energieverluste im Umformer, so muß $E_1 \cdot J_1 = E_2 \cdot J_2$ sein,

wo J_1 die effektive Stromstärke an der Wechselstromseite und J_2 die Stromstärke an der Gleichstromseite ist. Berücksichtigen wir die vorlezte Gleichung, so ergibt sich

$$E_1 \cdot J_1 = E_1 \cdot \sqrt{2} \cdot J_2 \text{ oder } J_1 = \sqrt{2} \cdot J_2 = 1,41 \cdot J_2.$$

Bei Drehstrom-Gleichstromumformern geben theoretisch $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 100 = 61$ Volt zugeführter Drehstromspannung 100 Volt Gleichstromspannung. Das theoretische Verhältnis der beiden Spannungen ändert sich aber wegen des Spannungsabfalles im Umformer, wegen der Verluste und der wattlosen Ströme um einige Prozente. Bei 4% Spannungsabfall entsprechen 61 Volt Drehstromspannung 96 Volt Gleichstromspannung. Da synchrone Mehrphasenmotoren von selbst anlaufen und sich selbst bis zum synchronen Laufe emporarbeiten können, so gibt es bei Mehrphasen-Gleichstromumformern außer den beiden beschriebenen Arten des Ingangsegens noch eine dritte¹⁾.

Da zwischen der Gleichstrom- und Wechselstromspannung ein bestimmtes Verhältnis besteht, so wird man in den meisten Fällen den Wechselstrom, ehe man ihn in den Umformer schickt, transformieren müssen. Soll z. B. der Gleichstrom eine Spannung von 500 Volt haben, so muß die Einphasenstromspannung theoretisch gleich $500 \cdot 0,707 = 354$ Volt sein. Steht nun Wechselstrom von 1000 Volt zur Verfügung, so muß dieser im Verhältnis 1000 : 354 transformiert werden. Um die Spannung des Gleichstromes, die sich auch bei konstanter Spannung des Wechselstromes etwas mit der Belastung ändert, während des Betriebes regulieren zu können, erhöht oder verringert man die Wechselstromspannung, indem man Drosselspulen oder Transformatoren mit abschaltbaren Spulen vorsieht. Im letzteren Falle werden die Spulen mittels eines Zellenhalters, wie die Zellen einer Akkumulatorenbatterie ab- oder hinzugeschaltet.

Eine selbsttätige Regulierung der Spannung in gewissen Grenzen erreicht man, wenn man die Magnetschenkel mit einigen Hauptstromwindungen versieht, also das Verbundprinzip benutzt. Die Compound-Erregung findet man bei den meisten amerikanischen Umformern für Bahnbetrieb zur Verwandlung von Drehstrom in Gleichstrom, und zwar ist der Umformer übercompoundiert. Die Gleichstromspannung beträgt bei Leerlauf beispielsweise 575 Volt, bei Vollbelastung 625 Volt, so daß also der mit steigender Stromstärke zunehmende Spannungsverlust in der Leitung ganz oder doch zum Teil gedeckt wird. Wegen des festen Verhältnisses, in dem die Drehstrom- und Gleichstromspannung stehen, muß natürlich, wenn die Gleichstromspannung steigen soll, auch die Drehstromspannung zunehmen. Bei übercompoundierten Umformern sind aber keine Regulierapparate oder besondere Anordnungen für die Erhöhung bzw. Erniedrigung der Drehstromspannung erforderlich. Wächst nämlich die Belastung und mit dieser die Erregung, so wird, wie bei einem Synchronmotor, die Phasenverschiebung kleiner, infolgedessen sinkt der reaktive Spannungsabfall in der Leitung, der meistens noch durch einzubauende Drosselspulen erhöht werden muß (s. „Leitungen“, S. 286), und die Drehstromspannung wächst (G.-Z. 3. 1903, Nr. 30).

¹⁾ G.-Z. 3. 1903, S. 737.

Handelt es sich um die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom, so hat die Dreieckschaltung der Transformatoren den Vorzug, daß im Falle des Durchbrennens einer Sicherung der Betrieb aufrechterhalten werden kann, indem nämlich die beiden übrigen Phasen noch für alle drei Phasen Strom geben, während bei Sternschaltung der Umformer nur einphasig arbeitet und der Kollektor dann stark feuert.

Eine mechanische Beanspruchung des Ankers (größerer Lagerdruck), wie sie bei belasteten Generatoren stattfindet, tritt bei Umformern nicht ein. Der Umformer verhält sich bei Belastung so wie eine leerlaufende Dynamomaschine. Die Reibungsverluste sind daher verhältnismäßig klein und von der Belastung unabhängig. Immerhin muß ein kleiner Strom für die Bestreitung der Verluste aufgewendet werden. Da ferner eine kleine Phasenverschiebung auftreten wird, der wattlose Ströme entsprechen, so ist für 1 Amp. Gleichstrom etwas mehr als 1,41 Amp. Wechselstrom (bezw. 0,94 Amp. bei Drehstrom) aufzuwenden.

Da durch die Ankerleiter nur die Differenz, also pro 1 Amp. abgegebenen Gleichstromes nur 0,41 Amp. fließt, so sind die Kupferverluste, d. h. in den Ankerdrähten in Stromwärme umgesetzten Watt kleiner als bei einer Gleichstrommaschine für dieselbe Leistung. Läßt man also bei einem Umformer die gleiche Ankererwärmung zu wie bei einer Gleichstrommaschine, so kann er stärker belastet werden, als wenn er als Gleichstrommaschine lief. Die Ausnutzungsfähigkeit ist natürlich um so größer, je kleiner die Phasenverschiebung auf der Wechselstromseite ist.

Wie schon bemerkt, läuft der rotierende Umformer als Synchronmotor; daher ist seine Tourenzahl von der Frequenz des Wechselstromes und der Polzahl abhängig. Bei einer Frequenz von 50 pro Sekunde ist bei einem vierpoligen Umformer die Tourenzahl gleich $\frac{60 \cdot 50}{2} = 1500$ pro Minute. Dieser hohen Tourenzahl muß der Umformer in mechanischer Beziehung gewachsen sein.

Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Umformers muß stets im Einklang stehen mit der Periodenzahl des Wechselstromes; der Umformer muß sich also den Schwankungen in der Periodenzahl des Netzes möglichst anschmiegen. Dies ist nur möglich, wenn der Anker keine großen Schwungmassen enthält. Als anderes Mittel, das Ausertrettsfallen zu vermeiden, ist die Verbindung der Magnetpole durch Notgußbrücken zu erwähnen. Die starken Wirbelströme, die in diesen Brücken entstehen, sobald sich die Periodenzahl oder die Spannung im Netz ändert und der Umformer zu pendeln anfängt, wirken dämpfend auf die Bewegung.

Bei dem gewöhnlichen Maximalauschalter, der die Maschinen vor zu hohen Stromstärken schützen soll, wird der Strom plötzlich ausgeschaltet. Der dabei entstehende Stromstoß kann auf der Wechselstromseite den Generatoren, angeschlossenen Motoren und Apparaten leicht gefährlich werden. Man hat daher für Umformer Ausschalter mit Zeiteinteilung eingeführt, durch die man erreicht, daß der Strom erst in einer bestimmten Zeit allmählich auf Null fällt¹⁾.

¹⁾ Siehe Schillings Journal 1902, S. 75.

Wenn ein Umformer, z. B. ein Drehstrom-Gleichstromumformer, in Parallelschaltung mit Akkumulatoren oder anderen Umformern arbeitet und die Wechselstromzufuhr plötzlich aufhört (z. B. wenn eine Sicherung auf der Wechselstromseite durchbrennt), so läuft der betreffende Umformer als Gleichstrommotor. Hat der Umformer Compoundwicklung, so wirkt der durch die Hauptstromwicklung aus dem Netze fließenden Strom schwächend auf das Magnetfeld. Die Tourenzahl steigt daher zu einer bedenklichen Höhe (s. Elektromotoren). Bei reiner Nebenschlußwicklung ist ein Durchgehen nicht zu befürchten. Auf die Mittel, die man in Anwendung gebracht hat, das Durchgehen zu verhindern, können wir hier nicht näher eingehen¹⁾.

Von anderen Anwendungen des Umformers erwähnen wir die Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom, die gleichzeitige Erzeugung von zwei Stromarten bei Zufuhr von mechanischer Energie und die Umwandlung von Einphasenstrom in Drehstrom, endlich die gleichzeitige Verwendung eines Umformers für die Umwandlung der Stromart und als Motor.

Der Wirkungsgrad der Umformer hängt von der Größe und seiner Belastung ab. Ein großer amerikanischer Drehstrom-Gleichstromumformer für normal 1500 KW hat nach der *E. & T. Z.* (1903, S. 617) bei 100 % Belastung einen Wirkungsgrad von 95,75 % bei 50 % Belastung von 93,50 %.

Frequenzumwandler. Die Selbstinduktion bzw. die Phasenverschiebung hängt, wie wir gesehen haben, von der Periodenzahl des Wechselstromes ab. Je geringer die Frequenz ist, um so weniger wird die Leitung durch wattlose Ströme belastet, um so geringer ist auch der reaktive Spannungsabfall in der Leitung (s. S. 286). Für motorische Zwecke genügt eine Frequenz von 25 pro Sekunden vollständig, während diese Periodenzahl für Beleuchtungszwecke, besonders für Bogenlampen, zu klein ist. Wenn es sich nun um Kraftübertragungen auf große Entfernungen handelt, so kann es sich unter Umständen empfehlen, als Fernleitungsstrom Strom von geringer Periodenzahl zu verwenden und diesen am Verbrauchsorte für Beleuchtungszwecke in Strom von größerer Frequenz (50) umzuformen. Die Frequenzerhöhung erfolgt in einem Motorgenerator, der, wenn es sich z. B. um Drehstrom handelt, aus einem asynchronem Drehstrommotor und einer mit ihm gekuppelten Drehstrommaschine besteht.

Die elektrolytischen Umformer, welche die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom bezwecken, beruhen auf folgendem Prinzip. Bildet man aus einer Aluminiumelektrode und einer Blei- (oder Platin)elektrode und verdünnter Schwefelsäure (oder einer Lösung der Sulfate der Alkalien oder des Natriums) einen elektrolytischen Apparat, so fließt bei Verwendung von Gleichstrom, falls die Spannung einen gewissen Betrag (22 Volt) nicht übersteigt, nur dann Strom durch die Zelle, wenn Aluminium die negative Elektrode ist. Man nimmt an, daß sich bei der umgekehrten Stromrichtung das SO_4 , das dann an der Anode frei wird, mit Aluminium zu einer sehr dünnen, unlöslichen

¹⁾ Näheres siehe *E. & T. Z.* 1903, S. 579.

Schicht von basischem Aluminiumsulfat verbindet, die den elektrischen Strom nicht leitet. Nachdem also eine sehr geringe Elektrizitätsmenge durch den Apparat geflossen ist, wird die Zelle zu einem Kondensator. Schaltet man eine hinreichend große Anzahl der Zellen hintereinander und verbindet man die Batterieklammern mit einem Wechselstromnetz, so wird von jeder Stromwelle die Hälfte erdrückt, und man erhält pulsierenden Gleichstrom¹⁾.

Scotts Transformationsmethode²⁾. Scott hat ein Verfahren angegeben, Zweiphasenstrom in Drehstrom zu verwandeln und umgekehrt. Die Phasen des Zweiphasengenerators G sind unverkettet (s. Fig. 111) und werden mit den primären Klemmen der beiden Einphasentransformatoren T_1 und T_2 verbunden. Diese haben nicht dasselbe Überetzungsverhältnis, es müssen vielmehr, wenn die Spannungen in den drei Leitungen einander gleich werden sollen, in dem Verhältnisse $1 : \sqrt{\frac{3}{2}} = 1 : 0,867$ stehen. Beträgt z. B. die primäre Spannung 100 Volt, und wird in dem Transformator T_2 die Spannung auf 1000 Volt erhöht, so muß sie in dem Transformator T_1 auf 867 Volt erhöht werden. Von den sekundären Spulen ist die zu T_2 gehörige mit der Mitte O der anderen Spule verbunden; in diesem Punkte sind also die drei Phasen verkettet (er entspricht dem neutralen Punkte O in Fig. 45, S. 75). Die drei Leitungen werden an die Klemmen A_1, A_2, A_3 angeschlossen.

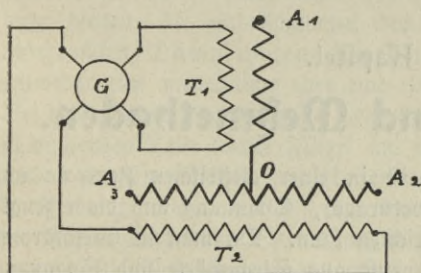


Fig. 111.

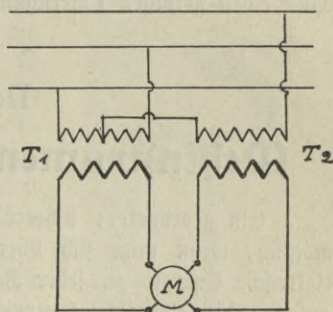


Fig. 112.

An der Sekundärstation wird der Dreiphasenstrom für Beleuchtungszwecke wieder in Zweiphasenstrom niedriger Spannung umgewandelt, während der Strom für größere Motoren direkt den Leitungen entnommen werden kann. Die Schaltung ist in der Fig. 112 dargestellt, bei deren Entwurf angenommen wurde, daß ein Zweiphasenmotor angetrieben werden soll.

Die Vorzüge dieses Systems bestehen darin, daß die Kraftübertragungsleitungen gegenüber dem Zweiphasensysteme billiger werden (s. Leitungsnetz) und daß die Regulierung der Spannung bei ungleich belasteten Phasen einfacher ist. Nehmen wir z. B. an, daß an der Sekundärstation die erste Phase des Zweiphasensystems stärker belastet sei, dann ist auch an der Erzeugerstation die erste

¹⁾ Näheres siehe G.-L. 3. 1903, S. 432 u. 527.

²⁾ Näheres siehe La Cour, Theorie der Wechselströme, S. 333.

Phase des Generators stärker belastet; denn durch die erste Phase wird die zweite Phase nicht beeinflusst. Es ist also gerade so, als ob die Lampen und Motoren direkt an den Generator angeschlossen wären. Die Regulierung auf konstante Lampenspannung verursacht mithin keine größeren Schwierigkeiten als bei einem nicht verketteten Zweiphasensystem.

Das monozyklische System (in Deutschland nur sehr selten angewendet). Steinmetz versteht den Einphasengenerator mit einer Hilfswicklung; das eine Ende dieser Wicklung ist mit der Mitte der Hauptwicklung verbunden, das andere mit der Hilfsleitung, einer dritten Fernleitung. In der Hilfswicklung wird Strom erzeugt, dessen elektromotorische Kraft um 90° gegen die Spannung der Hauptwicklung verschoben ist. Sehen wir also in Fig. 111 A_2, A_3 als die Hauptwicklung an, so ist OA_1 die Nebenwicklung; die Leitungen sind mit A_2, A_1, A_3 zu verbinden. Die Windungszahlen werden so gewählt, daß die elektromotorische Kraft der Hilfswicklung 25 % derjenigen der Hauptwicklung beträgt. Die Lampen werden in die Hauptleitungen eingeschaltet; den Motoren wird aus Transformatoren durch drei Leitungen Strom zugeführt. Das System hat nur dann Vorzüge, wenn die Maschine hauptsächlich Beleuchtungsstrom abgeben soll und der Strom für motorische Zwecke eine nur untergeordnete Rolle spielt; die Hilfsleitung kann dann einen geringen Querschnitt erhalten.

Neuntes Kapitel.

Meßinstrumente und Meßmethoden.

Ein geordneter, sicherer Betrieb ist in einer elektrischen Zentrale nur möglich, wenn man sich über Stromverbrauch, Spannung und die erzeugte elektrische Energie zu jeder Zeit unterrichten kann. Da man in Gleichstromanlagen die elektrische Energie als Produkt aus Stromstärke und Spannung leicht berechnen kann, so kommen hier hauptsächlich Spannungs- und Strommesser in Betracht. Ferner liegt dem Leiter eines Elektrizitätswerkes in manchen Fällen die Pflicht ob, feinere Messungen, z. B. Messungen an Glüh- oder Bogenlampen oder Widerstandsmessungen, auszuführen. Hierfür müssen geeignete Apparate vorhanden sein. Im folgenden werden hauptsächlich technische Meßinstrumente berücksichtigt werden.

Die Anforderungen, die man an gute Meßinstrumente stellt, sind im Vergleich zu dem Preise, den man zahlt, recht hohe. Vor allem muß das Instrument die zu messende Größe so genau angeben, daß die Abweichungen von den wirklichen Werten nicht mehr als etwa 1 % betragen. Sodann muß das Instrument allen Schwankungen des Stromes schnell folgen, so daß man auch wirklich über den augenblicklichen Zustand unterrichtet wird. Damit ferner der Apparat empfindlich sei, muß die Reibung des beweglichen Teiles auf einen kleinen Betrag reduziert werden. Dies erreicht man durch Ver-

wendung sorgfältig gehärteter Stahllachsen, die auf Steinen (Saphiren) spielen. — Die Ableseung muß leicht, schnell und auch bei größerer Entfernung des Beobachters von dem Instrumente vorgenommen werden können. Daher muß die Skala für den in Betracht kommenden Meßbereich groß sein. Dies gilt besonders für die Voltmeter. Beträgt z. B. in einer elektrischen Anlage die normale Spannung 110 Volt, so kann die Skala von etwa 0—90 Volt klein sein zugunsten des Skalentheiles für Spannungen von 90—130 Volt. Man verlangt ferner von den Meßinstrumenten, daß ihre Angaben möglichst wenig beeinflusst werden von magnetischen Feldern in ihrer Nähe, z. B. durch die magnetischen Felder der Dynamomaschinen, und von nahe vorbeischießenden starken Strömen¹⁾. Gehäuse aus Gußeisen wirken schon schützend, indem sie die Kraftlinien benachbarter Felder gleichsam auffangen (Schirmwirkung). Auch bringt man vielfach im Innern des Apparates Scheiben oder Bänder aus weichem Eisen an, die die wirksamen Eisenteile schützen (vergl. Fig. 115).

Eine andere Anforderung, die man an gute Meßinstrumente stellt, ist die, daß die Zeigereinstellung schnell erfolgt. Jeder Leser hat wohl schon Gelegenheit gehabt zu beobachten, daß die Magnetnadel eines Galvanoskops bei Stromschluß erst nach einer größeren Anzahl von Schwingungen zur Ruhe gelangt. Das Bestreben, Schwingungen auszuführen, hat auch der Zeiger der meisten Strom- oder Spannungsmesser. Man nennt Vorrichtungen, die dazu dienen, die Schwingungen des Zeigers zu unterdrücken, Dämpfungen. Die Dämpfung kann entweder eine mechanische oder eine elektrische sein. Bei der ersteren Dämpfungsart bringt man an dem schwingenden Teile leichte Flügel an, die in vielen Fällen von einer Kapsel eingeschlossen werden. Durch die Reibung zwischen den Flügeln und der Luft in der Kapsel werden die Schwingungen fast gänzlich unterdrückt. Man sorgt dafür, daß der Widerstand der Luft möglichst groß wird, ohne daß der bewegliche Teil des Apparates zu sehr beschwert wird. In Fig. 113 ist eine Dämpfungsanordnung, die an dem beweglichen System eines Strommessers von Siemens & Halske angebracht ist, abgebildet. Bei dieser ist eine Scheibe S mit der Drehungsachse des Zeigers fest verbunden und bewegt sich bei der Drehung der Achse in einer Röhre R.

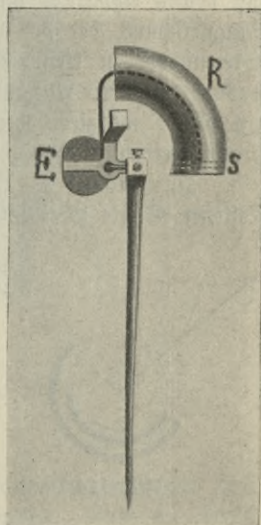


Fig. 113.

Die elektrische Dämpfung wird später beschrieben werden (s. Apparate nach Deprez=d'Arsonval). Man nennt Meßapparate, die mit einer guten Dämpfung versehen sind, aperiodische.

Der Einfluß der Temperatur auf die Angaben der Meßinstrumente darf nur so groß sein, daß man ihn in der Praxis vernachlässigen kann. Diese

¹⁾ Hierauf hat man auch bei der Montage Rücksicht zu nehmen.

Anforderung kommt, wenn wir von den Elektrizitätszählern einstweilen absehen, hauptsächlich für die Voltmeter in Betracht. Wir werden auf diesen Punkt später zurückkommen.

Endlich sollen die Meßinstrumente nur eine kleine Energiemenge verzehren. Dieses ist der Fall, wenn bei den Strommessern (Amperemetern) der Widerstand im Apparate selbst ein möglichst kleiner und bei den Voltmetern ein möglichst großer ist.

1. Strommesser — Amperemeter.

a) Strommesser nach dem elektromagnetischen Prinzip. Die Hauptbestandteile dieser Strommesser sind eine Spule, die aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes besteht, und ein Körper (Kern, Scheibe zc.) aus weichem Eisen. Fließt durch die Spule ein elektrischer Strom, so übt sie auf den Weicheisenkörper eine Anziehung aus; dieser bewegt sich gegen die Wirkung der Schwere entweder in das Innere der Spule hinein oder nach der Spulwand hin. Die Bewegung wird auf einen Zeiger übertragen. Die Skala wird durch Vergleich mit einem Präzisionsamperemeter hergestellt, indem man die beiden Apparate hintereinander schaltet (Eichung). Damit der remanente Magnetismus, der bei abnehmender Stromstärke zu große und bei zunehmender Stromstärke zu kleine Angaben verursacht, einen möglichst geringen Einfluß ausübt, muß der Abstand der beiden Pole, die durch den Strom in dem Weicheisenkörper induziert werden (die magnetische Achse), auf ein Minimum gebracht werden.

Hartmann & Braun bringen in dem Hohlraume der stromdurchflossenen Spule zwei Eisenkörper an, die man am einfachsten als Stücke einer Eisenröhre bezeichnen kann („Zylindermantel-segmente“) (s. Fig. 114). Der eine Körper ist drehbar angeordnet, während der andere feststeht. Die beiden Teile decken sich, wenn kein Strom durch das Solenoid fließt, nahezu und haben einen möglichst kleinen Abstand. Bei Stromdurchgang werden beide Segmente in demselben Sinne polarisiert, so daß Abstoßung erfolgt.

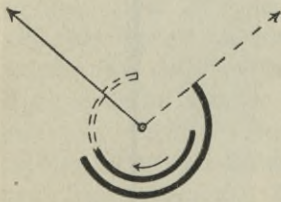


Fig. 114.

Bei den Strommessern von Siemens & Halske, deren bewegliches System in Fig. 113 abgebildet ist, ist der Weicheisenkörper E so angeordnet, daß der Durchschnittspunkt der Achse peripher liegt, d. h. nicht mit dem Mittelpunkt bzw. Schwerpunkte von E zusammenfällt, sondern näher dem Rande liegt. Die Spule hat eine längliche Form mit schmalen Spalt, so daß durch die große Annäherung des Eisenkerns an die Drahtwindungen den Instrumenten eine relativ große Empfindlichkeit gegeben wird. Über die Einrichtung der Luftdämpfung und den Zweck des Schutzkörpers aus weichem Eisenblech ist schon früher das Nötige gesagt worden. Das Innere eines aperiodischen Stromzeigers zeigt Fig. 115.

Strommesser nach dem System Hummel (Schuckert & Co.). Bei diesem wird die Wirkung eines Solenoides auf ein exzentrisch angeordnetes, leicht drehbares, sehr dünnes Eisenblech in Form eines Zylinderabschnittes benutzt. Der Zeiger ist an dem Eisenbleche befestigt. Fließt ein Strom durch die Windungen, so wird das Eisenblech nach der Wandung hin angezogen, und der Zeiger macht einen Ausschlag. Da der Schwerpunkt des Systems (Zeiger und Eisenblech) bei der Nullstellung des Zeigers unterhalb des Drehungspunktes liegt, so sucht die Schwerkraft das System bei Stromdurchgang in die Ruhelage zurückzuführen; als Gegenkraft ist also die Anziehungskraft der Erde anzusehen. — Da sich das Eisenkörperchen in einem starken magnetischen Felde befindet, so wird das Instrument durch äußere magnetische Felder nur wenig beeinflusst.

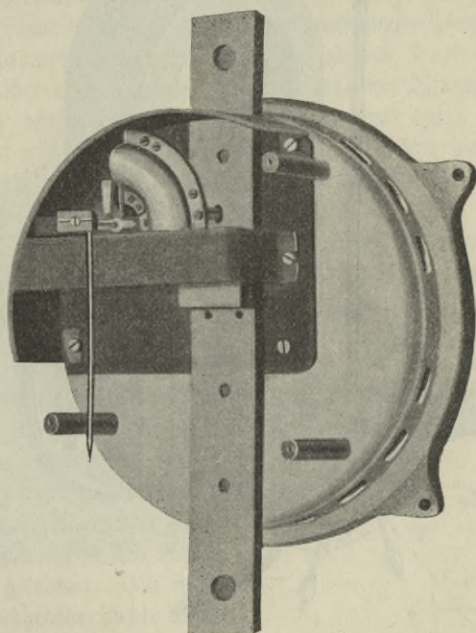


Fig. 115.

Die Weicheiseninstrumente werden auch für Wechselstrommessungen verwendet, müssen aber dann für Wechselstrom geeicht werden. Denn die Kraft, mit der die Spule auf den Weicheisenkörper einwirkt, hängt nicht von der effektiven Stromstärke, die ja gemessen werden soll, sondern von der mittleren Stromstärke ab. — Die Periodenzahl übt einen nicht unbedeutenden Einfluß auf die Angaben aus¹⁾.

b) Strommesser nach Deprez=d'Arsonval (mit beweglicher Spule, Drehspulinstrumente). Die Meßinstrumente nach dem Prinzip von Deprez

¹⁾ Siehe Kittler, Handbuch der Elektrotechnik. Bd. II S. 161.

und d'Arsonval erfreuen sich einer großen Beliebtheit, weil sie neben großer Empfindlichkeit in hohem Maße aperiodisch sind und durch magnetische Felder in ihrer Nähe sehr wenig beeinflusst werden. „So können Ströme bis zu 100 Ampere ohne beträchtliche Beeinflussung unmittelbar am Instrument vorbeigeführt werden, größere Ströme dagegen nicht mehr“ (Appenborn, Kalender für Elektrotechniker). Die Meßinstrumente nach Deprez und d'Arsonval stellen gleichsam die Umkehrung der Weicheiseninstrumente dar, indem bei ersteren die stromdurchflossene Spule drehbar angeordnet ist. Die Einrichtung kann aus der Fig. 116 ersehen werden. An den Polen des Stahlmagnets M

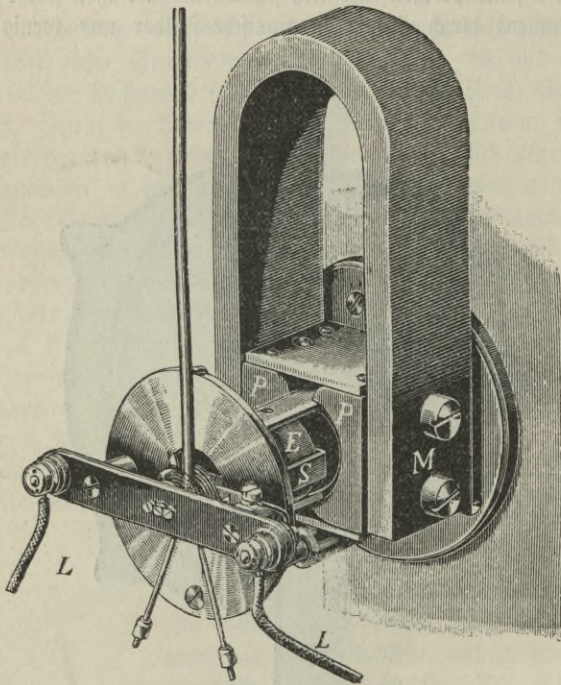


Fig. 116.

sind Polschuhe P aus weichem Eisen befestigt, die auf der Innenseite zylindrisch ausgedreht sind. In dem hierdurch gebildeten Hohlraume befindet sich ein Zylinder E aus weichem Eisen. Durch diese Anordnung wird erreicht, daß das magnetische Feld im ganzen Luftzwischenraume überall gleiche Stärke hat. Der bewegliche Teil besteht aus einem leichten, rechteckigen Rahmen S aus Aluminium, auf das ein sehr dünner Draht gewickelt ist. Durch zwei übereinanderliegende Spiralfedern, die einerseits mit den Klemmen des Apparates, andererseits mit den Enden des Spulendrahtes in Verbindung stehen, wird der Spule der Strom zugeführt. Die Spiralen wirken gleichzeitig als Gegenkraft. Der Zeiger ist an der Drehungsachse des Rahmens befestigt. Fließt durch

die Spule ein Strom, so dreht sie sich so lange, bis ihr Drehungsmoment¹⁾ durch die Gegenkraft der Federn, deren Spannung mit dem Drehungswinkel wächst, kompensiert wird.

Wenn sich die Spule dreht, so entstehen in dem Aluminiumrahmen elektrische Ströme, da er die Kraftlinien des Magnetsystems, die in unserer Figur nahezu horizontal verlaufen, schneidet. Die Ströme haben eine solche Richtung, daß durch die Wechselwirkung zwischen ihnen und den Polen die Bewegung des Rahmens gehemmt wird (wie bei einer Dynamo der Anker). Die Dämpfung ist eine so vorzügliche, daß die Zeigereinstellung eine vollkommen aperiodische ist.

Da die Drehungsrichtung der Pole von der Stromrichtung abhängig ist, so muß darauf geachtet werden, daß man die Klemmen richtig mit den Polen der Stromquelle verbindet. Aus dem genannten Grunde sind die Meßinstrumente mit beweglicher Spule nicht für Wechselstrommessungen geeignet.

Da der Rahmen nur mit einem sehr dünnen Drahte bewickelt werden darf, damit auf ihm eine möglichst große Anzahl von Windungen untergebracht werden kann, so dürfen nur ganz schwache Ströme durch die Spule fließen. Soll der Apparat als Amperemeter für stärkere Ströme dienen, so läßt man nur einen Bruchteil des zu messenden Stromes durch die Spule fließen, indem man eine Stromverzweigung anwendet (s. S. 252). Die Instrumente nach Deprez und d'Arsonval sind von der Weston Electrical Instrument Co. in vorzüglicher Güte ausgeführt bezw. vervollkommenet worden und werden von den Technikern kurz Weston-Instrumente genannt.

c) Hydrazininstrumente. Bei diesen wird die Wärmewirkung des elektrischen Stromes für die Messung benutzt. Die ersten auf diesem Prinzipie beruhenden Instrumente wurden von Cardew konstruiert. Die Einrichtung, die Hartmann & Braun den Hydrazininstrumenten gegeben haben, ist folgende. Ein sehr dünner Platin Silberdraht *a b* (Fig. 117) ist an den Enden fest eingeklemmt und, wenn kein Strom durch ihn fließt, gespannt. Ein feiner Messingdraht ist ungefähr in der Mitte von *a b* und bei *d* befestigt. Über eine leicht drehbare kleine Rolle *r* ist ein Kokonfaden geschlungen, dessen Enden an *c d* und eine Blattfeder *f*, die einen schwachen Zug auf den Faden ausübt, befestigt sind. Fließt ein Strom durch den Platin Silberdraht, so wird er erwärmt; insolge dessen dehnt er sich aus, der Abstand der Punkte *c* und *d* wird kleiner, und es erfolgt eine Durchbiegung, da ja die Feder *f* eine Zugkraft ausübt. Die Rolle *r* wird also,

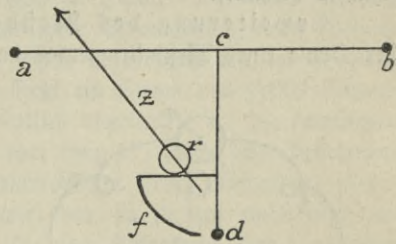


Fig. 117.

¹⁾ Unter Drehungsmoment versteht man das Produkt aus der Länge des Hebelarmes und der am Ende des Hebelarmes senkrecht zu ihm wirkenden Kraftkomponente. In unserem Falle ist der Hebelarm die halbe Breite des Rahmens.

da das rechts von ihr befindliche Stück des Kokonfadens aufgewickelt wird, von links nach rechts gedreht; diese Drehung macht der Zeiger Z mit.

Um den Einfluß der Außentemperatur zu eliminieren, ist der Draht a b auf einer Metallplatte, gegen die er natürlich isoliert ist, angebracht. Steigt die Temperatur der Umgebung, so dehnt sich die Platte so aus, daß die Spannung des Fadens unverändert bleibt. Durch Drehung einer von außen zugänglichen Schraube kann der Zeiger auf den Nullpunkt der Skala eingestellt werden (nach dem Transporte oder nach zu starker Belastung).

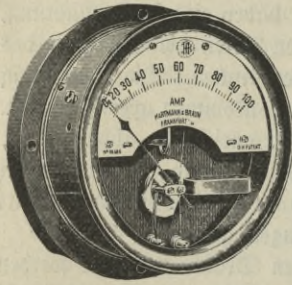


Fig. 118.

Um eine Dämpfung zu erzielen, ist auf der Achse des Zeigers eine leichte Aluminiumscheibe befestigt, die sich zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagnets bewegt (s. Fig. 118).

Die Hauptvorzüge der Hitzdrahtinstrumente bestehen in ihrer vollkommenen Unabhängigkeit von benachbarten Starkströmen und Magnetfeldern und in dem geringen Stromverbrauch. Da ferner die Erwärmung des Platinsilberdrahtes von dem Quadrate der Stromstärke abhängig ist, so kann dasselbe Instrument sowohl für Gleichstrom- wie für Wechselstrommessungen Verwendung finden (man vergl. die Berechnungen auf S. 51). Als Nachteil der Instrumente ist zu erwähnen, daß die Zeigereinstellung nicht eine sofortige ist, da der stationäre Zustand erst nach Verlauf von einigen Sekunden eintritt.

Da der Hitzdraht nur ganz schwache Ströme verträgt, so ist die Strommessung auch hier eine indirekte, d. h. sie geschieht unter Benutzung eines Nebenschlusses (Shunt).

Erweiterung des Meßbereiches. Angenommen der Widerstand der Spule eines Meßinstrumentes nach Deprez-d'Arsonval oder eines Hitzdrahtes betrage 1 Ohm und die größte zulässige Stromstärke 0,15 Ampere (vergl. Universalgalvanometer von Siemens & Halske). Wollen wir mit dem betreffenden Instrumente Ströme bis zu 15 Ampere messen, so müssen wir eine Stromverzweigung anwenden, so daß, wenn wir dem Apparate 15 Ampere zuführen, nur 0,15 Ampere durch die Spule und demgemäß 14,85 Ampere durch den Nebenschluß fließen (s. Fig. 119, in der K_1 , K_2 die Klemmen des Instru-

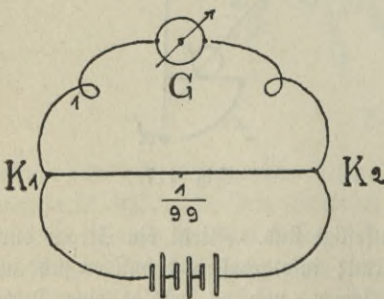


Fig. 119.

mentes G sind). Um den Widerstand des Nebenschlusses zu erhalten, schließen wir folgendermaßen: Da der Spannungsverlust im Apparate oder die Klemmenspannung bei voller Belastung 0,15 · 1 Volt betragen soll, so muß der Wider-

stand im Nebenschlusse der Gleichung genügen: $0,15 = 14,85 \cdot w$. Es ergibt sich $w = \frac{1}{99}$ Ohm. Schalten wir umgekehrt mit der Spule einen Widerstand von $\frac{1}{99}$ Ohm parallel, so teilt sich ein Strom von 15 Ampere so, daß nur 0,15 Ampere durch die Spule fließen. Ist die Skala in 150 Teile geteilt, so entspricht jedes Intervall ohne Nebenschluß einem Strome von 1 Milliampere und bei Benutzung eines Shunts von $\frac{1}{99}$ Ohm einem Strome von $\frac{1}{10}$ Ampere.

Die Nebenschlüsse, auch Abzweigwiderstände genannt, werden bei den technischen Meßinstrumenten im Innern des Apparates angebracht; bei den Universalgalvanometern, die für Laboratoriumsmessungen eine ausgedehnte Verwendung finden, werden sie meistens in der Größe von $\frac{1}{9}$ Ohm, $\frac{1}{99}$ Ohm u. d. d. Apparaten beigegeben.

2. Spannungsmesser (Voltmeter).

Ein prinzipieller Unterschied zwischen Strom- und Spannungsmessern besteht im allgemeinen nicht. Während aber der innere Widerstand bei den Amperemetern sehr klein ist, haben die Voltmeter — oder besser gesagt sollten die Voltmeter einen sehr großen inneren Widerstand haben. Die Voltmeter müssen daher, auch wenn nur schwache Ströme durch sie fließen, einen größeren Ausschlag zeigen.

Angenommen, ein Meßapparat sei so eingerichtet, daß durch einen sehr schwachen Strom, etwa 1 Milliampere, eine deutliche Zeigerablenkung herbeigeführt wird. Hat das Instrument einen Widerstand von 1000 Ohm, so beträgt der Spannungsverlust im Apparate oder die Klemmspannung bei einer Stromstärke von 0,001 Ampere $0,001 \cdot 1000 = 1$ Volt. Verbinden wir umgekehrt die Klemmen des Instrumentes mit einer Stromquelle, deren Klemmspannung 1 Volt beträgt, durch Drähte, deren Widerstand wir im Vergleich zu 1000 Ohm vernachlässigen können, so fließt ein Strom von 0,001 Ampere durch den Apparat und der Zeiger wird deutlich abgelenkt. An die betreffende Stelle der Skala schreiben wir 1 Volt oder kurz 1. Wird das Instrument mit einer Stromquelle von 2 Volt elektromotorischer Kraft verbunden, so erleidet der Zeiger eine stärkere Ablenkung wie eben, da ja jetzt ein Strom von 2 Milliampere durch den Apparat fließt. Die neue Ablenkung wird durch einen Strich auf der Skala markiert und neben diesen die Zahl 2 geschrieben u. d. d. Man notiert also auf der Skala diejenigen Zahlen, die der Klemmspannung des Apparates entsprechen (w. i.).

Würde man den großen Widerstand eines nach dem elektromagnetischen Prinzip eingerichteten Voltmeters in der Weise herstellen, daß man einen dünnen isolierten Kupferdraht auf eine Spule wickelt, so würden sich die Angaben des Voltmeters mit der Temperatur des Spulendrahtes ändern. Denn wir wissen ja, daß der Widerstand eines Leiters von der Temperatur abhängig ist. Besonders würde die Joulesche Wärme in der Spule in Betracht kommen. Man zerlegt daher den Widerstand des Voltmeters in zwei Teile, indem man eine

auf den beweglichen Teil wirkende Spule mit Kupferdraht bewickelt und vor diese einen von der Temperatur möglichst unabhängigen, großen Widerstand schaltet (Neusilber, Manganin 2c.).

Von zwei Voltmetern, die bei gleichem Meßbereiche dieselbe Empfindlichkeit besitzen, verdient dasjenige den Vorzug, dessen Widerstand am größten ist. Denn die Angaben eines Spannungsmessers, dessen Widerstand klein oder relativ klein ist, werden durch den Widerstand langer Verbindungsdrähte beeinflusst. Es sei, um einen recht drastischen Fall zu wählen, der Widerstand eines Spannungsmessers gleich 100 Ohm, und das Voltmeter sei mit zwei weit entfernten Punkten, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll, durch Drähte verbunden, die einen Widerstand von 20 Ohm haben. Die wirkliche zu messende Spannung betrage 60 Volt. Dann fließt durch das Voltmeter ein Strom von $\frac{60}{120} = 0,5$ Amp. Da nun das Voltmeter seine

Klemmspannung anzeigt und diese $0,5 \cdot 100 = 50$ Volt beträgt, so differiert die Messung um 10 Volt mit der Wirklichkeit. Wir sehen also, daß Voltmeter, die für die Messungen von Spannungen zwischen weit entfernten Punkten einer elektrischen Anlage verwendet werden, einen möglichst großen inneren Widerstand haben müssen (s. auch Prüfdrähte).

Soll der Meßbereich eines Spannungsmessers vergrößert werden, so kann man entweder, wie bei den Strommessern, eine Teilung des Stromes vornehmen oder einen Widerstand vorschalten. In der Praxis benutzt man fast ausschließlich das letztere Mittel. Beispiel: Der Meßbereich erstreckte sich bis 100 Volt und der innere Widerstand betrage 1000 Ohm¹⁾. Schalten wir noch einen Widerstand von 1000 Ohm hinzu, indem wir eine Klemme des Voltmeters mit einer Klemme des neuen Widerstandes verbinden, so können wir Spannungen bis zu 200 Volt messen. Denn verbinden wir die freien Klemmen mit einer Leitung, deren Spannung 200 Volt beträgt, so fließt durch das Voltmeter ein Strom von $\frac{200}{2000} = 0,1$ Amp.; dieser Strom bewirkt dieselbe Ablenkung des Zeigers, wie wenn wir ohne Vorschaltwiderstand das Voltmeter mit einer Spannung von 100 Volt verbinden. Wir müssen also die abgelesene Spannung (100 Volt) mit 2 multiplizieren, um die zu messende zu erhalten.

Gewöhnlich unterdrückt man bei Spannungsmessern zwecks Erzielung möglichst großer Intervalle in der Nähe der Gebrauchsspannung die unteren Skalenwerte. Ein Voltmeter für 110 Volt normal erhält z. B. nur eine genaue Teilung von 90—130 Volt.

Die Messung höherer Wechselstromspannungen von 1000 Volt an aufwärts kann geschehen entweder mittels elektrostatischer Voltmeter oder indirekt unter Benutzung eines Transformators oder durch Teilung der Spannung.

¹⁾ Handelt es sich um Wechselstrom, so muß der Widerstand induktionsfrei sein.

a) **Elektrostatische Voltmeter.** Es ist bekannt, daß ein positiv elektrischer und ein negativ elektrischer Körper sich gegenseitig anziehen. Die Größe der Anziehung wächst mit dem Potentialunterschiede der beiden Körper. Bei den elektrostatischen Voltmetern verwendet man eine oder mehrere feststehende Metallplatten und eine oder mehrere drehbar angeordnete Platten oder Scheiben. Das eine System wird mit dem positiven Pol der Stromquelle oder mit der positiven Leitung, das andere mit dem negativen Pol verbunden oder umgekehrt. Die ganze Anordnung kann also mit einem Kondensator verglichen werden, dessen Dielektrikum die Luft ist. Bei dem elektrostatischen Voltmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, das in Fig. 120 abgebildet ist, sind drei beilähnlliche Bleche *b* so nebeneinander angeordnet, daß enge Zwischenräume bleiben. Das bewegliche System besteht aus zwei Aluminiumscheiben *a*, an deren gemeinsamer Drehungsachse der Zeiger *z* befestigt ist. Bei genügend starker Ladung von *a* und *b* drehen sich die Aluminiumscheiben so lange, bis die Anziehung zwischen den beiden Elektrizitätsarten durch die Schwerkraft, die die Aluminiumscheiben in die in der Figur gezeichnete Lage zurückzuführen sucht, kompensiert wird.

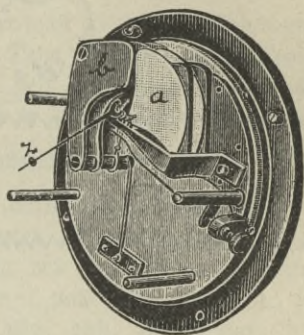


Fig. 120.

Bei dem Multizellularinstrumente von Hartmann & Braun besteht der feste Körper aus vielen übereinander angeordneten Metallscheiben; diese wirken anziehend auf ein System, das aus einer entsprechenden Anzahl übereinanderliegender, durch kleine Zwischenräume voneinander getrennter, leichter Aluminiumflügel besteht, die auf einer gemeinsamen Achse sitzen; das bewegliche System ist an einem dünnen Metallbände aufgehängt. Das Instrument ist so empfindlich, daß es auch für die Messung niedriger Spannungen, wie sie bei Lichtbetrieb vorkommen, Verwendung finden kann; besonders eignet es sich auch für Fernspannungsmessungen, da der Widerstand in den Verbindungsdrähten keinen Einfluß auf die Messung ausübt (s. S. 254).

b) Mittels eines kleinen Meßtransformators wird die Spannung so weit reduziert, daß man die früher beschriebenen Spannungsmesser benutzen kann. Letztere werden mit den sekundären Klemmen des Transformators verbunden. Kennt man das Übersetzungsverhältnis des Transformators, so kann man aus der sekundären Spannung, die das Voltmeter anzeigt, die primäre ermitteln (s. Transformatoren). Ist z. B. das Übersetzungsverhältnis 10 : 1, so hat man die gemessene Spannung mit 10 zu multiplizieren, um die Hochspannung zu erhalten.

c) Im Notfalle kann man folgendes Verfahren anwenden. Man verbindet die beiden Leitungen, deren Spannung gemessen werden soll, durch einen sehr großen induktionsfreien Widerstand und mißt die Spannung an den Enden

eines bekannten Teiles des ganzen Widerstandes, etwa des Teiles w_1 (Fig. 121). Ist w_1 der n te Teil des ganzen Widerstandes, so ist die abgelesene Spannung mit n zu multiplizieren. Beispiel: Die zu messende Spannung liege in der

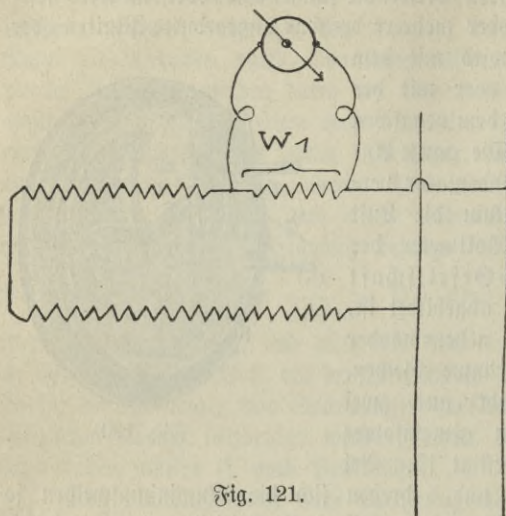


Fig. 121.

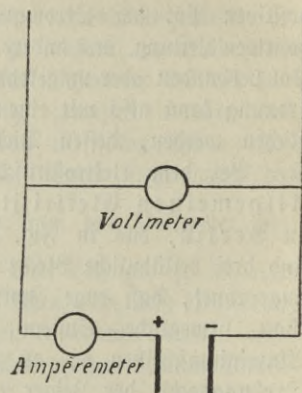


Fig. 122.

Nähe von 2000 Volt, der ganze Widerstand betrage 50 000 Ohm und w_1 5000 Ohm, das Voltmeter zeige 190 Volt an. Dann ist $E = 1900$ Volt.

Wie man die Strom- und Spannungsmesser schaltet, ist aus der Fig. 122 zu ersehen.

3. Wattmeter (Elektrodynamometer).

Wir haben gesehen, daß die Leistung eines Wechselstromes nur dann gleich dem Produkte aus der gemessenen (effektiven) Stromstärke und Spannung ist, wenn die Selbstinduktion im Stromkreise so klein ist, daß man sie praktisch vernachlässigen kann, wie es bei reinem Glühlampenbetriebe der Fall ist. In den meisten Fällen muß man die wirkliche Leistung $e \cdot i \cdot \cos \varphi$ mittels besonderer Meßinstrumente, der sogen. Wattmeter oder Elektrodynamometer, bestimmen. Diese basieren auf dem folgenden Prinzip: Wenn zwei rechteckige (kreisförmige oder sonstwie geförmte) Stromleiter, von denen der eine feststeht, während der andere sich leicht drehen kann, so angeordnet sind, daß ihre Windungsebenen sich durchkreuzen, und man schickt durch beide Stromleiter einen elektrischen Strom, so dreht sich der bewegliche Rahmen so, daß die Rechtecksebenen zusammenfallen und die Ströme in beiden gleich gerichtet sind, d. h. bis die beiden Felder der Richtung und dem Sinne nach zusammenfallen. Die beiden Stromkreise verhalten sich also wie zwei Magnete, deren Achsen sich unter einem Winkel schneiden. Nennen wir den durch die erste Windung oder Spule fließenden Strom J und den der zweiten Windung i , so ist das Drehungsmoment proportional $J \cdot i$. Ändert man in einem der beiden Strom-

kreise die Stromrichtung, so ändert sich der Drehungssinn der beweglichen Spule. Kehrt man aber in beiden Stromkreisen die Stromrichtung um, so bleibt der Drehungssinn derselbe. Fließen also durch die beiden Rechtecke Wechselströme, die in der Phase übereinstimmen, so addieren sich die den einzelnen Zeittheilen entsprechenden Drehungsmomente zu einem resultierenden Drehungsmoment.

Das resultierende Drehungsmoment ist unter sonst gleichen Umständen um so kleiner, je größer die Phasenverschiebung ist. Denn bei Phasenverschiebung kehrt sich nicht in beiden Rechtecken zur selben Zeit die Stromrichtung um, sondern in dem einen Rechteck etwas später als in dem anderen, und zwar nach $\frac{\varphi}{360} \cdot T$ Sekunden, wenn φ der Phasenverschiebungswinkel ist. Die während dieser Zeit eine Drehung verursachenden elektrodynamischen Kräfte — so nennt man die Kräfte, die die beiden gekreuzten Stromleiter aufeinander ausüben — wirken hemmend auf die Bewegung des drehbar angeordneten Rechtecks. Würde die Phasenverschiebung zwischen J und i 90° betragen, so würden sich die Impulse aufheben. Wir sehen also, daß, kurz gesagt, die Phasenverschiebung in der beschriebenen Anordnung ihren Einfluß geltend macht oder daß das Wattmeter der Phasenverschiebung gleichsam Rechnung trägt.

Das Elektrodynamometer oder Wattmeter von Siemens & Halske (Fig. 123). An einem mit Fußschrauben versehenen Holzgestell ist eine feste Spule angebracht mit zwei übereinander liegenden Wickelungen. Die eine Wickelung (die innere), aus vielen Bindungen eines dünneren Drahtes, ist für schwache Ströme, die andere (äußere), aus wenigen Bindungen eines dicken Drahtes, für starke Ströme bestimmt. Die 4 freien Drahtenden sind an 4 auf der Grundplatte befindlichen Klemmen, K_1 und K_2 bezw. K_3 und K_4 , befestigt. — Auf einen rechteckigen Rahmen r , dessen Ebene senkrecht auf den Windungsebenen der festen Spule steht, ist ein sehr langer dünner Draht gewickelt. Der Rahmen ist an einem Seidenfaden aufgehängt. Die Drahtenden der beweglichen Spule sind mit zwei schwachen Spiralfedern, die oben und unten an der Spule befestigt sind, verbunden und diese Spirale durch Drähte mit den beiden mittleren Klemmschrauben e .

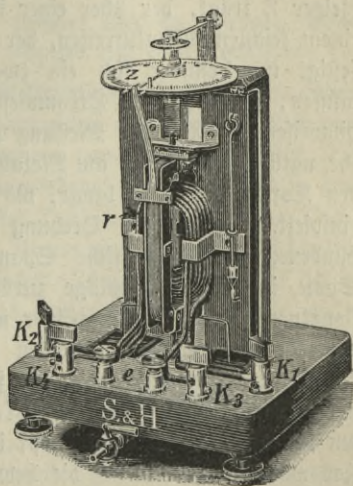


Fig. 123.

Die feste Spule wird in den Hauptstrom eingeschaltet, wie ein Amperemeter, und zwar benutzt man für Ströme unter 25 Amp. die Klemmen K_3 , K_4 und für stärkere Ströme die Klemmen K_1 , K_2 . Die Klemmen e der beweglichen

Spule (s in Fig. 124) verbindet man mit den Klemmen desjenigen Apparates, dessen Energieverbrauch man messen will oder mit den beiden Leitungsdrähten, wie ein Voltmeter. In die eine Zuleitung legt man noch einen Vorschaltwiderstand, um den Nebenstrom abzuschwächen (s. Schaltungschema, Fig. 124).

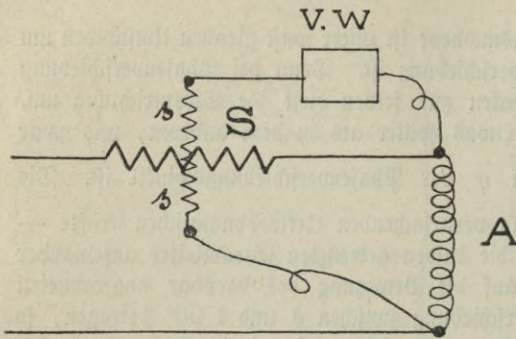


Fig. 124.

Hat man über die Stärke des Nutzstromes keine angenäherte Vorstellung, so nehme man zuerst die stärkere Wicklung der festen Spule. Ferner ist zu beachten, daß zwischen benachbarten Klemmen keine hohen Spannungen auftreten und daß die Drehung der beweglichen Spule nach der richtigen Seite hin erfolgt. Ist letzteres nicht der Fall, so muß man entweder den Strom in der festen oder in der beweglichen Spule umkehren.

Die obere Spiralfeder dient zugleich zur Messung der ablenkenden Kraft zwischen den beiden Spulen. Zu dem Zwecke ist dieselbe an dem sogenannten Torsionsknopfe befestigt, der um eine durchbohrte vertikale Achse drehbar ist und einen Zeiger Z trägt, der über einer in Bogengrade eingeteilten Skala spielt. An einem leichten Metallstreifen, der an dem Rahmen der beweglichen Spule befestigt ist, befindet sich ein zweiter Zeiger. Die beiden erwähnten Zeiger müssen, ehe man zur Strommessung schreitet, auf den Nullpunkt der Skala hinweisen. — Bei der Messung wird die bewegliche Spule abgelenkt und mit ihr natürlich auch der am Metallstreifen befestigte Zeiger. — Man dreht nun den Torsionsknopf so lange, bis der Rahmenzeiger genau auf den Nullpunkt einspielt. Durch diese Drehung entstehen in der mit dem Knopfe fest verbundenen Feder elastische Spannungen (Torsionskraft), die die bewegliche Spule in die Anfangslage zurückzutreiben suchen. Je mehr man den Torsionsknopf dreht, um so größer wird die der elektrodynamischen Kraft entgegenwirkende Torsionskraft. Halten sich die beiden Kräfte das Gleichgewicht, so stehen die Windungsebenen der festen und beweglichen Spule wieder senkrecht aufeinander. (Man vergl. Coulombs Drehwaage.) Übrigens ist der Winkel, um den man den Torsionsknopf im ganzen drehen muß, nicht gleich dem Torsionswinkel. Ist nämlich die bewegliche Spule um α Grad abgelenkt worden, und muß man den Torsionsknopf um β Grad drehen, damit die Spule in die Anfangslage zurückkehrt, so ist der Torsionswinkel gleich $\beta - \alpha$ Grad. Multipliziert man den Torsionswinkel bzw. dessen Maßzahl (z. B. $70^\circ 30' = 70,5^\circ$, Maßzahl = 70,5) mit einer Konstanten, die man in einer dem Apparate beigegebenen Eichungstabelle findet, so erhält man die gesuchte wirkliche elektrische Arbeit in Watt.

Nennen wir den Torsionswinkel τ , und ist C eine Konstante (= Torsionskraft, wenn $\tau = 1^\circ$), so ist die Torsionskraft gleich $C \cdot \tau$. — Ist ferner

$$e = E_0 \cdot \sin \omega t$$

die Netzspannung und

$$J = J_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

der Hauptstrom zur Zeit t , so ist die ablenkende Kraft zur Zeit t proportional

$$\left(\frac{E_0}{W} \cdot \sin \omega t\right) \cdot (J_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)),$$

vorausgesetzt, daß der Ohmsche Widerstand im ganzen Nebenschlusse W (Vorschaltwiderstand inkl. Spulenwiderstand) so groß ist, daß man die Selbstinduktion vernachlässigen kann.

Sollte letzteres nicht der Fall sein, oder handelt es sich um sehr genaue Messungen, so hat man W durch die Impedanz des Nebenschlusses und $\sin \omega t$ durch $\sin(\omega t - \psi)$ zu ersetzen.

Bildet man in der früher (S. 64) beschriebenen Weise den Mittelwert für die ablenkende Kraft, so findet man, daß dieser Mittelwert proportional

$$\frac{1}{W} \cdot \text{effektive Spannung} \times \text{effektive Stromstärke} \times \cos \varphi$$

oder gleich

$$K \cdot \frac{1}{W} \times \text{wirkliche Leistung, wo } K \text{ eine Konstante ist.}$$

Mithin ist

$$C \cdot \tau = K \cdot \frac{1}{W} \cdot \text{wirkliche Leistung,}$$

oder die wirkliche Leistung ist gleich $\frac{C \cdot W}{K} \cdot \tau$, d. h. proportional dem Torsionswinkel.

Bei niedriger Betriebsspannung und bei größerer Phasenverschiebung zwischen Nutzstrom und Spannung bedarf das gefundene Resultat noch einer Korrektion.

Bei den Wattmetern der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft und anderer Firmen für direkte Ablesung ist die feste Hauptstromspule mit vertikaler Windungsebene in zwei durch einen kleinen Zwischenraum voneinander getrennte Teile zerlegt. Die bewegliche Spule, deren Windungsebene mit der Vertikalen einen Winkel von etwa 45° bildet und die sich zum Teil in der einen, zum Teil in der anderen Hälfte der festen Spule befindet, ist um eine horizontale Achse leicht drehbar. Die Stromzuführung zur beweglichen Spule geschieht wie bei den Spannungsmessern nach d'Arsonval mittels zweier Spiralfedern, die zugleich als Gegenkraft dienen.

Leistungsmessung eines Dreiphasensystems.

a) Messung mittels eines Wattmeters: Wenn in den drei Zweigen eines Drehstromkreises völlige Gleichheit herrscht (symmetrischer Dreiphasenstrom), so erhält man die Leistung des ganzen Systems, indem man die Leistung in einer Phase mit drei multipliziert. Die Leistung in einer Phase ist aber bei der Sternschaltung gleich dem Produkte aus dem Phasenstrom (effektiv), der effektiven Spannung zwischen dem neutralen Punkte und der zugehörigen Klemme oder zugehörigen Leitung und dem $\cos \varphi$. Man muß also die Stromspule des Wattmeters in eine der Hauptleitungen einschalten

und die Klemmen der Spannungsspule mit der betreffenden Leitung einerseits und dem neutralen Punkte andererseits verbinden (s. Fig. 45 auf S. 75). Ist der neutrale Punkt nicht zugänglich, so wendet man die von Behn-Eschenburg angegebene Meßmethode an¹⁾. Bei dieser stellt man sich künstlich einen neutralen Punkt her unter Benutzung von drei Widerständen w_1, w_2, w_3 . Die Schaltung ist aus der Fig. 125 zu ersehen, in der S die Stromspule, s die Spannungsspule darstellt. Ist $w_1 = w_2 = w_3 + w$, wo w der Widerstand in s ist, so erhält man die ganze Leistung, indem man die abgelesene Leistung mit 3 multipliziert. Die Nullpunktswiderstände werden, wenn es sich um kleinere Spannungen handelt, im Instrumente selbst untergebracht.

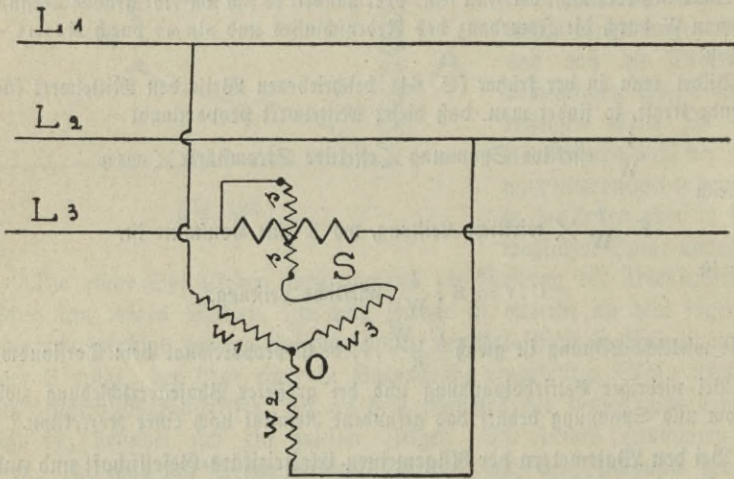


Fig. 125.

Bei der Dreieckschaltung (s. Fig. 46, S. 76) und symmetrischer Belastung muß man eine der Dreiecksseiten durchschneiden und die so erhaltenen freien Enden mit den Klemmen der Stromspule verbinden. Die Klemmen der Spannungsspule (beweglichen Spule) sind mit den Endpunkten der betreffenden Phase oder mit den zugehörigen Leitungsdrähten zu verbinden.

b) Bei Ungleichheit in den drei Phasen kann man die Messung der Leistung nach zwei verschiedenen Methoden ausführen. Ist kein Nullleiter vorhanden, so erfolgt die Leistungsmessung mittels zweier Einphasen-Wattmeter. Es seien OA, OB, OC die drei zu einem Stern vereinigten Nutzwiderstände (Lampen zc.). Bezeichnen wir die momentanen Ströme in den drei Leitungen, die den Strömen in OA, OB, OC gleich sind, mit i_1, i_2, i_3 und die Phasenspannungen mit e_a, e_b, e_c , wo z. B. e_a die Spannung zwischen O und A ist, so ist die Arbeit während einer sehr kleinen Zeit gleich

$$A = e_a \cdot i_1 + e_b \cdot i_2 + e_c \cdot i_3 \dots \dots \dots (1)$$

¹⁾ G.-L. Z. 1896, S. 182.

Für die Sternschaltung ist aber

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \text{ oder } i_3 = -i_1 - i_2.$$

Setzen wir in (1) ein, so erhalten wir

$$\begin{aligned} A &= e_a i_1 + e_b i_2 - e_c \cdot i_1 - e_c \cdot i_2 \\ &= i_2 (e_b - e_c) - i_1 \cdot (e_c - e_a). \end{aligned}$$

Nun ist aber $e_b - e_c$ nichts anderes als die Spannung zwischen B und C oder zwischen den Leitungen L_2 und L_3 , also gleich e_1 und $e_c - e_a$ die Spannung zwischen C und A, also gleich e_2 . Mithin

$$A = e_1 \cdot i_2 - e_2 \cdot i_1.$$

Dieselbe Gleichung kann man für die Dreieckschaltung ableiten. Denn zunächst ist hier die Klemmspannung gleich der Phasenspannung:

$$e_1 = e_a, e_2 = e_b, e_3 = e_c.$$

Ferner ist

$$e_1 + e_2 + e_3 = e_a + e_b + e_c = 0$$

und

$$i_1 = i_c - i_b, i_2 = i_a - i_c, i_3 = i_b - i_a.$$

Setzt man in dem Ausdrucke für die Arbeit

$$\begin{aligned} A &= e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \\ &= e_1 \cdot i_a + e_2 \cdot i_b + e_3 i_c, \end{aligned}$$

für e_3 die Differenz $-e_1 - e_2$ ein, so ist

$$\begin{aligned} A &= e_1 \cdot i_a + e_2 i_b - e_1 i_c - e_2 i_c \\ &= e_1 (i_a - i_c) - e_2 (i_c - i_b) \\ &= e_1 \cdot i_2 - e_2 i_1. \end{aligned}$$

In unserer für Dreiecks- und Sternschaltung übereinstimmenden Gleichung kommen vor die Ströme in zwei Leitungen, nämlich in L_1 und L_2 , und die Spannungen zwischen diesen beiden Leitungen und der dritten.

In analoger Weise wie eben kann man noch folgende Gleichungen ableiten:

$$\begin{aligned} A &= e_2 i_3 - e_3 i_2, \\ A &= e_3 \cdot i_1 - e_1 i_3. \end{aligned}$$

Da in jeder der drei Gleichungen für die Arbeit nur zwei Leistungsströme und zwei Klemmspannungen vorkommen, so kann man die Leistungsmessung mittels zweier Wattmeter vornehmen. Wie die Schaltung auszuführen ist, ergibt sich ohne weiteres aus unseren Gleichungen. Das erste Wattmeter wird z. B. mit seiner Hauptstromspule in die Leitung L_2 eingeschaltet und die Spannungsspule mit dieser Leitung und mit L_3 verbunden zc.

Haben die beiden Wattmeter dieselbe Konstante, so kann man die beiden Spannungsspulen auf dieselbe Achse arbeiten lassen. Man erhält dann durch eine Ableseung die Leistung des Drehstromes.

Ist nur ein Wattmeter vorhanden, so mißt man unter Benutzung eines Umschalters und Stromwenders die Leistungen nacheinander. Die einzelnen Ablesungen sind zu addieren.

c) Die Leistungsmessung mittels dreier Wattmeter erfolgt, wenn ein Nullleiter vorhanden und die Phasen ungleich belastet sind. Jede der drei Spannungsspulen wird mit der zugehörigen Leitung und dem neutralen Punkte oder mit der neutralen Leitung verbunden. In diesem Falle mißt jedes Wattmeter die Leistung der betreffenden Phase.

Wenn aber ein neutraler Leiter nicht vorhanden ist oder der neutrale Punkt nicht zugänglich ist, so muß man die drei noch freien Klemmen der

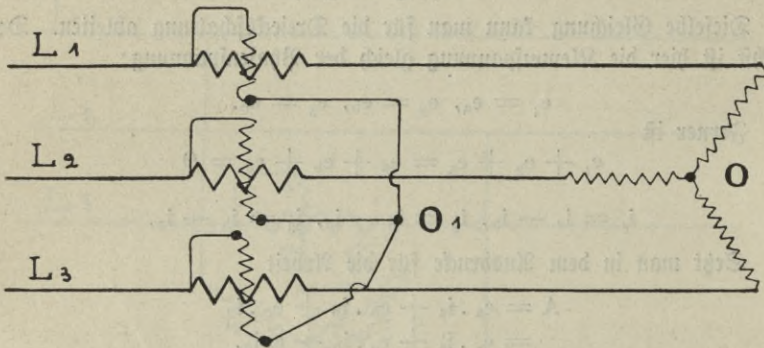


Fig. 126.

Spannungsspulen in der angedeuteten Weise miteinander verbinden (s. Fig. 126). Es ist zu beachten, daß in diesem Falle die ganze Leistung durch Addition der einzelnen Leistungen erhalten wird, daß aber nicht die abgelesene Leistung mit der Leistung der betreffenden Phase übereinstimmt. Man kann daher bei der gekennzeichneten Schaltung die Phasenverschiebung in den einzelnen Phasen nicht ermitteln. In nicht schwankenden Betrieben können die Messungen auch mit nur einem Wattmeter unter Benutzung eines geeigneten Umschalters vorgenommen werden. Der gesamte Effekt ist gleich der Summe der drei Ablesungen.

Nachdem wir eine größere Reihe von technischen Meßapparaten beschrieben haben, wollen wir noch ein Meßinstrument besprechen, das für Kontrollmessungen vielfach Verwendung findet, nämlich das

Universalgalvanometer.

Dieses Instrument, das in keiner Centrale fehlen sollte, wird von Siemens & Halske in vorzüglicher Ausführung geliefert. Es besteht aus einem empfindlichen Amperemeter nach Deprez-d'Arsonval, Vorschaltwiderständen und einer Brückenvorrichtung. Die Vorschaltwiderstände sind im Innern des Gehäuses untergebracht; ihre Enden stehen mit den Metallklößen, die sich

zu beiden Seiten der Klemmen am Rande des Gehäuses befinden (s. Fig. 127 und 128), in Verbindung. Durch Einsetzen von Metallstößeln kann man die Vorschaltwiderstände kurz schließen.

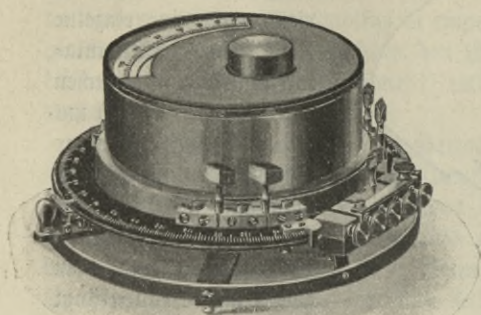


Fig. 127.



Fig. 128.

Die Skala ist in 150 Intervalle geteilt. Da ein durch die bewegliche Spule fließender Strom von 1 Milliampere eine Ablenkung des Zeigers um 1 Teilstrich bewirkt, so ist die höchste zulässige Stromstärke gleich 0,150 Amp.

a) Strommessung. Man stößelt y (s. Fig. 129 oder 130), schließt also den Nebenschluß zu der Spule des Instrumentes und schließt alle Vorschaltwiderstände v kurz; die Zuleitungsdrähte werden an die äußere rechte und äußere linke Klemme angeschlossen. Der Widerstand des ganzen Apparates beträgt jetzt 1 Ohm. Man kann Ströme von 0—0,15 Amp. messen. Schaltet man einen zugehörigen Nebenschluß von $\frac{1}{9}$ Ohm vor den Apparat, so wird der Meßbereich, wie früher gezeigt wurde, 10mal größer. Man kann also Ströme bis 1,5 Amp. messen (1 Teilstrich = $\frac{1}{100}$ Amp.). Benutzt man einen Nebenschluß von $\frac{1}{99}$ Ohm, so ist 1 Teilstrich = $\frac{1}{10}$ Amp., so daß man Ströme bis zu 15 Amp. messen kann *z.* Hat man keine Vorstellung über die Stärke des Stromes, den man messen will, so bedient man sich entweder vor der eigentlichen Messung eines Hilfsamperemeters, oder man fängt mit dem kleinsten Nebenschlusse an, oder man schwächt zunächst den Strom mittels eines Rheostates ab.

b) Spannungsmessung. Man stößelt y und bei den neueren Apparaten das erste Loch linkerhand (s. Fig. 129). Die Zuleitungsdrähte werden an dieselben Klemmen wie eben gelegt. Der ganze Widerstand des Apparates beträgt jetzt $(900 + 90 + 9)$ Ohm + Widerstand der Stromverzweigung, die bei a beginnt und bei b endigt, also 1000 Ohm. Bei einer Apparatklemmenspannung von 1 Volt fließt durch G ein Strom von 1 Milliampere, und der Zeiger wird um einen Teilstrich abgelenkt. Man kann also Spannungen bis zu 150 Volt messen. Schließt man 900 Ohm kurz, so beträgt der Widerstand des Apparates (von einer Klemme bis zur anderen)

100 Ohm. Wird jetzt der Zeiger um einen Teilstrich gedreht, so ist die Apparatklemmspannung gleich $100 \cdot 0,001 = 0,1$ Volt. Man kann also Spannungen bis

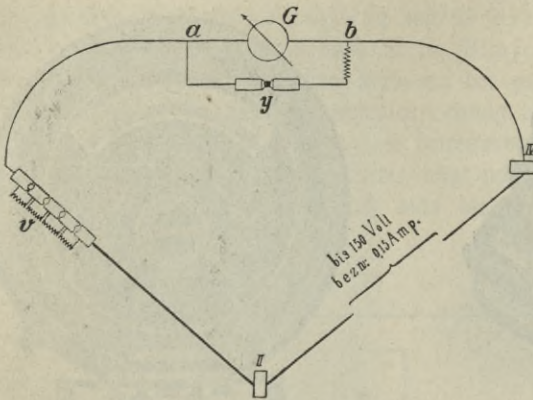


Fig. 129.

zu 15 Volt messen. Die zuletzt erwähnte Schaltung wendet man an, wenn man eine einzelne Zelle einer Akkumulatorenbatterie untersuchen will. Handelt es sich um die Messung kleinerer Spannungen, so schließt man auch 90 Ohm (bis 1,5 Volt) und eventuell noch 9 Ohm kurz. In zweifelhaften Fällen fängt man mit 1000 Ohm Widerstand an und stößt nach Bedarf.

c) Messung von Drahtwiderständen. Diese wird nach der Wheatstoneschen Brückenmethode vorgenommen, die im ersten Kapitel (s. S. 30) besprochen worden ist. Der Meßdraht, dessen Enden an den Metallklößen links und rechts neben der Klemmengruppe befestigt sind, liegt bis zur Hälfte seines Querschnittes in einer Nut, die sich am äußeren Rande

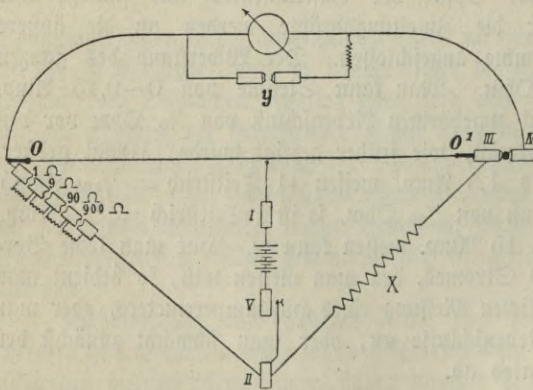


Fig. 130.

einer Schieferplatte befindet, die mit einer Skala versehen ist (s. Fig. 128). Im Schema (Fig. 130) ist der Meßdraht als gerade Linie gezeichnet und OO' genannt. O und O' stehen durch Kupferbleche, deren Widerstand vernachlässigt werden kann, mit der Klemmschraube III und dem ersten Metallfloß links in Verbindung. Der aus der Rinne herausragende Teil des Brückendrahthes wird von einer Kontaktrolle (entsprechend dem Gleitkontakt in Fig. 12, S. 30) bestrichen, wenn man den Handgriff dreht. Die Rolle steht in leitender Verbindung mit einem um die Achse des Instrumentes drehbaren Metallarme und die Achse mit der Klemme I. Der zu messende Widerstand X wird zwischen Klemme II und III oder IV — letztere beiden Klemmen sind durch einen Stöpsel miteinander zu verbinden — eingeschaltet und die Meßbatterie zwischen Klemme I

und III oder IV — letztere beiden Klemmen sind durch einen Stöpsel miteinander zu verbinden — eingeschaltet und die Meßbatterie zwischen Klemme I

und V. Zu beachten ist noch, daß y nicht gestöpselt werden darf. Ist der positive Pol der Meßbatterie mit V verbunden und drückt man die Taste (in Fig. 130 rechts von V), so fließt der Strom von V durch die Taste nach II. Hier teilt sich der Strom; ein Teil i_1 fließt über X nach III, der Rest i_2 durch die eingeschalteten Vergleichswiderstände. Ist Gleichgewicht hergestellt, sind also die beiden nach dem Galvanoskop in entgegengesetzter Richtung fließenden Ströme gleich stark, oder besteht zwischen den Enden des Meßdrahtes keine Potentialdifferenz, so fließen die Ströme i_1 und i_2 durch den Meßdraht zur Batterie zurück¹⁾.

Die Messung verläuft folgendermaßen: Man drückt, nachdem die nötigen Schaltungen hergestellt sind, auf den Knopf der Taste. Erhält man einen Ausschlag des Zeigers, so dreht man die Kontaktrolle und drückt die Taste wieder. Ist der Ausschlag größer als eben, so verschiebt man die Rolle nach der entgegengesetzten Seite, ist er kleiner, nach derselben Seite, bis man eine Stellung gefunden hat, bei der kein Ausschlag des Zeigers mehr erfolgt. Man liest die Zahl, auf die der am Handgriffe angebrachte Index zeigt (s. Fig. 127), ab und multipliziert sie mit dem eingeschalteten Vergleichswiderstande (1000 Ohm, 100 Ohm, 10 Ohm, 1 Ohm).

Den Vergleichswiderstand wählt man so, daß er von derselben Größenordnung wie der Widerstand X ist. Mißt man z. B. den Widerstand einer Glühlampe, so weiß man, daß X zwischen 100 und 1000 Ohm liegt; man wählt also als Vergleichswiderstand 100 Ohm, muß also 900 Ohm kurz schließen.

In der beschriebenen Weise kann man Widerstände bis etwa 30 000 Ohm mit hinreichender Genauigkeit bestimmen.

¹⁾ Es seien 1000 Ohm als Vergleichswiderstand eingeschaltet, und die elektromotorische Kraft der Batterie betrage E Volt. Fließt durch das Galvanoskop kein Strom, so haben wir zwei einfache Stromkreise vor uns. Haben die Stücke des Meßdrahtes links und rechts von der Kontaktrolle die Widerstände w_1 und w_2 , so ist für den linken Stromkreis

$$i_1 = \frac{E}{1000 + w_1}$$

und für den rechten

$$i_2 = \frac{E}{X + w_2}$$

Die Spannungsverluste in den Widerständen 1000 Ohm und X Ohm sind also

$$\frac{1000 \cdot E}{1000 + w_1} \quad \text{und} \quad \frac{X \cdot E}{X + w_2}$$

Diese beiden Spannungsverluste müssen einander gleich sein. Mithin

$$\frac{1000}{1000 + w_1} = \frac{X}{X + w_2}$$

oder

$$1000 \cdot w_2 = w_1 \cdot X \quad \text{oder} \quad X = 1000 \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

$\frac{w_2}{w_1}$ kann durch das Verhältnis der Drahtlängen ersetzt werden.

Will man sehr kleine Widerstände messen, so ist der Vergleichswiderstand 1 Ohm schon zu groß. Deshalb wird dem Instrumente noch ein kleinerer Vergleichswiderstand beigegeben, der im Innern eines Stöpsels untergebracht ist. Dieser Widerstandsstöpsel wird in Loch 1 gesteckt, wodurch an die Stelle des Widerstandes 1 Ohm der Widerstand 0,1 Ohm tritt. Die Löcher 9, 90, 900 müssen natürlich ebenfalls gestöpselt werden.

Je größer die elektromotorische Kraft der Meßbatterie ist, um so genauer wird die Messung, um so größer ist aber auch die Gefahr, daß die Widerstände des Instrumentes zu stark erhitzt werden. 2—4 Volt dürften für die meisten Messungen genügen.

Die Isolationsmessung mittels des Universalgalvanometers soll später besprochen werden (s. S. 311). Vorher wollen wir noch einige einfache Methoden der

Widerstandsmessung

beschreiben.

Mittels Spannungs- und Strommessers.

a) Man verbindet die Pole einer Stromquelle (Akkumulator oder Akkumulatorenbatterie) mit dem Voltmeter, schaltet die Batterie, den Widerstand X und ein geeignetes Amperemeter unter Benutzung von Drähten, deren Widerstand man vernachlässigen kann, hintereinander. Ist e die gemessene Klemmspannung und J die Stromstärke, so ist

$$X = \frac{e}{J}.$$

Ist X so klein, daß J zu groß wird, so nimmt man einen zweiten Widerstand zu Hilfe, den man eventuell nach der eben beschriebenen Methode bestimmt, und schaltet diesen mit X hintereinander. Zu beachten ist, daß sich jeder Leiter bei Stromdurchgang erwärmt. Man wählt daher eine solche Stromdichte (s. S. 26), daß keine merkliche Temperaturerhöhung eintritt oder kühlt X während der Messung in Alkohol.

Wegen der Übergangswiderstände in den Klemmen kann die Messung nach der vorigen Methode eine zu ungenaue werden.

b) Man schaltet den Widerstand X mit einem Rheostat und einem Präzisionsamperemeter bezw. Milliampereometer hintereinander und verbindet die Endpunkte von X mit einem Präzisionsvoltmeter. Man findet so den Spannungsverlust e in X und die Stromstärke J . Da $X \cdot J = e$, so kann man X berechnen. Ist der durch den Spannungsmesser fließende Strom nicht so klein, daß man ihn vernachlässigen darf, so hat man ihn in Abzug zu bringen; man findet diesen Strom leicht, wenn man den Widerstand w des Voltmeters kennt oder wenn man das Voltmeter ausschaltet und den neuen Strom J' von J abzieht. Im letzten Falle muß man sich bei sehr genauen Messungen vergewissern, ob die Spannung an den Enden von X bei dem Strome J' nicht merklich verschieden ist von e .

Beispiel: $J = 1$ Amp., $w = 100$ Ohm, $e = 10$ Volt.

$$\text{Voltmeterstrom} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ Amp.}$$

$$X = \frac{10}{0,9} = 11\frac{1}{9} \text{ Ohm.}$$

c) Mittels der Wheatstoneschen Brückenmethode (s. S. 29 und 264).

d) Große Widerstände kann man mit Hilfe eines Voltmeters messen, wenn dessen Widerstand w bekannt ist. Man mißt zu dem Zwecke die elektromotorische Kraft einer genügend starken Batterie, diese betrage e Volt. Schaltet man jetzt in den Stromkreis noch den Widerstand X ein, so liest man eine geringere Anzahl Volt ab; diese sei e' ; der jetzt durch das Voltmeter fließende Strom

$$i = \frac{e'}{w},$$

da man den inneren Widerstand der Batterie vernachlässigen kann.

Da dieser Strom bei der elektromotorischen Kraft e Volt durch den Widerstand $w + X$ getrieben wird, so ist auch

$$i = \frac{e}{w + X}; \text{ daher } \frac{e'}{w} = \frac{e}{w + X}$$

$$X = \frac{w(e - e')}{e'}$$

Diese Methode liefert besonders dann zufriedenstellende Resultate, wenn das Voltmeter bei einem großen inneren Widerstande sehr empfindlich ist.

Frequenzmesser dienen, wie aus dem Namen hervorgeht, dazu, die Periodenzahl bezw. die Polwechselzahl — daher auch die Drehungsgeschwindigkeit einer Wechsel- bezw. Drehstrommaschine — an einer beliebigen Stelle des Netzes zu messen bezw. zu bestimmen. Sie beruhen auf folgendem Prinzip. Wenn man eine an einem Ende fest eingeklemmte Stahlzunge anschlägt, so führt sie Schwingungen aus, und es entsteht ein Ton. Die Schwingungen, die die Stahlzunge, sich selbst überlassen, ausführt, nennt man Eigenschwingungen; diesen möge die Schwingungszahl n entsprechen. Bringt man in die Nähe des freien Endes der Stahlzunge einen durch Wechselstrom gespeisten Elektromagnet, so macht die Zunge, da sie abwechselnd angezogen und abgestoßen wird, Schwingungen (erzwungene Schwingungen), deren Zahl gleich der Frequenz n des Wechselstromes ist. Ist $n = n'$, so besteht vollkommene Resonanz und die Schwingungen der Zunge sind kräftiger, als wenn n von n' verschieden wäre. Die Form der Stromkurve übt keinen Einfluß aus, so daß also Wechselstrom jeder Gestalt als Erregerstrom benutzt werden kann. Die Resonanzfrequenzmesser der Firma Hartmann & Braun enthalten je nach ihrem Verwendungszwecke eine größere oder kleinere Anzahl abgestimmter, skalenartig angeordneter Stahlzungenfedern. Unter der pulsierenden Kraftwirkung eines lamellierten Magnets, der durch den Wechselstrom erregt wird, gerät nur diejenige Zunge in Resonanz

schwingungen, deren Eigenschwingungszahl mit der Frequenz des Erregerstromes übereinstimmt. Die Apparate lassen sich in solche einteilen, die die Resonanzstelle nur optisch, d. h. durch die starken Schwingungen der Zungenfedern anzeigen (elektro-optische Resonanzapparate) und in solche, bei denen mit der Resonanzschwingung zugleich ein starkes Tönen verbunden ist (elektro-akustische Apparate).

Schließlich erwähnen wir noch die Registrierapparate für Stromstärke, Spannung oder Energie. Sie bestehen aus einem Präzisionsmeßinstrumente und einer (meistens) elektrisch betriebenen Registriervorrichtung, die in bestimmten Intervallen (etwa alle 4 Sekunden) die Zeigerstellung auf einen Papierstreifen aufzeichnet. Der einem Tage entsprechende Papierstreifen rotiert entweder mit einer Trommel, oder er rollt sich langsam ab. Bei nicht zu hoher Spannung geschieht der Antrieb der Registriervorrichtung bei Gleichstromanlagen durch den Leitungsstrom selbst, vorausgesetzt, daß die Spannung nicht stark schwankt, andernfalls durch zwei kleine Batterien aus Trockenelementen, die abwechselnd Strom abgeben, damit sich die beanspruchten Elemente während der Ruhepause erholen können.

Zehntes Kapitel.

Das Leitungsnetz und Verteilungssysteme.

1. Leitungen.

Die in der Centrale erzeugte elektrische Energie wird durch die Leitungen den Lampen, Motoren und sonstigen Verbrauchsapparaten zugeführt. Außer den Verlusten durch Stromwärme, die man durch Verringerung des Leitungswiderstandes möglichst einzuschränken sucht, kommen noch Verluste in Betracht, die dadurch entstehen, daß die Elektrizität aus den Drähten in die Erde und, ohne nutzbare Arbeit zu leisten, aus einer positiven Leitung in eine benachbarte negative fließt. Diese letzteren Verluste werden durch sorgfältige Isolation der Leitungen gegen Erde und gegeneinander auf ein Minimum beschränkt. Im Interesse der Betriebssicherheit müssen ferner die Drähte oder Kabel gegen beabsichtigte oder unbeabsichtigte Beschädigungen möglichst geschützt sein; es muß nach Möglichkeit verhütet werden, daß Wind und Wetter, sowie atmosphärische Entladungen den Leitungen Schaden zufügen können; schließlich muß eine Berührung zweier Leitungen verschiedener Polarität ausgeschlossen sein.

Freileitungen. Da die Luft ein ausgezeichnete Isolator ist, so kann man bei oberirdischen Leitungen blanke Drähte spannen. Die Isolation beschränkt sich in diesem Falle auf die Stützpunkte. Als Material findet wegen seines guten Leitungsvermögens fast immer Kupfer Verwendung, seltener — wenigstens in Deutschland — das Aluminium. Der spezifische Widerstand des Aluminiums ist $1\frac{1}{2}$ —2mal so groß wie derjenige des Kupfers; dagegen beträgt

das spezifische Gewicht des Aluminiums (2,7) etwa ein Drittel desjenigen des Kupfers (8,9). Eine einfache Berechnung ergibt, daß eine Leitung aus Aluminium gerade so teuer ist wie eine Leitung aus Kupfer, wenn der Preis für 2 kg Kupfer derselbe ist wie derjenige für 1 kg Aluminium. Wenn sich das Aluminium als Ersatz für Kupfer bei uns keinen Eingang zu verschaffen gewußt hat, so werden die Gründe hierfür sein die Schwierigkeiten, die die Herstellung einer guten und dauernden Verbindung zwischen zwei Drahtenden verursacht, die leichte Verletzbarkeit des Drahtes und die Dehnung, wenn er zu stark gespannt wird. Ferner hat sich durch Versuche ergeben, daß das Aluminium im Laufe der Zeit korrodiert; dadurch wird der Querschnitt vermindert und die mechanische Festigkeit in Frage gestellt (s. G.-Z. J. 1901, S. 101).

Wenn die Leitung einen größeren Querschnitt als etwa 50 mm² haben muß, so benutzt man sogenannte Litzleiter (Kabel, Drahtseile), obschon sie etwas teurer sind als einfache Kupferdrähte. Drähte von größerem Querschnitte verursachen nämlich bei der Montage Schwierigkeiten. Ein Litzleiter besteht aus einer größeren Anzahl von dünnen Drähten, die zu einem Seile vereinigt werden (verseiltes Kabel). Der mittelfste, die Achse des Kabels bildende Draht heißt die Seele; die auf die Seele folgende Schicht ist torbiert, etwa von links nach rechts, die darauffolgende im entgegengesetzten Sinne. Wegen der größeren Oberfläche kann man Litzleiter stärker belasten.

An den Stützpunkten werden die Drähte an isolierenden Körpern befestigt, an den sogenannten Isolierringen. Als Material für die Isolatoren wählt man meistens Porzellan, da dieses dem Durchgange des Stromes einen sehr großen Widerstand entgegensezt. Den Widerstand, den der Isolator einer quer durch das Material gehenden Entladung entgegensezt, nennt man die Durchschlagsfestigkeit. Diese hängt von der chemischen Beschaffenheit des Rohmaterials und von der Art, wie es gebrannt ist, ferner von der Beschaffenheit der Glasur ab. Für die Form des Isolators ist der Umstand maßgebend, daß die Oberflächenisolation möglichst groß ist, und das ist der Fall, wenn die Isolierringe so geformt ist, daß größere Teile der Oberfläche trocken bleiben. Die trockenen Teile setzen der gleichsam über die Oberfläche kriechenden Elektrizität einen großen Widerstand entgegen. Man griff zur Glockenform, weil deren Innenseite ziemlich trocken bleibt. Später fand große Verbreitung der in Fig. 131 schematisch dargestellte Isolator, die Doppelglocke. Für hochgespannte Ströme (3000 Volt und mehr) genügte diese Isolation noch nicht und man ging zu Ölisolatoren über. Bei den ältesten Ölisolatoren ist der Rand einer einfachen Glocke nach innen

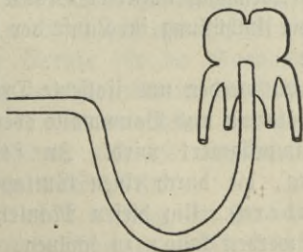


Fig. 131.

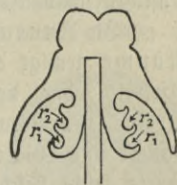


Fig. 132.

umgebogen, so daß ein Ringkanal r (Fig. 132) entsteht, der mit Öl, einem ausgezeichneten Isolator, angefüllt wird. Bei der berühmten Kraftübertragung Lauffen—Frankfurt benutzte man Ölisolatoren mit drei übereinanderliegenden, für die Aufnahme des Öles bestimmten Rinnen r (s. Fig. 132). Es scheint jedoch, als ob sich die Ölisolatoren nicht in dem Maße bewährt haben, wie man erwartet hatte. Meistens verwendet man jetzt als Hochstromisolatoren dreifache Glocken (Fig. 133); sie werden aus Hartfeuerporzellan hergestellt. Das Porzellan muß vollständig glasiert sein, da es sonst schon bei Spannungen von etwa 17 000 Volt durchgeschlagen wird. Bezüglich der Dimensionen gilt der Grundsatz: je höher die Spannung, um so größer der Isolator. (Vergrößerung der Oberflächenisolation.)

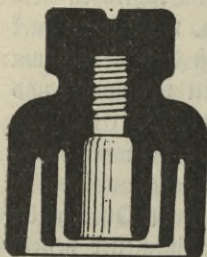


Fig. 133.

Kreuzungen und Annäherungen zwischen bereits vorhandenen Telegraphen- oder Telephonleitungen — Schwachstromleitungen — und einer zu verlegenden Starkstromleitung lassen sich häufig nicht umgehen. Wegen der Induktionswirkungen soll ein Parallellaufen der beiden Leitungen möglichst vermieden werden; außerdem sind Vorkehrungen zu treffen, daß beim Zerreißen eines Drahtes oder beim Umfallen einer Stange eine metallische Berührung der beiden Leitungen möglichst ausgeschlossen ist. Die Reichstelegraphenverwaltung verlangt, daß Kreuzungen unter einem rechten Winkel erfolgen sollen; „der Abstand der beiderseitigen Leitungen soll in vertikaler Richtung nicht weniger als 1 m und bei seitlicher Annäherung nicht weniger als $1\frac{1}{4}$ m betragen“¹⁾. Wo Berührungen vorkommen können, soll eine der beiden Leitungen mit einer gut isolierenden Hülle versehen werden, oder es ist ein Netz stromfreier Schutzdrähte, ein sogenanntes Fangnetz, vorzusehen, das geerdet werden muß. Die Verwendung isolierten Drahtes ist nur dann als ausreichender Schutz anzusehen, wenn die Leitungsspannung 1000 Volt nicht übersteigt. Die Isolation muß so stark sein, daß sie bei der doppelten Betriebsspannung nicht durchgeschlagen wird. Die Verwendung isolierter Drähte als Freileitungen kann nicht empfohlen werden, da die Umhüllung im Laufe der Zeit infolge der Witterungseinflüsse schadhast wird.

In Innenräumen werden nur isolierte Drähte verlegt. Für trockene Räume genügt eine Isolation aus Baumwolle oder Leinenzwirn, die mit Teer, Asphalt oder dergl. imprägniert wird. In feuchten Räumen kommen Drähte zur Verwendung, die durch einen Guttapercha- oder Kautschukmantel isoliert sind (Gummiadern). Um diesen Mantel, der wegen seiner geringen Härte leicht beschädigt werden kann, zu schützen, umgibt man ihn mit einer oder mehreren Hüllen aus Baumwolle oder Jute; die äußerste Hülle wird, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhüten, imprägniert.

Wlekabel. Statt der blanken Freileitungen verwendet man bei elektrischen Anlagen im Interesse der größeren Betriebssicherheit, manchmal auch aus

¹⁾ Handbuch der Elektrotechnik. XII. Bd. S. 679.

ästhetischen Rücksichten und um Unglücksfälle, die bei Berührung von blanken oberirdischen Leitungen vorkommen, zu verhüten, isolierte Kabel, die in die Erde verfenkt werden.

In der Mitte des Kabels befindet sich die Leitung aus elektrolytischem Kupfer; sie besteht je nach dem erforderlichen Querschnitt aus einem oder mehreren Drähten. Wenn zu befürchten ist, daß die auf das Kupfer folgende Isolierhülle das Metall chemisch angreift, so wird der Leiter verzinkt. Den Leiter umgibt die Isolierhülle, deren Dicke sich nach der Spannung des Stromes richtet. Als isolierende Massen finden Verwendung: Zute, eine aus Ostindien stammende Bastfaser, auch Hanf und Baumwolle, Gummi, Guttapercha und Papier. Die Zute, die am meisten benutzt wird, wird, nachdem sie auf die Kabelseele gebracht worden ist, in Vakuumtrockenschränken von jeder Feuchtigkeit befreit und darauf in großen Kesseln mit isolierender Masse getränkt. Die Tränkung der Zute hat den Zweck, die Poren der Umspinnung zu schließen, wodurch das Wiedereindringen von Feuchtigkeit verhütet wird, und die Durchschlagsfestigkeit des Kabels zu erhöhen. Wenn das Isoliermaterial nicht absolut wasserdicht ist, wie Gummi und Guttapercha, preßt man über das Kabel einen Bleimantel. Nachdem das Kabel den Bleimantel erhalten hat, wird es auf Leitungsfähigkeit und Isolation geprüft. Der Bleimantel wird, falls chemischer Angriff nach der Verlegung zu befürchten ist, durch imprägnierte Papier- oder Zuteschichten, auch durch Gummi- oder Guttaperchaüberzug geschützt. Zum Schutze gegen Beschädigungen beim Transporte, bei und nach der Verlegung und bei Straßenarbeiten (Rickenhiebe, Spatenstiche, Bodensenkungen u. dergl.) gibt man dem Bleimantel eine Panzerung, bestehend aus spiralig um das Kabel gewundenem Eisenband. Ein solches Kabel heißt man eisenbandarmiertes Kabel. In manchen Fällen besteht die Armatur aus Eisen- oder Stahldrähten. Auf die Armatur wird, um sie gegen schädliche Einflüsse des Erdreiches oder des Wassers, in welches das Kabel verlegt wird, zu schützen, eine mehrfache Bespinnung mit Faserstoff gebracht und mit Isoliermasse (Asphalt) getränkt. Nachdem das Kabel schließlich, um das Kleben zu verhindern, durch ein Bad von Kalkmilch gezogen worden ist, wird es auf eine große Holztrommel gewickelt.

Als höchst zulässige Grenze für die Spannung gibt man für Kabel 20—30 000 Volt an; es wachsen nämlich die Kosten für die Isolation mit der Spannung rapide an; außerdem nehmen bei hohen Spannungen die Ladungsströme und die Kabelverluste einen beträchtlichen Wert an (s. S. 273).

Wenn ein Kabel nur eine Leitung, die Hin- oder Rückleitung enthält, so nennt man es Einfachkabel (s. Fig. 134). Mehrfachkabel (Zweifach- oder Dreifachkabel) werden entweder als verfeilte Kabel angefertigt oder man ordnet die Leiter konzentrisch an. Ein verfeiltes Zweifachkabel enthält also eine verfeilte Hin- und eine verfeilte Rückleitung (s. Fig. 136). Bei Wechselstromanlagen verwendet man, um die Fernwirkung (Induktion) in fremden Leitern zu vermeiden, fast

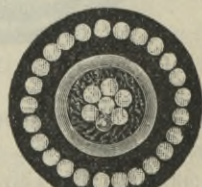


Fig. 134.

nur Zweifach- bzw. Dreifachkabel an; es heben sich dann die Induktionswirkungen fast ganz auf.

Bei großer Ausdehnung des Kabelnetzes gehen von der Zentrale, um den Spannungsverlust innerhalb gewisser Grenzen zu halten, Hauptleitungen nach Verteilungspunkten (s. später). Um die Spannungen an den Verteilungspunkten in der Zentrale messen zu können, benutzt man besondere Leitungen, die entweder in das Kabel eingebettet oder bei Hochspannungsanlagen als besondere Kabel ausgebildet werden. Im ersten Falle genügt eine dünne Isolierhülle für die Prüfleitungen, da bei richtiger Verbindung nur geringe Spannungen zwischen Prüf- und Hauptleitung auftreten.

Die in den Fig. 135—138 abgebildeten Kabelquerschnitte sollen dazu dienen, die vorhergehenden Darlegungen zu erläutern. Fig. 134 bezieht sich

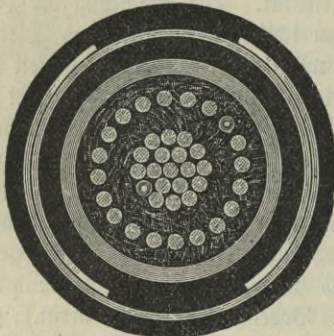


Fig. 135.

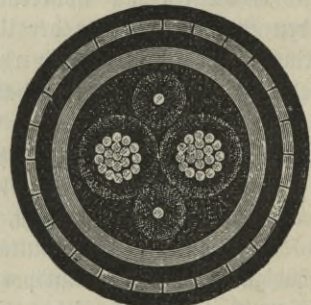


Fig. 136.

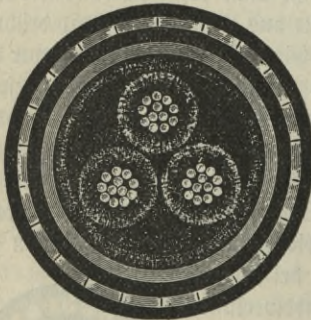


Fig. 137.

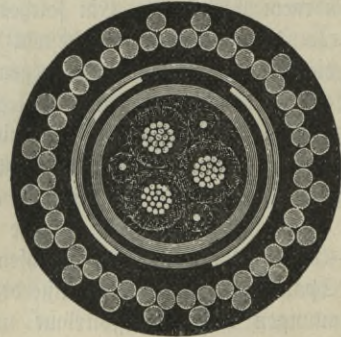


Fig. 138.

auf ein Einfachkabel für 700 Volt mit Prüfdraht, Bleimantel und Eisen-
drahtarmatur, die durch eine imprägnierte, asphaltierte Zuteumspinnung ge-
schützt ist, Fig. 135 auf ein einfach konzentrisches Kabel mit zwei Prüfdrähten,
Bleimantel und Eisenbandarmatur. Fig. 136 stellt den Schnitt durch ein
zweifach verdrilltes Kabel für 3000 Volt mit Prüfdrähten dar. Der Blei-
mantel ist durch eine zwischen 2 neutralen Kompositionsschichten liegende Papier-
umspinnung, eine säurefrei imprägnierte Zuteumspinnung und eine Armatur aus

verzinkten Eisendrähten geschützt. Die Armatur ist mit einer imprägnierten, asphaltierten Juteumspinnung umgeben. Das Kabel eignet sich als Schachtkabel und für Verlegung in Wasserläufe mit geringem Schiffsverkehr. Einen Schnitt durch ein dreifach verseiltes Kabel ohne Prüfdrähte mit Eisendrahtarmatur zeigt Fig. 137. Endlich ist in Fig. 138 ein Schnitt durch ein dreifach verseiltes Flußkabel für 3×3000 Volt mit Prüfdrähten und schwerer Armatur abgebildet. Der Bleimantel wird durch eine doppelte Eisenbandspirale und eine Armatur aus verzinkten Eisendrähten geschützt.

Plötzliche Spannungsänderungen können Kabeln, die einem ausgedehnten Netze angehören, besonders bei konzentrischen Kabeln dem Außenleiter gefährlich werden. Dies gilt besonders, wenn die Leitung bei voller Spannung unter Strom gesetzt oder plötzlich abgeschaltet wird. Im letzteren Falle sind die Spannungserhöhungen wahrscheinlich auf elektrische Schwingungen zurückzuführen, die infolge der Lichtbogenbildung entstehen. Die Spannungserhöhung kann einen Betrag erreichen, der in Volt gemessen 200mal so groß ist wie der Wert der unterbrochenen Stromstärke in Ampere¹⁾. Da in einem Kabel auch dann Elektrizität in Bewegung ist (Ladungs- und Entladungsströme), wenn es keinen Strom an Lampen zc. abgibt, so können Spannungserhöhungen auch dann eintreten, wenn das unbelastete Kabel vom Netze abgeschaltet wird. Auch beim Einschalten von unbelasteten langen Fernleitungen hat man Spannungserhöhungen beobachtet. Um solche Spannungserhöhungen zu vermeiden, gibt es verschiedene Vorrichtungen, die dazu dienen, das Kabel vor dem Einschalten zu laden bzw. vor dem Ausschalten zu entladen. (Näheres s. *G.-L. Z.* 1903, S. 777.)

Bei konzentrischen Kabeln empfiehlt es sich, beim Einschalten zuerst den Außenleiter, der mit dem Bleimantel bzw. der Armatur einen Kondensator größerer Kapazität bildet, unter Strom zu setzen und beim Ausschalten zuerst den Innenleiter abzuschalten.

Bei Hochspannungskabeln treten, von der Jouleschen Wärme abgesehen, auch wenn das Kabel keinen Strom abgibt, Arbeitsverluste²⁾ auf. Diese sind proportional dem Quadrate der Spannung und proportional der Länge. Die Frage, wodurch diese Arbeitsverluste verursacht werden, ist noch nicht ganz geklärt. Höchst wahrscheinlich ist ein Teil der Verluste auf die elektrische Hysterese (s. S. 70) zurückzuführen, auch spielt die selbst bei sorgfältigster Herstellung nicht ganz vollständige Isolation, die das Überspringen von ganz minimalen Strömen von einem Leiter zum anderen und von den Leitern zur Erde zur Folge hat, eine (allerdings untergeordnete) Rolle. Vielleicht kommt ein Teil der Verluste folgendermaßen zustande. Wenn man einen Kondensator (Leydener Flasche) entlädt, so bleibt auf den Belegungen eine kleine Elektrizitätsmenge zurück (Rückstand). Wird der Kondensator abwechselnd in der einen, dann in der

¹⁾ Siehe *G.-L. Z.* 1903, S. 777.

²⁾ Einen Aufsatz über diesen Gegenstand von Dr. Apt und G. Mauritius findet man in der *G.-L. Z.* 1903, S. 879.

anderen Richtung geladen, so werden die Rückstände der ersten Entladung durch die folgende Ladung neutralisiert. Die Neutralisation positiver bezw. negativer Elektrizität durch negative bezw. positive kommt aber einem Energieverbrauche gleich.

Bei ausgedehnten unterirdischen Kabelnetzen macht sich der Einfluß der Kapazität um so mehr geltend, je geringer die dem Netze entnommene Leistung ist. Wenn z. B. bei einer Drehstrom-Kraftübertragung das Kabel eine Länge von 50 km hat und jeder der drei Leiter einen Querschnitt von 100 mm^2 besitzt, so ist bei 10 000 Volt Spannung am Generator und der Periodenzahl 50 der Ladestrom 25 Amp.¹⁾ Dieser Strom hat 90° Voreilung, kann also einen auf Selbstinduktion (in Motoren u. dergl.) zurückzuführenden nachteilenden (wattlosen) Strom zum Teil oder ganz kompensieren, und es kann dann die Kapazität des Kabels einen günstigen Einfluß ausüben. Je geringer die Belastung ist, um so ungünstiger ist der Einfluß der Kapazität. Der Ladestrom verursacht nicht nur Verluste durch Joulesche Wärme, sondern er bewirkt auch eine Änderung des Übersetzungsverhältnisses der Transformatoren und er wirkt auf den Generator zurück (s. S. 184). Zu erwähnen ist noch, daß der Kapazitätsstrom seiner Größe nach von der Kurvenform des Stromes abhängig ist, weil hier nicht die effektive Spannung, sondern die maximale maßgebend ist. Bei spitzer Kurvenform ist aber das Verhältnis zwischen der maximalen und effektiven Spannung größer als bei flacher Kurvenform.

Das System, das Pupin ausgearbeitet hat, bei Telephonleitungen den störenden Einfluß der Kapazität der Leitungen durch eingeschaltete Selbstinduktionspulen zu beseitigen, hat Mordey für Kraftübertragungsanlagen in Vorschlag gebracht (Parallelschaltung von Drosselpulen zu den 3 Leitern des Kabels)²⁾.

In bezug auf die Isolation der Kabel stellt man die Anforderung, daß sie per Kilometer 500—1000 Megohm ($1 \text{ Megohm} = 10^6 \Omega$) betrage. Beträgt z. B. die Spannung 2000 Volt, so fließt bei einem Isolationswiderstande von 500 Megohm auf einer Strecke von 1 km von dem einen Leiter zum anderen ein Strom von $\frac{2000}{500 \cdot 10^6} = \frac{4}{10^6}$ Ampere. Der Isolationswiderstand hängt in hohem Maße von der Zeit der Elektrifizierung ab, und zwar wird ihr Wert um so höher, je länger man die Netzspannung auf das Kabel einwirken läßt. Daher ist man übereingekommen, den Isolationswiderstand, gemessen nach 1 Minute, als den normalen anzusehen.

Was die Anordnung der Leitungen und die Berechnung der Querschnitte der verschiedenen Teile eines ausgedehnten Netzes anbelangt, so beschränken wir uns hier hauptsächlich darauf, die Fachausdrücke und den Zweck der verschiedenen Leitungen zu erklären. Bei ausgedehnteren Zentralen ist zu unter-

¹⁾ E.-L. 3. 1901, S. 147.

²⁾ E.-L. 3. 1901, S. 102.

scheiden zwischen den Hauptleitungen oder Speiseleitungen, den Verteilungsleitungen und den Prüfleitungen; ferner sind die Ausgleichsleitungen bzw. Ringleitungen zu erwähnen. Welchem Zwecke diese einzelnen Leitungen dienen, ergibt sich, wenn wir zunächst das einfachste Verteilungssystem besprechen, nämlich

2. Das Zweileitersystem.

Der in der Dynamomaschine erzeugte Strom wird den Sammelschienen zugeführt. Dort beginnt die Hauptstromverteilung, indem, wenigstens in den Fällen, wo die Zentrale innerhalb oder dicht an der Grenze des mit elektrischer Energie zu versorgenden Gebietes liegt, nach verschiedenen Richtungen Leitungen gelegt werden. Diese Leitungen, die man Speise- oder Hauptleitungen nennt, geben unterwegs keinen Strom ab, erst an den Speisepunkten erfolgt die weitere Verteilung. Jeden Speisepunkt kann man als eine neue kleinere Zentrale ansehen, der ein bestimmter Bezirk zugewiesen ist, den er mit elektrischer Energie zu versorgen hat. Man kann z. B. die Enden der Speiseleitungen an Kupferringen befestigen, von denen neue Leitungen nach verschiedenen Richtungen gehen. Diejenigen Leitungen, die, von den Speisepunkten ausgehend, den Strom den verschiedensten Bezirken zuführen, nennt man Verteilungsleitungen (s. Fig. 139, S. 278).

Auf die Frage, welchen Spannungsverlust man in den Hauptleitungen einerseits, in den Verteilungsleitungen andererseits zuläßt, wird in dem Kapitel Projektierung näher eingegangen.

Wenn man den Spannungsverlust so berechnet, daß die jährlichen Auslagen für die Verzinsung und Amortisation des Anlagekapitals für die Leitung inkl. Kosten für den Energieverlust in der Leitung ein Minimum werden, so erhält man den wirtschaftlichen Spannungsverlust; den zugehörigen Querschnitt nennt man den wirtschaftlichen oder den wirtschaftlich günstigsten Querschnitt der Leitung.

Nach einer von Thomson abgeleiteten Formel ist

$$q = 10J \sqrt{\frac{T \cdot \rho \cdot m}{B \cdot p}}$$

Hier ist T die Zeit in Stunden, während deren der konstante Strom J fließt, ρ der spezifische Widerstand des Leitungsmaterials, m = Kosten, die die Erzeugung einer Wattstunde im ganzen verursacht, B der Preis für die Volumeneinheit des Leitungsmaterials, p der Prozentsatz für Verzinsung, Amortisation und Instandhaltung der Leitungsanlage. Einen längeren Aufsatz über die Thomsonsche Regel hat Professor Reichmüller in der *E.-L. Z.* veröffentlicht (1902, S. 190), dem wir folgendes entnehmen: Veringer macht darauf aufmerksam, daß die Thomsonsche Regel nur gilt, wenn die Spannung am Stromempfänger gegeben sei, daß dagegen eine andere Formel anzuwenden sei, wenn die Spannung an der Erzeugerstelle bestimmt ist. Hohenegg führte für T die Zeit ein, die ein bestimmter, etwa der maximal mögliche Strom J fließen müßte, um den vollen Arbeitsverlust zu liefern. Ferner setzte er die Leitungskosten gleich einer linearen Funktion des Querschnittes q ($a + bq$ pro 1 km Leitung).

Indem Reichmüller von der Annahme ausgeht, daß der Effekt an der Verbrauchsstelle gegeben sei, und indem er die Kosten für die Übertragung des Effektes zerlegt in:

1. die Kosten, die die Erzeugung des Energieverlustes verursacht — Kohlen, Bedienung, Schmiermaterial zc.,
2. Kosten für die Verzinsung, Amortisation und Instandhaltung der Leitung,
3. Kosten für die Primärstation (m_0),

gelangt er zu der folgenden Beziehung:

$$\text{Der wirtschaftlich günstigste Effektverlust} = J \cdot L \cdot \rho \frac{z_1}{z_b}, \text{ wo } z_1 = \sqrt{\frac{b \cdot p_1}{\rho}} \text{ und } z_b = \sqrt{m_0 \cdot p_0 + T \cdot m_b}.$$

a , b , J , L und ρ haben hier die schon angegebene Bedeutung, T ist die Zeit im Höcheneggischen Sinne; m_b = reinen Betriebskosten einer Wattstunde in Mark, p_1 und p_0 endlich sind die Prozentzahlen, die für Verzinsung, Abschreibung und Instandhaltung der Leitung (p_1) oder der Erzeugerstation (p_0) anzusetzen sind, doch so, daß für $p_1 = 9\%$, $p_0 = 0,09$.

Endlich machen wir noch auf eine Arbeit von Rossander und Forsberg aufmerksam, in der der wirtschaftlich günstigste Querschnitt für den Fall, daß es sich um Wasserkräfte handelt, berechnet wird (s. Gl. A. 1901, Nr. 96).

Der projektierende Ingenieur berechnet aber wohl meistens die Leitungen nach einem anderen Gesichtspunkte, vorausgesetzt, daß ihm bei der Wahl des Stromsystems und der Spannung die Hände nicht gebunden sind. Man kann ja einen gegebenen Effekt, sagen wir 1 Kilowatt, übertragen bei 100 Volt Spannung und 10 Amp. oder bei 200 Volt und 5 Amp. u. s. f. Der Ingenieur paßt nun die Spannung der Entfernung an, d. h. er wählt die Spannung so hoch, daß der Energieverlust bei einem gewissen Querschnitte der Leitung einen bestimmten Prozentsatz nicht übersteigt. Auf diese Weise kann zunächst eine untere Grenze für die Spannung ermittelt werden. Für die obere Grenze kommt eine ganze Reihe von Momenten in Betracht: Die Stromart, die Größe der Anlage, die spätere Regelung des Betriebes, die Gefahren, die hochgespannte Ströme im Gefolge haben, Isolation zc. Man wird im allgemeinen nur notgedrungen mit der Spannung in die Höhe gehen. Zur Erläuterung möge folgendes Beispiel dienen. Es sollen 500 Kilowatt, die in einem Orte A erzeugt werden, nach einem 10 km entfernten Orte B übertragen werden; in der Leitung werde ein Energieverlust von 15% zugelassen. Wenn nicht ganz besondere Gründe für eine Kraftübertragung durch Gleichstrom vorliegen, so kommt wegen der großen Entfernung, der eine hohe Spannung entsprechen muß, nur Wechselstrom in Frage. Der Einfachheit halber wollen wir annehmen, daß man sich für Einphasenstrom entscheiden kann. Ehe man mit der Kalkulation beginnt, muß man wissen, welchen Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) man der Berechnung zugrunde zu legen hat. Denn es ist zu berücksichtigen, daß nicht nur die Wattkomponente an der Wärmeerzeugung in der Leitung beteiligt ist, sondern auch der wattlose Strom. Wir wollen annehmen, daß $\cos \varphi = 0,8$. Wählen wir zunächst eine Spannung von 5000 Volt, in der Zentrale gemessen. Bei 5000 Volt ist der Strom gleich $\frac{500\,000}{5000 \cdot 0,8} = 125$ Amp. Der

Spannungsverlust darf betragen 15 % von 5000 Volt, also 750 Volt. Mithin $750 = w \cdot 125$; $w = 6$ Ohm. Man findet leicht, daß der Querschnitt der Leitung 56 qmm betragen muß. Jetzt fragt es sich, ob der ermittelte Querschnitt bei 125 Amp. als feuer sicherer Querschnitt angesehen werden kann, d. h. ob bei der vorhandenen Stromstärke die Temperaturerhöhung des Leiters nicht zu hoch wird. Wir wollen annehmen, daß der gefundene Querschnitt nicht der angegebenen Bedingung entspricht. Es bleibt dann nichts anderes übrig, als zu einer höheren Zentralspannung oder einer Verminderung der Verluste auf Kosten des Leitungsquerschnittes überzugehen. Es ist aber jetzt nicht nötig, die ganze Berechnung zu wiederholen. Denn man kann folgenden Satz anwenden: Bei gegebener Entfernung und gegebenem Effekte nehmen die Querschnitte mit dem Quadrate der Spannung ab, vorausgesetzt, daß der Spannungsverlust in Prozenten bei verschiedenen Spannungen derselbe ist. Wir wollen diesen Satz für einen speziellen Fall nachweisen. Es betrage der Effekt in der Zentrale 66 KW, die Entfernung 300 m und der Spannungsverlust 10%. Bei 110 Volt ist J_1

$$= \frac{66000}{110} = 600 \text{ Amp.}; \text{ Spannungsverlust} = 11 \text{ Volt} = w \cdot 600, w = \frac{11}{600}.$$

$$\frac{11}{600} = \frac{2 \times 300}{q_1 \rho} = \frac{600}{q_1 \rho}, \text{ wo } \rho \text{ der spezifische Widerstand des}$$

$$\text{Leitungsmaterials ist. } q_1 = \frac{600^2}{11 \cdot \rho}.$$

$$\text{Bei 220 Volt ist } J_2 = 300 \text{ Amp. und } q_2 = \frac{600 \cdot 300}{22 \cdot \rho} = \frac{300^2}{11 \rho} \\ = \frac{1}{4} q_1 \text{ usw.}$$

Bei der Berechnung der Leitungen ist noch eine wichtige Anforderung, die man an die meisten elektrischen Zentralanlagen stellt, zu beachten. Die Anlage muß gegen Strom- und Spannungsschwankungen, verursacht durch das Ein- oder Ausschalten von Lampen und Motoren, möglichst unempfindlich sein, sie muß die Eigenschaft der Lösbarkeit haben. An und für sich ist die Lösbarkeit bei der reinen Hintereinanderschaltung gleich Null. Wenn aber dafür gesorgt wird, daß für eine Bogenlampe, die erlischt oder ausgeschaltet wird — die reine Hintereinanderschaltung wird nämlich hauptsächlich bei Bogenlampenbeleuchtung angewendet — automatisch ein äquivalenter Widerstand eingeschaltet wird, so besitzt die Hintereinanderschaltung die Eigenschaft der Lösbarkeit in hohem Maße. Was die Lösbarkeit bei der Parallelschaltung anbelangt, so beschränken wir uns auf einen einfachen Fall. Es sei in Fig. 139 L_1, L_2 eine Speiseleitung, an dem Speisepunkte S mögen drei Verteilungsleitungen abzweigen; in jede derselben möge ein Strom von 30 Ampere fließen. Der Widerstand in den Drähten L_1 und L_2 betrage im ganzen $\frac{1}{10}$ Ohm, ebenso in $S_1 a + S_2 b$; der Einfachheit halber wollen wir den Widerstand in den Drähten $a c$ und $b d$ vernachlässigen. Die Stromstärken und Spannungen mögen in dem Momente, den wir zunächst ins Auge fassen, die in der Figur notierten Werte besitzen.

Wird jetzt der Stromverbraucher zwischen c und d ausgeschaltet, und bleibt die Spannung in der Zentrale konstant, so steigt die Spannung an dem Speisepunkte um $15 \cdot \frac{1}{10} = 1,5$ Volt, um denselben Betrag wächst die Spannung an den Stromverbrauchern in II und III. Dagegen steigt die Spannung

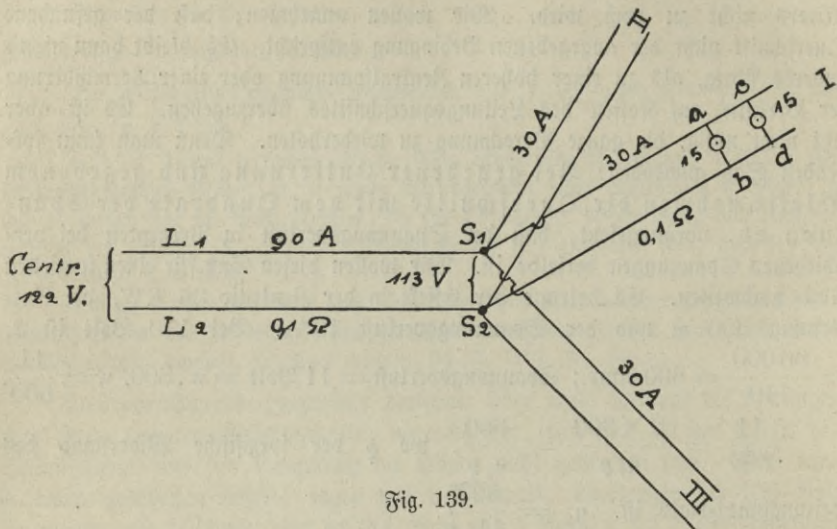


Fig. 139.

zwischen a und b um 3 Volt, da der Spannungsverlust in S_1, a und S_2, b noch um $\frac{1}{10} \cdot 15$ Volt abnimmt. Wenn die Spannung an den Speisepunkten nahezu konstant ist (s. Ringleitung), so bleiben nur noch die Variationen der Spannung in den Verteilungsleitungen mit wechselnder Belastung bestehen — in dem behandelten Falle noch 1,5 Volt. Durch Verringerung des Widerstandes in den Verteilungsleitungen wird offenbar die Lösbarkeit erhöht.

Bei ausgedehnten Anlagen verbindet man die einzelnen Speisepunkte durch eine besondere Leitung miteinander, die man als Ausgleichsleitung oder Ringleitung bezeichnet. Durch diese werden Spannungsunterschiede zwischen den verschiedenen Speisepunkten ausgeglichen. Die Ringleitung ist in unserer schematischen Fig. 140 mit R bezeichnet (P_1, P_2 sind Speisepunkte, K_1 und K_2 die Sammelschienen). Die Leitungen, die den einzelnen Lampen *z.* Strom zuführen, zweigen von der Ringleitung ab. Auch bei größeren Anlagen in Häusern wird eine Ringleitung verlegt, und zwar wird sie in der Regel in den Gängen untergebracht. Die Ringleitung gewährt noch den Vorteil, daß den Lampen von zwei Seiten Strom zugeführt wird. Infolgedessen brennen die Lampen auch dann, wenn die zugehörige Speiseleitung aus irgend einem Grunde stromlos ist.

Außer den genannten Leitungen werden noch Prüfdrähte verlegt. Diese stellen eine leitende Verbindung zwischen der Zentrale und den Speisepunkten her und dienen dazu, die Spannung an den Speisepunkten zu kontrollieren. Damit man mit ein und demselben Voltmeter die Spannung an

den verschiedenen Speisepunkten messen kann, bedient man sich eines Voltmeterumschalters. Hierbei ist zu beachten, daß die Angaben des Voltmeters ungenau sind, wenn der Widerstand in der Prüfleitung im Vergleich zu dem Widerstande des Voltmeters nicht klein ist. Beträgt der erstere Widerstand $p\%$ des letzteren, so zeigt das Voltmeter nahezu $p\%$ Spannung zu wenig an, denn soviel beträgt ungefähr der Spannungsverlust in den Prüfdrähten. Der Fehler kann dadurch verringert werden, daß bei der Eichung des Voltmeters der mittlere Widerstand in den Prüfdrähten berücksichtigt wird.

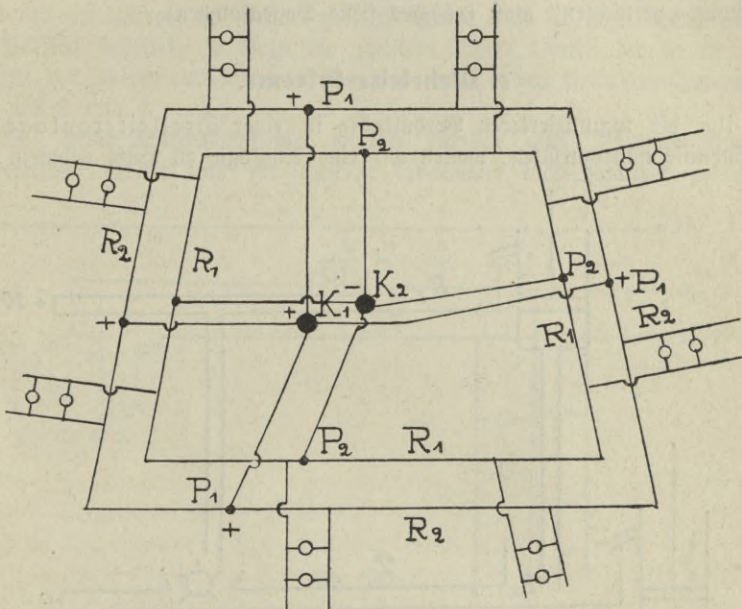


Fig. 140.

Wenn eine größere Anzahl von Speisepunkten vorhanden ist und auf Mittelspannung reguliert wird, so mißt man nicht die einzelnen Spannungen, sondern den Mittelwert sämtlicher Spannungen. Zu dem Zwecke verbindet man in der Zentrale alle Prüfdrähte mit zwei Sammelschienen, die positiven mit der einen, die negativen mit der anderen. Damit bei der Messung der Spannungsverlust in jeder Prüfleitung derselbe ist, schaltet man eventuell zwischen die Prüfdrähte und die Schienen Widerstände, die so groß gewählt sind, daß der Widerstand in jeder Prüfleitung + Zusatzwiderstand denselben Betrag hat. Das Voltmeter wird mit den Sammelschienen verbunden.

Die Betriebsspannung bei Zweileiteranlagen beträgt meistens 110 Volt. In den letzten 5 Jahren ist eine größere Anzahl von Zentralen nach dem Zweileitersystem mit 220 Volt Betriebsspannung ausgeführt worden mit Rücksicht auf die große Ausdehnung des mit Strom zu versorgenden Gebietes.

Dem Dreileitersystem mit 2×110 Volt Spannung gegenüber, von dem gleich die Rede sein wird, hat das genannte System die Vorzüge¹⁾, daß eine Leitung fortfällt, daß die Anlage billiger und — was in vielen Fällen sehr ins Gewicht fällt — der Betrieb einfacher und leichter zu überwachen ist. Diesen Vorzügen gegenüber tritt der etwas größere Stromverbrauch der 220-Volt-Lampen¹⁾ in den Hintergrund; ein anderer Nachteil besteht darin, daß den Konsumenten bei der Installation von Bogenlampen die Hände gebunden sind, insofern als man je vier Lampen hintereinander schalten oder, wenn man weniger als vier Lampen installiert, in einem Vorschaltwiderstande überschüssige Spannung „vernichten“ muß (näheres siehe Bogenlampen).

3. Mehrleitersysteme.

Um die komplizierteren Verhältnisse in einer Dreileiteranlage dem Verständnis näherzurücken, wollen wir eine Analogie zu Hilfe nehmen. In

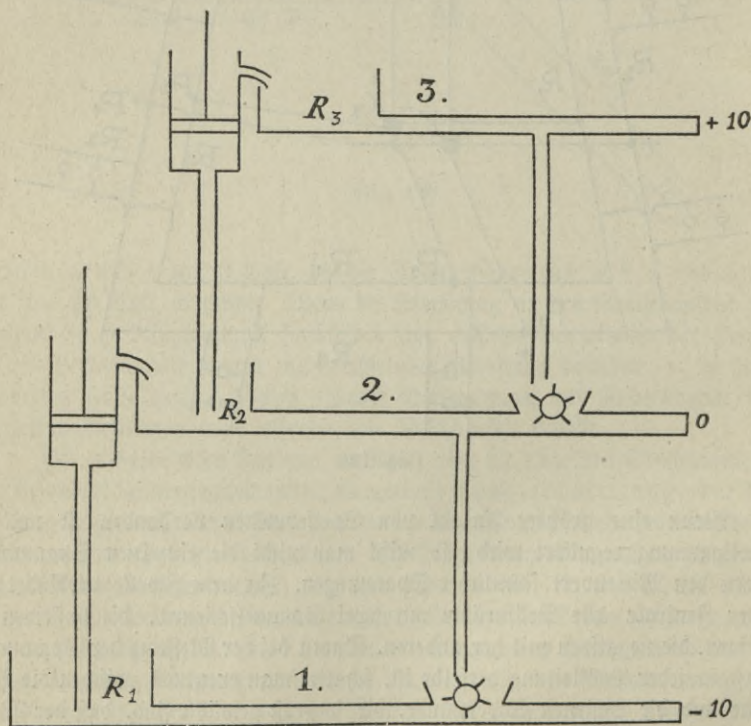


Fig. 141.

unserer schematischen Fig. 141 sind zwei Pumpen übereinander angeordnet, so daß Wasser aus R₁ nach R₂ und aus R₂ nach R₃ gehoben werden kann.

¹⁾ Siehe Gl. A. 1901, S. 1500. — G.-Z. 3. 1901, S. 594.

Wählen wir die mittlere Röhre als Ausgangspunkt für Höhenmessungen, so hat die Röhre 3 eine positive und Röhre 1 eine negative Höhe. Durch die gekennzeichnete Anordnung haben wir das Gefälle in zwei Hälften zerlegt. Verbinden wir die horizontalen Röhren durch vertikale, so kann das fallende Wasser in jeder Hälfte des Leitungssystems Arbeit verrichten. Fließt durch die untere vertikale Röhre dieselbe Wassermenge wie durch die obere, so fließt durch die mittlere Röhre kein Strom. Speist aber die untere Hälfte 2 Wasserräder und die obere nur 1, so muß die Röhre 2 aus dem mittleren Reservoir Wasser zuführen; wird umgekehrt die obere Hälfte stärker beansprucht als die untere, so fließt ein Wasserstrom nach R_2 hin. Sind immer beide Hälften belastet, so kann die mittlere Röhre, durch die ja nur die Differenz des oberen und unteren Stromes fließt, einen kleineren Querschnitt haben als 3 und 1.

Bei dem Dreileitersysteme werden vielfach zwei Dynamomaschinen von derselben Größe und für dieselbe Spannung hintereinander geschaltet

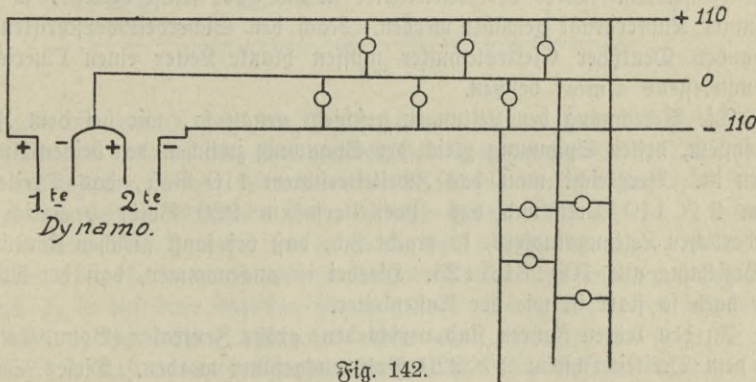


Fig. 142.

(Fig. 142). Die drei Leiter werden mit den freien Polen und der gemeinsamen Klemme verbunden. Die ersteren beiden Drähte werden Außenleiter genannt, den mittleren nennt man Mittelleiter oder Nullleiter.

Beträgt die Klemmspannung jeder Maschine 110 Volt und sehen wir von den Spannungsverlusten in den Leitungen ab, so besteht zwischen jedem Außenleiter und dem Mittelleiter eine Spannung von 110 Volt und zwischen den beiden Außenleitern eine Spannung von 220 Volt. Die Lampen werden gleichmäßig auf die beiden Nebhälften verteilt (s. Fig. 142). Sind beide Nebhälften gleich stark belastet, so ist der Mittelleiter stromlos. Man kann sich in diesem Falle die Lampen zu Paaren geordnet denken, so daß die Lampen je eines Paares hintereinander geschaltet und die einzelnen Paare parallel geschaltet sind. Sind die beiden Nebhälften ungleich belastet, so fließt durch den Mittelleiter entweder Strom nach den Maschinen hin oder von den Maschinen fort. Da bei richtiger Verteilung der Lampen die Differenz

zwischen der Anzahl der brennenden Lampen in der einen und in der anderen Hälfte nicht groß ist, so kann für den Mittelleiter ein kleinerer Querschnitt gewählt werden als für die Außenleiter. Gewöhnlich erhält der Mittelleiter die Hälfte des Querschnittes eines Außenleiters. Wird nach dem Zweileitersystem abgezweigt, werden also ein Außenleiter und der Mittelleiter weitergeführt, so muß natürlich der sich abzweigende Mittelleiter denselben Querschnitt haben wie der abgezweigte Außenleiter. Motoren schließt man meistens an die beiden Außenleiter an. Natürlich muß man dann Motoren wählen, die für die volle Betriebsspannung (220 Volt) gebaut sind.

Bei ungleicher Belastung der beiden Nebhälften sind die Spannungen verschieden. Nennen wir die Spannung der oberen Nebhälfte e_1 und der unteren e_2 und die Ströme in den beiden Außenleitern i_1 und i_2 , so ist der verbrauchte Effekt gleich $e_1 \cdot i_1 + e_2 \cdot i_2$.

Der blanke Mittelleiter wird geerdet, d. h. mit der Erde leitend verbunden. Infolgedessen können in dem Mittelleiter keine nennenswerten Spannungen auftreten. Wird der Mittelleiter in die Erde selbst verlegt, so muß verzinnter Kupferdraht gewählt werden. Nach den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker müssen blanke Leiter einen Querschnitt von mindestens 4 mm^2 besitzen.

Die Berechnung der Leitungen geschieht genau so, wie bei dem Zweileitersystem, dessen Spannung gleich der Spannung zwischen den beiden Außenleitern ist. Vergleicht man das Zweileitersystem 110 Volt, das Dreileitersystem 2×110 Volt und das Zweileitersystem 220 Volt, bezüglich des erforderlichen Leitungskupfers, so ergibt sich, daß bei sonst gleichen Umständen die Beziehung gilt $100 : 31,3 : 25$. Hierbei ist angenommen, daß der Mittelleiter halb so stark ist wie der Außenleiter.

In den letzten Jahren sind verschiedene große Zentralen (Bonn, Arefeld) nach dem Dreileitersystem 2×220 Volt ausgeführt worden. Dieses System ermöglicht unter sonst gleichen Umständen die Überwindung einer viermal so großen Entfernung wie das Zweileitersystem 220 Volt.

So sehr man beim Entwurf darauf Bedacht nimmt, beide Nebhälften gleichmäßig zu belasten, so ist es doch manchmal nicht ausgeschlossen, daß zeitweise eine große Stromdifferenz in den beiden Zweigen entsteht, und das wird besonders in den Stunden schwachen Konsums der Fall sein. Damit nicht eine der Maschinen fast leer mitläuft, schaltet man die beiden Außenleiter parallel, macht sie also beide gleichpolig (etwa positiv), der Mittelleiter wird dann der negative Pol. Diese Schaltung ist in Fig. 143 dargestellt; die punktiert gezeichnete Maschine ist abgeschaltet. Jeder Stromverbraucher

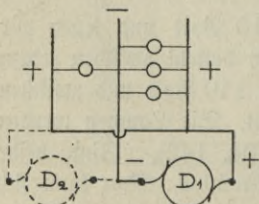


Fig. 143.

erhält die ganze Spannung einer Maschine (110 Volt bei 2×110 Volt). Diese Schaltung darf aber nur vorgenommen werden, wenn die Gesamtbelastung klein ist, weil sonst der Leitungsverlust zu groß wird.

Bei dem eben beschriebenen Dreileitersystem muß die Spannung in jeder der beiden Netzhälften besonders reguliert werden. Dieses ist nicht nötig bei dem Dreileitersystem mit einer Hauptmaschine und zwei Ausgleichsmaschinen. Hier erfolgt die Regulierung wie bei dem Zweileitersystem. D in Fig. 144 ist die Hauptmaschine für die ganze Netzspannung, z. B. für 220 Volt. Zwischen die beiden Außenleiter sind zwei miteinander gekuppelte Maschinen für 110 Volt hintereinander geschaltet. Der

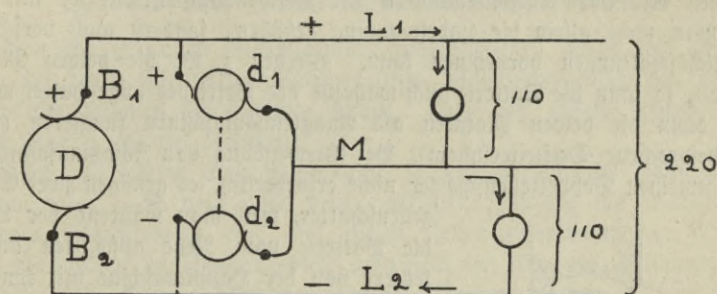


Fig. 144.

Mittelleiter zweigt von der gemeinsamen Klemme der beiden Ausgleichsmaschinen d_1 und d_2 ab. Bei gleicher Belastung der beiden Netzhälften nehmen d_1 und d_2 nur so viel Strom auf, als sie für den Leerlauf bedürfen, und durch die beiden Maschinen fließt derselbe Strom. Bei gleicher Belastung (J) ist nämlich das Potential in M gleich Null. Wird die obere Hälfte stärker belastet ($J + i$), so nimmt M ein positives Potential an und der Strom i fließt durch d_2 , so daß diese Maschine schneller läuft. Da d_2 mit d_1 fest verbunden ist, so muß d_1 die größere Tourenzahl mitmachen. Infolgedessen steigt die elektromotorische Kraft von d_1 (das magnetische Feld bleibt nämlich konstant, da die Nebenschlußwickelungen der Ausgleichsmaschinen hintereinander geschaltet sind) und wird größer als die Spannung in der oberen Netzhälfte; d_1 muß also Strom abgeben.

Dreileitersystem mit einer Hauptmaschine und zwei hintereinander geschalteten Akkumulatorenbatterien. Zwischen die beiden Außenleiter sind zwei Akkumulatorenbatterien für je 110 Volt hintereinander geschaltet. Der Ausgleichsleiter ist an die gemeinsame Klemme m der beiden Batterien befestigt (s. Fig. 145). Bei ungleicher Belastung der beiden Hälften sinkt die Spannung in der stärker belasteten Hälfte unter die

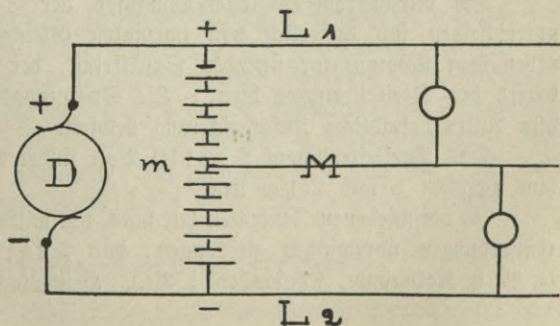


Fig. 145.

Klemmspannung der zugehörigen Batteriehälfte, so daß letztere Strom abgibt. Bei der Ladung der Batterie verwendet man entweder zwei Zusatzmaschinen, die von einer Transmission oder einem gemeinsamen Elektromotor angetrieben werden, in welchem Falle die beiden Zellschalter an den Endzellen (bei L_1 und L_2) liegen, oder man verwendet eine Zusatzmaschine, in welchem Falle die Zellschalter am Nullleiter liegen. Eine Modifikation bildet die den Siemens-Schuckert-Werken patentierte Anordnung, nach der zwei Zusatzmaschinen mit zwei Antriebsmotoren zur Verwendung gelangen, mit deren Hilfe man nicht allein die Ladepannung erhöhen, sondern auch verschiedene Ausgleichschaltungen vornehmen kann. Werden z. B. die beiden Motoren gekuppelt, so kann die Batterie auch während des Betriebes abgeschaltet werden, indem dann die beiden Motoren als Ausgleichsmaschinen fungieren (s. das vorherbesprochene Dreileitersystem). Bei Verwendung von Zusatzmaschinen sind im allgemeinen Doppelzellschalter nicht erforderlich, es genügen zwei Einfachzellschalter, weil man während der Ladung die Batterie vom Netze abschalten und das letztere von der Hauptmaschine mit konstanter Spannung speisen kann.

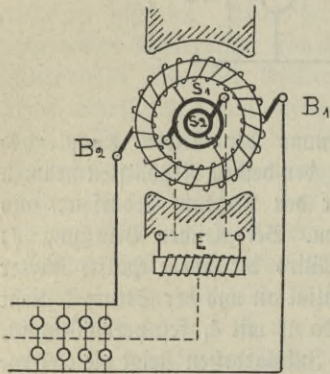


Fig. 146.

Endlich erwähnen wir noch das von Dolivo-Dobrowolsky eingeführte Dreileitersystem mit einer Maschine und Spannungsteiler. Die Gleichstrommaschine besitzt außer dem Kollektor noch zwei Schleifringe S_1 , S_2 und Bürsten (Fig. 146). Die Bürsten der Schleifringe werden mit dem Spannungsteiler E , einer Spule von hoher Selbstinduktion, aber geringem Ohmschen Widerstande, verbunden; die von den Schleifringen abgenommenen Wechselströme werden fast vollständig abgedrosselt, während Gleichstrom die Spule E leicht passieren kann. Der Mittelleiter wird von der Mitte des Spannungsteilers abgezweigt¹⁾.

Die Gleichstrom-Dreileiter-Dynamos der Siemens-Schuckert-Werke unterscheiden sich äußerlich von normalen Gleichstrommaschinen durch einen neben dem Kommutator sitzenden Schleifring, der zum Anschluß des Mittelleiters des Dreileiternetzes dient. Die Spannungsteilung wird durch eine in dem Anker befindliche Zusatzwicklung bewirkt.

Das Dreileitersystem 2×110 Volt findet Anwendung, wenn der Radius zwischen 1 und 2 km liegt.

In verschiedenen Zentralen hat man, um mittels Gleichstrom noch größere Entfernungen überwinden zu können, das Fünfleitersystem angewandt (z. B. in Rotterdam, Königsberg i. Pr.). Heutzutage würde man wahrscheinlich

¹⁾ Näheres s. *G.-T.* 3. 1894, S. 323.

einer Drehstromanlage den Vorzug geben. Bei dem Fünfleitersystem werden 4 Dynamomaschinen für 110 Volt hintereinander geschaltet und die Leitungen an die drei gemeinsamen Klemmen und an die Endklemmen gelegt. Das Netz besteht aus vier Teilen mit je 110 Volt Spannung. Die Lampen werden auf diese vier Teile möglichst gleichmäßig verteilt. Von einer näheren Beschreibung des erwähnten Systems können wir wohl Abstand nehmen.

4. Indirekte Gleichstromverteilungssysteme.

Von den indirekten Gleichstromverteilungssystemen heben wir diejenigen hervor, bei denen Gleichstromunformer bezw. Motorgeneratoren und Akkumulatoren-Unterstationen Verwendung finden. Über das erstere System findet man in dem 8. Kapitel Auskunft.

Was das letztere System anlangt, so sind verschiedene Fälle möglich. So kann man z. B. von einer weit entfernten Zentrale aus mittels hochgespannten Gleichstromes eine aus vielen Zellen zusammengesetzte Batterie laden, die mitten im Konsumgebiete aufgestellt ist; bei der Entladung wird die Batterie in kleinere Batterien zerlegt. Ferner werden Akkumulatoren-Unterstationen mit Vorteil verwendet, um bei Bahnanlagen mit großer Geleislänge einem allzu großen Spannungsverluste in den Leitungen vorzubeugen. Als Beispiel erwähnen wir die elektrische Bahn Düsseldorf—Krefeld, bei der die Gesamtlänge der Linie etwa 22 km beträgt und Gleichstrom von 600 Volt Spannung zur Anwendung gelangt. Hier ist die Unterstation in einer Entfernung von etwa 13,5 km von der Kraftstation untergebracht. Die Batterie steht durch eine besondere Fernleitung mit der Zentrale in Verbindung. Der durch die lange Leitung entstehende Spannungsverlust wird durch eine in der Zentrale aufgestellte Zusatzmaschine aufgehoben, die auch die zur Vollladung erforderliche Überspannung liefert. Die Batterie gibt nach beiden Richtungen hin Strom ab.

Der Kraftübertragung durch Gleichstrom wird eine Grenze gezogen durch den Umstand, daß Gleichstrommaschinen für mehr als 4000 Volt und große Leistungen wegen der Schwierigkeiten am Kommutator nicht gebaut werden können. Vereinzelt sind allerdings Kraftübertragungen ausgeführt worden, bei denen Gleichstrom von sehr hoher Spannung zur Verwendung gelangt ist. Als Beispiel erwähnen wir die Kraftübertragung Lausanne—St. Maurice; hier sind 10 Gleichstrommaschinen hintereinander geschaltet, die Strom von 22 000 Volt Spannungen in die Fernleitung schicken. Am Verbrauchsorte sind die Motoren hintereinander geschaltet. Im allgemeinen kommt für große und weite Kraftübertragungen nur Wechselstrom bezw. Drehstrom in Frage.

5. Wechselstromverteilungssysteme.

Wenn wir auch keine ausführliche Anleitung für die Berechnung der Wechselstromleitungen zu geben beabsichtigen, so glauben wir doch, wegen

der großen Bedeutung, die dieser Gegenstand für elektrische Kraftübertragungen in großem Maßstabe hat, die verschiedenen Faktoren, die bei dieser Berechnung zu berücksichtigenden sind, in Kürze darlegen zu müssen.

Bei Wechselstromleitungen kommt außer dem Spannungsverluste infolge des Ohmschen Widerstandes noch eine Spannungsabnahme in Betracht, die durch die Induktion verursacht wird. In bezug auf die Induktion haben wir zu unterscheiden zwischen der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion. Die Selbstinduktion haben wir in dem 4. Kapitel ausführlich besprochen, und es erübrigt noch, einige Worte über die gegenseitige Induktion zu sagen.

Es handle sich um Einphasenstrom, der die parallelen Leitungen L_1 und L_2 durchfließt. Ein Teil der durch den Strom in L_1 erzeugten Kraftlinien schneidet den Leiter L_2 . Der in L_1 fließende Strom induziert also in L_2 eine elektromotorische Kraft. Ebenso wirkt der Strom in L_2 auf L_1 zurück. Diejenige elektromotorische Kraft, die in L_2 (bzw. L_1) induziert wird, wenn der induzierende Strom in L_1 (bzw. in L_2) um 1 Ampere zu- oder abnimmt, nennt man den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion. Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion und diejenige der gegenseitigen Induktion setzen sich zu einer elektromotorischen Kraft zusammen, die im folgenden als resultierende Induktion bezeichnet wird. Diese hängt bei einem gegebenen Stromsystem von der Anzahl, der Anordnung und Länge der Leiter ab — streng genommen auch von dem Material der Leiter und der Permeabilität des umgebenden Mediums. Da wir aber als Leitungsmaterial nur Kupfer und als umgebendes Medium nur Luft berücksichtigen, so wollen wir von den beiden zuletzt genannten Faktoren absehen.

Für Einphasenstrom geht die komplizierte allgemeine Gleichung für den Koeffizienten der resultierenden Induktion L in die einfache Form über:

$$L = 0,5 + 21 g . n . \frac{d}{r} \dots \dots \dots (1)$$

Drückt man hier d , den Abstand der beiden Leitungen, ebenso r , den Radius der Leitung, in Zentimetern aus, so erhält man L in C-G-S-Einheiten, bezogen auf 1 cm Leitung. Da 1 Henry, d. h. die zu den Einheiten Volt, Ampere und Ohm zugehörige Einheit, gleich 10^9 C-G-S-Einheiten, so muß man, wenn man die Reaktanz, den Richtungs-widerstand, in Ohm erhalten will, den Wert für L aus Gleichung (1) durch 10^9 dividieren. Bezieht man endlich die Reaktanz auf 1 km Leitung ($= 10^5$ cm), so muß man mit 10^5 multiplizieren. Bezeichnen wir nun wie früher die Periodenzahl mit n , so stellt die Gleichung

$$R = 2\pi . n l . L . 10^{-4} \dots \dots \dots (2)$$

die Reaktanz in Ohm dar, wenn l die Länge der Leitung in km ist.

Multiplizieren wir die Reaktanz mit der effektiven Stromstärke, so erhalten wir den Spannungsabfall, verursacht durch die resultierende Induktion, oder die zu überwindende resultierende elektromotorische Kraft der Induktion. Die betreffende Spannungsabnahme darf aber nicht zu dem Ohmschen Spannungs-

verluste algebraisch addiert werden, da die gegenelektromotorische Kraft der Induktion um 90° gegen den Strom verschoben ist. Das Nähere ergibt sich aus den folgenden Beispielen.

Unsere Formeln (1) und (2) gelten auch für das Drehstromsystem, wenn die Drähte symmetrisch angeordnet sind, d. h. wenn die Drähte so verlegt sind, daß die Drahtquerschnitte, die man erhält, wenn die Leitungen durch eine senkrecht durch sie gelegte Ebene schneidet, die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bilden¹⁾. Für l hat man die Länge einer der drei Leitungen in km zu setzen, und man erhält mit Hilfe der Gleichung den resultierenden induktiven Spannungsabfall in einer Leitung.

Der Energieverlust in der Leitung ist nur durch die Stromstärke und den Ohmschen Widerstand gegeben und beträgt pro Sekunde $J^2 \cdot w$ Watt.

Wir wollen jetzt unsere Formeln für einen bestimmten Fall anwenden. Es seien am Ende einer Freileitung von 15 km Streckenlänge 1000 PS abzugeben. Dabei soll der Energieverlust in der Leitung 100 PS nicht überschreiten. Für die Übertragung sei Einphasenstrom von 50 Perioden gewählt; die Spannung, am Verbrauchsorte gemessen, betrage 5000 Volt, und die Belastung sei induktionsfrei.

$$\text{Die Stromstärke } J \text{ (effektiv)} = \frac{736 \cdot 1000}{5000} = 147 \text{ Amp.}$$

Der Energieverlust soll $736 \cdot 100$ Watt nicht übersteigen.

Da nun der Energieverlust durch $w J^2$ gegeben ist, so muß $w J^2 = 73600$ oder $w = 3,41$ Ohm sein.

Setzen wir den spezifischen Widerstand des Kupfers gleich $\frac{1}{60}$, so ergibt sich der Querschnitt der Leitung aus der Gleichung

$$3,41 = \frac{30000}{q \cdot 60} = \frac{500}{q}.$$

Man findet, daß $q = 148 \text{ mm}^2 = 1,48 \text{ cm}^2$. Nennen wir den Radius der Leitung r (in cm), so ist

$$r^2 \pi = 1,48;$$

r ist etwas weniger als 0,7 cm.

Um die Reaktanz zu bestimmen, müssen wir nach Gleichung (2) zunächst L , den Koeffizienten der resultierenden Induktion ermitteln. Wir wollen annehmen, daß der Abstand der Leitungen $1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$ betrage. Dann ist

$$L = 0,5 + 21 \lg n \frac{100}{0,7} = 0,5 + 2 \cdot 4,962 = 10,424.$$

Die Reaktanz hat nach Gleichung (2) den Wert

$$R = 2\pi \cdot 50 \cdot 30 \cdot 10,424 \cdot 10^{-4} = 9,82$$

¹⁾ Auch für die Fälle, daß die drei Querschnitte die Ecken eines gleichschenkligen Dreiecks bilden, liefern die Formeln noch hinreichend genaue Resultate.

und die gegen elektromotorische Kraft der Induktion, auch die reaktive gegen elektromotorische Kraft genannt, den Wert

$$J \cdot R = 147 \cdot 9,82 = 1443,5 \text{ Volt (1444 Volt)}.$$

Endlich ist der Ohmsche Spannungsverlust gleich

$$w \cdot J = 3,41 \cdot 147 = 500 \text{ Volt}.$$

Die Spannung in der Zentrale ergibt sich durch folgende Betrachtung. Denken wir uns die Enden der Leitung durch einen induktionsfreien Widerstand verbunden, der so groß ist, daß bei 147 Amp. der Spannungsverlust in ihm gleich 5000 Volt ist, so können wir diesen Widerstand und die Leitung in bezug auf den Ohmschen Widerstand, also auch in bezug auf den Ohmschen Spannungsverlust als ein Ganzes ansehen. Der ganze Ohmsche Spannungsabfall, von einer Klemme der Maschine bis zur anderen gerechnet, ist also gleich $5000 + 500 = 5500$ Volt. Da sich diese Spannung mit der Stromstärke in derselben Phase befindet, während $R \cdot J = 1444$ um 90° gegen den Strom verschoben ist, so muß die Spannung in der Zentrale

$$E_1 = \sqrt{5500^2 + 1444^2} = 5700 \text{ Volt sein}.$$

Die scheinbare Leistung der Maschine ist demnach $5700 \cdot 147 = 837\,900$ Voltampere, während die wirkliche Leistung beträgt $736 \cdot 1000$ Watt $+ wJ^2$ Watt oder $5500 \cdot 147 = 808\,500$ Watt. Dieser letzteren Leistung muß der motorische Teil der Anlage angepaßt sein.

Wir wollen jetzt annehmen, daß die Belastung eine induktive sei (Motoren), und zwar möge $\cos \varphi = 0,8$ angenommen werden. Die Selbstinduktion in den Motoren führt zu einer Vergrößerung der Stromstärke (s. wattlose Ströme), und wir erhalten die neue Stromstärke, indem wir die vorige Stromstärke (147 Amp.) durch 0,8 dividieren, das gibt $J = 184$ Amp.

Während eben die analytische Methode noch einfach und durchsichtig war, ist sie bei dem neuen Beispiele schon ziemlich kompliziert. Wir wollen daher jetzt die Rechnung durch eine Zeichnung unterstützen. Der Leser wird erkennen, daß dadurch eine bedeutende Vereinfachung erzielt wird.

Am Verbrauchsorte soll eine elektromotorische Kraft von 5000 Volt tätig sein; zwischen dieser und dem abgegebenen Strome besteht eine Phasenverschiebung, die durch $\cos \varphi = 0,8$ gegeben ist. Den Winkel φ können wir durch eine einfache Konstruktion finden. Zu dem Zwecke machen wir $OA = 4$ cm (s. Fig. 147) und beschreiben mit 5 cm um O einen Kreis. Schneidet dieser Kreis das auf OA in A errichtete Lot in B , so ist $\sphericalangle AOB = \varphi$; denn $\cos AOB = \frac{4}{5} = 0,8$. Durch OA wird die Richtung der Spannung am Verbrauchsorte und durch OB die Richtung des Stromes gegeben. Damit die Figur nicht zu groß wird, wollen wir übereinkommen, daß durch eine 1 cm lange Strecke eine Spannung von 1000 Volt dargestellt werde. Machen wir also OE_2 gleich 5 cm, so entspricht OE_2 der Größe und Richtung nach der Spannung am Ende der Leitung.

Wir bestimmen jetzt den Ohmschen Spannungsabfall in der Leitung. Dieser ist in jedem Falle gleich dem (ganzen) Strome mal dem Widerstand. Der Ohmsche Widerstand möge derselbe sein wie bei der vorigen Aufgabe; mithin $J \cdot w = 184 \cdot 3,41 \cong 630$ Volt¹⁾. Dieser Spannung entspricht eine Strecke von ungefähr $6\frac{1}{2}$ mm. Wir tragen unter Berücksichtigung des Umstandes, daß zwischen $J \cdot w$ und dem Strome Phasengleichheit besteht, auf einer durch E_2 zu OB gezogenen Parallelen E_2C $6\frac{1}{2}$ mm ab, und zwar nach unten. Würden wir nämlich nach oben abtragen, so würde das bedeuten, daß der Ohmsche Spannungsabfall 180° gegen den Strom verschoben sei.

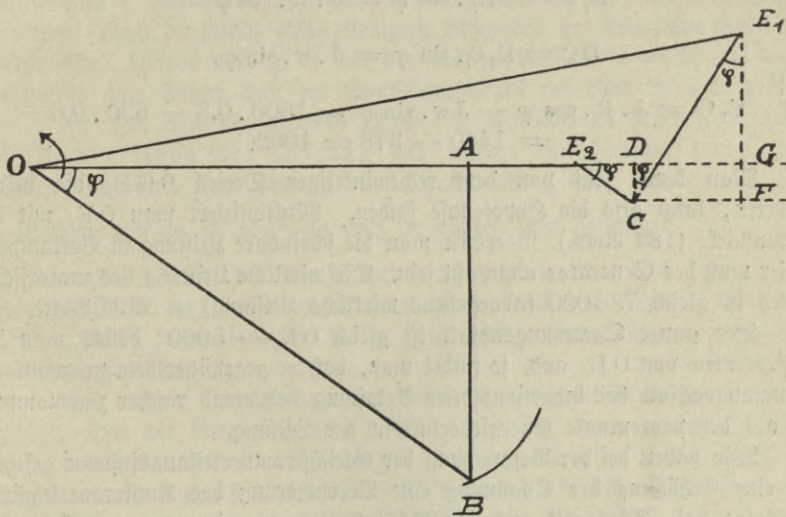


Fig. 147.

Die dritte Komponente ist die reaktive Spannung — gegenelektromotorische Kraft der Induktion. R , die Reaktanz, hat, da wir dieselbe Leitung benutzen wie eben, den Wert $9,82$ Ohm. Mithin $R \cdot J = 9,82 \cdot 184 \cong 1800$ Volt. Da die reaktive Gegenspannung gegen den Strom und daher auch gegen den Ohmschen Spannungsabfall um 90° verschoben ist — in dem Sinne, daß der Strom Nachteilung hat —, so müssen wir auf E_2C nach oben hin ein Lot errichten und auf diesem $1,8$ cm abtragen. Durch die Strecke OE_1 ist jetzt die Spannung in der Zentrale gegeben. Wenn die Zeichnung exakt ausgeführt ist, so genügt es, OE_1 in Zentimetern zu messen und die erhaltene Zahl mit 1000 zu multiplizieren.

Will man OE_1 berechnen, so ziehe man noch die in der Figur punktiert gezeichneten Hilfslinien. Da $\sphericalangle DCE_1 = \varphi$ und $\sphericalangle CE_1F = \sphericalangle DCE_1$, (als Wechselwinkel), so ist

¹⁾ \cong bedeutet angenähert gleich.

$$E_2 D = E_2 C \cdot \cos \varphi = J \cdot w \cdot \cos \varphi = 630 \cdot 0,8 = 504$$

$$DG = CF = CE_1 \cdot \sin \varphi = J \cdot R \cdot \sin \varphi = 1800 \cdot \sqrt{1 - 0,8^2} \\ = 1800 \cdot 0,6 = 1080.$$

Mithin ist

$$OG = OE_2 + E_2 D + CF = E_2 + J \cdot w \cdot \cos \varphi + J \cdot R \cdot \sin \varphi \\ = 5000 + 504 + 1080 = 6584.$$

Ferner

$$E_1 G = E_1 F - GF = E_1 F - DC.$$

Da

$$E_1 F = CE_1 \cdot \cos \varphi = J \cdot R \cdot \cos \varphi$$

und

$$DC = E_2 C \cdot \sin \varphi = J \cdot w \cdot \sin \varphi,$$

so ist

$$E_1 G = J \cdot R \cdot \cos \varphi - J w \cdot \sin \varphi = 1800 \cdot 0,8 - 630 \cdot 0,6 \\ = 1440 - 378 = 1062.$$

Man kennt jetzt von dem rechtwinkligen Dreieck OGE_1 die beiden Katheten, kann also die Hypotenuse finden. Multipliziert man OE_1 mit der Stromstärke (184 Amp.), so erhält man die scheinbare Leistung in Voltampere. Dieser muß der Generator angepaßt sein. Die wirkliche Leistung des motorischen Teiles ist gleich 736 000 (abgegebene wirkliche Leistung) + WJ^2 Watt.

Der ganze Spannungsabfall ist gleich $OE_1 - 5000$; drückt man ihn in Prozenten von OE_1 aus, so findet man, daß er gegenüber dem prozentualen Spannungsabfall bei induktionsfreier Belastung bedeutend rascher zugenommen hat als der prozentuale Energieverlust in der Leitung.

Wir haben bei der Besprechung der Gleichstromverteilungssysteme gesehen, daß eine Erhöhung der Spannung eine Verringerung des Kupferquerschnittes zur Folge hat. Dies gilt auch für Wechselstrom; hier ist aber noch folgendes zu beachten. Erhöht man die Spannung, so muß man den Abstand der Drähte vergrößern, um sowohl eine direkte Entladung durch die Luft hindurch als auch das Überströmen der Elektrizität von der einen Leitung über die Isolatoren zc. hinweg nach der anderen Leitung zu erschweren¹⁾.

Die Vergrößerung von d hat aber eine Vergrößerung von L zur Folge, ebenso die Verkleinerung von r , des Radius der Leitung; denn es ist ja

$$L = 0,5 + \lg \cdot n \cdot \frac{d}{r}.$$

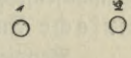
[Daß eine Vergrößerung von d ein Wachstum der Größe L zur Folge hat, sieht man ein, wenn man berücksichtigt, daß die von einer Leitung (L_1) auf die andere (L_2) ausgeübte Induktion der Selbstinduktion in L_2 entgegenwirkt.]

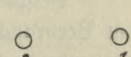
¹⁾ In einem Aufsatze in Eng. Magaz. Okt. 1902, S. 10—16, wird angegeben, daß man bis zu 60 000 Volt beide Leitungen auf einem Maste befestigen kann. Bei höheren Spannungen wird es notwendig, größere Abstände zwischen den Leitungen herzustellen durch Anbringung auf einem zwei Maste verbindenden Querarme oder durch Befestigung einer jeden Leitung auf einem besonderen Maste.

Mit L wächst aber die Reaktanz R . Ausschlaggebend ist aber nicht L , sondern $R \cdot J$. Es läßt sich nun zeigen, daß bei einer Spannungserhöhung J schneller abnimmt als R zunimmt. Daher hat die Wahl einer höheren Spannung nicht nur eine Verringerung des Kupfergewichtes, sondern auch eine Verkleinerung des prozentualen Spannungsabfalles zur Folge.

Wir haben bei unseren Beispielen den Abstand der beiden Leitungen zu 1 m angenommen. Für die gewählte Spannung (von 5000 Volt) ist dieser Abstand ein großer, und man wird in der Praxis 30–50 cm Abstand wählen. Aus der Formel für L ergibt sich, daß die Reaktanz kleiner wird, wenn man d verkleinert. Jedoch ist die Verringerung des Spannungsabfalles, die man durch die Wahl eines kleineren Abstandes der Leitungen erzielt, keine bedeutende. Würde man z. B. bei der zweiten Aufgabe $d = 50$ cm wählen, so würde man finden, daß der Spannungsabfall um etwa 3% kleiner wird.

Es gibt noch ein anderes Mittel die Reaktanz zu verringern, nämlich die Unterteilung der Leitung und richtige Gruppierung der Teilleiter. Wählt man statt einer Leitung vom Querschnitte q mm² zwei

Leitungen von je $\frac{q}{2}$ mm², so sind im ganzen vier Leitungen 

zu verlegen. Diese müssen so gruppiert werden, daß sich die Kraftlinien der Teilleitungen möglichst kompensieren. Das  ist der Fall, wenn man die in der Fig. 148 gekennzeichnete Anordnung wählt. Fig. 148.

Bei unseren Berechnungen haben wir die Kapazitätswirkung ganz vernachlässigt. Daß wir hierzu berechtigt waren, ergibt sich, wenn wir den Kapazitätsstrom bestimmen. Für $r = 0,7$ cm und $d = 100$ cm ist die Kapazität pro 1 km Doppelleitung ungefähr gleich 0,006 Mikrofarad = $0,006 \cdot 10^{-6}$ Farad. Die Kapazität unserer ganzen Leitung beträgt also $15 \cdot 0,006 \cdot 10^{-6} = 0,09 \cdot 10^{-6}$ Farad. Der wattlose, 90° voreilende Strom hat also bei 5700 Volt — hier kommt die Spannung in der Zentrale in Betracht — den Wert

$$2\pi \cdot n \cdot 0,09 \cdot 10^{-6} \cdot 5700 = 0,16 \text{ Ampere.}$$

Drehstromleitungen. Hier genügt es, eine der drei Leitungen zu berechnen. Es fragt sich, welche Spannung und welche Stromstärke man bei gegebener Leistung und bei gegebener Spannung zwischen zwei Leitungen der Berechnung zugrunde legen muß.

Wir berechnen die Leitung unter der Annahme, daß die drei Phasen gleich stark belastet sind und die Leistung am Verbrauchsorte gegeben ist; jede Phase leistet ein Drittel der ganzen Arbeit.

Wir haben gesehen, daß sowohl für Sternschaltung als auch für Dreieckschaltung

$$\text{die Leistung} = \sqrt{3} \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi,$$

wo J der effektive Strom in einer Leitung und E die Spannung (effektiv) zwischen zwei Leitungen ist. Mithin ist

$$J = \frac{\text{Leistung am Verbrauchsorte}}{\sqrt{3} \cdot E \cdot \cos \varphi} = \frac{1/3 \text{ Leistung}}{\cos \varphi \cdot \frac{E}{\sqrt{3}}}$$

$$\text{wo } \cos \varphi = \frac{\text{wirkliche Leistung am Verbrauchsorte}}{\text{scheinbare Leistung am Verbrauchsorte}}$$

J ist die Stromstärke, die für die Berechnung des Querschnitts in Betracht kommt und $\frac{E}{\sqrt{3}}$ die betreffende Spannung. Man nennt vielfach $\frac{E}{\sqrt{3}}$ die Schenkelspannung.

Soll der Energieverlust in der ganzen Leitung p % nicht übersteigen, so haben wir pro Draht mit $\frac{p}{3}$ % Verlust zu rechnen. Mit den Größen $\frac{E}{\sqrt{3}}$, J und $\frac{p}{3}$ rechnet man jetzt so, als ob eine Kraftübertragung mittels Einphasenstrom vorläge; nur ist zu beachten, daß als Länge der Leitung die einfache Entfernung zwischen den beiden Orten in Rechnung zu setzen ist.

Beispiel: Die Spannung zwischen zwei Leitungen (verfettete Spannung), am Verbrauchsorte gemessen, betrage 10 000 Volt, die Entfernung 30 km, die abzugebende Leistung 1000 PS; ferner sei $n = 50$, $\cos \varphi = 0,85$, $p = 14$ %.

$$\text{Die Schenkelspannung} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}} \cong 5800 \text{ Volt.}$$

Die scheinbare Leistung am Verbrauchsorte $= \frac{1000 \cdot 736}{0,85} \cong 870\,000$ Volt-ampere. Mithin

$$J = \frac{\frac{1}{3} \cdot 870\,000}{5800} = 50 \text{ Ampere.}$$

Verlust in einem Drahte $= 4^{2/3}$ % von 1000 PS, das gibt 34 350 Watt.

Nennen wir den Widerstand pro Draht W , so ist der Energieverlust pro Draht gleich $WJ^2 = W \cdot 50^2 = 2500 \cdot W$. Mithin

$$34\,350 = 2500 \cdot W. \quad W \cong 13,7 \text{ Ohm.}$$

Setzen wir den spezifischen Widerstand des Kupfers gleich $1/60$, so findet man den Querschnitt q aus der Gleichung

$$\frac{30\,000}{60 \cdot q} = 13,7. \quad q = 36,5 \text{ mm}^2.$$

Man bestimmt jetzt r , den Radius der Leitung, in Zentimetern, dann L und R zc. Die weitere Berechnung ist nach dem Schema der vorhergehenden Aufgabe durchzuführen. — Hat man die Schenkelspannung in der Zentrale ermittelt, so muß man diese mit $\sqrt{3}$ multiplizieren, wenn man die Spannung zwischen zwei Leitungen, in der Zentrale gemessen, erhalten will.

Berechnet man die Leitung, die Spannung in der Zentrale und den Spannungsabfall in Prozenten unter der Annahme, daß Einphasenstrom zur

Verwendung kommt, so findet man, daß das Drehstromsystem gegenüber dem Einphasensystem folgende Vorzüge besitzt. Es wird nicht nur bei demselben Verluste das Kupfergewicht bei der Wahl des Drehstromsystems geringer, sondern auch der Spannungsabfall. Außerdem muß man bei der Einphasenübertragung größere Generatoren wählen, und diese müssen für eine höhere Spannung gebaut sein.

Wir wollen noch unter Vernachlässigung des reaktiven Spannungsabfalles in den Drähten die Leitungen, die bei Einphasen- und Drehstrom unter gegebenen Bedingungen zu verlegen sind, miteinander vergleichen. Es sei

A_2 die wirkliche Leistung am Verbrauchsorte,

E_2 die Spannung zwischen zwei Leitungen am Verbrauchsorte,

l die Entfernung (Streckenlänge) in Metern.

Der Verlust soll $p\%$ von A_2 betragen.

1. Einphasenstrom: Scheinbare Leistung $= \frac{A_2}{\cos \varphi}$, $J = \frac{A_2}{\cos \varphi \cdot E_2}$.

Verlust: $wJ^2 = \frac{A_2 p}{100}$, mithin

$$w = \frac{A_2 p}{100 J^2} = \frac{A_2 p (E_2 \cos \varphi)^2}{100 A_2^2} = \frac{p (E_2 \cdot \cos \varphi)^2}{100 A_2}.$$

Nun ist auch $w = \frac{2 \cdot l}{q \cdot \rho}$, wo ρ der spezifische Leitungswiderstand des Leitermaterials; kombiniert man die beiden letzten Gleichungen, so findet man

$$q = \frac{200 l A_2}{\rho \cdot p (E_2 \cdot \cos \varphi)^2}.$$

2. Drehstrom:

$$J = \frac{A_2}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot E_2}.$$

Nennen wir den Widerstand in einer Leitung w , so ist

$$wJ^2 = \frac{1}{3} \frac{A_2 p}{100}, \quad w = \frac{A_2 p}{300 \cdot J^2}.$$

Setzt man für J seinen Wert, so erhält man

$$w = \frac{p (E_2 \cos \varphi)^2}{100 A_2}.$$

w ist aber auch gleich $\frac{1}{q' \rho}$. Es folgt

$$q' = \frac{100 l \cdot A_2}{\rho \cdot p (E_2 \cos \varphi)^2} = \frac{1}{2} q.$$

Bei Einphasenstrom ist der Querschnitt der beiden Leitungen zusammen $2 \cdot q$; bei Drehstrom ist der Querschnitt der drei Leitungen zusammen $3 \cdot \frac{1}{2} q$. Mithin sind bei der Drehstromanlage, wenn die Spannung zwischen zwei Leitungen so groß gewählt wird wie die Einphasenspannung, 25% weniger an Kupfer aufzuwenden.

Bei den Wechselstromverteilungssystemen mit Transformatoren ist zu unterscheiden zwischen dem primären und sekundären Netz. Das primäre Netz hat den Zweck, den Transformatoren den hochgespannten Strom zuzuführen, das sekundäre Netz gibt den transformierten Strom von geringer Spannung an die Lampen und Motoren ab. In einigen Anlagen hat man von der Verlegung eines sekundären Netzes abgesehen (z. B. in Köln). Es ist klar, daß, wenn ein sekundäres Netz fehlt, das primäre Netz wie bei einer Gleichstromanlage ausgebildet sein muß. Für jedes Haus, dem Strom zugeführt werden soll, bzw. für mehrere nahe bei einander liegende Häuser wird ein besonderer Transformator vorgeesehen. Dieses System hat zwar den Vorzug, daß — eben weil der hochgespannte Strom im ganzen Gebiete zur Verteilung gelangt — eine Ersparnis an Kupfer erzielt und das Leitungsnetz einfacher wird, aber es hat auch verschiedene Nachteile. Zunächst sind Kabel für hohe Spannungen wegen der sorgfältigeren Isolation teurer als solche für geringe Spannungen; ferner wird infolge der großen Ausdehnung des Hochspannungsnetzes die Gefahr einer Betriebsstörung vergrößert, die Isolation ist wegen der zahlreichen Zweigverbindungen, die in dem Hochspannungsnetze vorzunehmen sind, niedriger; sodann führt die große Anzahl von Transformatoren, die zu installieren sind, zu einer Verteuerung der Anlage; auch ist zu berücksichtigen, daß der Wirkungsgrad kleiner Transformatoren geringer ist als der von großen Transformatoren und daß die Leerlaufarbeit größer ist.

Nehmen wir z. B. an, daß 50 Häuser, die in einem kleineren Teile des Gebietes liegen, angeschlossen sind, und daß jedes Haus mit 40 Lampen ausgestattet ist, dann sind 50 Transformatoren, jeder für 40 Lampen, vorzusehen. Denn wenn auch nur selten alle 40 Lampen eines Hauses gleichzeitig brennen, so kann es doch vorkommen. Beträgt der Leerlaufverlust für jeden Transformator 2%, so verbrauchen die 50 Transformatoren so viel Energie wie $0,02 \cdot 40 \cdot 50 = 40$ Lampen, die ohne Unterbrechung Tag und Nacht brennen. Von den installierten 2000 Lampen brennen, wie die Erfahrung gelehrt hat, höchstens 60% gleichzeitig. Es würde also, wenn eine Transformatorstation vorhanden wäre, ein Transformator für $0,6 \cdot 2000 = 1200$ Lampen genügen. Dieser große Transformator kostet etwa ein Drittel des Geldes, das für die 50 kleinen Transformatoren zu bezahlen ist, und selbst wenn ein zweiter Transformator als Reserve aufgestellt wird, sind die Auslagen für Transformatoren kleiner. Der Leerlaufverlust in dem großen Transformator beträgt 1—2%, entspricht also der Energie, die 12—24 Lampen verbrauchen. Ist endlich ein geschlossenes sekundäres Netz vorhanden, so können bei schwachem Stromkonsum Transformatoren abgeschaltet werden, und die primäre Spannung kann leichter auf konstanter Höhe gehalten werden (Ausgleich).

Wenn ein sekundäres Netz mit parallel geschalteten Transformatoren angeordnet ist, so kann man die Anlage mit einem Gleichstromverteilungssystem vergleichen. Die Transformatoren, die möglichst gleichmäßig unter Berücksichtigung der abzugebenden Leistung in dem Konsumgebiete verteilt werden, kann man mit den Speisepunkten vergleichen und die primären Leitungen mit

den Speiseleitungen. Das sekundäre Netz entspricht den Verteilungsleitungen. Werden die sekundären Wicklungen der Transformatoren parallel geschaltet, so entsteht eine der Ringleitung analoge Ausgleichsleitung. Die nähere Anordnung für diesen Fall ist aus der schematischen Fig. 149 zu ersehen, in der der besseren Übersicht halber die Hochspannungsleitungen dick gezeichnet sind. In dieser ist W.D die Wechselstromdynamo, die den hochgespannten Strom liefert. Dieser wird durch das primäre Netz L_1, L_2 den primären Spulen der Transformatoren T_1, T_2 zc. zugeführt. Die sekundären Wicklungen der Trans-

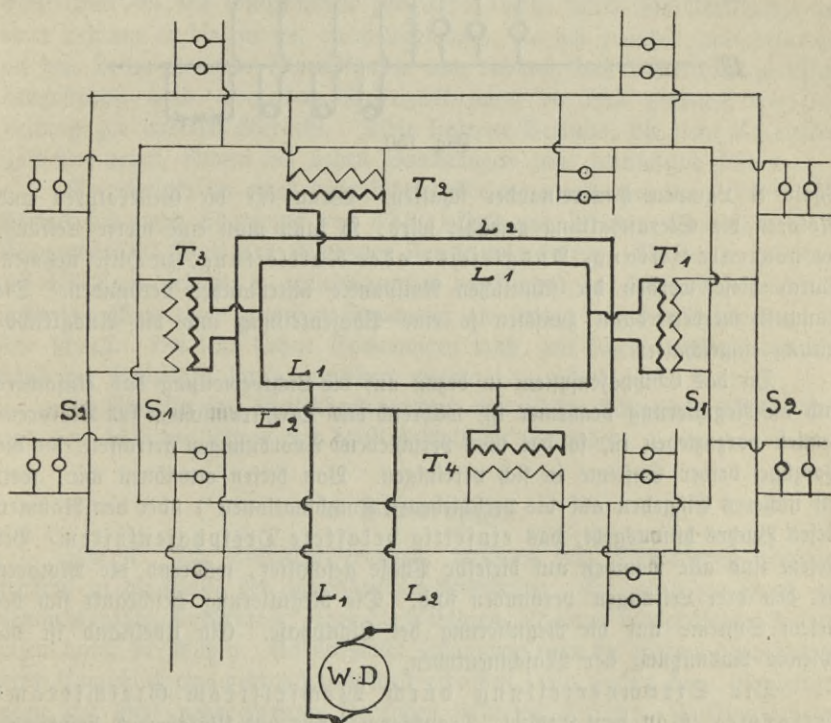


Fig. 149.

formatoren sind durch die Leitungen S_1, S_2 parallel geschaltet. Sollen größere Motoren mit Strom versorgt werden, so wird für jeden Motor ein besonderer Transformator vorgesehen, dessen sekundäre Klemmen direkt mit dem Motor verbunden werden. In der schematischen Figur ist angenommen worden, daß ein geschlossenes primäres Netz vorhanden sei; natürlich kann das primäre Netz auch ein offenes sein, in der Praxis ist es sogar meistens ein offenes oder nur teilweise geschlossenes.

Dieselben Betrachtungen gelten für Drehstromanlagen. Die Lampen werden in der Regel gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt, während Motoren an alle drei Leitungen anzuschließen sind. Die in unserer Fig. 150 skizzierte

Schaltung der Lampen ist als Dreieckschaltung zu bezeichnen; denn durch die drei ersten Lampen links wird I mit II, II mit III und III mit I verbunden, wie es für die Dreieckschaltung charakteristisch ist. Da Wechselstrombogenlampen mit zirka 30 Volt Spannung brennen, so kann man, wie es in der Figur angedeutet ist, bei 110 Volt Spannung zwischen zwei Leitungen in jeder

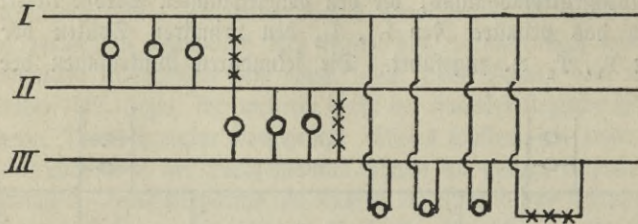


Fig. 150.

Phase 3 Lampen hintereinander schalten. Wenn für die Generatoren und Motoren die Sternschaltung gewählt wird, so kann man eine vierte Leitung, die neutrale Leitung, Ausgleichs- oder Nullleitung, zu Hilfe nehmen. Durch diese werden die sämtlichen Nullpunkte miteinander verbunden. Die Lampen werden dann zwischen je eine Phasenleitung und die Ausgleichsleitung eingeschaltet.

Da das Einphasensystem in bezug auf die Lichtverteilung das einfachere und die Regulierung bequemer ist, während das Drehstromsystem für Motorenbetrieb vorzuziehen ist, so hat man verschiedene Anordnungen getroffen, die die Vorzüge beider Systeme in sich vereinigen. Von diesen erwähnen wir, weil ein näheres Eingehen auf die verschiedenen Kombinationen¹⁾ über den Rahmen dieses Buches hinausgeht, das einseitig belastete Dreiphasensystem. Bei diesem sind alle Lampen auf dieselbe Phase geschaltet, während die Motoren mit den drei Leitungen verbunden sind. Die Regulierung beschränkt sich bei diesem Systeme auf die Regulierung der Lichtphase. Ein Übelstand ist die schlechte Ausnutzung der Maschinentypen.

Die Stromverteilung durch Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer ist in dem Kapitel „Transformatoren und Umformer“ besprochen worden. Dieses System kann mit Vorteil angewendet werden, wenn eine vom Konsumgebiete weit entlegene Wasserkraft ausgenutzt werden soll, die für den vollen Betrieb am Abend nicht ausreicht. Durch den Wechselstrom wird ein im Konsumgebiete aufgestellter Motor getrieben, der mit einer Gleichstrommaschine gekuppelt wird. Überschüssige elektrische Energie wird in einer Akkumulatorenbatterie aufgespeichert. Am Abend unterstützt die Batterie die Gleichstrommaschine. Ferner findet das System Verwendung, wenn die Kraftstation weit von dem Konsumgebiete entfernt, in dem Gleichstrom verbraucht wird.

Grenzen für Kraftübertragungen. Wir haben nachgewiesen, daß eine um so höhere Spannung für Kraftübertragungen gewählt werden muß,

¹⁾ Siehe Uppenborn, Kalender für Elektrotechniker, S. 150.

je größer die Entfernung der Kraftverbraucher von den Kräftezeugern ist. Es fragt sich nun, ob es eine Grenze für die Entfernung gibt. Die Erzeugung einer Spannung in Transformatoren bis zu 100 000 Volt (vielleicht auch einer noch höheren) kann als gelöste Aufgabe betrachtet werden. Eine Grenze wird also durch die Fernleitung gesetzt, für die man auf blanke Drähte angewiesen ist, weil Kabel für Spannungen von etwa 25 000 Volt an zu teuer werden (s. S. 271). Je höher die Spannung ist, um so größer werden die Verluste in der Fernleitung; diese werden verursacht durch das Abfließen der Elektrizität an den Stützpunkten zur Erde, bezw. durch das Überfließen aus einer Leitung in die andere, durch Lichtbögen, die sich zwischen zwei Leitungen an den Leitungsmasten bilden können und dadurch, daß Elektrizität gleichsam ausgestrahlt wird, oder daß Elektrizität durch die Luft hindurch von einer Leitung zur anderen übergeht. Diese letzteren Verluste, die man die elektrostatischen nennt, können bei hohen Spannungen ganz beträchtlich sein.

Ein Versuch an einer ausgeführten Anlage ergab, daß der elektrostatische Verlust bei einer Spannung von 47 300 Volt und 381 mm Abstand der drei Leitungen 760 Watt pro Kilometer Fernleitung betrug. Wurde der Abstand auf 1321 mm erhöht, so erniedrigte sich der Verlust auf 76,2 Watt pro Kilometer¹⁾. Von einer gewissen Spannung an steigen die Fernleitungsverluste sehr schnell. Bei sehr hohen Spannungen muß, wie schon erwähnt, der Abstand der Leitungen stark vergrößert werden.

In Amerika sind Kraftübertragungen von 56 km Länge mit 40 000 Volt und von 112 km Länge mit 50 000 Volt im Betriebe.

6. Sicherungen.

Zweck. Die Schmelzsicherungen, meistens kurz Sicherungen genannt, gehören in die Klasse der automatischen Ausrichter. Sie haben den Zweck, die Leitungsdrähte, Apparate zc. gegen die Gefahren, die ein zu starker Strom hervorzurufen kann, zu schützen. Bei normaler Spannung kann der Strom hauptsächlich durch Kurzschluß eine bedrohliche Stärke erreichen. Ein solcher kann sich bilden, wenn bei dicht nebeneinander laufenden isolierten Drähten (Zwillingsleitern) die Isolation schadhaft wird, oder wenn sich zwei blanke Drähte, zwischen denen eine größere Potentialdifferenz besteht, durch Zufall berühren oder durch Mutwillen zur Berührung gebracht werden oder durch einen verhältnismäßig kleinen Widerstand miteinander verbunden sind. Wenn die Stromstärke zu groß wird, erwärmt sich der stromdurchflossene Leiter stärker als zulässig ist, er kann unter Umständen glühend werden und durchschmelzen. Hierdurch können, abgesehen von längeren Betriebsstörungen, Brandunglücke herbeigeführt werden. Eine zu hohe Stromstärke kann, auch wenn sich die Temperaturerhöhung innerhalb mäßiger Grenzen bewegt, der Isolation der Drähte schädlich werden.

¹⁾ G.-T. 3. 1902, S. 1067.

Das Prinzip, das den Sicherungen zugrunde liegt, ist folgendes. Schaltet man in einen Stromkreis einen Leiter ein, dessen Widerstand pro 1 cm Länge größer ist als derjenige der Nachbarschaft pro 1 cm Länge, so wird dieser Leiter, wenn wir von dem Unterschiede in dem Wärmeausstrahlungsvermögen absehen, stärker erwärmt als die angrenzenden Leiter, und er wird daher, falls sein Schmelzpunkt nicht zu hoch liegt, früher durchschmelzen. Erfolgt aber ein Durchschmelzen, so wird eine Luftstrecke in den Stromkreis eingeschaltet und der Strom unterbrochen. Außer Widerstand, Schmelzpunkt, Wärmestrahlung ist bei einer Theorie der Sicherungen noch die Wärmeabgabe durch Leitung an die angrenzenden Leiter zu berücksichtigen, die um so größer ist, je größer die Wärmekapazität der Nachbarschaft ist¹⁾.

Die höchste zulässige Abschmelzstromstärke einer Sicherung soll nach den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker doppelt so groß sein wie die Normalstromstärke. Letztere ist identisch mit der Stromstärke, für die der betreffende Teil der Leitung dimensioniert ist. Hat z. B. eine Leitung einen Querschnitt von 4 mm², so darf sie mit 15 Ampere belastet werden. Die Sicherung, die den Schutz der betreffenden Leitung übernehmen soll, muß also, wenn der Strom 30 Ampere stark wird, durchschmelzen²⁾. Die Stromstärke, bei der eine Sicherung durchschmilzt, kann im Laufe der Zeit, besonders bei Sicherungen, die direkt von der Luft umgeben sind, größer und kleiner werden. Chemische Veränderung (Oxydation) hat eine Widerstandserhöhung und Verringerung der Abschmelzstromstärke zur Folge; Schwärzung der Oberfläche durch Schmutz bewirkt verstärkte Wärmeausstrahlung, so daß die Abschmelzstromstärke größer wird. Es empfiehlt sich daher, von Zeit zu Zeit ein Auswechseln der Sicherungen vorzunehmen. Die Normalstromstärke muß auf dem auswechselbaren Teile der Sicherung verzeichnet sein.

Anforderungen. Das Abschmelzen erfolgt, besonders bei plötzlichem Anwachsen der Stromstärke, meistens in der Weise, daß ein Teil des Metalles flüssig wird und in Gestalt von kleinen Tröpfchen herumsfliegt und ein Teil verdampft. Die Metalldämpfe verdanken wahrscheinlich einem Lichtbogen ihre Entstehung, und umgekehrt wird durch die Dämpfe die Existenz des Lichtbogens begünstigt. Solange der Lichtbogen vorhanden ist, ist der Stromkreis nicht unterbrochen; außerdem kann der Lichtbogen wegen seiner hohen Temperatur auf die Umgebung zündend wirken. Eine wichtige Anforderung, die man daher an Sicherungen stellen muß, besteht darin, daß sich kein längere Zeit dauernder Lichtbogen bilden darf. Je höher die Spannung des Netzes, um so länger kann der Lichtbogen werden, um so länger muß daher auch der Schmelzstreifen der Sicherung sein. Da also die Spannung auf den Verlauf des Abschmelzens einen wesentlichen Einfluß ausübt, so ist es nötig, daß auch in dieser Hinsicht

¹⁾ Siehe G.-Z. J. 1892, S. 423.

²⁾ Über die Zeit, nach der das Abschmelzen erfolgen soll, sind keine Vorschriften erlassen.

Irrtümer ausgeschlossen sind, und daß vor allem die höchste Spannung, für die man die Sicherung noch verwenden kann, auf dem Abschmelzstreifen verzeichnet wird.

Das Abschmelzen der Sicherungen spielt sich in sehr kurzer Zeit ab und hat den Charakter einer Explosion. Wenn eine Sicherung an einem Orte angebracht wird, wo die herumspritzenden glühenden Metalltröpfchen Personen oder Sachen gefährlich werden können, so ist sie in ein Gehäuse einzuschließen, dessen Grundplatte und Deckel aus feuersicherem Material angefertigt sind. Ferner muß die Sicherung so konstruiert sein, daß ein irrtümliches oder beabsichtigtes Einsetzen eines Abschmelzstückes für einen zu starken Strom ausgeschlossen ist, weil ja sonst die Sicherung keinen genügenden oder überhaupt keinen Schutz für die Leitung bildet. Diese Forderung erstreckt sich nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker für Niederspannung (bis 250 Volt) nur auf Sicherungen bis zu 20 Ampere Normalstromstärke, entsprechend 6 qmm Leitungsquerschnitt. Das Einsetzen einer Sicherung für zu schwachen Strom ist zwar gestattet, sollte jedoch auch tunlichst durch die Konstruktion der Sicherung unmöglich gemacht werden. Wird nämlich eine zu schwache Sicherung benutzt, so können unnötige und unliebsame Störungen durch Abschmelzen bei normaler Stromstärke vorkommen. — Besteht der Abschmelzstreifen oder Abschmelzdraht aus weichem Metall, Blei oder Blei-
legierungen, so müssen die Enden in Kontaktstücke aus hartem, leitendem Material (Kupfer oder dergl.) eingelötet werden, damit das weiche Metall nicht beim Anziehen der Kontaktsschrauben beschädigt wird. — Endlich muß die Sicherung auch durch einen Laien ausgewechselt werden können.

Material. Meistens werden als Material für den Abschmelzstreifen Metalle oder Metalllegierungen empfohlen, die bei großem spezifischen Widerstande einen niedrigen Schmelzpunkt haben oder umgekehrt. Edison, der Erfinder der Sicherung, benutzte eine Legierung aus Blei¹⁾ und Zinn, die bei etwa 200° schmilzt. Blei und seine Legierungen oxydieren an der Luft. — Von anderen Metallen, die man für die Herstellung des Abschmelzstreifens benutzt, ist vor allem Silber zu nennen. Dieses Metall verändert sich an der Luft kaum, außerdem leitet das Dryd des Silbers den Strom nahezu so gut wie das Metall selbst. Wegen des guten Leitungsvermögens und des hohen Schmelzpunktes des Silbers (bei 1000°) genügen relativ dünne Streifen oder Drähte. Wegen seines hohen Preises benutzt man Silber nur für kleine Stromstärken.

Anbringung. Wenn durch eine Sicherung eine Leitung von bestimmtem Querschnitte geschützt werden soll, so muß die Sicherung am Anfange der betreffenden Leitung eingesetzt werden. Die Speiseleitungen sind also am Schaltbrette bezw. in unmittelbarster Nähe der Sammelschienen zu sichern, die Verteilungsleitungen an den Speisepunkten zc. Verfolgt man das Leitungsnetz, von der Zentrale ausgehend, so ergibt sich folgende Regel: Jedesmal, wenn

¹⁾ Blei schmilzt bei 325° und leitet den Strom 10—11mal schlechter als Kupfer.

eine neue Abzweigung von geringerem Drahtquerschnitte beginnt, muß eine neue Sicherung angebracht werden. Wenn es nicht angängig ist, die Sicherung in den Anfang der Leitung zu legen, so muß sie doch möglichst nahe dem Anfange untergebracht werden. Beträgt die Entfernung zwischen Sicherung und Anfang mehr als 25 cm, so soll nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker das zwischen Sicherung und der stärkeren Leitung liegende Stück den Querschnitt der stärkeren Leitung haben.

In einer Zweileiteranlage kann man entweder von jedem Leitungsstrange nur einen Draht sichern oder jeden der beiden Drähte. Im ersten Falle, der

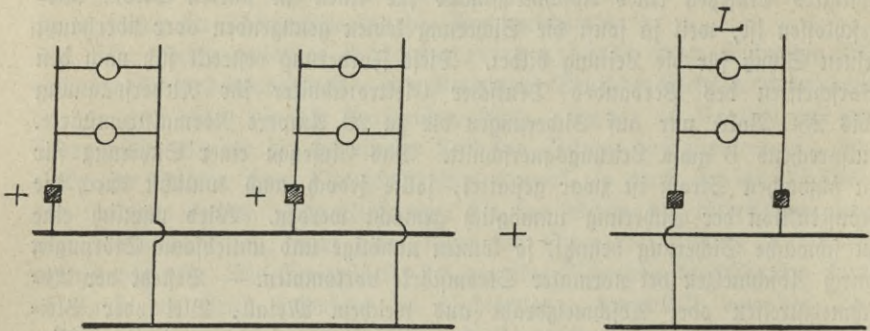


Fig. 151.

Fig. 152.

durch Fig. 151 veranschaulicht wird, spricht man von einpoliger Sicherung, im letzten Falle (s. Fig. 152) von zweipoliger Sicherung der Leitung. Bei einpoliger Sicherung¹⁾ ist sorgfältig darauf zu achten, daß immer die

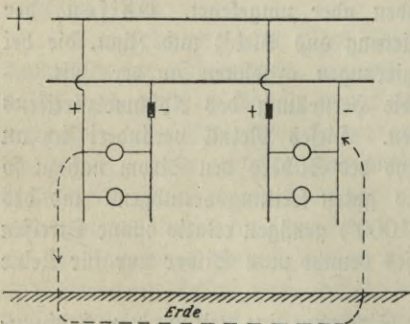


Fig. 153.

Leitung desselben Vorzeichens gesichert wird. Wird nämlich einmal die positive und ein anderes Mal die negative Leitung gesichert, so kann der Fall eintreten, daß bei starken Erdschlüssen die Sicherungen ihre Aufgabe nicht erfüllen. Es wird dieser Fall durch die schematische Fig. 153 erläutert, die wohl keiner besonderen Erklärung bedarf. Da bei einer ausgedehnten Anlage Verwechslungen der Leitungen nicht ausgeschlossen sind, es also vor-

kommen kann, daß an einer Stelle die positive Leitung und an einer anderen Stelle die negative Leitung gesichert wird, so ist die zweipolige Sicherung vorzuziehen.

¹⁾ Versuche zeigen, daß die positive Sicherung öfters durchbrennt als die negative. Diese auffallende Erscheinung ist noch nicht aufgeklärt. Es dürfte sich empfehlen, bei einpoliger Sicherung die positive Leitung zu schützen.

Bei Dreileiteranlagen dürfen die Mittelleiter (Nullleiter) keine Sicherungen enthalten, ebenso nicht bei Drehstromanlagen die die neutralen Punkte verbindenden Nullleiter. Ferner sollen alle blanken geerdeten Leitungen nicht gesichert werden.

In Räumen, in denen leicht entzündliche oder explosive Stoffe verarbeitet, verbraucht oder hergestellt werden, dürfen Sicherungen nicht untergebracht werden.

Es empfiehlt sich, besonders bei Anlagen in größeren Gebäuden, die Sicherungen möglich zu zentralisieren und in handlicher Höhe anzubringen. Durch die Zentralisation wird allerdings die Anlage etwas verteuert, indem einzelne Leitungen verlängert werden müssen. Aber dieser kleine Nachteil wird durch die Bequemlichkeit bei der Bedienung — Erneuerung einer abgeschmolzenen Sicherung — aufgewogen. Wird eine größere Anlage in einem gemeinsamen Kasten untergebracht, so ist es praktisch, etwa durch kleine Schildchen, die man unter den Sicherungen anbringt, die Räume kenntlich zu machen, deren Leitungen durch die einzelnen Sicherungen geschützt werden. Dadurch wird, wenn eine Sicherung abschmilzt, das Einsetzen einer neuen Sicherung wesentlich beschleunigt.

Konstruktionen. Wir beschränken uns auf die kurze Beschreibung einiger Konstruktionen, die weite Verbreitung gefunden haben oder als typische Formen anzusehen sind. Eine Schalttafelsicherung ist in Fig. 154 abgebildet; der Abschmelzstreifen *b* ist an den Enden

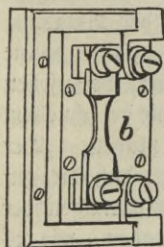


Fig. 154.

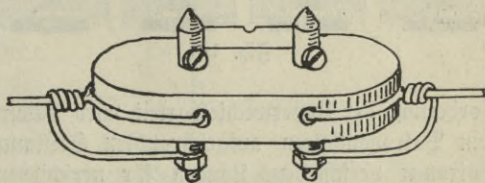


Fig. 155.

verdickt und wird durch Anziehen zweier Schrauben eingeklemmt. Sicherungen, die in Freileitungen eingeschoben werden, bestehen meistens aus zwei Kontaktstücken und dem Abschmelzstreifen. Damit auf die Sicherung nicht die Zugkraft der Leitung wirkt und die Leitung beim Durchschmelzen des Abschmelzstreifens nicht herabfällt, wird eine mit Klemmschrauben versehene Porzellanplatte (s. Fig. 155) oder ein Rahmen in die Leitung eingespannt; natürlich darf der Rahmen den Strom nicht leiten. Die Klemmen oder Klemmbolzen, an die die Leitungen herangeführt werden, werden durch die Sicherung miteinander verbunden. Eine bequeme Auswechslung gestatten die Stöpselsicherungen, die man bis zu etwa 40 Amp. in Gebäuden

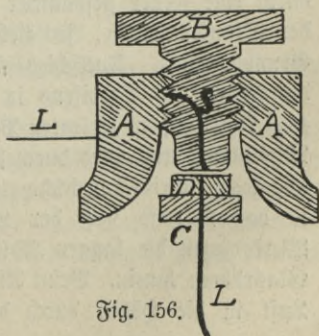


Fig. 156.

verwendet. Eine solche mit Schraubengewinde ist in Fig. 156 schematisch dargestellt. Der Abschmelzstreifen *S* ist mit dem Fuße des Stöpsels und mit dem Schraubengewinde verbunden. Damit das Einschrauben ohne jede Gefahr erfolgen kann, wird der Griff *B* aus einem nichtleitenden Material angefertigt. Dadurch, daß man dem Abstände zwischen Gewinde und Kontaktplatte des Stöpsels verschiedene Längen gibt, kann man verhindern, daß in eine Sicherung ein Stöpsel eingeseht wird, der für zu eine höhere als die richtige Stromstärke bestimmt ist (Voigt & Häffner). Die Firma Siemens-Schuckert verwendet für ihre Stöpselsicherungen in Räumen Schmelzstreifen oder Drähte

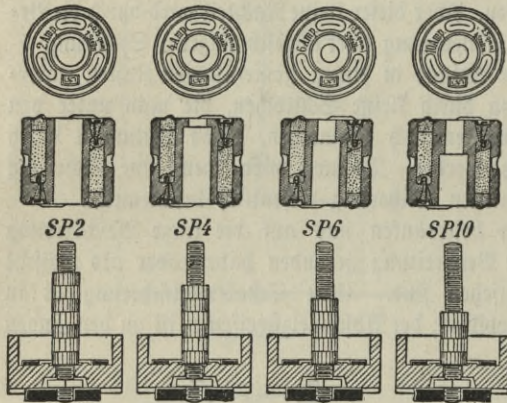


Fig. 157.

aus Silber von größerer Länge und schließt dieselben durch Einbettung in Talkumpulver völlig von der Luft ab. Von dem Talkum wird die bei dem Durchschmelzen des Drahtes erzeugte Wärme aufgesaugt. Um zu verhüten, daß bei einer besonders heftigen Verdampfung der ganze Stöpsel zertrümmert wird, sind in der Wandung der Patrone ganz dünne Stellen (Fenster) vorgesehen (s. Fig. 157), die bei schnellem Abschmelzen plazen. Der

Forderung der Unverwechselbarkeit wird dadurch Genüge geleistet, daß die auf dem Patronenbolzen aufgeschraubten Stellmuttern und die Aussparungen der Patronen verschiedene Längen für verschiedene Stromstärken haben, wie es aus Fig. 157 zu ersehen ist.

Hochspannungssicherungen müssen so konstruiert sein, daß ein Stehenbleiben des Lichtbogens, der hier eine bedeutende Länge erreichen kann, unmöglich wird. Von Mitteln, die man in Anwendung gebracht hat, dies zu erreichen, erwähnen wir folgende: Senkrecht auf dem Schmelzstreifen steht ein durch eine Feder gespannter Schieber aus nichtleitendem Materiale; schmilzt der Streifen durch, so zieht die Feder den Schieber in eine Öffnung der Grundplatte — Fallschiebersicherung. Bei einer anderen Einrichtung tauchen die Enden des Streifens in Öl ein, das sich in einem durch eine Wand in zwei Abteilungen zerlegten Porzellantasten befindet. Der Streifen liegt auf der Mittelwand und wird durch Federn, die sich in den beiden Abteilungen befinden, angezogen. Beim Durchschmelzen ziehen die Federn die beiden Hälften des Streifens in das Öl, so daß der Lichtbogen abbricht. Die Siemens-Schuckert-Werke legen die langen Abschmelzstreifen in schrägliegende, beiderseits offene Glasröhren hinein. Beim Abschmelzen steigen die Metaldämpfe und die erhitzte Luft in die Höhe; durch das schnelle Strömen der Gase wird der Licht-

bogen ausgeblasen. Voigt & Häffner umgeben den Schmelzdraht mit einem Isolierrohr, das durch einen Bleiknopf beschwert ist. Schmilzt der Streifen durch, so fällt das Rohr nach unten und unterbricht den Lichtbogen.

Benischke ¹⁾ bespricht in einem Vortrage die Verwendung von Sicherungen, die ein zu hohes Anwachsen der Spannung verhindern sollen. Hierhin gehören die Blitzschutzvorrichtungen; aber diese treten nur bei sehr starken Überspannungen, wie sie durch die atmosphärische Elektrizität verursacht werden, in Tätigkeit. Unter den atmosphärischen Entladungen kommen auch solche vor, die eine verhältnismäßig geringe Spannungserhöhung hervorrufen. Für diese sind die gewöhnlichen Blitzschutzvorrichtungen nicht empfindlich genug. Überspannungen können ferner entstehen beim Ein- und Ausschalten von Motoren, Transformatoren und Kabeln (s. S. 273). Sodann können in Niederspannungsleitungen hohe Spannungen dadurch auftreten, daß aus einer benachbarten Hochspannungsleitung infolge mangelhafter Isolation oder eines Drahtbruches Elektrizität überfließt. Endlich gehören hierher noch die hohen Spannungen, die in der Erregerwicklung eines Wechselstromgenerators oder eines Umformers entstehen, wenn sie bei Stillstand an ein unter Strom stehendes Netz angeschlossen werden. Die Erregerwicklung bildet dann die sekundäre Wicklung eines Transformators, dessen primäre Wicklung der Anker ist. Die Überspannungen können der Isolation und dem Bedienungspersonal, besonders in dem zuletzt erwähnten Falle, gefährlich werden. Die von Benischke empfohlene Spannungssicherung besteht aus zwei Messinghörnern (Fig. 158), deren kleinster Abstand, die Funkenstrecke, zwischen den Polen eines Elektromagnets liegt. Dieser wirkt auf den Lichtbogen wie ein Gebläse und treibt ihn nach oben, bis er erlischt. In die Erdleitung wird ein großer Widerstand w eingeschaltet, der aus einer mit Brunnenwasser gefüllten Röhre besteht. Der Widerstand verhindert, daß bei einer Funkenentladung etwa nachfolgenden Kurzschlusse zwischen den Hörnerspitzen ein stärkerer Strom zur Erde abfließt.

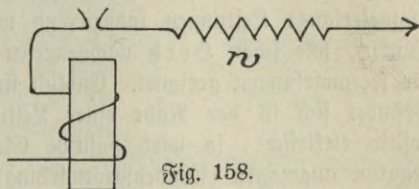


Fig. 158.

7. Blitzschutzvorrichtungen.

Diese schließen sich ihrem Zwecke und ihrer Konstruktion nach unmittelbar an die Spannungssicherungen an.

Unter Blitzschlag wird eine Reihe von elektrischen Erscheinungen zusammengefaßt, die auf die Wirkungen der atmosphärischen Elektrizität zurückzuführen sind. Hier ist zunächst der eigentliche Blitzschlag, d. h. das Einschlagen des Blitzes in die Leitung selbst, zu erwähnen. Wie photographische Aufnahmen von Blitzen zeigen, besteht ein Blitz nicht aus einer einzigen zickzackförmigen

¹⁾ Siehe G.-T. 3. 1902, S. 552.

feurigen Linie, sondern aus einem Hauptaste, und einer größeren Anzahl von Nebenzweigen; auch die Zweige verästeln sich. Man kann also einen Blitz am besten mit einem weitverzweigten Flußsystem vergleichen. Aus diesem Grunde schon beherrscht eine in Gestalt eines Blitzes erfolgende elektrische Entladung einen größeren Teil des Raumes, und es ist die Möglichkeit, daß der Blitz eine Leitung trifft, eine größere. Gegen die direkten Blitzschläge, die übrigens nur sehr selten eine Leitung treffen, gibt es wohl kaum einen vollkommen schützenden Apparat. Zweitens kommen Induktionswirkungen in Betracht; denn ein Blitz ist ja nichts anderes als ein durch die Luft hindurchgehender elektrischer Strom, und zwar ein Wechselstrom von sehr großer Frequenz. Der elektrische Funke ist nämlich, wie Feddersen nachgewiesen hat, keine einfache Erscheinung; er besteht vielmehr aus einer großen Anzahl von sehr schnell aufeinander folgenden Einzelentladungen, die abwechselnd in der einen und in der entgegengesetzten Richtung erfolgen. Bei horizontal liegenden Leitungsdrähten werden hauptsächlich die zwischen zwei benachbarten, ungleichnamig geladenen Wolken überspringenden Blitze induzierend wirken. Wir erinnern an die Vorgänge bei der Funkentelegraphie. Wenn wir dort mit unseren verhältnismäßig schwachen Mitteln in dem Empfängerdrahte stärkere Spannungen hervorrufen können, um wieviel mehr wird eine atmosphärische Entladung, bei der sehr große Elektrizitätsmengen in Bewegung sind, auf kilometerlange Leitungen induzierend wirken können. Allerdings sind lange Funken, wie schon Herz nachgewiesen hat, „weniger aktiv“, d. h. weniger für Fernwirkungen geeignet. Endlich sind Influenzerscheinungen zu erwähnen. Befindet sich in der Nähe einer Leitung eine geladene Wolke, etwa eine positiv elektrische, so wird positive Elektrizität der Leitung abgestoßen und negative angezogen (Kondensatorwirkung). Entlädt sich die Wolke, so wird die gebundene negative Elektrizität frei. Über die Spannungen, die bei Blitzschlägen herrschen, kann man nur Vermutungen aufstellen. Bei 20 000 Volt Spannung erzielt man Funken von etwa 14 mm¹⁾ Länge, und der Blitz hat eine Länge von vielen Metern. Allerdings kommt in Betracht, daß bei Gewittern die Luft mit Wasserdampf geschwängert und in den höheren Regionen mit kleinen Wassertropfchen angefüllt ist, wodurch ihr Leitungswiderstand verringert und daher die Entladung erleichtert wird.

Auf keinen Fall darf man sagen, daß die Blitzschutzvorrichtungen ihre Aufgabe immer in genügender Weise erfüllen. Es ist oft vorgekommen, daß eine Maschine vom Blitze beschädigt wurde, während die vorgeschalteten Blitzableiter lebhaft funktionierten. In diesen Fällen haben wir eine Stromverzweigung von der Blitzschutzvorrichtung an gerechnet vor uns: Der eine Weg geht durch die Leitung zur Maschine, zum Gehäuse, in die Erde, der andere durch die Erdleitung des Blitzableiters. Ferner hat man beobachtet, daß der Blitz in einer elektrischen Anlage nicht immer denselben Weg durchläuft. Überhaupt treten oft Zufälle auf, die man sich kaum erklären kann. Es kommt

¹⁾ Bei 5000 Volt von zirka 2 mm, bei 10 000 Volt von 4 mm.

z. B. vor, daß zuweilen eine Maschine durch Blitzschlag beschädigt wird, ohne daß der Blitzableiter funktioniert — auch wenn unsere Sinne keine atmosphärischen Störungen wahrnehmen. Hier scheint es, als ob die Spannungserhöhung in der Leitung nicht genügt, den Widerstand der Funkenstrecke der Blitzschutzvorrichtung zu überwinden, während sie imstande ist, den Isolationswiderstand der Wicklung zu überwinden, obgleich letzterer in den meisten Fällen bedeutend größer ist als ersterer ¹⁾.

Blitzschutzvorrichtungen sind in allen längeren bzw. ausgedehnteren Anlagen anzubringen, um sowohl die Leitungen selbst als auch die Maschinen, Transformatoren z., sowie das Bedienungspersonal vor Blitzschlägen zu schützen. Das Prinzip aller derartigen Vorrichtungen besteht darin, die hochgespannte Elektrizität durch eine Nebenleitung zur Erde abzuleiten. In die Nebenleitung wird eine Luftstrecke eingeschaltet, die die hochgespannte Elektrizität leicht überspringen kann, für den Maschinenstrom aber ein unüberwindliches Hindernis ist (s. Fig. 159).

Wenn ein Blitzableiter funktioniert, wenn z. B. der Blitz zwischen den Platten P in Fig. 159 überspringt, so sinkt der Widerstand der Luftschicht, wenigstens an den Stellen, an denen der Übergang der Elektrizität stattfindet, und es kann dann der Leitungsstrom dem Blitze nachfolgen; d. h. es kann sich ein stehender Lichtbogen in der Luftschicht ausbilden. Durch die Konstruktion des Blitzableiters muß die Entstehung bzw. das Bestehen eines Lichtbogens tunlichst verhindert werden.

Eine Hauptbedingung für die Betriebssicherheit von Starkstromblitzableitern ist die Vermeidung beweglicher Teile; ferner muß dem Blitze ein fast induktionsfreier Weg zur Erde geboten werden; denn es ist zu beachten, daß bei einer atmosphärischen Entladung große Elektrizitätsmengen während einer sehr kleinen Zeit in Bewegung sind, und daß daher die auf die Sekunde ungerechnete Änderung der Stromstärke, die für die Selbstinduktion in Betracht kommt, sehr groß ist. Die Erdplatten sind durch eine möglichst geradlinige Leitung, also unter möglicher Vermeidung von spitzen Winkeln oder scharfen Krümmungen mit dem Blitzableiter zu verbinden. Für die Verbindung wählt man blanken Kupferdraht von mindestens 25 mm² Querschnitt.

Die Erdplatten werden, wenn möglich, in das Grundwasser versenkt; ist dies nicht durchführbar, so ist die Erdplatte zur Erzielung einer guten Erdverbindung in fein gemahlener und fest gestampfter Kohle zu betten.

Werden Blitzableiter in der Nähe von Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren eingeschaltet, so sind zwischen diese und die Blitzableiter

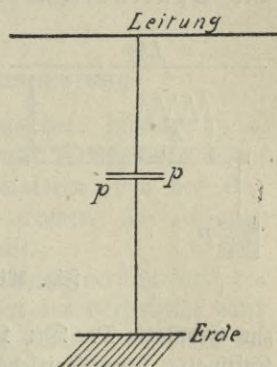


Fig. 159.

¹⁾ Siehe *E.-T. Z.* 1902, S. 455.

Drosselspulen einzuschalten. Diese erschweren dem Blitze wegen ihrer großen Selbstinduktion das Eindringen in die Maschinen bezw. Apparate.

Für die Wahl eines Blitzableiters ist die Stromart und die Betriebsspannung maßgebend. Es ist bekannt, daß sich ein Wechselstromlichtbogen zwischen Metallelektroden schwieriger erzeugen läßt als ein Gleichstromlichtbogen. Je größer die Betriebsspannung, um so größer muß der kleinste Abstand der Teile sein, zwischen denen der Blitz überspringen soll.

Von den zahlreichen Konstruktionen, die man für Blitzableiter erfunden hat, können hier nur einige wenige Berücksichtigung finden.

Man verwendet jetzt fast nur Blitzableiter mit selbsttätiger Funkenlöschung. Der Spulenblitzableiter der Siemens-Schuckert-Werke kann für

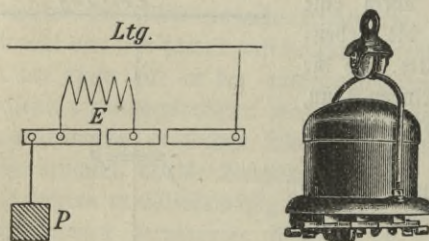


Fig. 160.

Gleichstrom- und Wechselstromanlagen bis zu 750 Volt benutzt werden. Er besteht (Fig. 160) aus drei Metallplatten mit zwei Funkenstrecken. Bilden sich zwischen den Metallstücken Lichtbögen, so fließt Strom aus der Leitung zur Erde; dieser nimmt größtenteils seinen Weg von der mittleren Platte durch die Spule E (magnetisches Gebläse)

zur Erdplatte P. Der Lichtbogen wird durch das magnetische Feld aus dem Luftspalte herausgetrieben und der Leitungsstrom unterbrochen. Die Vor-

richtung befindet sich in einem Gehäuse, das mittels einer isolierten Öse aufgehängt werden kann.

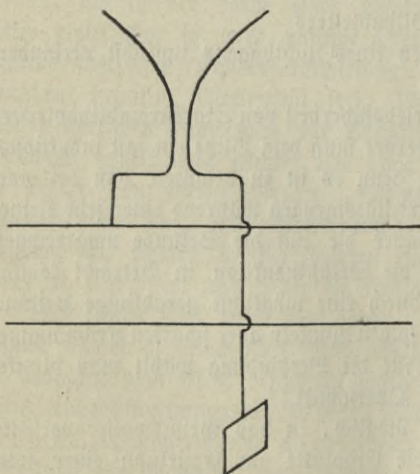


Fig. 161.

Bei den Hörnerblitzableitern ist ein besonderes magnetisches Gebläse überflüssig. Gibt man nämlich zwei Drähten die in Fig. 161 angedeutete Gestalt, so steigt ein entstandener Lichtbogen von selbst empor; wird also immer länger und zerreißt schließlich. Dieses Aufsteigen geschieht teils durch die mechanische Wirkung der aufsteigenden heißen Dämpfe, teils infolge der elektrodynamischen Wirkung der durch die Hörner selbst verlaufenden Ströme. Die strom-

durchflossenen Teile des Blitzschutzes und der Lichtbögen bilden nämlich einen Stromkreis. Der Strom sucht nun nach einem von Faraday aufgestellten Gesetze die beweglichen Teile eines Stromkreises so zu verschieben, daß die von den Stromteilen eingeschlossene

Fläche größer wird. — Vor der Montage muß der kleinste Abstand der beiden Hörner der Betriebsspannung angepaßt werden. Man rechnet für

3 000 Volt Betriebsspannung	2 mm Abstand
7 000 " " "	6 " "
10 000 " " "	10 " "

Die Hörnerblitzableiter sind für Gleichstrom- und Wechselstromanlagen geeignet und finden eine sehr ausgedehnte Verwendung.

Bei anderen Konstruktionen besteht die Funkenlöschvorrichtung aus einem Solenoide, das einen Eisenkern in sich hineinzieht und so die Lichtbogenlänge automatisch vergrößert. Die Blitzschutzvorrichtungen sind von Zeit zu Zeit, regelmäßig aber nach jedem Gewitter zu revidieren.

8. Isolationswiderstand, Isolationsprüfung.

Isolieren, vom italienischen *isola* = Insel abgeleitet, bedeutet in der Elektrizitätslehre, einen Leiter, z. B. einen Draht, unter Benutzung von sehr schlechten Leitern, sogenannten Nichtleitern oder Isolatoren, von der Verbindung mit der Erde oder mit benachbarten Leitern trennen. Die Isolation der Leitungen geschieht in der schon beschriebenen Weise.

Unter Isolationswiderstand eines umhüllten Drahtes versteht man den Widerstand, den die ganze Isolation dem Durchfließen der Elektrizität durch die Umhüllung entgegensetzt. Wenn die Beschaffenheit, Dicke und Dichte des

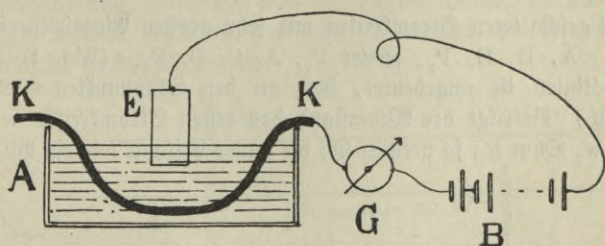


Fig. 162.

Isoliermaterials überall auf dem Leiter die gleiche ist, so ist der Isolationswiderstand der Länge des Leiters umgekehrt proportional. Um den Isolationszustand eines Kabels zu prüfen, kann man dasselbe oder ein Stück desselben in ein mit einer wässrigen Salzlösung gefülltes Gefäß legen (jedoch dürfen die Enden des Kabels nicht vom Wasser benetzt werden) und die in Fig. 162 gekennzeichnete Schaltung vornehmen. (B ist eine Batterie, E eine Metallplatte, G ein empfindliches Galvanoskop.)

Der Isolationswiderstand von Drähten oder Kabeln, die durch Gummi, Guttapercha oder Kautschuk isoliert sind, ändert sich in hohem Maße mit der Temperatur, da der elektrische Leitungswiderstand der genannten Substanzen als Leiter zweiter Klasse bei Temperaturerhöhung rasch abnimmt.

Wir wollen uns jetzt mit der Isolation einer verlegten Leitung gegen Erde und gegen benachbarte Leiter beschäftigen.

Um mit ganz einfachen Verhältnissen zu beginnen, wollen wir annehmen, daß, wie es bei der elektrischen Telegraphie meistens der Fall ist, der eine Pol der Stromquelle mit der Erde und der andere mit der Leitung verbunden ist, daß also die Erde als Rückleitung dient. Die Leitung sei an Porzellan-Isolatoren befestigt, die durch Eisenträger mit den Telegraphenstangen verbunden sind. Da die Isolatoren und Telegraphenstangen, besonders bei feuchter Witterung, keine absoluten Nichtleiter der Elektrizität sind, so ist eine Reihe

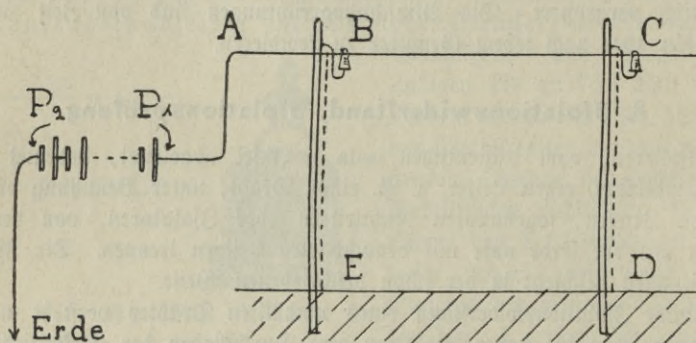


Fig. 163.

von parallel geschalteten Stromkreisen mit sehr großen Einzelwiderständen vorhanden; P_1 , A, B, E, P_2 , ferner P_1 , A, C, D, P_2 . (Fig. 163; durch die punktierten Linien ist angedeutet, daß an den Stützpunkten Elektrizität zur Erde abfließt.) Beträgt der Widerstand des ersten Stromkreises w_1 Ohm, der des zweiten w_2 Ohm zc., so verhält sich die ganze Leitung wie ein Widerstand von

$$W = \frac{1}{\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \dots + \frac{1}{w_n}}$$

und wir nennen W den Isolationswiderstand der ganzen Leitung gegen Erde. Die unvollkommene Isolation hat einen Elektrizitätsverlust zur Folge, der pro Sekunde $\frac{E}{W}$ Coulomb beträgt. Die Stromschwächung infolge mangelhafter Isolation ist nebenbei bemerkt bei einer sehr langen Telegraphenleitung keineswegs so unbedeutend, daß man sie vernachlässigen kann. Ist der Zustand der Leitung auf der ganzen Strecke der gleiche, so ist der Isolationswiderstand umgekehrt proportional der Länge der Leitung; denn unsere vorige Gleichung geht, wenn wir von dem Draht- und Erdwiderstande absehen, über in

$$W = \frac{w_1}{n}$$

Ist die Leitung durch eine isolierende Masse geschützt, so kommt noch folgendes Moment in Betracht: der Stromdurchgang durch einen Leiter zweiter Klasse ist stets mit einer Elektrolyse verbunden. Durch die zur Erde abfließende Elektrizität wird daher das Isoliermaterial an den Stützpunkten mit der Zeit verdorben, und zwar um so mehr, je mangelhafter die Isolation (je geringer der Isolationswiderstand) der Leitung ist. Da durch Wechselstrom eine chemische Zersetzung nur in sehr beschränktem Maße¹⁾ verursacht wird, so hält die Isolation länger als bei Gleichstrom.

Man spricht von Erdschluß, wenn ein Leiter an irgend einer Stelle mangelhaft gegen Erde isoliert ist. Ein solcher kann z. B. entstehen, wenn ein blanker Leiter von der Porzellanglecke abgerutscht ist und den Mast berührt oder wenn bei einem isolierten, an einer Wand befestigten Drahte die Umhüllung beschädigt ist und die bloßgelegte Stelle die Wand berührt. Wäre der Isolationszustand der Leitung und der Stromquelle sonst ein idealer, so würde der direkte Schaden eines einzigen Erdschlusses gleich Null sein. Denn man kann einen Pol einer Stromquelle direkt mit der Erde verbinden, ohne daß Elektrizität abfließt, vorausgesetzt, daß der andere Pol gut gegen Erde isoliert ist. Eine Stromquelle kann nämlich nur dann Elektrizität abgeben, wenn die Elektrizität wieder zur Stromquelle zurückkehren kann oder wenn positive und negative Elektrizität abfließen können. Auf jeden Fall hat aber auch ein einzelner Erdschluß eine unter Umständen ganz beträchtliche Verringerung des Isolationswiderstandes der ganzen Leitung zur Folge. Kommt zu einem vorhandenen Erdschlusse noch ein zweiter hinzu, so kann der ganze Betrieb gestört werden, da dann starke Ströme zwischen den beiden mangelhaft isolierten Punkten verkehren können.

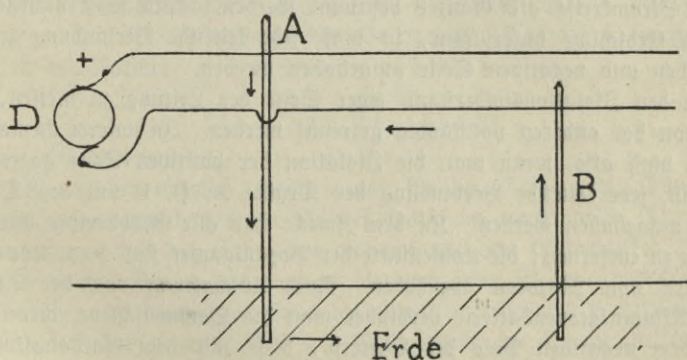


Fig. 164.

Sind mehrere Leitungen an demselben Maste befestigt, so hat jede einzelne Leitung einen gewissen Isolationswiderstand gegen Erde. Ist die positive

¹⁾ Daß durch Wechselstrom überhaupt keine Elektrolyse bewerkstelligt wird, ist eine irrtümliche Ansicht. Leitet man beispielsweise durch angesäuertes Wasser Wechselstrom, so beobachtet man schwache Gasentwicklung.

Leitung am Maste A und die negative am Maste B eine mangelhafte, so nimmt ein relativ starker Ableitungsstrom seinen Weg vom Maste A durch die Erde zum Maste B (s. Fig. 164). Durch diesen bei feuchter Witterung hauptsächlich über die Oberfläche der Maste fließenden Strom kann bei Hochspannungsanlagen die Gesundheit oder das Leben von Personen gefährdet werden, die die Leitungsmaste berühren; ferner verursacht der Ableitungsstrom einen Energieverlust; endlich kann der Spannungsverlust in der Leitung anormal groß werden, so daß eingeschaltete Lampen mit zu kleiner Spannung brennen.

Um stärkere Erdschlüsse zu erkennen, bedient man sich der Erdschlußanzeiger. Als solchen kann man ein empfindliches Voltmeter benutzen, dessen eine Klemme mit der Erde verbunden ist, während die andere Klemme mit einem Umschalter in Verbindung steht. Mittels des Umschalters kann man das Voltmeter nach Belieben mit der positiven oder negativen Leitung verbinden. Statt des Voltmeters benutzt man vielfach eine elektrische Klingel.

Die Isolationsmessung deckt sich mit der Messung großer Widerstände. Bei einer Zweileiteranlage mißt man zunächst den Isolationswiderstand jeder Seite der Leitung gegen Erde und dann den Isolationswiderstand der einen Seite gegen die andere; letztere Messung ist vorzunehmen, weil auch bei guter Isolation der beiden Seiten gegen Erde, die Isolation der Leitungen gegeneinander eine mangelhafte sein kann. Wenn nötig, wird der Isolationswiderstand jeder Hauptabzweigung, worunter die von den Sammelschienen der Zentrale ausgehenden Leitungen zu verstehen sind, nachdem man sie von der Sammelschiene abgetrennt hat, gemessen. Diese Messungen können an einer dem Betriebe übergebenen Anlage von größerer Ausdehnung kaum noch vorgenommen werden; es kann dann aber noch der Isolationswiderstand der einzelnen Stromkreise als Ganzes bestimmt werden. Will man nämlich jede Seite auf Erdschluß untersuchen, so muß jede leitende Verbindung zwischen der positiven und negativen Seite aufgehoben werden.

Um den Isolationswiderstand einer Seite der Leitung zu messen, muß dieselbe von der anderen vollständig getrennt werden. In unserer schematischen Fig. 165 muß also, wenn man die Isolation der positiven Seite gegen Erde messen will, jede leitende Verbindung der Drähte A, D, E mit den Drähten B, C, F aufgehoben werden. Zu dem Zwecke sind alle Glühlampen aus ihren Fassungen zu entfernen; die Kohlenstäbe der Bogenlampen sind herauszunehmen, die Bürsten von Motoren abzuheben. Nach Abschaltung von der Dynamo und der Akkumulatorenbatterie verbindet man die Sammelschiene, wenn möglich mit dem negativen Pole der Batterie, diese mit dem Galvanoskop und das Galvanoskop mit der Erde (Wasserleitungs- oder Gasrohr). Als Galvanoskop benutzt man am einfachsten ein Präzisionsmillivoltmeter von hohem Widerstande. Es fließen schwache Ströme aus A, D, E in die Erde, durch die Erde, das Galvanoskop zur Batterie zurück. Die Spannung der Meßbatterie muß der Betriebsspannung der Anlage möglichst nahe kommen. Denn die Erfahrung hat gelehrt, daß der Isolationswiderstand um so geringer ist, je höher die Netzspannung ist. Hat das Präzisionsvoltmeter einen Widerstand

von w Ohm und ist die Spannung der Meßbatterie E Volt, zeigt ferner das Voltmeter bei der beschriebenen Schaltung e Volt an, so ist der Isolationswiderstand, wie S. 267 gezeigt wurde,

$$X = w \frac{E - e}{e} = w \left(\frac{E}{e} - 1 \right) \text{ Ohm.}$$

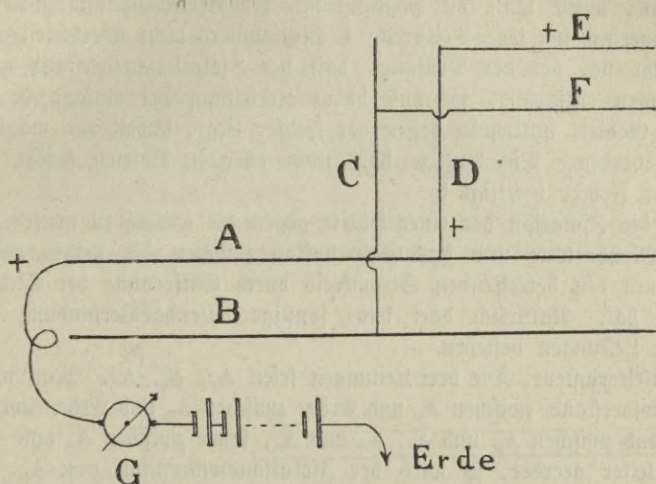


Fig. 165.

Auf diesem Prinzip beruht auch die Messung des Isolationswiderstandes mittels des Universalgalvanometers von Siemens & Halske. Man stöpft wie bei der Spannungsmessung bis zu 150 Volt (Loch 1 und y wird gestöpft). Da der Widerstand des Voltmeters 1000 Ohm beträgt, so hat man in der Formel

$$W = w \left(\frac{E}{e} - 1 \right)$$

$w = 1000$ zu setzen.

Wenn eben möglich, benutzt man für die Messung die Dynamo selbst, die, ehe man beginnt, bis zur Betriebsspannung erregt wird. Den einen Pol verbindet man mit der Erde, den anderen mit dem Galvanoskop. Einen hinlänglich langen Draht legt man in die noch freie Klemme des Galvanoskops und berührt mit dem freien Ende die einzelnen Leitungen nacheinander. Wenn möglich soll der negative Pol der Stromquelle an die zu messende Leitung gelegt werden, und die Messung soll erst erfolgen, nachdem die Leitung während einer Minute der Spannung ausgesetzt war.

Über die Höhe des Isolationswiderstandes gelten jetzt folgende Vorschriften.

1. Freileitungen. Bei feuchtem Wetter soll der Isolationswiderstand pro 1 km einfacher Länge betragen

- bei Niederspannungsanlagen (bis zu 250 Volt) 20 000 Ohm
- „ Mittelspannungsanlagen (250—1000 „) 100 000 „

Bei einer Drehstromanlage mit 1000 Volt Spannung zwischen zwei Leitungen und 10 km Streckenlänge muß also der Isolationswiderstand jeder Leitung gegen Erde mindestens 10 000 Ohm betragen.

2. Anlagen (Hausinstallationen zc.). Denkt man sich die Sicherungen herausgenommen, so zerfällt die Anlage in eine gewisse Anzahl von Teilstrecken. Es soll nun, wenn man die Messung mit der Betriebsspannung vornimmt, der Stromverlust für jede Teilstrecke 1 Milliampere nicht überschreiten.

Ergibt sich bei der Prüfung, daß der Isolationswiderstand nicht den Anforderungen entspricht, so muß durch Zerlegung der Anlage in kleinere Teile das Gebiet, innerhalb dessen der Fehler liegt, soweit wie möglich eingeschränkt werden. Die Anlage darf nicht eher in Betrieb gesetzt werden, als bis der Fehler beseitigt ist.

Um die Isolation der einen Hälfte gegen die andere zu messen, schaltet man die Meßbatterie und das Galvanoskop zwischen die beiden Leitungen, nachdem man den betreffenden Stromkreis durch Entfernung der Sicherungen abgetrennt hat. Natürlich darf keine sonstige leitende Verbindung zwischen den beiden Leitungen bestehen.

Dreileitersystem: Die drei Leitungen seien A_p , A_o , A_n . Man mißt den Isolationswiderstand zwischen A_p und Erde, zwischen A_n und Erde, zwischen A_o und Erde und zwischen A_p und A_o , A_n und A_o , sowie zwischen A_n und A_p . Ist der Mittelleiter geerdet, so wird der Isolationswiderstand von A_p und A_n gegen Erde und gegeneinander gemessen.

Wenn Wechselstromanlagen unter Strom stehen, so kann man unter Benutzung einer Meßbatterie die Messung ausführen, wenn das Galvanometer so eingerichtet ist, daß durch Wechselstrom eine Zeigerablenkung nicht bewirkt wird. Das Galvanometer verhält sich dann so, als ob nur der Gleichstrom vorhanden wäre. Man kann allerdings dann nur den Isolationswiderstand der ganzen Anlage, d. h. der Leitungsdrähte und der eingeschalteten Lampen zc. bestimmen.

Was den Isolationswiderstand der Stromquellen selbst anbelangt, so können wir uns kurz fassen. Es kommt in Betracht der Isolationswiderstand der Ankerspulen gegeneinander, des Ankers gegen Erde, der Elektromagnetwickelungen gegeneinander und gegen Erde zc. Als Stromquelle kann man, falls die Dynamo eine Nebenschluß- oder Verbundmaschine ist, diese Dynamo selbst benutzen.

Besondere Aufmerksamkeit ist der Isolation der Akkumulatorenbatterie zuzuwenden; bei dieser ist eine gute Isolation schwer zu erzielen. Nach der Methode von Liebenow verbindet man einen empfindlichen Strommesser mit der Erde und diesen zuerst mit dem einen und dann mit dem anderen Pole der Batterie. Findet man, daß die Ströme i_1 und i_2 zur Erde abfließen, so ist der Isolationswiderstand $W = \frac{E}{i_1 + i_2}$, wenn E die Klemmspannung der Batterie ist.

Wir warnen schließlich vor der Auffassung, man brauche bei der Isolationsprüfung nicht zu peinlich vorzugehen, einer Auffassung, der namentlich

Installateure aus Bequemlichkeitsgründen huldigen. Mit besonderer Vorsicht und Umsicht müssen besonders die elektrischen Anlagen in Wohn-, Lager- und Fabrikräumen untersucht werden. Denn gerade hier können kleine Ursachen oft große Wirkungen haben.

Fehlerbestimmungen in Leitungen. Ergibt die Prüfung einer Leitung, daß der Isolationswiderstand gegen Erde den Anforderungen nicht genügt, so muß, damit der Schaden ausgebessert werden kann, der Ort bestimmt werden, an dem der Fehler liegt. Prüft man den Isolationszustand der Hauptleitung und aller Abzweigungen — nach Abtrennung von der Hauptleitung zc. — nacheinander, so kann unter Umständen das Gebiet, innerhalb dessen sich der Fehler (Erdschluß) befindet, so eingeschränkt werden, daß andere Messungen nicht zu erfolgen brauchen.

Liegt der Fehler in einer langen Leitung, z. B. bei Kraftübertragungen in der Fernleitung, so kann der Ort, an dem sich der Erdschluß befindet,

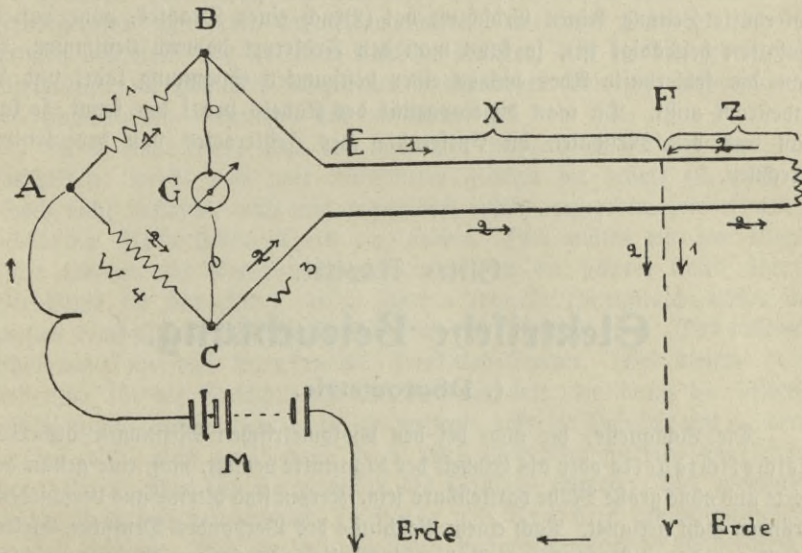


Fig. 166.

mittels der sogen. Schleifenmethode näher bestimmt werden. Wie man aus der Fig. 166, in der das Schaltungsschema dargestellt ist, ersehen kann, findet die Wheatstone'sche Brücke Anwendung. Das Ende der fehlerhaften Leitung wird mit dem Ende einer fehlerfreien — eine solche muß also vorhanden sein — verbunden. Aus dem Querschnitte, der Länge und dem spezifischen Widerstande berechnet man den Widerstand der ganzen fehlerhaften Leitung; dieser betrage w Ohm. Nennen wir den Widerstand von E bis F x und von F bis zum Ende z , so ist

$$w = x + z.$$

Der Widerstand der fehlerfreien Leitung inkl. des Widerstandes von C bis zu dieser Leitung, der bekannt sein, eventuell also in der eben angedeuteten Weise berechnet werden muß, betrage w_3 Ohm. Vergleicht man unsere Figur mit Fig. 12 auf S. 30, so erkennt man, daß F die vierte Ecke der Brücke ist, und diese ist durch den Leitungsmast und die Erde mit der Batterie verbunden. Ist die Brücke [stromlos, fließt also durch das Galvanometer kein Strom, so ist

$$w_1(w_3 + z) = w_4 \cdot x.$$

Setzt man hier $z = w - x$, so findet man

$$x = \frac{w_1(w_3 + w)}{w_1 + w_4}.$$

Aus dem Querschnitte der Leitung, dem spezifischen Widerstande und dem gefundenen Widerstande x kann man jetzt die Länge von EF berechnen.

Wenn bei Kabeln eine fehlerfreie Leitung nicht vorhanden ist und die fehlerhafte Leitung keinen Erdschluß hat (Bruch eines Drahtes, ohne daß die Isolation beschädigt ist), so kann man den Fehlerort dadurch bestimmen, daß man die fehlerhafte Ader bis zu einer bestimmten Spannung ladet und den Ladestrom mißt. Da man die Kapazität des Kabels pro 1 km kennt, so kann man aus den Meßdaten die Entfernung des Fehlerortes von der Zentrale berechnen.

Elftes Kapitel.

Elektrische Beleuchtung.

1. Photometrie.

Die Lichtquelle, die man bei den photometrischen Messungen als Vergleichslichtquelle oder als Einheit der Lichtstärke benutzt, muß eine genau definierte und ohne große Mühe darstellbare sein. Kerzen sind hierfür aus verschiedenen Gründen nicht geeignet. Nach einem Beschlusse des Verbandes Deutscher Elektrotechniker und des Vereins von Gas- und Wasserfachmännern ist in Deutschland als Lichteinheit bezw. als Etalon der Lichtstärke die Hefnerkerze eingeführt — abgekürzt 1 HK. Diese erhält man mittels der von v. Hefner-Alteneck vorgeschlagenen Amylazetatlampe, die von der Firma Siemens-Schuckert angefertigt wird. Das Amylazetat ist leicht in chemisch reinem Zustande erhältlich und kann leicht auf seine Reinheit geprüft werden¹⁾. Von einer Prüfung kann abgesehen werden, wenn man den genannten Brennstoff durch die Geschäftsstelle

¹⁾ Prüfung des Amylazetates: Spezifisches Gewicht bei 15° liegt zwischen 0,872 und 0,876; blaues Lackmuspapier darf nicht stark gerötet werden; gleiche Raunteile Benzin und Amylazetat müssen sich ohne Trübung mischen; ein Tropfen soll auf weißem Filtrierpapier verdunsten, ohne einen bleibenden Fettfleck zu hinterlassen.

des Vereins der Gas- und Wasserfachmänner in Karlsruhe bezieht. — Nach dem Anzünden der Lampe wartet man etwa 10 Minuten und stellt dann durch Drehung der Dochtschraube auf die richtige Flammenhöhe ein; diese soll 40 mm betragen. Zur Messung der Flammenhöhe bedient man sich am einfachsten des der Lampe beigegebenen Hefnerschen Flammenmaßes. Da die Leuchtkraft der Flamme durch Verunreinigungen der Luft, namentlich durch Kohlenäure, erheblich verringert wird, so muß der Raum, in dem die Messung erfolgt, sorgfältig gelüftet werden. Andererseits beeinträchtigt Zugluft in hohem Grade das ruhige Brennen und macht ein genaues Einstellen auf die richtige Flammenhöhe unmöglich. Nach der Messung muß man den sich während des Brennens bildenden braunen, dickflüssigen Rückstand durch Abwischen entfernen. Soll die Lampe längere Zeit unbenutzt bleiben, so gießt man das Amplatzetat aus und reinigt die Lampe gründlich.

Die Photometrie stützt sich auf ein bekanntes Gesetz der Optik, wonach die Helligkeit¹⁾, die durch eine Lichtquelle an verschiedenen Stellen des Raumes hervorgerufen wird (die Erleuchtungsstärke), mit dem Quadrate der Entfernung abnimmt. Es ist indes wohl zu beachten, daß bei den gebräuchlichen Lichtquellen die Helligkeit in gleichen Entfernungen von der Lichtquelle nach den verschiedenen Richtungen hin verschieden ist.

Das Auge kann, ohne daß wir einen Apparat zu Hilfe nehmen, wohl entscheiden, welche von zwei beleuchteten Flächen die hellere ist. Wir sind jedoch nicht imstande, auch nur angenähert richtig anzugeben, wie oftmal eine beleuchtete Fläche heller ist als eine andere. Hier müssen wir dem Auge zu Hilfe kommen und Apparate benutzen, die ihm ein sicheres Urtheil über das Verhältnis der Helligkeiten zweier Flächen oder der Intensitäten zweier Lichtquellen ermöglichen. Diesem Zwecke dienen die Photometer. Das bekannteste Photometer ist das Bunsensche Fettflecksphotometer. Bei diesem ist das Kriterium für die Gleichheit der Beleuchtungsstärke, die durch die beiden zu vergleichenden Lichtquellen — die zu messende und die Hefnerlampe — hervorgerufen wird, nicht ganz scharf, d. h. zwei Beobachter stimmen nur selten in ihrem Urtheile über das Verschwinden des Fettflecks überein. Viel zuverlässiger ist das Kriterium bei den von Lummer und Brodhun konstruirten Photometern, die wir, weil sie in technischen Laboratorien weite Verbreitung gefunden haben, ausführlicher beschreiben wollen. Das Prinzip des Gleichheitsphotometers von Lummer und Brodhun ist folgendes. Es sei *ade* in Fig. 167 ein durch ein Glasprisma parallel zur Grundfläche gelegter Schnitt. Das Prisma sei so geschliffen, daß in dem Schnitte ein Winkel ein rechter und die beiden anderen je 45° sind. Fällt ein Lichtstrahl *z*, senkrecht auf eine Kathetenfläche, so tritt er, ohne daß er gebrochen wird, in das Prisma ein.

¹⁾ Denkt man sich eine Fläche von 1 Quadratcentimeter Größe möglichst senkrecht zu den Lichtstrahlen an einem Orte des Raumes aufgestellt, so fällt auf diese eine gewisse Lichtmenge. Diese Lichtmenge kann man als die Helligkeit an dem betreffenden Orte ansehen.

Man kann nun aus dem Brechungsgesetze den Beweis herleiten, daß der die Hypotenusenfläche treffende Lichtstrahl total reflektiert wird, d. h. daß er sich an der Grenze Glas—Luft nicht, wie es in der Regel geschieht, derartig teilen kann, daß ein Teil in die Luft eintritt und der Rest an der Grenzfläche reflektiert wird. Würde also in dem Prisma kein Licht absorbiert, so wäre der austretende Strahl so stark wie der eintretende. Drückt man aber gegen die Hypotenusenfläche dort, wo unser Strahl die Fläche trifft, einen beliebig geformten Glaskörper fest auf oder kittet man ihn mittels Kanadabalsam, der durchsichtig ist und das Licht gerade so stark bricht wie Luft, auf die Hypotenusenfläche, so geht der Lichtstrahl weiter (z. B. x^1 in unserer Figur), ohne daß er seine Richtung ändert.

Es seien jetzt die beiden rechtwinkligen Dreiecke in Fig. 167 Schnitte durch zwei Glasprismen von der eben beschriebenen Gestalt, die durch die dünne Kanadabalsamschicht bc zusammenge kittet sein mögen. Es sind demnach ab und cd dünne Luftschichten. Ferner seien l und m zwei Schirme, die durch Lichtquellen beleuchtet werden. Da an der Oberfläche des Papiers das Licht diffus¹⁾ reflektiert wird, so gehen von l und m Strahlen nach allen möglichen Richtungen, also auch Strahlen, die senkrecht auf die Kathetenfläche oben bzw. rechts fallen. Von den drei gezeichneten Strahlen x, y, z geht nur der mittlere, nämlich der die Fläche bc treffende, ohne daß er seine Richtung ändert, durch die beiden Prismen hindurch, während die beiden anderen Strahlen y und z an der Hypotenusenfläche total reflektiert werden. Befindet sich also vor der unteren Kathetenfläche ein Auge, etwa in O ,

so erscheint diesem, wenn wir uns den Schirm m einstweilen entfernt denken, das Feld bc hell, während ihm die Felder ab und cd dunkel erscheinen. Jetzt wollen wir annehmen, daß nur die Fläche m Licht ausfende. Von den drei gezeichneten Strahlen x^1, y^1, z^1 geht nur der das Feld bc treffende x^1 in der ursprünglichen Richtung weiter, so daß also einem in O befindlichen Auge dieses Feld jetzt dunkel erscheint; die Strahlen y^1 und z^1 hingegen gelangen infolge der totalen Reflexion nach O . Die Umgebung des Feldes bc erscheint also dem Auge in O hell. Sind l und m leuchtende Flächen, so gelangen nach O von l her nur diejenigen Strahlen, die das Feld bc passiert haben und von m nur die total reflektierten Strahlen. Sind also l und m gleich helle Flächen, die von den Prismen denselben Abstand haben, so erscheint einem Auge, das von O aus nach $abcd$ hinblickt, die ganze

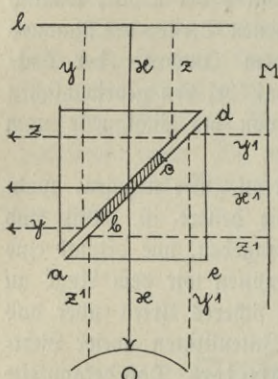


Fig. 167.

¹⁾ Bei der regelmäßigen Reflexion an einer ebenen Fläche wird ein Bündel paralleler Lichtstrahlen so zurückgeworfen, daß es nach der Reflexion wieder ein Bündel paralleler Lichtstrahlen bildet. Bei der diffusen Reflexion ist das nicht der Fall.

Fläche ad gleichmäßig hell. Daher der Name Gleichheitsphotometer. Die Hypotenusenfläche vertritt also hier den Papierschirm des Bunsenschen Photometers und bc den Fettfleck.

Statt der beschriebenen Prismenkombination verwenden Lummer und Brodhun folgende Anordnung. Die kugelförmige Oberfläche des Prismas A wird in der Mitte eben abgeschliffen und so fest gegen die Hypotenusenfläche des Prismas B gepreßt, daß eine innige Berührung erzielt wird. Ist nur der Licht ausfendende Schirm l vorhanden (Fig. 167), so sieht man von O aus in der dunklen Fläche ab einen hellen elliptischen Fleck.

Die mechanische Anordnung der einzelnen Teile ist folgende: in i_1 und i_2 (Fig. 168) sind die zu vergleichenden Lichtquellen; s ist ein undurchsichtiger Doppelschirm, etwa in der Weise hergestellt, daß man eine Pappdeckelscheibe beiderseits mit weißem Papier beklebt. Die linke Seite wird dann nur durch i_1 ,

die rechte nur durch i_2 beleuchtet. Die Helligkeit der linken Seite, die dem Schirme l der Fig. 167 entspricht, ist um so größer, je größer die Intensität der Lichtquelle i_1 und je kleiner ihr Abstand von dem Schirme ist. Entsprechendes gilt für die rechte Seite des Schirmes, die mit der leuchtenden Fläche m (Fig. 167) korrespondiert. Symmetrisch zu den leuchtenden Flächen l und m sind die Spiegel a und b angebracht. Durch den Spiegel a

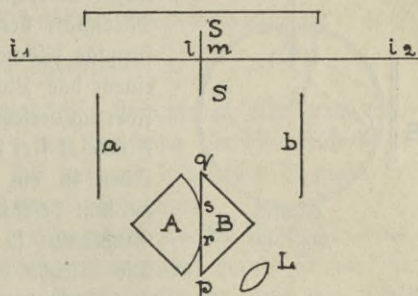


Fig. 168.

wird ein Teil der von l kommenden Strahlen auf das Prisma A geworfen; analoges gilt für b . Der Beobachter blickt durch eine Lupe L nach der Hypotenusenfläche hin und stellt scharf auf die Ränder des elliptischen Feldes ein. Ist i_1 die Vergleichslichtquelle (Amylazetatlampe) und i_2 die zu messende Lichtquelle, so verschiebt man i_2 so lange, bis das elliptische Feld und seine Umgebung gleich hell erscheinen, d. h. bis der Rand des Feldes verschwindet. Es betrage bei einer Messung der Abstand der Vergleichslichtquelle 50 cm, der der Lichtquelle X 175 cm, dann gilt die Proportion

$$1 \text{ HK} : X = 50^2 : 175^2, \text{ mithin } X = \left(\frac{175}{50} \right)^2 \text{ HK} = 12,25 \text{ HK}.$$

Die einzelnen Teile des Photometers sind bei dem von der Firma Hänisch & Schmidt in Berlin hergestellten Apparate so zusammengebaut, daß man dasselbe ohne weiteres auf die optische Bank schieben kann.

Bei den Kontrastphotometern stellt man nicht auf gleiche Helligkeit zweier Felder ein, sondern beurteilt, wann zwei Felder sich gleich deutlich von ihrer Umgebung abheben, d. h. gleich stark kontrastieren.

Wenn es sich um die genaue Photometrierung von Glühlampen handelt, so wird die Lampe auf einem Stativ befestigt. Dieses muß so eingerichtet sein, daß

man die Lampe sowohl um eine vertikale Achse drehen als auch aus der senkrechten Stellung in die wagerechte bringen kann; die Größe der vorgenommenen Drehung muß man an Skalen ablesen können.

Mißt man bei einer Glühlampe oder einer Bogenlampe die Lichtstärke nach allen möglichen Richtungen und bildet man aus den erhaltenen Werten das arithmetische Mittel, so erhält man die mittlere räumliche Lichtstärke. Die Bestimmung dieser Größe durch eine Messung ermöglicht das Kugelphotometer von Professor Ulbricht¹⁾. Es beruht auf folgendem Prinzip. Befindet sich innerhalb einer Hohlkugel, deren Innenwandung mit einer diffus reflektierenden Schicht bedeckt ist, z. B. aus einem Anstrich aus Kreide und Wasserglas, eine Lichtquelle, so sind infolge der diffusen Reflexion alle Teile der Kugel gleich hell, wie verschieden auch die direkte Beleuchtung der Kugelwandung verteilt sein möge. Die Kugel in Fig. 169 sei aus starkem, innen mattiertem Milchglase hergestellt und bis auf eine seitliche kreisförmige Fläche M von 11 cm Durchmesser innen mit einem das Licht nicht durchlassenden, matten, weißen Überzug versehen und außen mit einem ebenfalls nur die Fläche M frei lassenden geschwärzten Gehäuse umgeben. Oben ist ein Deckel angebracht, der ebenso wie die an ihm befestigten Halter für die Blende B und die Glühlampe L mit einem weißen Überzug versehen ist. Die Blende verhindert, daß direktes Licht auf die

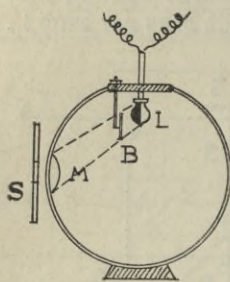


Fig. 169.

Öffnung M fällt; sie wird so gedreht, daß die auf sie fallenden Lichtstrahlen nicht wieder auf die Lichtquelle zurückgeworfen werden. S ist ein geschwärzter Schirm mit einer kreisförmigen Öffnung von 8 cm Durchmesser. Je größer die mittlere Intensität der Lichtquelle L ist, um so heller erscheint die Außenseite der Fläche M, um so größer ist die Helligkeit H der Schirmöffnung. Die Größe H, die nach einer der bekannten Methoden gemessen werden kann, ist proportional der gleichmäßigen Helligkeit auf der Innenseite der Kugelwandung, und diese letztere ist proportional der mittleren räumlichen Lichtintensität der Lichtquelle L. Da also $J = K \cdot H$, wo K eine für den Apparat charakteristische Konstante ist, so kann man J bestimmen.

Wenn es sich um die Messung sehr starker Lichtquellen handelt, so wird die Photometerbank, da der Abstand der Einheitslichtquelle von dem Photometer unter eine gewisse untere Grenze (etwa 30 cm) nicht heruntergehen darf, unbequem lang. Man bedient sich in solchen Fällen der Zwischenlichtquelle, gewöhnlich einer Glühlampe, deren Lichtstrom in horizontaler Richtung man genau bestimmt hat und die man mit konstanter vorgeschriebener Spannung brennen läßt.

Lichtstrom, Lumen. Es sei eine sehr kleine Kugel gleichmäßig bis zum Glühen erhitzt. Die Kugel, die wir als punktförmige Lichtquelle ansehen können,

¹⁾ G.-Z. 3. 1900, S. 595.

erscheint dem Auge an der ganzen Oberfläche gleichmäßig hell, oder die Lichtemission erfolgt nach den verschiedenen Richtungen des Raumes in derselben Weise. Denken wir uns um die punktförmige Lichtquelle eine Kugel mit dem Radius 1 cm beschrieben, so gelangt auf jedes cm^2 der Kugeloberfläche in derselben Zeit dieselbe Lichtmenge. Diese Lichtmenge kann man als Maß für die Intensität der Lichtquelle ansehen, bezeichnen wir sie mit J , so ist die gesamte von der Lichtquelle ausgehende Lichtmenge (in 1 Sekunde) gleich $4\pi J$, da die Kugel $4\pi \text{ cm}^2$ Oberfläche hat. Machen wir unser Quadratcentimeter zur Basis eines Kegels, dessen Spitze in dem leuchtenden Punkte liegt, so strömt das Licht, das auf unser Quadratcentimeter fällt, durch den erhaltenen körperlichen Winkel, und der Lichtstrom hat überall in dem Kegel die Stärke J . Der gesamte Lichtstrom ist also gleich $4\pi J$. Denken wir uns eine zweite konzentrische Kugel mit beliebigem Radius r (Zentimeter) beschrieben und den Mantel des eben definierten Kegels verlängert, bis er die neue Kugeloberfläche schneidet, so ist die herausgeschnittene Oberfläche r^2 Quadratcentimeter groß. Für 1 cm^2 der zweiten Kugel ist also der Lichtstrom $\frac{J}{r^2}$.

Wie schon bemerkt, senden die künstlichen Lichtquellen nicht nach allen Richtungen hin dieselbe Lichtmenge aus; der Lichtstrom für die verschiedenen körperlichen Winkel ist nicht konstant. Der gesamte Lichtstrom ist gleich der Summe der Lichtströme nach den verschiedenen Richtungen.

Eine punktförmige Lichtquelle hat die Intensität oder die Lichtstärke Cin , wenn ihre Lichtemission (nach den verschiedenen Richtungen) gerade so stark ist, wie die Lichtemission der richtig justierten Amylacetatlampe (d. h. die Lichtemission einer Hefnerkerze) in horizontaler Richtung. Diese Einheit nennt man kurz 1 Kerze. Eine solche punktförmige Lichtquelle sendet in den räumlichen Winkel Cin einen gewissen Lichtstrom, dem man den Namen 1 Lumen gegeben hat. Wenn die Einheit des Lichtstromes ganz auf die Flächeneinheit (1 cm^2) fällt, so wird auf dieser eine gewisse Stärke der Beleuchtung hervorgerufen; diese nennt man 1 Lux. Ist unsere Flächeneinheit (senkrecht zu dem Lichtstrome) 1 m weit von der Lichtquelle entfernt, so nennt man die durch 1 Lumen hervorgerufene Beleuchtungsstärke 1 Meterkerze.

Indizierte Helligkeit nennt man die an einer bestimmten Stelle des Raumes hervorgerufene Erleuchtungsstärke oder herrschende Helligkeit. Diese spielt eine wichtigere Rolle als die absolute Helligkeit der Lichtquellen. Demjenigen, der in einem Zeichensaale arbeitet, ist es höchst gleichgültig, wie groß die Intensität der einzelnen Lampen ist, wenn nur der Tisch gut beleuchtet ist. Die indizierte Helligkeit, die möglichst an allen Stellen des beleuchteten Raumes die gleiche sein soll, drückt man in Meterkerzen aus. Wir gelangen zu diesem Begriffe auch in folgender Weise: L sei eine Lichtquelle, A eine Stelle des Fußbodens oder der Tischplatte, deren indizierte Helligkeit man kennen will, die Entfernung von L bis O betrage r Meter. Löschen wir die Lichtquelle L aus, so können wir durch eine andere Lichtquelle, die wir uns 1 m senkrecht über A angebracht denken, dieselbe Helligkeit hervorrufen, wie sie durch die Lichtquelle L

erzeugt worden war. Müssen wir zu dem Zwecke eine Lichtquelle von m Hefnerkerzen anbringen, so sagen wir, die indizierte Helligkeit in A (hervorgerufen durch die Lichtquelle L) beträgt m Meterkerzen. Ist die Lichtquelle L Kerzen stark, und sendet sie nach allen Richtungen gleich viel Licht aus, so ist, wie man leicht nachweisen kann, die indizierte Helligkeit in A

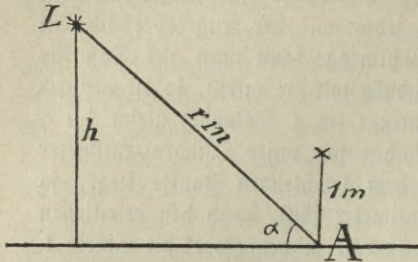


Fig. 170.

$$\text{gleich } \frac{L \cdot \cos(90 - \alpha)}{r^2} = \frac{L \cdot \sin \alpha}{r^2}.$$

Nach Cohn in Breslau soll die indizierte Helligkeit beim Lesen gewöhnlicher Druckschrift mindestens 50 Meterkerzen betragen.

Eine 16kerzige Glühlampe, die $\frac{1}{2}$ m Abstand von dem Papier hat, genügt also vollständig.

Unter dem Glanze einer Lichtquelle versteht man die von der Flächeneinheit ausgestrahlte Lichtmenge. Auch wenn der Glanz eines glühenden Körpers überall an der Oberfläche konstant ist, kann die Lichtemission nach den verschiedenen Richtungen des Raumes verschieden groß sein. Ein horizontal gespannter, glühender Draht z. B., dessen Oberfläche konstante Temperatur hat, sendet in horizontaler Richtung mehr Licht aus als in der Verlängerung der Achse. Es ist die Aufgabe der diffus reflektierenden Flächen (Schirme u. dergl.), die Helligkeitsunterschiede mehr auszugleichen.

2. Glühlampen.

Der wirksame Bestandteil einer Glühlampe ist der Kohlenfaden. Wir wollen uns nun, bevor wir auf die Herstellung der Glühlampe näher eingehen, mit der Frage beschäftigen, warum sich die Kohle besonders gut für die Lichterzeugung in Glühlampen eignet.

Jeder Körper sendet, wenn man ihn bis zu einer gewissen Temperatur erhitzt, neben Wärmestrahlen Lichtstrahlen aus. Erfolgt die Erhitzung oder Energiezufuhr durch einen elektrischen Strom, so stellt der Wärme und Licht ausstrahlende Körper gleichsam einen Energieumformer dar: man führt ihm elektrische Energie zu, und er gibt strahlende Energie ab. Nennen wir diejenige elektrische Energie, bezogen auf 1 Sekunde, die in Lichtstrahlen umgewandelt wird, q_1 und die der nicht wirksamen Strahlung entsprechende q_2 , so kann man

$\frac{q_1}{q_1 + q_2}$ den Wirkungsgrad der Lichtquelle nennen; $q_1 + q_2$ ist natürlich

auch die zugeführte elektrische Leistung. Der Wirkungsgrad hängt von der Beschaffenheit der leuchtenden Substanz und von der Temperatur ab, bis zu der man den Leuchtkörper erhitzt. Nach den Untersuchungen von Zummer und Pringsheim¹⁾ wächst die Gesamthelligkeit einer glühenden Substanz oder

¹⁾ Siehe G.-T. 3. 1902, S. 812.

die wirksame Strahlung, die von der Flächeneinheit der Oberfläche ausgeht, außerordentlich schnell mit der absoluten Temperatur* (s. S. 26, Fußnote). Bezeichnen wir die Helligkeit bei der absoluten Temperatur T_1 mit H_1 und bei T_2 mit H_2 , so ist

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^x.$$

In der Nähe der Rotglut ($T = 900^\circ$) ist für einen absolut schwarzen Körper, d. h. für einen Körper, der die auf ihn fallenden Strahlen jeder Wellenlänge weder reflektiert noch durchläßt, also alle Strahlen ganz absorbiert, $x = 30$, in der Nähe von 1400° absolut ist x noch nahezu gleich 18; mit steigender Temperatur nähert sich x höchst wahrscheinlich dem Grenzwerte 12. Erhöht man also die Temperatur des schwarzen Leuchtkörpers von 2000° auf 4000° (absolut), so steigt seine Helligkeit von 1 auf 2^{12} oder von 1 auf nahezu 5000. Allerdings muß man, wenn man die Temperatur steigern will, auch die Energiezufuhr, in unserem speziellen Falle die Wattzahl, erhöhen. Da aber die Energiezufuhr in einem viel langsameren Tempo steigt als die 12. Potenz der Temperatur, so folgt, daß der Wirkungsgrad durch Temperaturerhöhung wesentlich günstiger wird. Wenn man z. B. eine 45 Volt-Lampe bei 95 Volt Spannung brennen läßt, so verbraucht sie 285 Watt; das ist 5mal soviel wie im normalen Brennzustande, bei dem sie 16 Kerzen liefert. Die Temperatur des Glühfadens wird von dem genannten Forscher bei 95 Volt zu 3000° geschätzt. Die überhitzte Lampe sendet also, da die Temperatur im Normalzustande etwa 2000° beträgt, $\left(\frac{3000}{2000} \right)^{12} \cong 130$ mal mehr Licht aus, als wenn sie mit 45 Volt brennt. Der Energiesteigerung von 1 zu 5 steht demnach eine Helligkeitsvermehrung von 1 auf 130 gegenüber oder eine Ökonomieerhöhung von 1 auf 26 (Lummer, l. c.).

In bezug auf die Temperaturerhöhung ist uns von der Natur eine Grenze gezogen; wir dürfen nämlich in der Praxis den Schmelzpunkt des Leuchtkörpers nicht erreichen. Da der Schmelzpunkt der Kohle weit über dem der Metalle, ja, wir dürfen wohl sagen, weit über dem fast aller anderen Substanzen liegt, so eignet sich der Kohlenstoff ausgezeichnet als Leuchtkörper.

Wenn man bei verschiedenen Leuchtkörpern die Temperatur erhöht, so wächst bei allen der Wirkungsgrad; am meisten wächst er aber bei dem absolut schwarzen Körper. Da nun Kohle dem absolut schwarzen Körper nahekommt, so ist auch aus diesem Grunde Kohle für die Lichterzeugung besonders geeignet.

Endlich hat die Kohle die wertvolle Eigenschaft, auch bei gewöhnlicher Temperatur den elektrischen Strom zu leiten, so daß eine Vorwärmung, wie sie bei der Nernst'schen Lampe erfolgen muß, überflüssig ist.

Fabrikation. Früher stellte man den Glühfaden aus Kartonpapier, Bambusfasern u. dergl. her; jetzt benutzt man meistens Zellulose. Man behandelt reine Baumwolle mit Schwefelsäure. Der erhaltene Brei wird längere Zeit gewässert und dann durchgeknetet. Die Masse wird durch eine enge Düse,

deren Öffnung einen vorgeschriebenen Durchmesser hat, getrieben. Um den Fäden die gewünschte Form zu geben, wickelt man sie auf Graphitblöcke. Das Verkohlen erfolgt in Graphittiegeln unter Luftabschluß in den sogen. Karbonisieröfen. Man beginnt mit einer Temperatur von etwa 300° (Entweichen der Feuchtigkeit) und steigert allmählich die Temperatur.

Der Faden muß in seiner ganzen Länge überall denselben Durchmesser haben. Ist er nämlich an irgendeiner Stelle dünner, so setzt diese Stelle dem Strome einen größeren Widerstand entgegen; die Folge ist, daß diese Stelle stärker erhitzt wird und leichter durchbrennt. Um gleichmäßigen Durchmesser zu erzielen, bringt man den Faden in einen mit Kohlenwasserstoffgasen angefüllten Raum und erhitzt ihn mittels des elektrischen Stromes. Durch die Hitze werden die Kohlenwasserstoffverbindungen in der Nähe des Fadens dissoziiert (zerlegt), und zwar wird graphitischer Kohlenstoff frei; dieser schlägt sich auf dem Faden nieder. Die Ablagerung des Kohlenstoffes erfolgt offenbar an den Stellen am stärksten, welche die höchste Temperatur besitzen, und das sind ja gerade die dünnsten Stellen des Fadens. Durch den graphitischen Kohlenstoff wird die Oberfläche glatt und dicht und die Elastizität des Fadens erhöht; außerdem wird der Faden widerstandsfähiger gegen das Zerstäuben. Das eben beschriebene Verfahren nennt man die Präparatur.

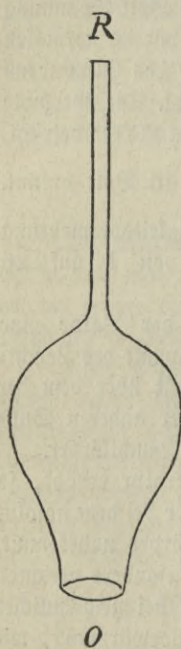


Fig. 171.

Die fertigen Glühfäden werden in das Innere eines Glasgefäßes (Birne, Kugel etc.) geschoben. Damit man nun den elektrischen Strom der Lampe zuführen kann, muß man in die Gefäßwand zwei Drähte einsetzen. Das durch die Wand hindurchgehende Metall muß denselben Ausdehnungskoeffizienten haben wie das Glas selbst; wenn das nämlich nicht der Fall ist, so wird sich der Zusammenhang zwischen Glas und Metall lockern und Luft in das Innere des Glasballons eindringen. Da sich Platin von den Metallen allein fast genau so stark bei der Erwärmung ausdehnt wie Glas, so ist man trotz des hohen Preises dieses Metalles auf seine Verwendung angewiesen. Um mit möglichst wenig Platin auszukommen, verlängert man die Platindrähte nach der einen Seite durch Nickeldrähte, nach der anderen durch Kupferdrähte. Die Verbindung zwischen den Zuleitungsdrähten und dem Kohlenfaden wurde früher in der Weise bewerkstelligt, daß man auf elektrolytischem Wege eine dünne Kupferschicht erzeugte. Jetzt bringt man unter Petroleum, Benzol u. dergl. ein kurzes Stück des Fadens zum Glühen, indem man den Faden dicht unter der Verbindungsstelle kurzschließt. Durch

die Hitze wird aus der Kohlenwasserstoffverbindung Kohlenstoff ausgeschieden, der sich auf dem glühenden Teile niederschlägt und eine gut leitende Verbindung herstellt. — Aus technischen Gründen werden die Platindrähte nicht in die Wand der Birne selbst eingefügt, sondern in einen

Glasstöpsel. Dieser wird an die Birne bei O (Fig. 171) angeschmolzen, nachdem der Faden nebst Zuleitungsdrähten durch die Öffnung geschoben worden ist.

Das Ansaßrohr R wird jetzt mit der Luftpumpe verbunden. Die Evakuierung hat hauptsächlich den Zweck, Luftsaurestoff zu entfernen. Dieser würde sich mit dem glühenden Faden zu Kohlensäure verbinden. Bei der Evakuierung bedient man sich vielfach der Quecksilberluftpumpe. Verrenberg hat vor einigen Jahren die mechanische Luftpumpe (mit Kolben) verbessert, indem er den Stempel, um gute Abdichtung zu erzielen, durch eine Ölsäule vorwärts drückt¹⁾. Die neue Pumpe soll hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Güte der Quecksilberluftpumpe überlegen sein. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft bringt in das Ansaßrohr etwas Phosphor. Dieser verbindet sich mit dem etwa noch vorhandenen Sauerstoff. Die entstandene Phosphorsäure schlägt sich als durchsichtige, sehr dünne Schicht auf der Wand der Birne nieder. Nachdem die Evakuierung beendet ist, wird das Ansaßrohr dicht über der Birne abgeschmolzen. Die Lampe wird jetzt in den Lampensockel oder Lampenfuß eingesetzt. Der Edisonsche Fuß besteht aus einem mit einem Gewinde versehenen Teile und dem Boden. An diese beiden Teile, die gegeneinander isoliert sind, werden die aus der Birne herausragenden Zuleitungsdrähte befestigt. Der Zwischenraum zwischen Birne und Sockel wird durch Gips oder eine Mischung von Gips, Glycerin und Bleiglätte ausgefüllt.

Die Sortierung der fertigen Glühlampe besteht hauptsächlich darin, daß man die Spannung bestimmt, bei der die Lampe eine bestimmte Lichtstärke hat. Spannung und Kerzenzahl werden auf der Lampe angegeben.

Die Prüfung der Glühlampen erstreckt sich auf den Kohlenfaden, das Vakuum, den Effektverbrauch pro Kerze bei der angegebenen Spannung und die Lebensdauer. Bei der Prüfung des Fadens läßt man die Lampe im Dunkeln mit etwa der halben Spannung brennen, am einfachsten in der Weise, daß man zwei Lampen hintereinander schaltet und das Paar der vollen Lampenspannung aussetzt. Dünnere Stellen des Fadens erscheinen als heller leuchtende Stellen. Um das Vakuum zu prüfen, versetzt man den Kohlenfaden in Schwingungen; ist die Evakuierung mangelhaft, so werden die Schwingungen infolge der Reibung schnell matter. Will man eine genauere Untersuchung des Vakuums vornehmen, so kann man sich eines Induktionsapparates bedienen, den man auf etwa 1 cm Funkenlänge einreguliert hat. Man umfaßt die Glasbirne, bringt den einen Pol des Sockels in Berührung mit dem einen Pole des Induktors und berührt den anderen Pol des Induktors mit der Hand, leitet ihn also zur Erde ab. Bei einer sehr gut evakuierten Lampe beobachtet man weder Fluoreszenz des Glases noch ein Leuchten im Innern der Lampe; ist das Vakuum schlecht, so leuchtet die Lampe ähnlich wie eine Geißlerische Röhre.

Die beste Methode, die Güte eines Fabrikates festzustellen, besteht darin, daß man die Lebensdauer, ferner durch zeitweiliges Photometrieren die

¹⁾ Siehe G.-Z. 3. 1900, S. 214.

Abnahme der Leuchtkraft bestimmt; die Spannung hält man möglichst konstant und mißt von Zeit zu Zeit die Stromstärke. Will man die Verhältnisse, wie sie in der Praxis herrschen, möglichst genau nachahmen, so schaltet man die Lampe, nachdem sie einige Stunden gebrannt hat, aus und schaltet sie wieder ein, wenn sich die Glasbirne ganz abgekühlt hat.

Lampenspannung. Soll eine Lampe eine ihrem Preise angemessene Anzahl von Stunden brennen, so darf der durch den Glühfaden fließende Strom — wenigstens für längere Zeit — einen gewissen Betrag nicht übersteigen, oder die Temperatur des Fadens darf über eine gewisse Höhe nicht hinausgehen. Die betreffende Stromstärke wollen wir mit i bezeichnen. Wenn der stationäre Zustand eingetreten ist, hat der Glühfaden einen gewissen Widerstand, der w Ohm betragen möge. Die normale Spannung zwischen den Polen der Lampe hat also den Wert $i \cdot w$ Volt. Herrscht umgekehrt an den Enden des Glühfadens oder an den Enden der Zuführungsdrähte die Spannung $i \cdot w$ Volt, so fließt durch die Lampe ein Strom von der gewünschten Stärke. Es genügt also, zu wissen, bei wieviel Volt Spannung die Lampe brennen soll. Diese Spannung wird auf dem Sockel angegeben. Eine 110 Volt-Lampe darf man natürlich nicht mit einer Stromquelle von 220 Volt Klemmspannung verbinden oder an ein Netz von 220 Volt Spannung anschließen. Die Lampe würde zwar sehr hell brennen, aber nach kurzer Brenndauer zerstört sein¹⁾. Schaltet man aber zwei 110 Volt-Lampen hintereinander oder vor eine Lampe einen Widerstand von w Ohm, so wird die Lampenspannung auf den richtigen Betrag reduziert. Auch verhältnismäßig geringe Spannungserhöhungen sind der Lampe schädlich. Denn der Widerstand des Glühfadens hängt in hohem Maße von der Temperatur ab. Wenn die Lampe normal brennt, so ist w etwa nur halb so groß wie bei gewöhnlicher Temperatur. Steigt also die Lampenspannung, so nimmt der Strom zu, nicht nur weil E größer wird, sondern auch weil w kleiner wird.

Altersbeschlag. Man beobachtet bei Glühlampen, daß sich nach einer größeren Anzahl von Brennstunden auf der Innenseite der Glasseite ein dunkler Niederschlag bildet; diesen nennt man den Altersbeschlag. Er besteht aus Substanz in feinst verteiletem Zustande, die sich von den in der Birne eingeschlossenen Leitern, hauptsächlich von dem Kohlenfaden, abgelöst hat. Über die Entstehung des Altersbeschlags sind verschiedene Hypothesen aufgestellt worden. Nach Berliner²⁾ kommt der Altersbeschlag folgendermaßen zustande. Ein Teil der von dem Kohlenfaden absorbierten Gase wird auch bei sorgfältigstem Evakuieren im Innern des Fadens verbleiben. Brennt die Lampe, so dehnen sich die Gase aus, entweichen und reißen sehr kleine Kohleteilchen

¹⁾ Nach D. Sumner hat eine Glühlampe im Normalzustande eine Temperatur von etwa 2000° abs. (zirka 1700° Cels.). Das Zerplagen soll nach Messungen von Holborn und Kurlbaum im Durchschnitt bei rund 3000° abs. erfolgen und tritt, wenn man die Spannung verdoppelt, nach kurzer Zeit ein.

²⁾ Wiedemanns Annalen 1888, S. 289.

mit sich. Kühlt sich der Faden nach dem Ausschalten ab, so werden die freigewordenen Gase wieder absorbiert; der Vorgang wiederholt sich beim nächsten Einschalten. Diese am weitesten verbreitete Ansicht Berliner's scheint deshalb nicht zutreffend zu sein, weil sich der Altersbeschlag bei Lampen, die ohne Unterbrechung brennen, fast gerade so schnell bildet wie bei Lampen, die oft aus- und eingeschaltet werden. Nach Moissan ist der Altersbeschlag auf eine sehr langsame Verdampfung zurückzuführen. J. Stark¹⁾ ist der Ansicht, daß der Altersbeschlag durch vagabundierende Ströme verursacht werde. Zwei beliebige Punkte des Glühfadens a und b, etwa die beiden Endpunkte, haben verschiedene Potentiale. Es ist nun bekannt, daß in stark verdünnten und erhitzten Gasen leicht elektrische Entladungen erfolgen, wenn man eine Potentialdifferenz herstellt. Stark hat durch Versuche festgestellt, daß innerhalb der Glasbirne einer Glühlampe an zwei beliebigen Punkten eine Potentialdifferenz besteht. Es liegt daher die Vermutung nahe, daß die Elektrizität von a nach b nicht nur durch den Faden überströmt, sondern auch durch die verdünnten Gase. Berücksichtigt man endlich, daß in Entladungsröhren (Crookes'schen, Röntgenröhren) eine Zerstäubung der Metallelektroden erfolgt, so erkennt man, daß die Zerstäubung der Kohle durch die vagabundierenden Ströme verursacht werden kann.

Ökonomie. Der spezifische Energieverbrauch einer Lichtquelle wird bei der Besprechung der Bogenlampen näher erklärt werden. Vorläufig wollen wir unseren Begriff definieren als das Verhältnis zwischen der Wattzahl und der Lichtstärke. Wenn z. B. eine Glühlampe als 16kerzige photometriert ist und sie bei 110 Volt Spannung 0,5 Amp. verbraucht, so ist der spezifische Verbrauch $\frac{110 \cdot 0,5}{16} = 3,4$ Watt. Am günstigsten ist der spezifische Ver-

brauch bei neuen Lampen. Bei erstklassigen Glühlampen für 110 Volt ist der anfängliche spezifische Verbrauch etwa 3,3 Watt. Glühlampen für 220 Volt verbrauchen etwa $\frac{1}{3}$ Watt pro Kerze mehr als solche für 110 Volt. Die Wattzahl pro Kerze steigt im Laufe der Zeit um zirka 40% der anfänglichen. Für die Abnahme der Ökonomie der Lampe mit der Brenndauer kann man zwei Gründe anführen. Erstens absorbiert der im Laufe der Zeit immer dunkler werdende Altersbeschlag Licht. Zweitens nimmt der elektrische Widerstand des Fadens langsam zu, da sein Querschnitt allmählich kleiner wird. Da man die Lampe aber immer mit derselben Spannung brennen läßt, so verringert sich die Stromstärke und mit dieser die Temperatur des Fadens. Geringe Temperaturerniedrigungen haben aber große Abnahmen der Helligkeit zur Folge. Denn die Helligkeit ist nach Lummer proportional der zwölften Potenz der absoluten Temperatur. Obschon die Helligkeit des Fadens und der Stromverbrauch kleiner werden, so wird die Ökonomie ungünstiger, weil die Leuchtkraft in einem schnelleren Tempo herabgeht als der Stromverbrauch. Es ist daher ratsam, Lampen durch neue zu ersetzen, auch wenn ihre Leuchtkraft noch

¹⁾ G.-Z. 3. 1900, S. 152.

nicht so stark abgenommen hat, daß man sie als unbrauchbar bezeichnen muß. Je höher der Preis für die Kilowattstunde ist, desto eher wird man zweckmäßig die Auswechslung vornehmen.

Läßt man eine Glühlampe mit Überspannung¹⁾, d. h. mit einer höheren als der angegebenen Spannung, brennen, so steigt die Ökonomie, wie wir gesehen haben, sehr schnell, allerdings auf Kosten der Lebensdauer. Nach Sumner ist es schon heute von größerem Nutzen, drei überhitzte Glühlampen von nur je 300 Stunden Brenndauer anzuwenden als eine normal brennende Glühlampe von 900 Brennstunden Lebensdauer. Je geringer allerdings der Preis für die elektrische Energie ist, um so kleiner wird dieser Nutzen.

Der Wirkungsgrad der Glühlampen beträgt 3—5 %; es werden also 95—97 % der der Lampe zugeführten Energie in Wärmestrahlen umgewandelt.

Lebensdauer. Die Glühlampen brennen, da auch bei normaler Stromzufuhr, wie schon erwähnt, eine langsame Zerstäubung der Glühfäden erfolgt, nur eine gewisse Anzahl von Stunden. Man kann wohl bei Fabrikaten solider Firmen durchschnittlich 600 Brennstunden rechnen. Einzelne Lampen brennen sofort oder kurze Zeit nach dem Einschrauben durch, andere haben eine Lebensdauer von 1000 und mehr Stunden. 220 Volt-Lampen haben eine geringere Durchschnittsbrenndauer als Glühlampen für 110 Volt. Bei Lampen, die im Freien brennen, ist sorgfältig darauf zu achten, daß die Lampe trocken bleibt, weil sonst der Gips des Sockels feucht wird und sich ein Kurzschluss bilden kann.

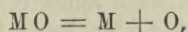
Vorzüge. Hier ist vor allem die große Bequemlichkeit im Gebrauche zu erwähnen. Diese ermöglicht in manchen Fällen, den auf die Brennstunde bezogenen höheren Preis (im Vergleich zur Gasbeleuchtung) zu kompensieren, ja sogar gegenüber anderen Beleuchtungsarten Ersparnisse zu erzielen, indem man nämlich die Lampe nur dann brennen läßt, wenn man Licht nötig hat. Bei Gasbeleuchtung wird man wegen des lästigen Anzündens die Flamme brennen lassen, auch wenn man zeitweise kein Licht nötig hat, z. B. in einem Warenlager. Wenn ferner eine Glühlampe die in ihr erzeugte Wärme nach allen Richtungen frei ausstrahlen kann, so wird sie niemals so heiß, daß man sie nicht mit der Hand anfassen könnte. Aus diesem Grunde kann man Glühlampen überall anbringen (in Schaufenstern etc.). Bei sorgfältiger Montage muß man eine Glühlampenanlage als mindestens ebenso feuersicher bezeichnen wie eine Anlage für Gasbeleuchtung (Gasexplosionen). Sodann ermöglicht die Glühlampenbeleuchtung eine sehr weitgehende Teilung des Lichtes; zumal man Lampen von den verschiedensten Kerzenstärken (5, 10, 16, 25 etc.) anfertigt. Vor der Gasglühlichtbeleuchtung zeichnet sich das elektrische Glühlicht in sanitärer Hinsicht aus: 1. wegen der geringen Wärmeentwicklung, 2. weil sich keine Verbrennungsgase (Kohlensäure, Kohlenoxyd) bilden. Endlich ist zu erwähnen, daß sich die elektrische Glühlampe wie keine andere Lichtquelle für Effekt- und Reklamebeleuchtung eignet.

¹⁾ Über diesbezügliche Messungen s. Gl. N. 1903, Nr. 10.

3. Die Nernst'sche Lampe.

Es wurde schon hervorgehoben, daß der Wirkungsgrad oder die Ökonomie einer Lichtquelle sehr schnell mit der Temperatur steigt, daß man aber mit Rücksicht auf die Lebensdauer die Erhitzung eines Kohlenfadens nicht viel weiter treiben kann, als es jetzt geschieht. Entsprechendes gilt für fast alle Leiter erster Klasse. Sie sind daher für die Herstellung einer Lichtquelle von günstiger Ökonomie nicht geeignet. Der Wirkungsgrad der gewöhnlichen Glühlampen ist, wie bereits erwähnt wurde, ein sehr niedriger (s. S. 326). Man muß also, so ungefähr schloß Nernst, wenn man eine günstigere Umwandlung der elektrischen Energie in Lichtenergie als es bei den gewöhnlichen Glühlampen geschieht, erzielen will, seine Zuflucht zu den hitzebeständigen Leitern zweiter Klasse nehmen. Es kommen hier hauptsächlich die Oxide des Magnesiums, das sogen. Magnesia, ferner die Oxide der seltenen Erden (Thoroxyd, Zirkonoxyd etc.) in Betracht. Diese Substanzen, die zu den Elektrolyten gehören, leiten bei gewöhnlicher Temperatur den elektrischen Strom sozusagen gar nicht, sie sind zu den Isolatoren zu rechnen; bei höheren Temperaturen aber werden sie zu überraschend guten Leitern der Elektrizität.

Der Nernst'sche Glühkörper ist ein aus einer porzellanähnlichen Masse geformtes Stäbchen, das beispielsweise für 200 Volt Lampenspannung und $\frac{1}{4}$ Amp. Stromstärke 20 mm lang und nur 0,4 mm dick ist. Das Stäbchen wird an beiden Enden mit einem sehr feinen Platindrahte umwickelt; die Umwickelungsstelle wird mit einer Paste überdeckt, die aus dem gleichen Materiale besteht, wie das Stäbchen. Die Platindrähte werden andererseits mit den Zuleitungsdrähten verbunden. Der Glühkörper braucht, da er aus Oxiden zusammengesetzt ist, nicht in ein Vakuum eingeschlossen zu werden. Das Einschließen in ein Vakuum würde ihm sogar schädlich sein. Wenn nämlich der Glühkörper den Strom leitet, so erfolgt Elektrolyse nach dem Schema



wo M das mit Sauerstoff verbundene Element bedeutet. Der Sauerstoff entweicht an dem einen Ende; das an dem anderen Ende des Glühkörpers frei gewordene Element verbindet sich mit Luftsaauerstoff, ein Vorgang, der durch die herrschende hohe Temperatur begünstigt wird. Wäre der Glühkörper von der Luft abgeschlossen, so würde die Regenerierung des durch den Strom zerlegten MO nicht erfolgen können und der Glühkörper in kurzer Zeit zerstört werden.

Da der Elektrolyt-Glühkörper bei gewöhnlicher Temperatur den Strom nicht leitet, so muß eine Vorwärmung erfolgen. Für diese ist eine ganze Reihe von Methoden in Vorschlag gebracht worden. Am einfachsten ist natürlich die Vorwärmung mittels einer Flamme (Spiritusflamme etc.). Von den selbsttätigen Vorwärmungsmethoden hat die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin die folgende ausgewählt. Man bildet aus sehr dünnem Platindrahte eine Spirale (s. Fig. 172) und überzieht diese, um sie vor der enormen Hitze

des Glühkörpers zu schützen, mit einer dünnen Schicht feuerfesten Materials. Die den Glühkörper in weiten Windungen umgebende Heizspirale wird mit dem Glühkörper parallel geschaltet. Durch die in dem Platindrahte erzeugte Stromwärme wird der Glühkörper in etwa 20—30 Sekunden so stark erhitzt, daß er den Strom leitet. Wenn letzteres der Fall ist, muß der Heizkörper ausgeschaltet werden. Dieses geschieht mittels eines im Lampensockel untergebrachten kleinen

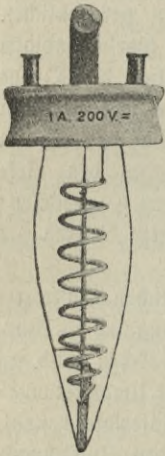


Fig. 172.

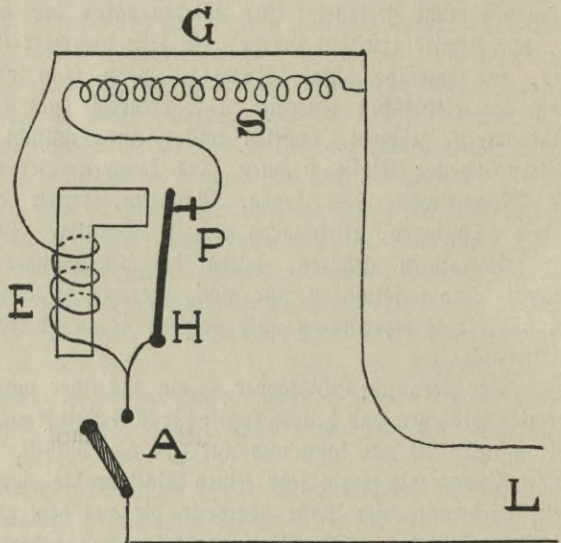


Fig. 173.

Elektromagnets, der mit dem Glühkörper in Serie geschaltet ist. Die Schaltung ist in Fig. 173 schematisch dargestellt. G ist der Glühkörper, S die Heizspirale, E der Elektromagnet. Der drehbare Anker H muß, sobald die Lampe ausgeschaltet wird, durch eine Feder oder durch die Schwerkraft in die in der Figur gezeichnete Lage zurückgeführt werden. Schließt man den Ausschalter A, so fließt zunächst, da G den Strom nicht leitet, nur durch S Elektrizität; durch S wird G vorgewärmt. Bei etwa 800° fließt durch G ein so starker Strom, daß weitere Vorwärmung überflüssig ist. Der Anker H wird angezogen und infolgedessen zwischen den feststehenden Kontakt P und den Anker eine Luftstrecke eingeschaltet; S ist also ausgeschaltet.

Ein wichtiger Bestandteil der Kernst-Lampe ist der Vorschaltwiderstand. Wenn man den durch einen gegebenen Glühkörper fließenden Strom schwächt oder die Spannung erniedrigt, so findet man, daß unterhalb einer gewissen Spannung der Glühkörper erlischt¹⁾. Dieses Verhalten des Glühkörpers ist eine Folge des Umstandes, daß der Leitungswiderstand der Elektrolyte, die hier in Frage kommen, mit der Temperatur schnell sinkt: Nimmt also

¹⁾ Siehe G.-L. 3. 1903, S. 281.

der Strom ab, so sinkt die Temperatur, der Widerstand wächst, die Stromstärke fällt nochmals ab u. Steigert man aber die Spannung bei einem lichtausstrahlenden Glühkörper, so wächst die Stromstärke sehr schnell, weil der Widerstand abnimmt. So z. B. fand J. A. Wurts¹⁾ bei einem Elektrolytglühkörper, der in atmosphärischer Luft brannte, daß bei

einer Spannung von 180 Volt die Stromstärke 3 Amp.
" " " 190 " " " 3,7 "
" " " 193 " " " 5 " betrug.

Hat man die Spannung bis zu einer gewissen Höhe gesteigert, so beobachtet man, daß ohne jede weitere Änderung der Spannung die Stromstärke zuerst langsam, dann schnell zunimmt, bis sie so hoch steigt, daß der Glühkörper durchbrennt. Es gibt daher für jeden Elektrolytglühkörper eine gewisse Spannung, die nicht erreicht werden darf, wenn eine Zerstörung vermieden werden soll. Diese Spannung nennt man die kritische Spannung. Die Differenz zwischen dieser und der Spannung, bei welcher der Glühkörper brennen soll, ist relativ klein und befindet sich innerhalb der Grenzen der Spannungserhöhungen, die auch bei gut bedienten elektrischen Anlagen vorkommen können. Bei einem direkt an ein Leitungsnetz einer Zentrale angeschlossenen Kernstichen Glühkörper ist also die Gefahr vorhanden, daß er infolge zu starken Stromes durchbrennt. Diese Gefahr wird bedeutend verringert, wenn man vor den Glühkörper einen Widerstand schaltet, der einen hohen positiven Temperaturkoeffizient hat. Hierfür benutzt man Eisen. Da sich dieses besonders bei stärkerer Erwärmung mit Sauerstoff verbindet, so wird der Eisenwiderstand in ein mit einem indifferenten Gase (Wasserstoff, Stickstoff) angefülltes Gefäß eingeschlossen (s. Fig. 174). Ist ein Eisendraht mit einem Elektrolytglühkörper in Serie geschaltet, und wächst die Netzspannung, so wird zunächst die Stromstärke größer; die Temperatur des Vorschaltwiderstandes steigt und sein Widerstand wächst; mithin wächst der Spannungsverlust in dem Eisendrahte aus zwei Gründen. Durch passende Wahl des Vorschaltwiderstandes kann man erreichen, daß innerhalb gewisser Grenzen Erhöhungen der Netzspannung von dem Eisendrahte fast ganz aufgenommen werden. Es ist klar, daß, falls der Vorschaltwiderstand seine Aufgabe gut erfüllen soll, er schnell auf Stromänderungen reagieren muß, d. h. daß der spezif. Widerstand in ihm bei zunehmender Netzspannung schnell wachsen muß. Dies ist der Fall, wenn er bei genügend großem Widerstand eine kleine Masse hat.

Eine Kernst-Lampe mit Vorschaltwiderstand für 220 Volt brennt zwischen 210 und 230 Volt mit nahezu konstantem Strom. Der Vorschaltwiderstand ist hinreichend groß, wenn in ihm zirka 10% der von der Lampe selbst konsumierten Watt in Wärme umgesetzt werden. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft schreibt vor, daß man für alle Betriebsspannungen bis zu 160 Volt

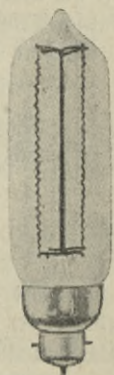


Fig. 174.

¹⁾ Siehe E.-L. 3. 1901, S. 855.

Vorschaltwiderstände für 15 Volt und für alle höheren Betriebsspannungen solche für 20 Volt benutzen soll. Gegen sehr plötzlich auftretende Spannungserhöhungen schützt der Vorschaltwiderstand nicht, weil eine gewisse Zeit vergeht, ehe der Eisendraht die dem höheren Strome entsprechende Temperatur angenommen hat. Bei lang andauernder zu hoher Spannung kann der Vorschaltwiderstand durchbrennen. (Zuerst erfolgt stärkere Wärmeabgabe an das eingeschlossene Gas; ist dieses ebenfalls stark erhitzt, so wird die Wärmeabgabe kleiner zc.) Bei stärkeren Spannungsschwankungen ist also die Nernst-Lampe stärker gefährdet als die gewöhnliche Glühlampe; dagegen hat sie bei den gewöhnlich vorkommenden kleineren Schwankungen der Netzspannung den Vorzug, daß die Lichtemission sehr konstant bleibt.

Das von dem Glühkörper ausgestrahlte Licht ist sehr intensiv und hat in der Farbe Ähnlichkeit mit dem Sonnenlichte; der Faden einer gewöhnlichen neben der Nernst-Lampe brennenden Glühlampe erscheint unscheinbar gelblich. Wegen des sehr intensiven Glanzes des Leuchtkörpers, durch den das Auge geblendet wird, umgibt man den Glühkörper meistens mit einer Glocke aus Mattglas. In dieser wird ein größerer Teil des emittierten Lichtes absorbiert. Die Temperatur des Glühkörpers wird von Bußmann, der sich um die technische Ausbildung der Nernst-Lampe sehr verdient gemacht hat, zu 2200° angegeben, von Lummer zu 2050°¹⁾. Wegen der hohen Temperatur ist der Wirkungsgrad der Lampe ein sehr günstiger. Nach Messungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, die sich auf eine 220 Volt-Lampe mit etwa 1 Ampere Stromverbrauch bezogen, ergab sich, daß

		die Lichtstärke betrug und die Wattzahl pro HK	
anfangs	153	" " "	1,54
nach 50 Stunden . .	137	" " "	1,66
" 100 "	138	" " "	1,67
" 200 "	138	" " "	1,65
" 300 "	139	" " "	1,67

Die Lichtstärke blieb also nach 50 Stunden Brennzeit nahezu konstant, ebenso der Wattverbrauch. Die mittlere Lebensdauer betrug bei 6 geprüften Lampen 286 Stunden.

Für Lampen, die bezüglich des Stromverbrauchs mit 220 Volt-Glühlampen gleichwertig sind, ergaben die Prüfungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, daß der Wattverbrauch pro Kerze anfangs günstiger war als bei der eben erwähnten Nernst-Lampe für 1 Ampere, nach 50 Stunden ihr gleichkam und nach 300 Stunden schlechter wurde. Ferner kann man aus den Versuchen entnehmen, daß Lampen mit hügelartigem Leuchtkörper unter sonst gleichen Umständen mehr Licht aussenden bzw. eine geringere Wattzahl pro HK aufweisen als Lampen mit geradem Leuchtkörper; dagegen war die mittlere Lebensdauer bei letzteren bedeutend höher als bei ersteren.

¹⁾ G.-Z. 3. 1902, S. 811.

Neuere Untersuchungen von Prof. Wedding¹⁾ erstreckten sich auf 220 Volt-Lampen; hierbei wurden die praktischen Verhältnisse möglichst nachgeahmt und vor allem den Spannungsschwankungen Rechnung getragen: Die Lichtstärke war nach 275 Stunden um 20 % abgefallen, nach 530 Stunden um zirka 50 %. Nach zirka 200 Stunden waren von 6 Lampen 2 durchgebrannt; 4 Lampen brannten über 600 Stunden. Eingehend wurde auch das neueste Modell geprüft; dieses unterscheidet sich von den früheren Ausführungsformen durch die Gestalt und die Anbringung der Heizspirale. Die Stromstärke betrug bei 220 Volt 1 Ampere. Als mittlere Lebensdauer ergab sich eine Zeit von 730 Stunden; der spezifische Verbrauch für die untere Halbkugel betrug nur 1,21 Watt, mit Klarglasglocke 1,26, mit Opalglasglocke 1,76 Watt. Ein Vergleich der Kernst-Intensivlampe mit kleinen Bogenlampen (2 Ampere) ergab, daß beide in bezug auf die Lichtausbeute pro 1 Watt nahezu gleichwertig sind.

Die Brenner werden mit vertikal oder horizontal angeordnetem Glühkörper versehen (s. Fig. 172 und 175). Auf den Lampensockeln, in denen sich die Umschaltvorrichtung befindet, werden die Stromstärken angeschrieben, für die sie bestimmt sind; Brenner und Widerstand werden mit der Stromstärke und Spannung bezeichnet, die jeder von ihnen bei normalem Betriebe verbraucht. In jeden Lampensockel dürfen nur solche Brenner und Widerstände eingesetzt werden, die mit derselben Stromstärke bezeichnet sind wie der Lampensockel. Beachtet man diese Vorschrift nicht, so versagt einer der Teile.

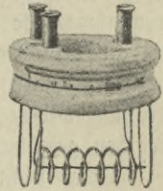


Fig. 175.

Die Lampen werden für Gleichstrom und Wechselstrom hergestellt; dieses gilt für die Sockel und Brenner. Für Gleichstrom hergestellte Sockel schnarren und summen, sobald sie für Wechselstrom benutzt werden.

Bei Gleichstrom soll der Strom in einer ganz bestimmten Richtung durch die Lampe fließen. Ein Wechsel der Stromrichtung kann eine plötzliche Zerstörung des Leuchtkörpers zur Folge haben. Es werden daher an den Anschlußstüpfeln + und - Zeichen angebracht.

Bei den Kernst-Lampen unterliegen einer Abnutzung hauptsächlich der Glüh- und der Heizkörper, letzterer besonders dann, wenn er den Glühkörper als Spirale umgibt. Die Teile sind so angeordnet, daß eine Auswechslung leicht vorgenommen werden kann.

4. Die Osmiumlampe.

Die großen Schwierigkeiten, die einer Massenfabrikation der Osmiumlampe und einer ausgedehnten Verwendung in der Beleuchtungstechnik im Wege standen, scheinen in den letzten Jahren überwunden worden zu sein; denn man findet die Lampe jetzt schon häufiger. Nuer von Welsbach, dem Erfinder der

¹⁾ G.-L. Z. 1903, S. 442.

Gasglühkörper, ist es gelungen, aus Osmium, das ein sprödes, hartes, sehr schlecht zu bearbeitendes Metall ist, Glühfäden herzustellen. Statt aus reinem Osmium werden auch Fäden aus einem Gemenge von Osmium und seltenen Erden (z. B. Thororyd) oder aus einer Osmiumlegierung mit einem Drydüberzug oder endlich aus Osmium mit einem Gehalt an Kohlenstoff angefertigt. Der Faden wird, wie bei den gewöhnlichen Glühlampen, in einen evakuierten Glasbehälter eingeschlossen.

Das Osmium kann, ohne daß es schmilzt oder sich verflüchtigt, bis zu einer sehr hohen Temperatur erhitzt werden; man kann daher bei Benutzung eines Osmiumfadens als Glühkörper einen hohen Wirkungsgrad erzielen. Aus einem Gutachten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt über Daueruntersuchungen an Osmiumlampen für 38 Volt, die sich auf 600 Brennstunden erstreckten¹⁾, geht hervor, daß der Stromverbrauch der 30—35kerzigen Lampe 1,28 Amp. betrug, woraus sich der Effektverbrauch zu 1,43—1,58 Watt mittlerer Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse ergab. Eine nennenswerte Abnahme der Helligkeit war nicht zu konstatieren. Prof. Wedding spricht sich über die Osmiumlampe sehr günstig aus. Er fand, daß, wenn man von einer ausnahmsweise frühzeitig (nach 520 Stunden) durchgebrannten Lampe abstieht, die absolute Brenndauer mehr als 3320 Stunden betrug. Bei keiner der untersuchten Lampen nahm die Lichtstärke um 20% der anfänglichen ab; ein Altersbeschlag bildete sich sozusagen gar nicht; die Glaswandungen blieben klarer als bei den gewöhnlichen Glühlampen.

Das Licht, das der Osmiumfaden ausfendet, ist von blendendem Glanze und fast weiß. Eine Folge des geringen Energieverbrauches und des günstigen Wirkungsgrades ist die geringe Erwärmung der Glasbirne.

Der Einführung der Osmiumlampe in die Beleuchtungstechnik stand bezw. steht der Umstand hindernd im Wege, daß die Lampe wegen des geringen Widerstandes des Fadens mit niedriger Spannung brennen muß. Bis jetzt wurden Lampen für 20—50 Volt und für Kerzenstärken bis zu 200 HK hergestellt.

Um die Einführung der Osmiumlampe zu erleichtern, bringt die Auer-Gesellschaft einen Hilfsapparat unter dem Namen Divisor auf den Markt. Dieser ist ein Transformator mit einer Wicklung (Drosselspule), die in drei gleiche Abteilungen geteilt ist. Das Ende der ersten Spule ist mit einer Klemme verbunden, mit derselben Klemme der Anfang der zweiten Spule zc. Werden die erste und letzte Klemme mit einem Neze von 110 Volt verbunden, so beträgt die Spannung zwischen Anfang und Ende einer Abteilung oder zwischen zwei aufeinander folgenden Klemmen $\frac{110}{3}$ Volt. Man kann auf diese Weise drei voneinander unabhängige Kreise von Osmiumlampen speisen.

Die Lampe darf nur so eingeschraubt werden, daß der Glühfaden senkrecht nach unten gerichtet ist, wahrscheinlich weil er bei Stromdurchgang weicher wird.

¹⁾ G.-Z. 3. 1903, S. 888.

5. Die Quecksilberdampf Lampe von C. P. Hewitt¹⁾.

Daß sich ein Lichtbogen zwischen Quecksilberelektroden für die Lichterzeugung eignet, wurde zuerst von *Wah* erkannt (1860). Später beschäftigte sich *Arons* (1892) eingehend mit dem Quecksilberlichtbogen. Er benutzte ein umgekehrtes U-Rohr aus Glas, das bis zur Krümmung mit Quecksilber gefüllt war, und stellte den Lichtbogen durch Neigen oder Schütteln des Rohres her. Das hierbei aus dem einen Schenkel in den anderen fließende Quecksilber stellt für einen Augenblick eine leitende Verbindung zwischen den beiden Schenkeln her; die Lichtbogenbildung erfolgt also ähnlich wie bei einer gewöhnlichen Bogenlampe. *Arons* mußte seine Lampe in einem Wasserbade kühlen und einen großen Borschalwiderstand benutzen.

C. P. Hewitt bestimmte zunächst die Faktoren, von denen der Widerstand einer stromleitenden Gasfäule abhängt, und es gelang ihm, brauchbare Gas- und Dampf Lampen zu konstruieren.

Er erkannte, daß die Beziehung zwischen Stromstärke und Lampenspannung und ebenso die Ökonomie in hohem Maße durch die Dichte des Gases beeinflusst werden; ferner ersetzte er die negative Quecksilberelektrode durch eine Eisenelektrode, wodurch die Konstruktion der Lampe wesentlich vereinfacht wird. Seine Lampen sind bereits in kleinem Umfange in die Praxis eingeführt und sollen sich sehr gut bewährt haben.

Die Lampe besteht aus einem Glasbehälter (einer Röhre oder dergl.), den Elektroden und der Kühlkammer. Als Eisenelektrode werden entweder kleine dünnwandige Tiegel oder Spiralen angewendet, die in Tiegelform gebogen sind. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, falls die Lampe ohne Anwärmung oder mittels Ströme mäßig hoher Spannung in Betrieb gesetzt wird, die Glaswandung in der Nähe der einen Elektrode mit einem Streifen aus leitender Substanz, z. B. mit Stanniol, zu umgeben, der mit der anderen Elektrode verbunden wird (s. Fig. 176). Die stationäre Ladung, die sich bei der Inangabeung ansammelt, scheint dadurch verringert zu werden. Die obere Eisenelektrode und die untere Quecksilberelektrode sind mit Platindrähten verbunden. Die Länge der Gasstrecke wird bedingt durch die Charakteristik (Beziehung zwischen Stromstärke und Spannung) und die Kerzenstärke. Die kleinsten (100voltigen) Lampen waren 20 cm lang und hatten einen Durchmesser von zirka 2,5 mm. Die Röhre wird sorgfältig evakuiert.

Ein sehr wichtiger Teil der Lampe ist die Kühlkammer. Diese ist eine kugelförmige oder sonstwie gestaltete Erweiterung der Röhre, die aber so

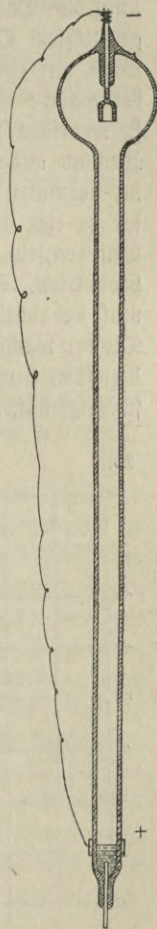


Fig. 176.

¹⁾ Siehe *E.-L.* 3. 1902, S. 179, 492. — *Gl. N.* 1901, Nr. 83, 86, 88.

angebracht wird, daß sie von dem elektrischen Strome nicht durchflossen wird. Der Zweck der Kühlkammer ergibt sich aus den folgenden Darlegungen. Hewitt fand, daß die Leitfähigkeit eines leitenden Gases — in dem vorliegenden Falle des Quecksilberdampfes — in demselben Verhältnisse wächst, in dem seine Dichte abnimmt, aber nur bis zu einer gewissen Grenze; wird diese überschritten, so verringert sich die Leitfähigkeit. Die Regulierung der Stromstärke fällt daher zusammen mit der Regulierung der Dampfdichte. Da nun die Dampfdichte von der Temperatur abhängig ist (die Röhre ist mit gesättigtem Quecksilberdampfe angefüllt), so läuft die Regulierung der Stromstärke auf eine Temperaturregulierung hinaus. Je größer die Gesamtoberfläche der Lampe ist, um so stärker wird die Wärmeabgabe an die Außenwelt, um so niedriger wird also auch die Temperatur sein, wenn sich ein stationärer Zustand ausgebildet hat. Der Dampfdruck beträgt bei der brennenden Lampe im normalen Zustande etwa 2 mm Quecksilber. Dieser Dampfspannung entspricht eine gewisse Temperatur T ; es muß also die Oberfläche der Lampe so bemessen sein, daß bei der Temperatur T die Wärmeabgabe gleich ist der Wärme-
produktion. Steigt der Strom, so steigt zunächst die Joulesche Wärme, und es muß bei richtig getroffener Anordnung der Dampf Widerstand (infolge zunehmender Dichte) wachsen, so daß der Strom wieder erniedrigt wird. Nach v. Recklinghausen, der sich mit der technischen Ausbildung der Hewittlampe eingehend beschäftigt hat, ist die Temperatur der Glaswand eine solche, daß man sie noch eben

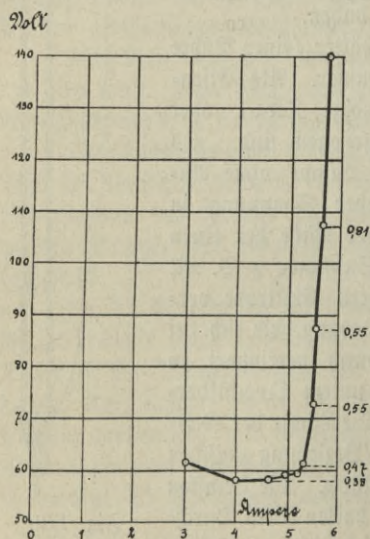


Fig. 177.

berühren kann. Da die Wärmeabgabe von der Außentemperatur abhängig ist, so brennt, streng genommen, eine Quecksilberdampflampe nur bei einer bestimmten Temperatur der Umgebung normal. Die Lampe wird im allgemeinen so eingerichtet, daß sie bei Zimmertemperatur ihre beste Ökonomie hat.

Die Lampenspannung ist proportional der Länge der Glasröhre und umgekehrt proportional dem Durchmesser; dagegen ändert sie sich innerhalb des Gebietes des guten Wirkungsgrades nur wenig mit der Stromstärke; wird dieses Gebiet überschritten, so wächst die Lampenspannung sehr schnell mit der Intensität (s. Fig. 177). In unserer Figur geben die rechts an den Rand notierten Zahlen die Wattzahlen pro Kerze an, die den betreffenden Punkten der Kurve entsprechen. Bei 3 Amp. — es ist

dies der niedrigste Strom, bei dem die betreffende Lampe noch brennen würde — werden also etwa 0,5 Watt pro Kerze verbraucht; die geeignetste Stromstärke würde bei der geprüften Lampe 4—5 Amp. betragen. Um auf die günstigste

Stromstärke einzuregulieren, bedient man sich eines Vorschaltwiderstandes. Von diesem werden normal 5—20% der Netzspannung aufgenommen.

Bezüglich des Wirkungsgrades steht die Quecksilberdampf Lampe mit an der Spitze der künstlichen Lichtquellen. In einzelnen Fällen hat man 0,4 Watt pro Kerze inkl. Verlust im Vorschaltwiderstande erreicht.

Für das Ingangsetzen der Lampe genügt es nicht, die Lampe mit dem Netze zu verbinden, weil der Anfangswiderstand ein außerordentlich hoher ist. Durch Anwärmen kann man den Anfangswiderstand erniedrigen. Ferner fand Hewitt, daß die Lampe leichter in Betrieb gesetzt werden kann, wenn man in das Innere kleine Mengen gewisser Substanzen bringt, z. B. Schwefel oder Schwefelverbindungen. In der Praxis überwindet man den großen Anfangswiderstand durch einen „Stoß hohen Potentials“. Wie schon erwähnt, wird die Wirkung dieses Stoßes wesentlich erhöht durch die Metallbelegung. Um mit Hilfe der Netzspannung für kurze Zeit eine hohe Spannung zu erzeugen, benutzt man die Selbstinduktion eines Elektromagnets. Die Anordnung wird durch Fig. 178 erläutert. Eine Spule mit Eisenkern liegt in der Hauptleitung; ein Widerstand und ein Auswechsler bilden einen Nebenschluß. Schließt man den Stromkreis, und unterbricht man ihn dann, so kommt zu der vorhandenen Spannung noch die in der Spule induzierte elektromotorische Kraft hinzu (Öffnungsextrastrom).

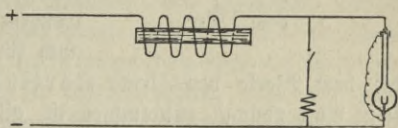


Fig. 178.

Die Quecksilberdampf Lampe sendet ein ruhiges, starkes und scheinbar weißes Licht aus, und zwar leuchtet die ganze Gas säule. In Wirklichkeit ist die Farbe kein reines Weiß, sondern ein bleiches Blaugrün, fast ohne jedes Rot im Spektrum. Um den geisterhaften Anblick der von dem Lichte direkt getroffenen Personen zu mildern, hat man Reflektoren mit transparentem Gewebe, das mit rot fluoreszierenden Farbstoffen imprägniert ist, angewendet. Da das Quecksilberlicht reich ist an chemisch wirksamen Strahlen, so eignet es sich vorzüglich für photographische Zwecke. Auch soll das Licht, wie v. Neeklinghausen fand, weniger ermüdend auf das Auge einwirken, als irgend eine andere künstliche Lichtquelle.

In späteren Patentschriften wird eine Gaslampe beschrieben, bei der statt Quecksilberdampf verdünnter Stickstoff verwendet wird. Die Lichtemission soll an der Kathode erfolgen. „Der Erfinder behauptet, durch Verwendung von Eisenelektroden in verdünntem Stickstoff, bei einem Abstände von zirka 38 mm, die Lampen mit Gleichstrom von 750 Volt und darunter zum Brennen zu bringen.“ (G.-L. Z. 1902, S. 180.)

6. Das elektrische Bogenlicht.

a) Der elektrische Lichtbogen.

Zunächst sollen diejenigen Erscheinungen geschildert werden, die man bei Verwendung von Gleichstrom am elektrischen Lichtbogen beobachtet.

a. **Gleichstromlichtbogen.** Nähern wir zwei mit den Polen einer Stromquelle verbundene Kohlenstifte einander, bis eine Berührung erfolgt, so findet der Strom an der Berührungsstelle, da der Kontakt nur ein loser ist, einen verhältnismäßig großen Widerstand. Hat die Stromquelle eine genügend hohe Spannung (40—50 Volt), so hat im Momente der Berührung der Strom eine hohe Stärke, und es entwickelt sich an der Berührungsstelle eine große Wärmemenge. Entfernt man jetzt die Kohlenstifte, die Elektroden, voneinander, so wird eine Schicht heißer Gase oder Dämpfe in den Stromkreis eingeschaltet, in der sich zahlreiche feine Kohlenpartikelchen befinden; diese Schicht leitet die Elektrizität ziemlich gut. Die hierbei auftretende Lichterscheinung bezeichnet man als Lichtbogen. Übrigens kann man bei vertikal angeordneten Kohlen von einem Lichtbogen nicht gut reden; man hat aber trotzdem die von Davy herrührende Bezeichnung auch für diesen Fall beibehalten. Die Fig. 179,

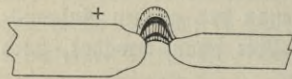


Fig. 179.

die dem Werke der Firma Körting & Mathiesen „Das Bogenlicht und seine Anwendung“ entnommen ist, gibt angenähert die Gestalt des Lichtbogens wieder, der sich zwischen reinen, horizontal liegenden Kohlenelektroden bildet. Die Flamme wird durch den aufsteigenden Luftstrom nach oben getrieben.

Projiziert man den zwischen vertikalen Kohlen gebildeten Lichtbogen mittels einer Sammellinse auf einen weißen Schirm, so erkennt man, daß er aus einem violetten Kern a (Fig. 180) und einer grünlichen äußeren Hülle c besteht (Aureole); Kern und Hülle sind durch eine dunkle Zone b voneinander getrennt.

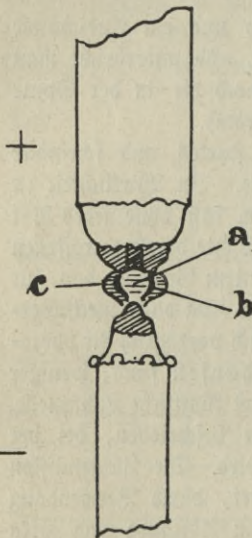


Fig. 180.

Beide Kohlen spitzen sich, wenn der Lichtbogen einige Zeit gebrannt hat, an den Enden zu, die negative aber stärker als die positive (s. Fig. 180, vergl. auch Fig. 183). An der Endfläche der positiven Elektrode, die man aus Gründen, auf die wir später näher eingehen werden, bei vertikal stehenden Elektroden als obere wählt, bildet sich eine kleine Grube mit kreisförmigem Rande, der sogen. Krater. Haben die beiden Kohlenstifte denselben Durchmesser, so brennt der positive ungefähr $2\frac{1}{4}$ mal so stark ab, wie der negative. Damit nun beide Elektroden ungefähr dieselbe Länge erhalten können, gibt man der positiven

Kohle einen größeren Durchmesser, und zwar ist in der Regel das Verhältnis der beiden Durchmesser gleich 1 zu 1,5—1,6.

Bei senkrecht stehenden Kohlen hat der Lichtbogen die Neigung, um die Kohlen zu rotieren. Um diesem Übelstande, der unruhiges, flackerndes Licht zur Folge hat, abzuwehren, versieht man die positive Kohle mit einem aus Kohle, Wasserglas und Borflure hergestellten Kern, den man Docht nennt (Dochtkohlen).

Durch die Verwendung der Dochkohlen wird, wie sich aus dem Folgenden ergibt, auch die Lichtbogenspannung erniedrigt.

In neueren Lampen ordnet man vielfach die Kohlen so an, daß der Lichtbogen nach unten gerichtet ist; die Kohlen stehen dann schräg nebeneinander. In diesem Falle wirkt die Beweglichkeit des Lichtbogens störend, und man wendet besondere Hilfsmittel an, den Lichtbogen an einer bestimmten Stelle festzuhalten. Hier ist zunächst zu erwähnen der sogen. Sparer, ein kleiner Schirm oberhalb des Lichtbogens, durch den die Bewegung der heißen Gase verlangsamt und infolgedessen die Stabilität des Lichtbogens vergrößert wird. Ferner benutzt man ein magnetisches Feld, das den Lichtbogen nach unten treibt. Nach den Beobachtungen¹⁾ der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin soll schon das durch die Stromschleife, gebildet aus den beiden Kohlen und dem Lichtbogen, erzeugte magnetische Feld genügen, den Lichtbogen an die Spitze zu treiben und dort festzuhalten (man vergl. S. 306). Eine Erhöhung der Leuchtkraft soll die Verwendung eines Plasmagneten nach den Messungen der Firma Gebrüder Siemens & Co. in Charlottenburg nicht zur Folge haben, im Gegenteil eine Verminderung; der Lichtbogen breitet sich nämlich aus, so daß seine Abkühlungsfläche größer wird. Trotzdem wird unter Umständen die Verwendung eines magnetischen Gebläses vorteilhaft sein.

Lichtverteilung. Von dem gesamten Lichte, das uns ein offen brennender Lichtbogen einer gewöhnlichen Bogenlampe spendet, entfallen auf

den Krater	zirka 85 %,
die negative Kohle	„ 10 %,
den Lichtbogen selbst	„ 5 %.

Die Lichtmenge, die ein nackter Gleichstromlichtbogen nach den verschiedenen Richtungen des Raumes hin sendet, ist eine außerordentlich verschiedene, weil das meiste Licht von der vertieft liegenden Krateroberfläche abgegeben wird und weil die Kohlen der Ausbreitung des Lichtstromes hindernd im Wege stehen. Denken wir uns eine durch die Achse der vertikal stehenden Kohlen gehende Ebene gelegt, in dieser vom Lichtbogen aus nach allen möglichen Richtungen hin gerade Linien gezogen und auf jeder Geraden eine der Lichtstärke entsprechende Strecke abgetragen, so erhalten wir die Polar-kurve für die Lichtverteilung. In Fig. 181 ist eine von Prof. Wedding gefundene Kurve, die im großen und ganzen als typisch anzusehen

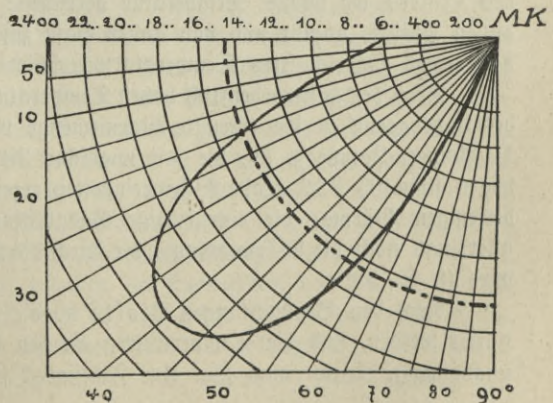


Fig. 181.

¹⁾ Siehe *E. Z.* 3. 1903, S. 169.

ist, abgebildet; die Stromstärke betrug 12 Ampere und die Lampenspannung 43 Volt. Die Lichtstärke in horizontaler Richtung betrug also 600 Kerzen, in vertikaler Richtung ist sie nahezu Null; das Maximum der Lichtemission liegt bei 40° und beträgt hier ungefähr 2300 Hefnerkerzen. Bildet man aus einer hinreichend großen Anzahl von Werten für die Lichtstärke das arithmetische Mittel, so erhält man die mittlere räumliche (hemisphärische) Lichtstärke unterhalb der Horizontalen (s. die strichpunktierte Linie in Fig. 181). Mißt man auch die Helligkeit oberhalb der Horizontalen nach den verschiedenen Richtungen, die übrigens schon für 10° nur noch 16 % der maximalen Helligkeit ist, so gibt das arithmetische Mittel die mittlere räumliche Helligkeit oberhalb der Horizontalen an. Der Mittelwert der beiden definierten Größen ist die mittlere räumliche Lichtstärke. Die Bedeutung dieser letzten Größe ist also folgende: Eine lichtausstrahlende Kugel, die an ihrer ganzen Oberfläche konstante Temperatur besitzt, würde im ganzen gerade so viel Licht aussenden wie der ganze Lichtbogen, falls die durch sie hervorgerufene Erleuchtungsstärke in 1 m Entfernung gleich ist der mittleren räumlichen des Lichtbogens in 1 m Entfernung.

Der spezifische Verbrauch (Wattzahl: Lichtstärke) nimmt ab, wenn der Energieverbrauch steigt; z. B. ist nach Uppenborn für eine

5	Ampere-Lampe (nackt)	die hemisph. Lichtstärke	308	HK	(43 Volt)
8	"	" " " "	620	"	(44,4 ")
10	"	" " " "	860	"	(45,2 ")

Aus dem stärkeren Abbrande und der 8—10mal größeren Lichtausstrahlung der positiven Kohle schließen wir, daß die Temperaturen an den beiden Kohlenspitzen verschieden sind. Biolle¹⁾ gelangte zu dem Resultate, daß die Temperatur des Kraters 3500° beträgt, während die Temperatur der Kathodenspitze von ihm zu 2700° angegeben wird. Nach Lummer liegt die Temperatur der Bogenlampe zwischen 3500° und 3900° Cels.

Die Temperatur der einzelnen Querschnitte des Lichtbogens ist wahrscheinlich eine verschiedene, und zwar wird in den Querschnitten in der Nähe des Kraters die höchste Temperatur herrschen; da ferner der Lichtbogen nach außen Wärme abgibt und von außen Gase zuströmen, so bestehen auch innerhalb eines Querschnittes Temperaturunterschiede.

Trotz der außerordentlich hohen Temperaturen an den verschiedenen Stellen des Lichtbogens ist die erzeugte Wärmemenge verhältnismäßig klein. Bei einer 10 Ampere-Lampe z. B., die mit ungefähr 38 Volt brennt, werden im Lichtbogen stündlich 328 große Wärmeeinheiten erzeugt, das ist ungefähr ein Drittel derjenigen Wärme, die eine einzige Gasglühlampe ausstrahlt. Hierzu kommt allerdings noch die Wärmemenge, die durch die Verbrennung der Kohlen erzeugt wird (s. S. 359).

Nach den Beobachtungen Biolle's, die auch von anderen Forschern bestätigt werden, sind die Temperaturen an den Elektroden von der Stromstärke unabhängig. Wenn man nun eine Flüssigkeit bis zum Siedepunkte erhitzt hat,

¹⁾ Compt. rend. 119, S. 940, 1894; Weibl. 49, S. 258, 1895.

So bleibt die Temperatur konstant, mag man auch noch so viel Wärme zuführen. Man erklärt daher die Beobachtung, daß die Temperatur des Kraters von der Stromstärke unabhängig ist, durch die Annahme, daß im Krater die Verdampfungstemperatur der Kohle herrscht. Was die Temperaturen der negativen Elektrode anbelangt, so sei darauf aufmerksam gemacht, daß 2700° die maximale Temperatur ist, die man bei Verbrennung reinen Kohlenstoffs in atmosphärischer Luft erzielen kann.

Die Gestalt des Kraters und die Größe seiner Oberfläche sind, da ja von ihm der weitaus größte Teil des Lichtes ausgestrahlt wird, für den optischen Nuzzeffekt des Lichtbogens von großer Bedeutung. Wie H. Myrton nachgewiesen hat, nimmt die Tiefe des Kraters mit der Lichtbogenlänge ab, während sein Durchmesser eine lineare Funktion der Stromstärke ist¹⁾.

Aus den mitgeteilten Ergebnissen der Forschung kann man Schlüsse für die Praxis ziehen. Die Lichtausbeute ist, da fast die ganze Lichtmenge vom Krater ausgeht, bei einer bestimmten Lichtbogenlänge und demselben Aufwand an elektrischer Energie um so günstiger, je flacher der Krater ist, und einen je größeren Durchmesser er hat. Ferner folgt aus dem Vorhergehenden, daß wir die Lichtemission pro 1 mm² Krateroberfläche (den Glanz des Kraters) durch Steigerung der Stromstärke nicht vergrößern können. Wohl aber können wir bis zu einer gewissen Grenze durch Verstärkung des Stromes die Oberfläche des Kraters vergrößern; jedoch ist zu berücksichtigen, daß wir bei gegebenem Durchmesser der positiven Kohle über eine gewisse Größe der Krateroberfläche nicht hinauskommen. Es gibt also für jeden Durchmesser der positiven Kohle eine gewisse günstigste Stromstärke, auf die man die Lampe einregulieren muß, wenn man im Verhältnis zur aufgewendeten elektrischen Energie eine möglichst große Lichtmenge erzielen will. Eine Vergrößerung der Stromstärke hat unter Umständen nur einen stärkeren Abbrand zur Folge.

Berücksichtigt man die vorerwähnten Beobachtungen und die Tatsache, daß die negative Kohle einen nicht unbedeutenden Teil des Lichtstromes an seiner Ausbreitung hindert, so sieht man ein, daß die Lichtausbeute bei Benutzung dünnerer Kohlen günstiger sein muß, als bei Verwendung dickerer Elektroden. Handelt es sich z. B. um eine 10 Ampere-Lampe, so wird für einen gewissen Durchmesser der positiven Kohle der Strom von 10 Ampere den günstigsten Krater erzeugen und der Wirkungsgrad der Lampe der beste werden. Setzt man in die Lampe dickere Elektroden ein, so ändert sich der Krater seiner Gestalt und Größe nach nur unwesentlich, aber er ist jetzt mehr von dem Rande der Kohlen entfernt und wird außerdem durch die dickere negative Elektrode mehr verdeckt. Messungen der Bodenbeleuchtung, ausgeführt von der Firma Körting & Mathiesen, ergaben bei Anwendung von 20 und 13 mm Kohlen gegenüber solchen von 16 und 10 mm einen Verlust von zirka 20% an Bodenbeleuchtung. Zu einem ähnlichen Resultate gelangte Prof. Wedding. Aus praktischen Gründen, unter denen wir vor allem die Verlängerung der

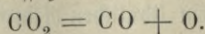
¹⁾ Näheres siehe G. Voit, Der elektrische Lichtbogen.

Brenndauer nennen, ist man gezwungen, die Kohlenstäbe stärker zu wählen, als es im Interesse des Wirkungsgrades angebracht ist.

Die Vorgänge im Lichtbogen sind noch nicht vollständig aufgeklärt. Nach den neueren Untersuchungen ist die Kathode, d. h. die negative Kohle, nicht, wie man früher annahm, als eine rein passive Ableitungselektrode anzusehen, wie z. B. die Kohlenplatte des Bunsenschen Elementes. Es erfolgt vielmehr an beiden Elektroden Dampf- und Ionenbildung, d. h. es werden Dampf-moleküle in positiv und negativ geladene Bestandteile zerlegt (dissoziiert). Die Ionen bewegen sich mit sehr großer Geschwindigkeit nach den Elektroden hin, die positiv geladenen nach der negativen Elektrode und umgekehrt. An den Elektroden entladen sich die Ionen. Die Bewegung der Elektrizität würde nach dieser Anschauung im Lichtbogen in derselben Weise erfolgen wie in einem Elektrolyten. Ferner spielen sich im Lichtbogen chemische Prozesse ab, es erfolgen Neubildungen (NO_2) und Dissoziationen. In bezug auf die ersteren ist zu beachten, daß sich im Lichtbogen eine ganze Reihe von Elementen im freien Zustande oder, wenigstens ursprünglich, in chemischen Verbindungen (Wasserdampf, Zusätze zur Kohle) finden. Ein Teil der entstandenen Produkte verdichtet sich, nachdem er den Lichtbogen verlassen hat und schlägt sich auf den kälteren Teilen der Lampe nieder.

Die heißen Gase zwischen den Elektroden haben einen verhältnismäßig kleinen Leitungswiderstand. Es dürfte dies schon aus dem folgenden Versuche hervorgehen. Brennt ein Lichtbogen ruhig, und unterbricht man den Stromkreis durch sehr schnelle Auf- und Abwärtsbewegung eines Ausschalterhebels, so bildet sich der Lichtbogen von neuem, ohne daß wir die Elektroden zur Berührung zu bringen brauchen. Dieser Vorgang spielt sich, wie schon jetzt bemerkt sei, im Wechselstromlichtbogen während jeder Periode zwei Mal ab.

Der Materialverbrauch an der positiven Kohle oder, wie man gewöhnlich sagt, der Abbrand, besteht aus dem Teile, der im Krater verdampft und dann nach der negativen Kohle hin wandert, auf welchem Wege im Lichtbogen Oxydationen stattfinden, und dem Teile, der in der nächsten Umgebung des Kraters verbrennt (ohne zuvor zu verdampfen). Beide Teile, besonders aber der erste, hängen von der Menge der elektrischen Energie ab, die in der Nähe des Kraters in Wärme umgesetzt wird. Die Verbrennung des Elektrodenmaterials können wir dadurch vermindern, daß wir den Zutritt der Luft zu dem Lichtbogen einschränken, wie es bei den Lampen mit eingeschlossenem Lichtbogen, den Dauerbrand- oder Tanduslampen, geschieht. Wenn bei einer Lampe das Zufließen der Luft zum Lichtbogen nur sehr langsam erfolgen kann, so schlägt sich verdampfte Kohle als schwarzer Überzug auf der den Lichtbogen einschließenden Hülle nieder, und es bildet sich Kohlenoxyd, und zwar entweder primär oder sekundär durch Dissoziation der Kohlenäure nach der Gleichung



Nach den Untersuchungen Deville's sind unter Atmosphärendruck bei 3000° etwa 40% Kohlenäure gespalten und bei 3500° nach De Chatelier 53% (s. Kernst, Theoret. Chemie, 3. Aufl. S. 416).

Wenn die Stromstärke im Vergleich zur Lichtbogenlänge zu groß ist, so spitzen sich die beiden Kohlen von den Enden aus weiter zu, ferner bildet sich auf der negativen Elektrode ein pilzartiger Anfsatz. Der Pilz dürfte folgendermaßen zustande kommen. In dem Lichtbogen fliegen Kohlenpartikelchen von der Anode zur Kathode, und zwar in um so größerer Menge, je stärker der Strom ist. Ist nun der Lichtbogen im Verhältnisse zur Stromstärke zu klein, so werden sich auf dem Wege, den die Teilchen zurücklegen, verhältnismäßig wenige Kohlenatome mit Sauerstoff verbinden, so daß also ein dichter Regen von Kohlentheilchen auf die Spitze der negativen Kohle fällt. So kommt es zu einer Anhäufung von Kohle auf der Kathode. Die Pilzbildung hängt also mit einem Mangel an Sauerstoff zusammen. Für unsere Ansicht sprechen auch die Beobachtungen Herzfelds¹⁾, der einen Lichtbogen in einer Glasröhre bei sehr beschränkter Luftzufuhr brennen ließ und hierbei jedesmal Pilzbildung beobachtete.

Die Spannung oder das Potentialgefälle zwischen den Elektroden hängt von verschiedenen Umständen ab, vor allem von der physikalischen und chemischen Natur des Elektrodenmaterials, der Länge und dem mittleren Querschnitte des Lichtbogens und von dem Gasdrucke. Je leichter sich die Elektroden verflüchtigen, und je größer das Leitungsvermögen der entstandenen Dämpfe ist, um so geringer ist die Lichtbogenspannung. Es macht daher einen Unterschied aus, ob man zwei Homogen- oder zwei Dochkohlen oder eine Docht- und eine Homogenkohle benutzt; denn der Docht enthält Substanzen, die sich leichter in Dampf verwandeln als reine Kohle. Höchst beachtenswert für die Theorie des Lichtbogens ist die zuerst von Lecher²⁾ konstatierte Tatsache, daß das Potential zwei Sprünge macht, nämlich einen großen Sprung an der Grenze zwischen der Anode und der angrenzenden Schicht des Lichtbogens und einen viel kleineren Sprung an der Grenze des Lichtbogens und der negativen Kohle. Die gesamte zur Unterhaltung eines Lichtbogens erforderliche Spannung setzt sich also aus diesen beiden Potentialsprüngen und dem Spannungsverluste in den Lichtbogensgasen zusammen. Bei einer Lichtbogenspannung von 47 Volt sind die betreffenden Werte ungefähr 39 Volt, 4 Volt und 4 Volt. Die Ungleichheit der Potentialsprünge an den beiden Elektroden hängt aufs engste mit der Verschiedenheit der Temperaturen zusammen. Wie Luggin konstatierte, nehmen die Potentialsprünge mit der Lichtbogenlänge langsam zu³⁾.

Die durch die beiden plötzlichen Änderungen der Spannung an den Elektroden verursachte verhältnismäßig große, zur Unterhaltung eines Lichtbogens erforderliche elektromotorische Kraft hat man durch verschiedene Annahmen zu erklären versucht. Es würde zu weit führen, wenn wir auf die verschiedenen Hypothesen näher eingehen wollten; wir begnügen uns daher mit kurzen Andeutungen. Durch die Annahme, daß die beiden Potentialsprünge durch Über-

¹⁾ Wiedem. Annalen 1897, 238, S. 435.

²⁾ Wiedem. Annalen 1888, 33, S. 609.

³⁾ Näheres siehe G. Voit, Der elektr. Lichtbogen, 1896, S. 38.

gangswiderstände verursacht werden, dürfte die Tatsache kaum genügend erklärt werden; vor allem bereitet die Frage, warum auch bei zwei gleichartigen Kohlen ein Unterschied in der Größe der Sprünge besteht, große Schwierigkeit. Dies gilt auch von der von verschiedenen Forschern ausgedrückten Ansicht, daß sich an den Grenzen der beiden Elektroden eine Substanz von großem Widerstande ansammle, nämlich eine sehr dünne Gasschicht von anderer chemischer Beschaffenheit als die übrigen Lichtbogengase. Ferner haben wir die Hypothese zu erwähnen, daß in dem Lichtbogen eine elektromotorische Gegenkraft tätig sei¹⁾. Endlich haben verschiedene Autoren den Peltier-Effekt für die Erklärung verwertet.

Die Beziehung zwischen der Lichtbogenlänge und den elektrischen Größen, der Stromstärke und Spannung, ist von verschiedenen Forschern zum Gegenstande eingehender Untersuchungen gemacht worden. Nach Ayrton's Vorschlag versteht man unter der Lichtbogenlänge L den Abstand der negativen Kohlenspitze von der durch den Kraterrand gelegten Ebene. Dem Werte $L = 0$ entspricht also nicht eine Berührung der beiden Elektroden spitzen. Die meisten Forscher setzen die Spannung E , die zur Unterhaltung eines Lichtbogens von der Länge L mm nötig ist,

$$E = a + b \cdot L.$$

Da E von der Beschaffenheit des Elektrodenmaterials und dem Durchmesser der Elektroden abhängt, so sind die Konstanten a und b für jede Kohlenforte zu bestimmen. Bei den gewöhnlichen Gleichstromlampen beträgt die Spannung 40—48 Volt, entsprechend einer Lichtbogenlänge von 2—4 mm.

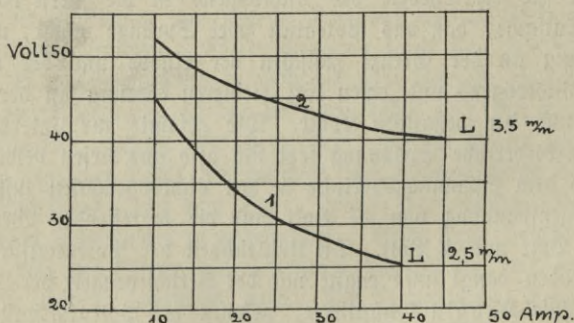


Fig. 182.

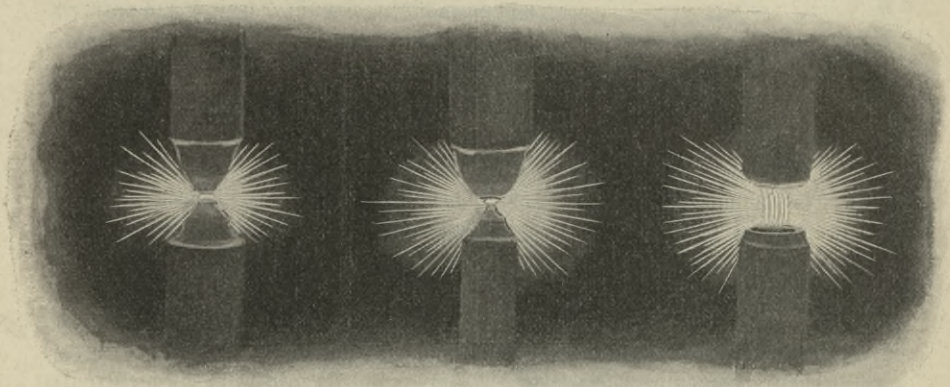
Hält man die Lichtbogenlänge konstant, und vergrößert man die Stromstärke, so nimmt die Spannung ab. Es wird die Beziehung zwischen Lichtbogenlänge und Stromstärke für zwei verschiedene Lichtbogenlängen bei Benutzung von Gleichstrom in Fig. 182 wiedergegeben, die durch Versuche von J. Zeidler im Laboratorium der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gefunden wurden²⁾.

¹⁾ G. Vecher, Wiedem. Ann. 1888, 33, S. 609. — Fr. Stenger, Wiedem. Ann. 1892, 45, S. 33. — Leo Arons, Wiedem. Ann. 1896, 102, S. 185. — Ferner siehe G.-Z. 3. 1900, S. 439, und Schilling's Journal 1902.

²⁾ G.-Z. 3. 1899, S. 242.

Durch Untersuchungen hat sich ergeben, daß die Lichtbogen­spannung von dem Druck des den Lichtbogen umgebenden Gases abhängig ist. Wächst der Druck über 1 Atm. hinaus, so steigt, wenn man die Lichtbogenlänge und die Stromstärke konstant hält, die Spannung an. Ob bei Verringerung des Druckes unter 1 Atm. die Spannung ebenfalls steigt, ist fraglich. Wahrscheinlich gibt es einen zwischen 0 Atm. und 1 Atm. liegenden Druck, bei dem der Spannungsverlust ein Minimum ist. [Näheres ist aus der Arbeit von Monasch über den Wechselstromlichtbogen bei höherer Spannung zu ersehen¹⁾.] Untersuchungen über den Knodenabfall des Potentials haben endlich ergeben, daß er durch Abkühlung der Anode erniedrigt wird.

β. **Der Wechselstromlichtbogen.** Da sich die Stromrichtung in schnellem Wechsel ändert, so ist bald die obere, bald die untere Kohle die positive. Beide Kohlen nehmen an der Spitze ungefähr dieselbe Gestalt an (s. Fig. 183).



Wechselstrom-

Gleichstrom-

Abgeschlossener Lichtbogen.

Fig. 183.

Jedoch ist der Abbrand der beiden Kohlen bei senkrechter Anordnung nicht genau der gleiche; er ist bei der oberen Kohle vielmehr ein etwas stärkerer, weil ihr unteres Ende von den heißen emporsteigenden Gasen umspült wird. Aus demselben Grunde hat die obere Elektrode eine etwas höhere Temperatur.

Gewöhnlich benutzt man bei Wechselstromlampen zwei Dochkohlen von gleicher Länge und gleichem Durchmesser, um ruhigeres Licht zu erzielen. Die Verwendung zweier Dochkohlen hat zur Folge, daß die Lichtbogen­spannung eine verhältnismäßig niedrige ist (zirka 30 Volt effektiv) und die violetten Farbentöne stärker hervortreten. Die Lichtverteilung bei der Wechselstrombogenlampe ist aus der Fig. 184 zu ersehen; oberhalb der Horizontalen ist also die Lichtverteilung ungefähr die nämliche wie unterhalb derselben.

¹⁾ E.-L. 3. 1902, S. 957.

Die Ökonomie der Wechselstromlampe wird durch verschiedene Umstände im Vergleich zur Gleichstromlampe beeinträchtigt. Zunächst ist als Grund zu erwähnen, daß die die Ausbreitung des Lichtstromes hindernde untere Kohle einen größeren Querschnitt hat als die negative Kohle der Gleichstromlampe.

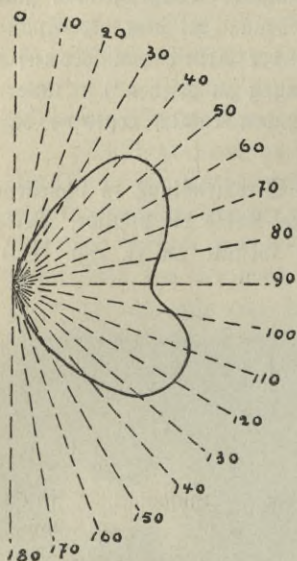


Fig. 184.

Ferner verursachen die fortwährenden Änderungen der Stromstärke eine vibrierende Bewegung der Lichtbogengase, indem sich das Volumen der Gase mit der Stromstärke ändert; die Vibrationen haben eine Abkühlung des Lichtbogens zur Folge. Hierdurch wird auch, wie hier eingeschaltet werden soll, das Summen oder Brummen des Wechselstromlichtbogens verursacht. Am wichtigsten aber dürfte der Einfluß sein, den die Temperaturschwankungen der Kohlenspitzen auf die Lichterzeugung ausüben. Da nämlich die Temperaturen der Kohlenspitzen von der momentanen Stromstärke abhängen, so schwankt sie während jeder halben Periode; ferner wird der Lichtbogen, wenn die Spannung unter einen gewissen Wert gesunken ist, abbrechen, um sich nach Umkehrung der Stromrichtung wieder zu bilden. Schon diese beiden Umstände haben zur Folge, daß die durchschnittliche Temperatur der Kohlenspitzen niedriger ist als die Temperatur der positiven Kohle der Gleichstromlampe. Die außerordentlich

starke Lichtemission der positiven Elektrode einer Gleichstromlampe und die hierdurch bedingte bedeutende Steigerung der Ökonomie tritt also beim Wechselstromlichtbogen mehr in den Hintergrund.

Nach Bedding ist der Quotient aus der verbrauchten elektrischen Energie und der mittleren räumlichen Lichtstärke für eine 8 Ampere-Lampe bei Wechselstrom zirka 1,38 Watt; für Gleichstrom liegt der entsprechende Wert zwischen 0,94 und 1,1 Watt. Das Verhältnis wird aber für den Wechselstromlichtbogen ein viel ungünstigeres, wenn man den spezifischen Verbrauch, bezogen auf die mittlere hemisphärische Lichtstärke, als Vergleichszahlen benutzt. Da nämlich eine Gleichstromlampe nur wenig Licht nach oben wirft, während bei der Wechselstromlampe fast die Hälfte des erzeugten Lichtes in den Raum oberhalb der Horizontalen gesandt wird, so ist der spezifische Verbrauch, bezogen auf die hemisphärische Lichtstärke, bei Gleichstrom nur etwa die Hälfte des spezifischen Verbrauchs, bezogen auf die mittlere räumliche Lichtstärke, während bei Wechselstrom die beiden Größen nahezu einander gleich sind. Das Verhältnis von Gleich- zu Wechselstrom ist in diesem letzteren Sinne rund 1:2. Benutzt man einen Reflektor, so wird das Verhältnis zu gunsten des Wechselstromlichtbogens besser (etwa 1:1,6). Görgeß hat nachgewiesen, daß flache Kurven der Spannung für Bogenlampen günstiger sind als spitze.

Eine für die Theorie des Lichtbogens sehr wichtige Frage ist die, ob bei einem Wechselstromlichtbogen eine Phasenverschiebung vorhanden ist. Heubach konnte bei einem zwischen zwei Dochtkohlen brennenden Lichtbogen eine Phasenverschiebung nicht finden, d. h. der Quotient $\frac{\text{Watt}}{\text{Volt} \times \text{Amp.}}$

hatte den Wert 1; er fand aber, daß für zwei Homogenkohlen dieser Quotient gleich 0,82 war. Der Unterschied zwischen der Wattzahl und dem Produkte $\text{Volt} \times \text{Amp.}$ zwingt nicht zu der Annahme, daß eine wirkliche Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke stattfindet. Erfolgen nämlich im Lichtbogen nicht zu vernachlässigende Änderungen des Widerstandes, so ist die Arbeit des Wechselstromes während einer Sekunde nicht gleich dem Produkte aus der effektiven Stromstärke und der effektiven Spannung und man kann dann höchstens von einer scheinbaren Phasenverschiebung reden. Wahrscheinlich ist der Unterschied, den Heubach für Docht- und Homogenkohlen fand, darauf zurückzuführen, daß bei Bemüzung von zwei Homogenkohlen wegen der höheren zur Unterhaltung des Lichtbogens erforderlichen Spannung der Lichtbogen früher abbricht, so daß die Widerstandsänderungen (infolge der Abkühlung) von größerem Einflusse sind als bei zwei Dochtkohlen.

Der zischende Lichtbogen. Berringert man die Länge eines ruhig brennenden Lichtbogens allmählich, so tritt ein Moment ein, in dem die Stromstärke plötzlich um 2—3 Amp. steigt, während die Spannung stark fällt; gleichzeitig geht der ruhig brennende Lichtbogen in einen zischenden über. Lassen wir den Strom eines zischenden Lichtbogens durch die primäre Spule eines Induktionsapparates fließen, dessen Kondensator und Hammer ausgeschaltet sind, so finden wir, daß die Stärke des primären Stromes schwankt. Frau Myrton¹⁾ gelangte auf Grund eingehender Untersuchungen zu dem Resultate, daß das Einbringen von Luft in den Krater die Ursache des Zischens sei; bei zu starkem Strome breite sich nämlich der Krater auf den Mantel des Kohlenstabes aus und die einströmende Luft verursache schnelle Vibrationen der Lichtbogengase.

7. **Flammenbogen.** In neuerer Zeit verwendet man vielfach Kohlen, denen man leicht flüchtige Substanzen (Salze) zugesetzt hat, sei es um eine bessere Lichtausbeute zu erzielen, sei es um dem Lichte eine bestimmte Farbe zu erteilen. Bei Verwendung derartiger Kohlen spricht man nicht mehr vom Lichtbogen, sondern vom Flammenbogen. Allgemeiner bekannt geworden sind die farbigen Bogenlampen erst durch das Bremerlicht. Als Zusätze benutzt man Kalziumverbindungen (Flußspat), Baryumoxyd, Strontiumoxyd u. Durch Zusatz kalziumhaltiger Verbindungen wird das Licht gelb gefärbt, durch strontiumhaltige rot und durch baryumhaltige weiß. Durch Mischung verschiedener Salze erhält man natürlich Mischfarben. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin setzt die Salze nur der Dochtmasse zu. Die glühenden Dämpfe haben kein kontinuierliches Spektrum wie glühende Kohle, sondern ein sogen. Banden-

¹⁾ E.-Z. 3. 1901, S. 320.

Spektrum; sie senden also nur einzelne leuchtende Farben aus. Da die Flammenbogenlampen bei gleicher Lichtbogenlänge mit einer geringeren Spannung brennen, und der Lichtbogen selbst eine nicht unbedeutende Lichtmenge ausstrahlt, so ist die Ökonomie des Flammenbogenlichtes günstiger als die des gewöhnlichen Bogenlichtes. Prof. Wedding¹⁾ untersuchte sowohl bei schräg nebeneinander stehenden, als auch bei vertikal übereinander angeordneten Kohlen den Einfluß verschieden großer Beimengungen desselben Stoffes auf die Lichtausbeute. Er fand, daß bei schräg stehenden Kohlen die hemisphärische Lichtstärke mit wachsender Menge des Zusatzes von 0% bis zu 40% (Flußspat) von 1173 Kerzen bis zu 3574 Kerzen stieg. Ferner zeigte sich, daß bei gleichem Prozentgehalte verschiedener Stoffe — die Untersuchungen erstreckten sich auf kalziumhaltige, baryumhaltige und strontiumhaltige Kohlen — die Lichtausbeute am günstigsten war bei Kalzium- und am ungünstigsten bei Baryumzusätzen. Der spezifische Verbrauch, d. h. der Quotient aus der Wattzahl und der mittleren hemisphärischen Lichtstärke, betrug bei schräg nebeneinander stehenden Kohlen und Verwendung von Wechselstrom²⁾

für gelbes Licht (7% Kalzium)	0,235 Watt
" rotes " (7% Strontium)	0,299 "
" weißes " (7% Baryum)	0,968 "

Da für Gleichstrom bei 7% Flußspat ein spezifischer Verbrauch von 0,24 Watt gefunden wurde, so schließt Wedding, daß bei schräg nebeneinander stehenden Kohlen mit Zusätzen die Wechselstromlampe ebenbürtig und gleichwertig neben der Gleichstromlampe steht.

Bei übereinander stehenden Kohlen ergab sich, wie zu erwarten war, eine durchweg schlechtere Ökonomie. Hier werden nur der positiven Kohle Salze zugesetzt, weil sonst durch Schlackenbildung das Licht unruhig wird. Wurden 7% Zusatz an Flußspat genommen, so ergab sich bei 9 Amp. und 42,7 Volt eine mittlere hemisphärische Lichtstärke von 1250 Kerzen, so daß also der spezifische Verbrauch 0,3 Watt betrug; eine Flammenbogenlampe für rotes Licht ist bei 7% Zusatz in bezug auf die Ökonomie einer gewöhnlichen Bogenlampe gleichwertig.

Was die Lichtverteilung anbelangt, so ergab sich folgendes. Sind die Kohlen schräg nebeneinander angeordnet, sind also die beiden Kohlenspitzen und der Flammenbogen abwärts gerichtet, so liegt das Maximum der Lichtstärke bei 90°, d. h. in der Vertikalen; nennen wir diese Lichtstärke L, so ist

für 80° die Lichtstärke gleich	0,9 L
" 70° " " " " "	0,81 L
" 60° " " " " "	0,8 L
" 50° " " " " "	0,76 L
" 30° " " " " "	0,66 L
" 20° " " " " "	0,6 L
" 10° " " " " "	0,3 L.

¹⁾ Siehe G.-L. Z. 1902, S. 702.

²⁾ Die Spannung betrug 47,5 Volt; sie ist verhältnismäßig hoch, weil ein Blasmagnet verwendet wurde, wodurch der Widerstand des Lichtbogens erhöht wird.

Bei vertikaler Anordnung der Kohlen dehnt sich das Maximum der Lichtstärke zwischen 30° und 70° aus. Die Lichtverteilung ist also sehr viel günstiger als bei gewöhnlichen Bogenlampen. Dieser Vorzug ist darauf zurückzuführen, daß der Flammenlichtbogen länger ist und selbst eine nicht unbedeutende Lichtmenge aussendet. Diese beträgt nach Bedding zirka 25% der gesamten Lichtmenge.

Je größer der prozentuale Zusatz zu den Kohlen ist, um so schneller brennen die Elektroden ab, um so größer ist die Gefahr, daß durch sich bildende Tröpfchen oder Blasen aus dem flüssig gewordenen Zusatz Flackern des Lichtes verursacht wird und — falls nicht ganz reine Salze gewählt sind — Schlackenbildung erfolgt. Je nach der chemischen Beschaffenheit der Zusätze können sich Dämpfe bilden, die der Gesundheit oder den Metallteilen der Lampe schädlich sind.

Da man für die Effektkohlen geringere Durchmesser wählt, um ruhiges Licht zu erzielen, und der längere Lichtbogen eine stärkere Luftzufuhr zur Folge hat, so ist die Brenndauer bei gegebener Länge kürzer als bei der üblichen Dimensionierung gewöhnlicher Kohlen. Während z. B. bei einer gewöhnlichen 8 Ampere-Gleichstromlampe mit Kohlen von 16 und 10 mm Durchmesser der Abbrand stündlich 16—17 mm beträgt, beläuft er sich bei Flammenbogenlicht auf $27\frac{1}{2}$ mm bei gleicher Stromstärke und Spannung, wenn beide Kohlen 10 mm Durchmesser haben.

Für die Intensivflammenbogenlampen¹⁾ werden noch schwächere Kohlenstifte gewählt, dementsprechend ist der Abbrand noch stärker. Benutzt man, um die Brenndauer zu verlängern, stärkere Kohlenstifte, so ist es zweckmäßig, um möglichst ruhiges Licht zu erzielen, als negativen Pol einen „ungetränkten“ oder weniger stark mit Leuchtzusätzen versehenen Kohlenstift zu verwenden²⁾. Um den Abbrand besonders der positiven Kohle einzuschränken, bedient man sich des sogen. Sparer's. Er besteht meistens aus einem aus Schamotte angefertigten kleinen Teller oder Schirm, der über dem Lichtbogen angebracht wird. Durch den Sparer wird die Bewegung der Luft verlangsamt. Ferner hat der Sparer noch den praktischen Wert, daß von ihm die mit den heißen Gasen aufsteigenden Aschenteilchen abgefangen werden, wodurch eine Verschmutzung der Lampenteile verhindert wird.

Bei der großen Länge, die der Lichtbogen der Flammenbogenlampen hat, wird die Bildung von Stickstoffdioxid begünstigt. Um die schädlichen Dämpfe abzufangen, legt man einige Gramm kohlenfauren Ammoniums auf den Aschenteller. Dieses Salz verbindet sich unter Abgabe von Selenstoffdioxid mit den Dämpfen zu salpetersaurem Ammonium (Patent der Firma Gebrüder Siemens & Co. in Charlottenburg).

b) Kohlenstifte.

Da die Qualität der Kohlenstifte großen Einfluß auf die Ökonomie und die Beschaffenheit des Bogenlichtes (ruhiges Brennen, Farbe) hat, so

¹⁾ Mit diesem Namen bezeichnet man vielfach Flammenbogenlampen mit schräg stehenden Kohlen.

²⁾ G.-Z. 3. 1903, S. 170.

wollen wir der Fabrikation der Bogenlampenkohlen einen kurzen Abschnitt widmen¹⁾.

Davy, der als der Entdecker des elektrischen Lichtbogens angesehen wird, benutzte bei seinen Versuchen Holzkohle; Foucault empfahl die Verwendung von Retortenkohle. Die Entdeckung, daß man durch Tränken der Kohlen mit Bor säure den Lichtbogen beruhige, verdankt man Casselmann; dieser hat auch zuerst im Laboratorium farbige Lichtbogen hergestellt. Den Gebrüthern Siemens endlich gebührt das Verdienst, die Dochkohle in die Beleuchtungstechnik eingeführt zu haben.

Wir stellen an gute Kohlenstifte die Anforderungen, daß sie eine lange Brenndauer besitzen, daß sich zwischen ihnen ein ruhiger, nicht flackernder Lichtbogen bildet, daß der Prozentsatz an Aschenbestandteilen ein nur geringer, daß endlich die Lichtausbeute im Verhältnis zur aufgewendeten Energie eine günstige ist. Neben sorgfältiger Auswahl der Rohmaterialien und richtiger Wahl des Mischungsverhältnisses spielt bei der Fabrikation vor allem das Pressen und gute Brennen der geformten Stifte eine wichtige Rolle.

Als Rohmaterialien finden Retortenkohle, Ruß und Steinkohlenteer Verwendung. Der Ruß wird mit Teer vermischt, aus der teigartigen Masse werden die sogen. Rußnubeln gepreßt, die, nachdem sie gebrannt sind, in Mühlen vermahlen werden. Die Kohlen werden sorgfältig pulverisiert und mit heißem Teer versetzt; die Masse wird in Mischmaschinen gemengt. Hierauf wird das Gemenge gewalzt oder im Kollergang geknetet und dann durch eine Vorpresse zu einem Zylinder gepreßt. Hierbei sollte ein möglichst hoher Druck angewendet werden. Durch eine Strangpresse gibt man der Kohle die gewünschte Endform. Die Stäbe werden jetzt, in Schamottetiegel eingelegt, in Ringöfen befördert und hier dadurch, daß man sie nacheinander in Kammern von verschiedener Temperatur bringt, zuerst vorgewärmt, dann stark erhitzt und zuletzt langsam abgekühlt. Um Verbrennung der Kohlenstifte zu verhüten, werden sie in Koks-pulver eingebettet. Die ganze Brenndauer beläuft sich bei einem mittleren Ringofen auf etwa 10 Tage. Schließlich werden die Kohlenstäbe auf Karbo-rundumscheiben an einem Ende zugespitzt.

Die zur Aufnahme der Dochtmasse nötige zentrale Bohrung erhält man dadurch, daß man in dem Mundstücke der Strangpresse einen Stift („Nadel“) anbringt. Die Dochtmasse, die man nach dem Brennen in den zu ihrer Aufnahme bestimmten Kanal hineinpreßt, besteht aus einem Gemenge von gemahlener verunglückter Homogenkohle, Wasserglas und Bor säure.

Wie sehr die Qualität der Kohlen die Ökonomie einer Lampe beeinflusst, geht aus der Angabe der Firma Körting & Mathiesen²⁾ hervor, daß die beste Marke einer Firma unter völlig gleichen Verhältnissen eine um 20—25% stärkere Beleuchtung ergab, als eine billigere Marke. Man sollte daher nur Kohlen allerbesten Qualität benutzen.

¹⁾ Siehe G.-Z. 3. 1901, S. 320.

²⁾ Das Bogenlicht und seine Anwendung. Von Körting & Mathiesen.

Die Kohlenstifte müssen an einem möglichst trockenen Orte aufbewahrt werden, weil bei feuchten Kohlen die Lichtausbeute eine ungünstige ist und das Licht unruhig brennt.

c) Die Bogenlampen.

Der Reguliermechanismus oder das Regelwerk einer elektrischen Bogenlampe muß mehrere Aufgaben lösen: Beim Einschalten der Lampe müssen die Kohlen zur Berührung gebracht und dann sofort voneinander getrennt werden, damit sich der Lichtbogen bilden kann; da ferner die Kohlen an den Spitzen abbrennen und daher der Lichtbogen allmählich länger, unruhig und schließlich abbrechen würde, so müssen die Kohlen in dem Maße, in dem sie abbrennen, vorgeschoben werden.

Je nach der Art, wie man zwecks Betätigung des Regulierwerkes die Schaltung ausführt, werden die Bogenlampen in Hauptstrom-, Nebenschluß- und Differentiallampen eingeteilt.

Bei den Hauptstromlampen (s. Fig. 185) sind die Elektromagnetspule s und der Lichtbogen hintereinander geschaltet. In unserer schematischen Figur sind p_1 und p_2 die Anschlußklemmen, K_1 und K_2 die Kohlen. Da der Reguliermechanismus in Tätigkeit tritt, wenn sich die Stärke des Elektromagnets ändert, diese

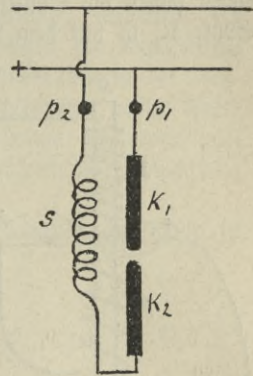


Fig. 185.

aber von der Stromstärke abhängig ist, so reguliert die Hauptstromlampe auf konstante Stromstärke. Natürlich muß der Mechanismus so eingerichtet sein, daß sich vor dem Einschalten die Kohlen berühren, da ja sonst ein Stromkreis nach dem Einschalten nicht vorhanden ist. Die Hauptstromlampe eignet sich nicht für Serienschaltung; sie findet daher bei den Beleuchtungsanlagen mit 110 bzw. 220 Volt Netzspannung nur in einzelnen Fällen Verwendung.

Die Nebenschlußlampe. Wie man aus dem Schema (Fig. 186) erfieht, teilt sich der aus der positiven Leitung kommende Strom; durch die Spule s , die aus vielen Windungen eines dünnen Kupferdrahtes besteht und daher einen großen Widerstand hat, fließt ein viel schwächerer Strom als durch den Lichtbogen. Nennen wir die Lichtbogenspannung e und den Widerstand der Spule w , so hat der durch s

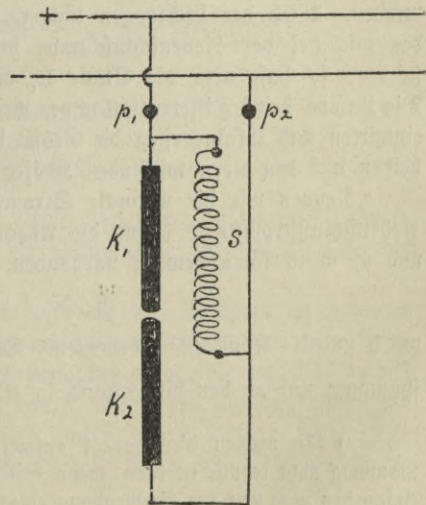


Fig. 186.

fließende Strom die Stärke $i = \frac{e}{w}$, denn e ist ja auch die Spannung an den Enden der Spule. Sobald sich also die Lichtbogenspannung ändert¹⁾, ändert sich auch die Stärke des durch s fließenden Stromes. Wird die Lichtbogenlänge infolge Abbrandes der Kohlen größer, so wächst e und damit auch i , und der Reguliermechanismus tritt in Tätigkeit. Die Lampe reguliert also auf konstante Spannung. Die Nebenschlußlampe eignet sich für Parallelbetrieb und Serienschaltung.

Das Prinzip der Differentillampen soll durch die Fig. 187 erläutert werden. An dem um D drehbaren Hebel ist ein Eisenkern befestigt; diesen suchen die Spulen R_1 und R_2 in sich hineinzuziehen. Die dickdrähtige Spule R_2 ist mit dem Lichtbogen in Serie geschaltet, während die aus vielen

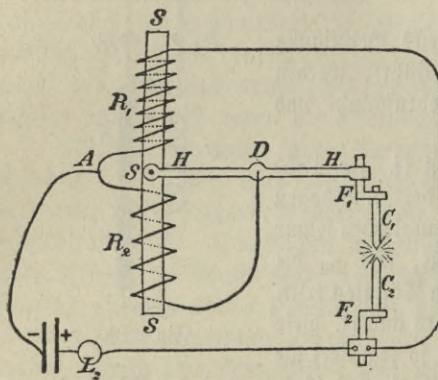


Fig. 187.

Windungen eines dünnen Drahtes bestehende Spule R_1 einen Nebenschluß bildet. Sind die Kohlen C_1 und C_2 voneinander getrennt, und ist kein Lichtbogen vorhanden, so ist die Spule R_2 stromlos, während durch R_1 ein verhältnismäßig starker Strom fließt. Dadurch, daß der Eisenkern, auf den zunächst nur das Solenoid R_1 wirkt, gehoben wird, werden die Kohlen zur Berührung gebracht. Da jetzt durch R_2 ein starker Strom fließt, so bewegt sich der Eisenkern abwärts, so daß die Kohlenspitzen voneinander getrennt

werden. Wird der Lichtbogen länger, so wird der durch R_1 fließende Strom, der wie bei der Nebenschlußlampe der Lichtbogenspannung proportional ist, stärker, so daß also die Spule R_1 den Eisenstab etwas in die Höhe zieht. Die Lampe heißt Differentillampe, weil die beiden Spulen auf den Eisenkern S einwirken und infolgedessen die Größe der Hebeldrehung von der Differenz der beiden auf den Kern wirkenden Kräfte abhängt.

Nennen wir die normale Stromstärke des Lichtbogens J , die zugehörige Nebenschlußstromstärke i und die Anzahl der Windungen der beiden Spulen N und n , so ist Gleichgewicht vorhanden, wenn

$$K \cdot N \cdot J = K' \cdot n \cdot i,$$

wo K und K' Konstanten bedeuten. Da nun $i = \frac{e}{w}$, wenn e die Lichtbogenspannung und w der Widerstand in R_1 ist, so gilt die Gleichung

¹⁾ Wir machen hier darauf aufmerksam, daß die Lampe bei konstanter Regspannung nicht regulieren kann, wenn kein Vorschaltwiderstand vorhanden ist. Da wir einstweilen noch von der Verwendung eines solchen absehen, so müssen wir annehmen, daß sich die Regspannung ändert.

$$K \cdot N \cdot J = K' \cdot n \cdot \frac{e}{w} \text{ oder}$$

$$\frac{e}{J} = \frac{K \cdot N \cdot w}{K' \cdot n}$$

$\frac{e}{J}$ können wir aber als den Lichtbogenwiderstand ansehen bezw. ist dieser Widerstand, wenn in dem Lichtbogen keine elektromotorische Gegenkraft tätig ist. Da ferner alle Größen auf der rechten Seite unserer Proportion konstant sind, so besagt unsere Gleichung, daß die Differentiallampe auf konstanten Lichtbogenwiderstand reguliert.

Die Differentiallampe eignet sich für jede Schaltung, besonders für Reihenschaltung. Sie ist nach Görgeß¹⁾, was die Feinheit der Regulierung anbelangt, der Nebenschlußlampe überlegen. Kleinen Schwankungen der Netzspannung entsprechen bei der Nebenschlußlampe verhältnismäßig große Änderungen der Stromstärke, während bei der Differentiallampe die prozentuale Änderung der Stromstärke gerade so groß wie die prozentuale Schwankung der Netzspannung ist.

Bezeichnen wir nämlich mit dE die Änderung der Netzspannung E , so ist

$$100 \cdot \frac{dE}{E} = \Delta E$$

die prozentuale Änderung von E .

Analog ist

$$100 \cdot \frac{dJ}{J} = \Delta J$$

die prozentuale Änderung des ganzen in die Lampe fließenden Stromes.

Es läßt sich nun beweisen, daß wenn e die Lampenspannung ist,

$$\text{für die Nebenschlußlampe } \Delta J = \frac{E}{E - e} \Delta E \text{ und}$$

$$\text{„ „ Differentiallampe } \Delta J = \Delta E.$$

Ist z. B. $E = 55$ Volt, $e = 40$ Volt, so ist

$$\frac{E}{E - e} = \frac{55}{15} = 3\frac{2}{3}$$

Ändert sich also in diesem Falle die Netzspannung um 1% (von 55 Volt), so ändert sich bei der Nebenschlußlampe die Stromstärke um $3\frac{2}{3}\%$, bei der Differentiallampe aber nur um 1%.

Reguliermechanismus. Bevor wir mit der Beschreibung einzelner Systeme beginnen, wollen wir einige allgemeine Bemerkungen über den Reguliermechanismus vorausschicken. Bei der Nebenschlußlampe, die wir als Beispiel wählen, soll das Regelwerk in Funktion treten, wenn die Lichtbogen Spannung einen gewissen Betrag e überschreitet oder unter diesen Betrag sinkt. Der Spannung e entspricht eine gewisse Stärke des durch die Nebenschlußspule

¹⁾ Siehe G.-L. Z. 1899, S. 444.

fließenden Stromes, dieser eine gewisse Amperewindungszahl oder eine gewisse Anziehungskraft des Elektromagnets. Wir können daher auch sagen, daß das Regelwerk in Tätigkeit treten muß, wenn die anziehende Kraft des Elektromagnets eine gewisse Stärke besitzt. Daraus folgt, daß eine der magnetischen Kraft entgegenwirkende Kraft in den Mechanismus hineingelegt werden muß. Als solche eignet sich die Spannkraft einer Feder. Es sei in Fig. 188 E der

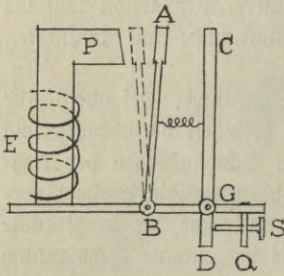


Fig. 188.

Elektromagnet mit dem Pole P; der von dem Pole angezogene Anker A sei an einem einarmigen Hebel befestigt, der um B drehbar ist. Die Spiralfeder sei einerseits an AB, andererseits an der Säule CG befestigt und wirke als Zugfeder. Fließt durch die Wicklung des Elektromagnets ein Strom, so wird A von P angezogen; die Feder wird also stärker gespannt, d. h. sie wirkt der anziehenden Kraft des Elektromagnets entgegen. Bei jeder Stromstärke nimmt A eine bestimmte Lage ein. Man kann nun die Bewegung des Ankers A auf die Kohlen übertragen.

Die beschriebene einfache Regulierung würde genügen, wenn die Kohlen nicht infolge des Abbrandes kürzer würden. Da dies aber geschieht, so muß noch auf eine andere Weise eine Annäherung oder ein Nachschub der Kohlen erreicht werden. Auf diese Regulierung werden wir später näher eingehen. Einstweilen wollen wir annehmen, daß der Nachschub erfolgt, sobald der Anker in die in der Figur ange deutete Lage gelangt. Werden die Kohlen durch den Mechanismus einander genähert, so sinkt die Lichtbogen spannung, mit ihr die Anziehung, die der Pol P auf den Anker ausübt, die Feder zieht den Anker zurück und der den Nachschub besorgende Mechanismus hört auf zu arbeiten.

Der Zweck der Regulierschraube S, deren Muttergewinde sich in der feststehenden Platte Q befindet, ist jetzt leicht zu erkennen. Drehen wir S in dem Sinne, daß das untere Ende des um G drehbaren Hebels nach links gedrückt wird, so bewegt sich der obere Teil CG nach rechts; die Feder wird daher stärker gespannt. Folglich rückt A erst dann in die punktiert gezeichnete Stellung ein oder der Mechanismus, der den Nachschub besorgt, kann erst dann in Aktion treten, wenn die Lichtbogen spannung einen größeren Wert hat als vor der Drehung der Regulierschraube. Wird aber die Regulierschraube in einem dem eben angenommenen entgegengesetzten Sinne gedreht, so wird die Spannung der Feder kleiner und die Lichtbogen spannung wird erniedrigt. Man kann also mit Hilfe der Schraube die Lichtbogen spannung oder die Lichtbogenlänge regulieren.

Jetzt ist noch zu zeigen, wie der Reguliermechanismus ausgelöst werden kann. Es sei Z (Fig. 189) ein auf der Drehachse A sitzendes Zahnrad, auf dem ein kleineres mit einer Nille versehenes Rad festgenietet sein möge. Die Kohlenhalter H_1 und H_2 seien an einem Faden oder an einer Kette befestigt. Ist das Gewicht des oberen Kohlenhalters inkl. Kohle größer als das des unteren Kohlenhalters K_2 , so hat das Zahnrad die Tendenz, sich zu drehen. Es befindet sich nun ober-

halb Z ein zweites Zahnrad, das zwei durch Metallstücke beschwerte Arme trägt. Befindet sich der Drehungspunkt von Z_1 oberhalb des Mittelpunktes des Rades, wie es in der Fig. 189 angedeutet ist, so kehrt Z_1 , wenn wir es aus der Gleichgewichtslage herausbringen und dann sich selbst überlassen, wieder in die ursprüngliche Lage zurück. Dreht sich das große Zahnrad, so stößt bald der mit 1 bezeichnete Zahn gegen den Zahn a des Balanciers, so daß Z_1 etwas gedreht wird. (Man denke sich die Arretierungsvorrichtung h einstweilen weggenommen.) Sobald der Zahn 1 den Zahn a freigibt, schwingt Z_1 zurück, und der Zahn a greift in eine Zahnflanke des Rades Z . Dreht sich Z weiter, so wiederholt sich das eben beschriebene Spiel. Während sich also Z dreht, pendelt Z_1 . An dem Arme b des Balanciers ist eine Metallzunge befestigt, ebenso an dem drehbar angeordneten Träger h . Drückt der Zahn 1 gegen den Zahn a , so legt sich die Zunge bei b auf die Anschlagzunge, so daß die Bewegung der beiden Zahnräder gehemmt wird. Nehmen wir nun an, daß die Drehung des Ankers A in Fig. 188 in irgendeiner Weise auf den Träger der Anschlagzunge H übertragen wird und daß die Balancierzunge frei wird, wenn der Anker in die punktierte Stellung gerückt ist, so kann der Nachschub erfolgen, sobald die Lampenspannung einen gewissen Betrag erreicht hat.

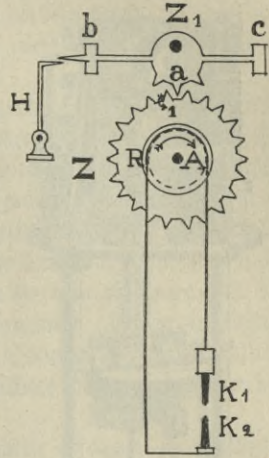


Fig. 189.

Das pendelnde Zahnrad kann man durch ein rotierendes mit Flügeln versehenes Rad ersetzen; die Bewegung des Laufwerkes wird in diesem Falle gehemmt, wenn sich einer der Flügel auf die Anschlagzunge legt.

Bei der schematisch gezeichneten Anordnung in Fig. 189 bleibt der Lichtbogen immer an derselben Stelle, wenn beide Kohlen gleich stark abbrennen; man nennt derartige Lampen Fixpunktbogenlampen. Brennen beide Kohlen nicht gleich stark ab, d. h. werden sie in derselben Brennzeit nicht um das gleiche Stück kürzer, so wird die Entfernung des Lichtbogens von dem Lampengehäuse im Laufe der Zeit allmählich größer oder kleiner, je nachdem der Abbrand der oberen oder der unteren Kohlen der stärkere ist.

Von den zahlreichen Konstruktionen der verschiedenen Firmen wählen wir nur einige wenige für die Beschreibung heraus.

Die Nebenschlußlampe der Firma Körting & Mathieson, die in den Fig. 190 und 191 abgebildet ist, gehört zu den Typen, bei denen durch einen Elektromagnet ein schwingendes Laufwerk betätigt wird. Die Bewicklung des Elektromagnets a besteht aus ungefähr 11 000 Windungen eines sehr dünnen Kupferdrahtes und hat bei gewöhnlicher Temperatur einen Widerstand von rund 450 Ohm. Bei einer Lampenspannung von 42 Volt, die wir als die normale der ausgewählten Lampe ansehen wollen, beträgt also die Stärke des durch die Spule fließenden Stromes ungefähr 0,1 Amp. und die

Amperewindungszahl liegt nahe bei 1000, so daß der Elektromagnet kräftig erregt wird. Bei der angenommenen Lampenspannung verbraucht der Regulierungsmechanismus 4,2 Watt. Die Elektromagnetschenkel haben schräge Einschnitte, in die eine Eisenplatte *b*, der Anker, paßt. Dieser bildet die obere

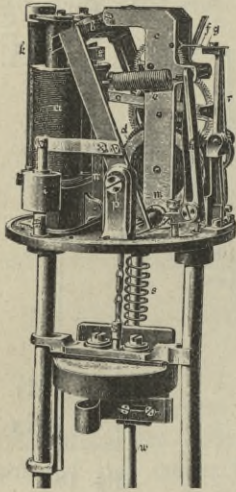


Fig. 190.

Seite des schräg angeordneten, rechteckigen Rahmens, den wir den Ankerrahmen nennen wollen. Er ist um zwei Stifte *p* drehbar. Die dem Anker gegenüberliegende Seite des Rahmens trägt das Laufwerk, bestehend aus zwei oben mit einem horizontalen Hebelarme versehenen Eisenplatten *c* und dem Zahnradgetriebe, dessen nähere Einrichtung aus der Fig. 191 zu ersehen ist. Über das untere, größte Rad des Laufwerkes ist eine Kette gelegt, die die beiden Kohlenhalter trägt. Wie Fig. 191 zeigt, geht das rechte Kettenstück durch das Führungsrohr des unteren Kohlenhalters. Die Spiralfeder *e*, die einerseits an dem Hebelarme *h*, andererseits an dem Ankerrahmen befestigt ist, wirkt der anziehenden Kraft des Elektromagnets entgegen.

Durch die bis jetzt beschriebene Einrichtung können die Kohlen einige Millimeter einander genähert werden. Beim Einschalten der Lampe z. B. fließt durch die Nebenschlußspule ein kräftiger Strom, so daß der Anker stark angezogen wird. Da der Zahnradrahmen die Bewegung des Ankers, mit dem er fest verbunden ist, mitmacht, so dreht er sich um die unter dem Buchstaben *m* liegende Achse¹⁾. Da das Kettenrad *d* an der Drehung des Rahmens teilnimmt, so wird die obere Kohle um ein kleines Stück gesenkt, die untere um ein gleiches Stück gehoben, so daß sich der Abstand der beiden Kohlen spitzen verringert. Die aus der Drehung des Zahnradrahmens resultierende kleine Verschiebung der Kettenradachse (nach links) wird durch die die Drehung des Ankerrahmens begleitende Verschiebung (nach rechts) kompensiert.

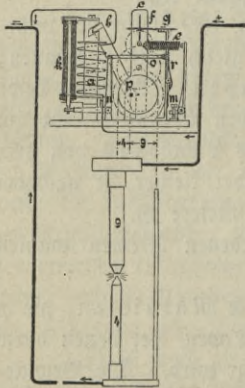


Fig. 191.

Angenommen, die Kohlen seien durch die Drehung des Kettenrades beim Einschalten der Lampe zur Berührung gebracht worden. Es fließt dann ein Strom von großer Stärke durch die Kohlen, und es wächst der Spannungsverlust in dem vor der Lampe liegenden Widerstande (*f*. Vorschaltwiderstand); diesen Spannungsverlust wollen wir mit *e*, bezeichnen,

¹⁾ Diese Achse und mit ihr der Zahnradrahmen wird, da sich der Ankerrahmen ebenfalls dreht, auch etwas gehoben. Durch die hierdurch verursachte Verschiebung des Kettenrades wird der Abstand der beiden Kohlen nicht verändert.

während E die Betriebsspannung sei. Da die Lampenspannung stets gleich $E - e_1$ ist, so hat sie in dem Momente, in dem sich die Kohlen berühren, einen kleinen Wert (in dem Produkte $w \cdot J = e_1$ ist J groß). Die Stromstärke des Nebenschlusses sinkt also; daher wird die auf den Anker b ausgeübte Zugkraft kleiner, und die Spiralfeder zieht den Ankerahmen zurück. Durch diese neue Bewegung des Ankers wird eine Trennung der Kohlenspitzen herbeigeführt, so daß sich der Lichtbogen bilden kann. Der Anker stellt sich auf Gleichgewicht zwischen magnetischer Zugkraft und Federkraft ein.

Der Nachschub der Kohlen kommt durch folgende Einrichtung zustande: Das oberste Rad des Zahnradgetriebes ist als Flügelrad f ausgebildet. So lange einer der vier Flügel auf der Anschlagzunge g liegt, kann eine Bewegung des Flügelrades und daher auch eine Drehung der anderen Zahnräder nicht erfolgen; eine solche ist aber möglich, wenn die Flügelspitze den Anschlag verläßt. Die Kraft, durch die die Drehung verursacht wird, ist die Differenz zwischen dem Gewichte des oberen und unteren Kohlenhalters. Nach den Vorbemerkungen auf S. 353 glauben wir von einer näheren Besprechung der Vorgänge absehen zu können.

Durch Drehung der Schraube m kann die Spannung der Spiralfeder und damit die Lichtbogenlänge bzw. Lichtbogenlänge vergrößert bzw. verkleinert werden (s. S. 352).

Damit die Bewegungen des Ankers nicht ruckweise erfolgen, ist der Ankerrahmen mit dem Luftdämpfer i , einem kleinen Zylinder mit Kolben, verbunden.

Wenn die Lampe brennt, werden beide Kohlen leichter, die obere (positive) aber in höherem Grade als die untere. Die Gewichts-differenz der beiden Kohlenhalter (inkl. Kohle und Kette) verringert sich daher langsam während des Betriebes; diese Verringerung muß, da sie auf die Bewegung des Ankerrahmens einen Einfluß ausüben würde, kompensiert werden. Dies wird dadurch erreicht, daß sich die senkrechten Abstände der beiden Kettenstücke von der Drehungsachse p umgekehrt verhalten (4:9) wie die Gewichtsabnahmen der betreffenden Kohlen (9:4) (s. Fig. 191).

Nennen wir nämlich das Gewicht des oberen Kohlenhalters (inkl. Kohle) P und das des unteren P' , so sind die Drehungsmomente der beiden Kräfte in bezug auf den Durchschnittspunkt der Achse p mit der Ebene des Kettenrades gleich $4P$ und $9P'$. Da aber die Angriffspunkte der Kräfte P und P' auf verschiedenen Seiten der Achse p liegen, so ist das resultierende Drehungsmoment gleich $9P' - 4P$. Verringert sich nun das Gewicht der oberen Kohle um δ , so nimmt das der unteren Kohle um $\frac{4}{9}\delta$ ab. Mithin ist jetzt die Differenz der Drehungsmomente

$$9\left(P' - \frac{4}{9}\delta\right) - 4(P - \delta) = 9P' - 4P.$$

Das resultierende Drehungsmoment hat also denselben Wert wie eben.

Wir wollen uns noch Rechenschaft ablegen über den Einfluß, den die Erwärmung der Nebenschlußspule auf die elektrischen Größen des Lichtbogens ausübt. Die Temperaturerhöhung der Spule ist infolge der Jouleschen Wärme in den Drahtwindungen und der Erwärmung des ganzen Mechanismus durch die heißen Lichtbogengase nicht unbedeutend; sie beträgt nach den Angaben der

Firma Körting & Mathiesen bei der beschriebenen Lampe etwa 50° . Beträgt der Widerstand der Spule bei 15° Cels. 450° Ohm, so hat er bei 65° den Wert 540 Ohm.

Es sei nun die Lampe so einreguliert, daß nach Eintritt des stationären Zustandes die Lampenspannung bei 10 Amp. Stromstärke 42 Volt beträgt. Nehmen wir die Netzspannung zu 55 Volt an, so muß der Vorschaltwiderstand w die Gleichung befriedigen $10 \cdot w = 13$; mithin $w = 1,3$ Ohm. Als konstante Amperewindungsanzahl des Elektromagnets ergibt sich $11\,000 \cdot \frac{42}{540} = 855$.

Die Lampe reguliert also, sobald die Amperewindungsanzahl den Betrag 855 erreicht.

Wird unsere Lampe eingeschaltet, so beträgt der Widerstand der Spule anfangs 450 Ohm; auch jetzt tritt das Laufwerk in Tätigkeit, wenn die Amperewindungsanzahl gleich 855 ist. Die anfängliche Lampenspannung ergibt sich also aus der Gleichung

$$11\,000 \cdot \frac{e}{450} = 11\,000 \cdot \frac{42}{540},$$

woraus folgt: $e = 35$ Volt.

Die zugehörige Stromstärke findet man durch folgende Überlegung: In dem Vorschaltwiderstande müssen $55 - 35 = 20$ Volt vernichtet werden. Da derselbe aber gleich $1,3$ Ohm ist, so muß die Stromstärke $20 : 1,3 = 15,5$ Amp. betragen.

Unsere Berechnungen, die man leicht verallgemeinern kann, lehren uns, daß die Lampenspannung mit zunehmender Erwärmung allmählich wächst und der Strom abnimmt. Da aber der stationäre Zustand der maßgebliche ist, die Lampe also für diesen einreguliert wird, so verbraucht sie anfangs zuviel Strom.

Diesen Übelstand zu beseitigen, ist die Aufgabe des Wärmekompensators $K^1)$. Er besteht aus einer größeren Anzahl von Röhren aus Zink- und Aluminiumblech, die ineinandergesteckt und so miteinander verbunden sind, daß die Differenz ihrer Ausdehnungen zur Geltung kommt. Das innerste Rohr (aus Zink) ist mit dem Winkelhebel n (s. Fig. 191) fest verbunden und letzterer durch die Zugstange o mit dem Träger r der Anschlagzunge g . Erwärmt sich nun der Lampenmechanismus während des Betriebes, so wird die Anschlagzunge um ein kleines Stück nach rechts gedrückt, so daß das Flügelrad schon bei einer geringen Zugkraft des Elektromagnets frei wird. Durch den Wärmekompensator wird also die Verringerung der Amperewindungsanzahl des Elektromagnets, die eine Verlängerung des Lichtbogens zur Folge hat, unschädlich gemacht. Während man Lampen ohne Wärmekompensator erst dann einregulieren darf, wenn der stationäre Zustand eingetreten ist, kann man diese Arbeit bei Lampen mit Kompensator sofort nach dem Einschalten vornehmen.

Bei der Differentillampe von Krizik und Piette (Siemens-Schuckert-Werke), deren Einrichtung von überraschender Einfachheit ist, wird

¹⁾ G. & T. 3. 1898, Nr. 20.

die Kraft, mit der eine von einem elektrischen Strome durchflossene Spule einen Eisenkern in sich hineinzieht oder hineinanzuziehen sucht, für die Regulierung benutzt. Diese Kraft hängt, abgesehen von der Windungszahl und der Strom-

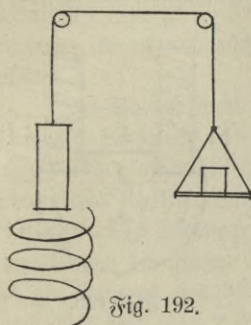


Fig. 192.

stärke, von der Lage des Eisenkerns in bezug auf die Spule ab. Hat der Eisenkern eine zylindrische Gestalt, so wandert er so lange in die Spule (Fig. 192) hinein, bis seine Mittelebene mit der Mittelebene der Spule zusammenfällt. Damit nun bei den verschiedenen Lagen des Eisenkerns die

Anziehung der Spule möglichst gleich groß sei, hat Krüzik dem Kern eine konische Gestalt gegeben. Bei der in Fig. 193 abgebildeten Lampe sind die Kohlenhalter an zwei Blechröhren befestigt, die je einen konisch gestalteten, mit der Spitze nach oben gerichteten Weicheisenkern umschließen. Die Blechröhren werden von einer über ein Rad gelegten Schnur getragen und dienen als Stromzuleitungen zu den Kohlen; ihnen selbst wird der Strom durch biegsame, durch Seide gut isolierte Drähte zugeführt. Mit dem Abbrande wird der Kern der Nebenschlußspule langsam in diese hineingezogen, während der Kern der Hauptstromspule aus seiner Spule nach unten heraustritt.

Wechselstromlampen. Verschiedene Konstruktionen von Lampen, die für Gleichstrom gebaut sind, können ohne weiteres oder nach kleinen Abänderungen, z. B. in der Nebenschlußwicklung, für Wechselstrom verwendet werden.

Außer der Kraft, die ein Elektromagnet oder ein Solenoid auf Eisen ausübt, verwendet man für die Konstruktion von Wechselstromlampen noch folgende Erscheinungen.

Befindet sich ein Metallring vor einem Pole eines Wechselstrommagnets, so werden in dem Ringe Wechselströme induziert, die eine solche Richtung haben, daß der Ring von dem Pole abgestoßen wird (Thomson-Effekt). — Zu beiden Seiten einer um die Achse A drehbaren Metallscheibe sind in der Nähe der Peripherie Elektromagnetpole angeordnet, die sich gegenüberstehen (Fig. 194). Zwischen

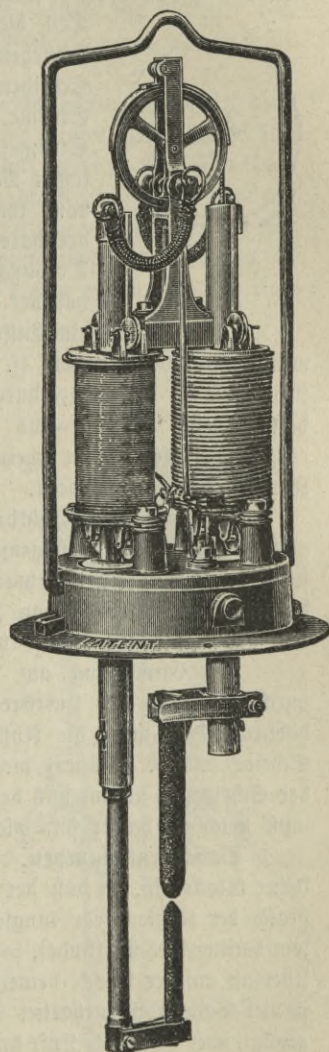


Fig. 193.

der Scheibe und den Polen befinden sich metallische Platten T, die die Pole zum Teil verdecken. Schickt man durch die Elektromagnetspulen Wechselströme, so gerät die Scheibe in Rotation. Das Zustandekommen des Drehmomentes wird von Dr. Benischke¹⁾ folgendermaßen erklärt. Die Kraftlinien treffen zum

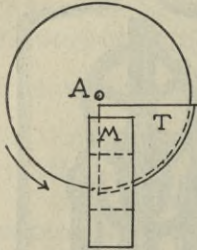


Fig. 194.

Teil die drehbare, zum Teil die feststehenden Scheiben; in allen Scheiben entstehen gleichgerichtete Ströme. Da sich aber gleichgerichtete Ströme anziehen, so wirken die festen Metallplatten auf die links von ihnen gelegenen Teile der drehbaren Scheibe anziehend. Der Drehungssinn ist also unabhängig von der Polarität. Man erhält nun eine Differential-Wechselstromlampe,

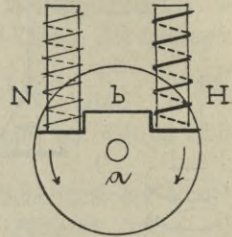


Fig. 195.

wenn man zwei Magnete (s. Fig. 195), von denen der eine durch eine Hauptstromspule H, der andere durch eine Nebenschlußspule N erregt wird, so anordnet, daß sie eine Scheibe aus einem nichtmagnetischen Metall (Aluminium) im entgegengesetzten Sinne beeinflussen. Die Polflächen sind zum Teil durch den Kupferstreifen b abgedeckt.

Bei normalem Lichtbogen sind die beiden Drehmomente einander gleich; wächst die Lichtbogenenspannung, so überwiegt das durch die Nebenschlußspule hervorgerufene Drehmoment, und es erfolgt eine Drehung der Scheibe, die unter Vermittlung von Zahnrädern auf die Kohlen so übertragen wird, daß der Lichtbogen kleiner wird.

Die Einstellung auf eine bestimmte Lichtbogenenspannung kann erfolgen durch Änderung der Luftstrecke zwischen Hauptstrommagnet und Scheibe oder dadurch, daß man die Abstände der Magnetpole von dem Mittelpunkte der Scheibe ändert. Nähert man beispielsweise den Nebenschlußmagnet der Mitte der Scheibe, so nimmt das betreffende Drehmoment ab, und die Lampenspannung muß wachsen, damit sich wieder ein Gleichgewichtszustand ausbilden kann.

Dauerbrandlampen. Schließt man den Lichtbogen in eine besondere kleine Glocke ein, so daß der Luftzutritt ein beschränkter ist, so erfolgt der Abbrand der Kohlen sehr langsam. Wenn, wie vielfach behauptet wird, überhaupt kein Luftwechsel stattfindet, so müßte sich die verdampfte Kohle bald als schwarzer Überzug auf der Glocke bemerkbar machen, es sei denn, daß in den Beimengungen so viel Sauerstoff enthalten ist, daß dieser für die Drydation des Kohlenstoffes genügt, oder es müßte Luft durch die heiße Glocke hindurchdiffundieren, was durchaus nicht unmöglich ist. Die Brenndauer eines Kohlenpaares wird zu 100 bis 200 Stunden angegeben. Die längere Brenndauer der Kohlen, für die eine besondere Marke zu verwenden ist, wird erkauft auf Kosten des Wirkungsgrades. Um nämlich die gleiche Lichtwirkung zu erzeugen, bedarf man einer etwa 1,6mal

¹⁾ G.-Z. 3. 1899, S. 82.

größeren elektrischen Energie als bei gewöhnlichen Bogenlampen. Bei letzteren wird nicht nur die der Lampe zugeführte elektrische Energie in Wärme und Licht umgewandelt, sondern auch die bei der Oxydation der Kohle frei werdende chemische Energie; diese letztere beträgt zirka 15 % der der Lampe zugeführten elektrischen Energie. Jedoch wird man in manchen Fällen den Nachteil des größeren Stromverbrauches wegen der bequemeren Bedienung mit in den Kauf nehmen.

Die Dauerbrandlampen, auch Lampen mit beschränktem Luftzutritt oder Sandus=Lampen genannt, brennen bei etwa 80 Volt Lampenspannung, so daß man bei der meist üblichen Netzspannung von 110 Volt nur eine Lampe in einen Stromkreis schalten kann. Die Kohlen spitzen sich nicht zu (s. Fig. 183 auf S. 343). Der Lichtbogen hat eine Länge von etwa 8 mm und wandert hin und her. Wegen der großen Lichtbogenlänge ist die Lichtverteilung eine günstigere als bei den Lampen mit offen brennendem Lichtbogen; hierzu trägt auch der Umstand bei, daß man 2 Glocken verwendet. —

Von den verschiedenen Formen wählen wir für eine kurze Beschreibung heraus die

Regina=Bogenlampe (System Rosemeyer), zumal bei dieser Lampe neue Konstruktionsprinzipien zur Anwendung gelangen. Die Absperrung des Lichtbogens von der Außenluft ist soweit als möglich getrieben. Der Lichtbogen wird von einer kleinen Glocke, die gegen den Lampenkörper hermetisch abgedichtet ist, eingeschlossen und steht mit der Außenluft nur durch ein abwärts gebogenes Röhrchen in Verbindung (s. Fig. 196). Außerdem wird in die Gasausströmungsöffnung ein kleines Ventil eingesetzt; infolgedessen wird den Innengasen der Austritt erschwert, so daß der Druck im Glase steigt und zugleich eine hohe Temperatur in der Umgebung des Lichtbogens erzielt wird. Die Lampe wird nur für Gleichstrom gebaut und bedarf bei Einzelschaltung mindestens 100 Volt Netzspannung. Bei Verwendung eines Ventils erreicht die Brenndauer eines Kohlenpaares nach den Angaben der Firma eine Höhe von 400 Stunden, — die längste Brenndauer, die bis jetzt bei Bogenlampen überhaupt erzielt worden sein dürfte. Der außerordentlich geringe Kohlenverbrauch kann vielleicht durch die Annahme erklärt werden, daß die von der

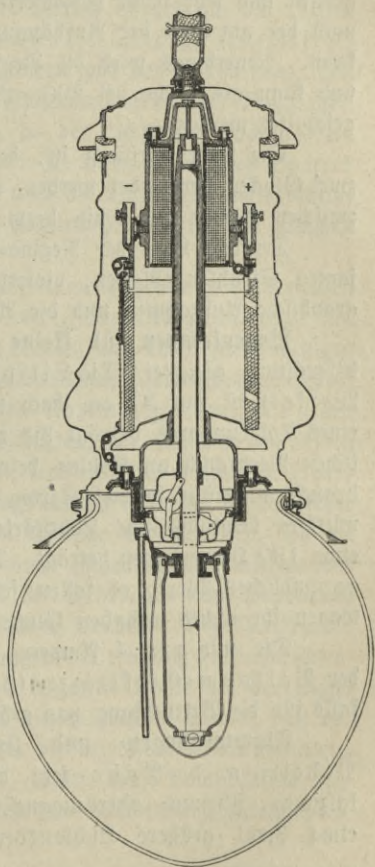


Fig. 196.

positiven Elektrode sich ablösenden Kohlenpartikelchen sich wegen der geringen vorhandenen Sauerstoffmenge fast vollzählig nach der negativen Kohle hin begeben, dort negativ geladen werden und nach der positiven Kohle zurückfliegen usw.

Um das Anbrennen der Lampe zu erleichtern, wird neuerdings noch ein zweites Ventil an der Lampe angebracht, das nur beim Einschalten gelüftet wird, so daß Luft eintreten kann. Hat sich der Lichtbogen gebildet, so wird das Hilfsventil automatisch geschlossen. Wäre das zweite Ventil nicht vorhanden, so würde der Lichtbogen beim Einschalten so lange abbrechen, bis durch die verdampften Kohlentelchen ein genügend leitfähiges Gasgemisch zwischen den Elektroden gebildet ist.

Die nähere Einrichtung der Lampe, die zu den Hauptstromlampen gehört, ist aus der Fig. 196 zu ersehen: Eine vom Lampenstrom durchflossene Spule zieht einen Eisenkern in sich hinein. Der Widerstand ist in der Lampe eingebaut und sehr leicht veränderlich, so daß die Lichtbogenspannung ohne Mühe nach der am Orte der Aufhängung herrschenden Spannung einreguliert werden kann. Neuerdings wird die Regina-Lampe auch als Differentiallampe gebaut und kann als solche bei 200—250 Volt Netzspannung zu zweien hintereinander geschaltet werden.

Die Lichtverteilung ist, da der Lichtbogen eine große Länge hat und zwei Glocken verwendet werden, eine sehr günstige; daher kann die Entfernung zwischen Lampe und Fuß- bzw. Erdboden stark reduziert werden.

Da das Licht der Regina-Bogenlampe sehr reich ist an chemisch wirkenden Strahlen (blauen, violetten und ultravioletten), so ist es für photographische Aufnahmen und die Anfertigung von Blaupausen sehr gut geeignet.

Bogenlampen für kleine Stromstärken sind hauptsächlich für Innenbeleuchtung geeignet. Die Liliputbogenlampe der Siemens-Schuckert-Werke¹⁾ ist nur 31 cm hoch und hat 8 cm Glockenweite. Die Brenndauer eines Kohlenpaares beträgt bis zu 20 Stunden, und die Kosten für den stündlichen Verbrauch an Kohlen belaufen sich auf etwa $\frac{1}{4}$ Pf. Die Lampe verbraucht ungefähr so viel Strom wie vier 16kerzige Glühlampen, während die mittlere hemisphärische Lichtstärke der mit Marmorlocke versehenen Lampe etwa 130 Hefnerkerzen beträgt. Die Lampe besitzt kein gegen Erschütterungen z. empfindliches Werk; es sollen selbst die Erschütterungen in einem Eisenbahnwagen ihr nichts anhaben können.

Die mit nur 4 Ampere brennende, zierliche Mignon-Bogenlampe der Voltahn-Elektrizitätsgesellschaft Frankfurt a. M. findet ebenfalls für die Beleuchtung von größeren Wohnräumen, Büreaus zc. Verwendung.

Flammenbogen- und Intensivflammenbogenlampen. Bremer in Neheim a. d. Ruhr setzt den Kohlen 20—50% Metallsalze, z. B. Kalzium-, Natrium- oder magnesiumhaltige Verbindungen zu und erzielt eine etwa 3mal größere Lichtausbeute wie bisher. Wir teilen einige Meß-

¹⁾ E.-L. 3. 1903, S. 242.

resultate mit (Prof. Wedding¹). Gleichstromlampe ohne Glocke, 12,3 Amp., 44,4 Volt; mittlere hemisphärische Lichtstärke 4320 HK, spez. Verbrauch 0,126 Watt. Dieselbe Lampe mit Glocke: spez. Verbrauch 0,196 Watt. — Sehr große Lampe mit 4 Lichtbögen, ohne Glocke, 55,8 Amp., 89,3 Volt. Die Lichtausstrahlung hatte ein Maximum bei 37° von 83 000 Kerzen, und der spez. Verbrauch betrug ohne Glocke 0,1 Watt, mit Glocke 0,17 Watt. Der niedrigste Wert der bei gewöhnlichen Lampen gefunden worden war, betrug 0,3 Watt. Auch bei Benutzung von Wechselstrom ist die Ökonomie bedeutend günstiger als früher.

Bei dem Abbrand der Kohlen wird der Nachschub fortwährend und nicht stoßweise durch das Gewicht der Kohlen und ein Zusatzgewicht bewirkt. Als Reflektor bezw. Sparer dient ein konischer Blechzylinder von etwa 5 cm Höhe, der über die Kohlenenden gestülpt ist. Die im Lichtbogen verdampften Metallverbindungen schlagen sich auf dem Blechzylinder nieder und bilden eine vorzüglich reflektierende Oberfläche. Die Farbe des Lichtes ist gelblich bis rötlich.

Die Flammenbogenlampen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin²) sind gewöhnliche Differentillampen mit der Abänderung, daß der Zündhub mit Rücksicht auf den langen Flammenbogen nach Möglichkeit vergrößert wurde; die Luftpumpe erwies sich, da der Lichtbogen doch an und für sich etwas unruhig ist, als überflüssig. Über die Verwendung des Sparerers haben wir schon gesprochen. Für Wechselstrom wird die Differentialmotorlampe, bei der Magnetpole auf eine Aluminiumscheibe einwirken, benutzt. Die Lampen werden auf 27—30 Volt einreguliert.

Der Reguliermechanismus der Intensivflammenbogenlampen derselben Firma ist im wesentlichen der gleiche wie bei den Flammenbogenlampen. Um die Anordnung der Kohlen unter einem spitzen Winkel und einen gleichmäßigen Nachschub zu ermöglichen, wurden außer den beiden Hauptführungsstäben zwei neue Führungsstäben für die Kohlenhalter bezw. Kohlen angeordnet, die gegen die ersteren um 90° versetzt sind. An einem Schlitten, der zwischen den beiden Hauptführungsstäben gleitet, ist ein die beiden Kohlenhalter tragender Querkalken angebracht. An den beiden Hauptführungsstäben ist ferner der Reflektor angeordnet, der mit einer möglichst feuerfesten Einlage versehen ist. Da die beiden schräg nebeneinander stehenden Kohlen einen spitzen Winkel miteinander bilden, so müßten sie beim Einschalten, damit der Lichtbogen eine hinreichend große Länge erhält, um ein großes Stück gehoben werden. Bei Gleichstrom genügt aber der beschränkte Hub nicht, eine genügende Trennung herbeizuführen. Die Einrichtung ist daher so getroffen, daß die negative Kohle bei der Lichtbogenbildung etwas gedreht wird, natürlich in einem solchen Sinne, daß der Abstand der Kohlenspitzen vergrößert wird. Da die Wechselstromintensivlampe nicht an einen bestimmten Hub gebunden ist, so konnte diese Komplikation hier wegfallen. — Die in den Intensivbogenlampen zur Verwendung gelangenden

¹) G.-Z. Z. 1900, S. 546.

²) G.-Z. Z. 1903, S. 167.

Kohlen bleiben zweckmäßig oben auf eine Länge von 50—60 mm ungedocht (ohne Zusatz von Salzen); es reißt dann der Flammenbogen von selbst ab, wenn der gedochete und mit Salzen versehene Teil abgebrannt ist, so daß eine Zerstörung des Reflektors vermieden wird. Sowohl bei Gleichstrom als auch bei Wechselstrom reguliert man auf 45 Volt. — Ein magnetisches Gebläse wird nicht benutzt (s. auch S. 345).

d) Nebenapparate für Bogenlampen.

1. Der Vorschalt- oder Beruhigungswiderstand. Wenn eine Bogenlampe eingeschaltet wird, so werden die Kohlen für einen Moment zur Berührung gebracht. Da während der Berührung der Widerstand im Hauptstromkreise nur gering ist, so wächst der Strom zu einer bedenklichen Größe an. Um das zu verhindern, legt man vor die Lampe einen passend gewählten Widerstand. Es fragt sich, ob eine Bogenlampe überhaupt regulieren kann, wenn sie ohne Vorschaltwiderstand an ein Netz mit konstanter Spannung angeschlossen ist. Diese Frage dürfte für die Differentillampe zu bejahen sein, weil der konstant bleibenden (in unserem Falle von der Netzspannung abhängigen) Kraft der Nebenschlußspule die infolge der Verlängerung des Lichtbogens variable Kraft der Hauptstromspule gegenübersteht. Anders aber bei der Nebenschlußlampe; denn deren Mechanismus kann nur dann in Tätigkeit treten, wenn sich die Lichtbogen Spannung ändert. Diese würde aber unter der gemachten Annahme konstant, nämlich gleich der Netzspannung sein. Nennen wir den Vorschaltwiderstand w , die Lampenstromstärke J , die Netzspannung E , die Lampen Spannung e , dann ist $E - e = w \cdot J$ der Spannungsverlust im Vorschaltwiderstand. Wird der Lichtbogen infolge Abbrandes der Kohlen etwas länger, so nimmt zunächst J ab, daher auch $w \cdot J$; e wird also größer zc. Ein Blick auf die schon früher benutzte Formel

$$\Delta J = \frac{E}{E - e} \Delta E$$

zeigt uns, daß bei der Nebenschlußlampe die Änderungen der Stromstärke infolge der Schwankungen der Netzspannung um so kleiner werden, je größer $E - e$, d. h. je größer der Vorschaltwiderstand ist. Dies ist der eine Grund, weshalb der Vorschaltwiderstand den Namen Beruhigungswiderstand verdient; der andere ergibt sich aus folgender Überlegung. Auch wenn die Netzspannung konstant bleibt, brennt die Lampe nicht ruhig, weil selbst die besten Kohlen nicht vollständig homogen sind. Da aber der Widerstand des Lichtbogens wesentlich von der chemischen und physikalischen Beschaffenheit der Kohlen abhängig ist, so wird sich die Stromstärke fortwährend ändern. Brennt z. B. eine Stelle der positiven Kohle ab, an der sich zufällig weniger flüchtige Bestandteile befinden, so wird der scheinbare Widerstand des Lichtbogens größer. Man kann nun leicht nachweisen, daß auch die Wirkungen, die eine plötzliche Änderung des scheinbaren Lichtbogenwiderstandes zur Folge hat, durch den Beruhigungswiderstand abgeschwächt werden, und zwar um so mehr, je größer der vor der Lampe

liegende Widerstand ist. Nach Görgeß erfordert eine Nebenschlußlampe zirka 30% der Lampenspannung als Spannungsverlust im Vorschaltwiderstande, Differentiallampen nur zirka 15%. Es hängt der Spannungsverlust im Vorschaltwiderstande auch davon ab, wieviel Lampen hintereinander geschaltet sind. Sind z. B. zwei Lampen hintereinander geschaltet, so wirkt die eine gleichsam als Vorschaltwiderstand für die andere.

Bei Wechselstromanlagen kann man mit dem Vorschaltwiderstande weiter heruntergehen als bei Gleichstrom, weil die Vibrationen den Reguliermechanismus empfindlicher machen.

Die Größe des Vorschaltwiderstandes ergibt sich aus der Gleichung

$$w \cdot J = E - n \cdot e,$$

wo w , J , E und e dieselbe Bedeutung haben wie eben, während n angibt, wieviel Lampen hintereinander geschaltet werden sollen.

Wenn man eine Bogenlampe hinsichtlich ihrer Ökonomie mit anderen Lichtquellen vergleicht, so muß man natürlich die in dem Vorschaltwiderstande in Wärme umgesetzte Energie mit in Rechnung setzen.

Eine Ausführungsform, die man oft findet, ist in Fig. 197 abgebildet. K_1 und K_2 sind die Anschlußklemmen; K_1 steht mit dem unteren Ende der auf einem Porzellankörper liegenden Widerstandspirale in Verbindung, K_2 mit der Messingstange s . Der federnde Metallring r kann nach Lockerung einer Schraube verschoben und dadurch der Widerstand zwischen den beiden Klemmen variiert werden.

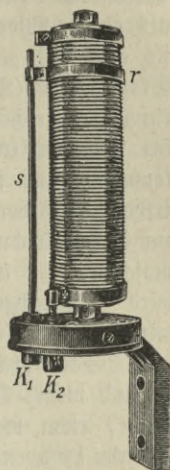


Fig. 197.

2. Bogenlampen=Transformatoren und Drosselspulen. Die Lichtbogenlampe einer Wechselstromlampe beträgt etwa 30 Volt. Während man bei Gleichstrom von 110 Volt Netzspannung im Interesse der Ökonomie gewöhnlich zwei Lampen und einen Beruhigungswiderstand hintereinander schaltet, kann man bei Wechselstromanlagen, auch bei höherer Netzspannung, ohne größere Energieverluste in den Kauf nehmen zu müssen, eine Lampe an das Netz anschließen, indem man Bogenlampen=Transformatoren oder Drosselspulen zu Hilfe nimmt. Die ersteren transformieren in der Regel Strom von 100—120 Volt Primärspannung in die für den Betrieb von 1 oder 2 Lampen erforderliche Spannung, einschließlich eines in einem kleinen Vorschaltwiderstande zu vernichtenden Spannungsüberschusses, und zwar beträgt die sekundäre Spannung 40 bzw. 80 Volt. Der Energieverlust, den die Transformation verursacht, beträgt bei den gebräuchlichen Stromstärken 40—60 Watt. Die Berechnung des Zusatzwiderstandes, der in den sekundären Stromkreis einzuschalten ist, erfolgt in derselben Weise wie bei Gleichstrom. Beträgt also die sekundäre Spannung 40 Volt, die Lampenspannung 30 Volt und die Stromstärke 10 Amp., so ist ein Vorschaltwiderstand von 1 Ohm zu wählen. Von den vier Klemmen des Transformators vereinigt man in der Regel eine primäre und eine sekundäre zu einer einzigen. Bezeichnen wir diese mit ML , die zweite

primäre Klemme mit L, die zweite sekundäre mit M, so schließt man das Netz an ML und L und die Lampen an M und ML an.

Eine Drosselspule besteht aus einem lamellierten Eisenkerne, der einen geschlossenen magnetischen Kreis bildet und einer Wicklung, die einen kleinen Ohmschen Widerstand hat. Wegen der Selbstinduktion verhält sich eine solche Spule so, als ob ihr Widerstand bedeutend größer wäre als der Ohmsche (s. Impedanz); sie erdrosselt gleichsam eine gewisse Anzahl Volt. Der Effektverbrauch der Drosselspulen (Joulesche Wärme, Hysteresis- und Wirbelstromverluste) ist zwar ein etwas größerer als der der Transformatoren, nämlich bei 10 Amp. und 50 Perioden etwa 80 Watt; da aber ein Vorschaltwiderstand in Wegfall kommen kann, so erzielt man gegenüber den Transformatoren eine Energieersparnis. Jedoch hat die Verwendung der Drosselspulen eine Phasenverschiebung zur Folge, wodurch die Leistungsfähigkeit des Leitungsnetzes und der Dynamomaschinen — allerdings ohne daß der Kohlenverbrauch dadurch vergrößert wird — herabgesetzt wird (s. wattlose Ströme); daher gestatten manche Elektrizitätswerke die Vorschaltung einer Drosselspule vor Bogenlampen nicht.

Selbsttätiger Minimalauschalter. Angenommen, es seien mehrere (3 und mehr) Differentiallampen hintereinander geschaltet und eine Lampe erlösche, etwa weil die Kohlen verbraucht sind. Es ist dann der durch die anderen Lampen fließende Strom gezwungen, seinen Weg durch die Nebenschlußspule der nicht mehr brennenden Lampe zu nehmen, und er wird, da diese Spule einen großen Widerstand hat, so sehr geschwächt, daß auch die anderen Lampen erlöschen und deren Kohlen sich berühren. Die Nebenschlußspule der ersten Lampe ist daher der ganzen Netzspannung ausgesetzt und kann verbrennen. Um das zu verhüten, bedient man sich des selbsttätigen Minimalauschalters. Dieser unterbricht den Stromkreis, wenn der Strom unter eine gewisse Grenze sinkt. Die Verwendung des selbsttätigen Minimalauschalters hat den Nachteil, daß alle Lampen des betreffenden Stromkreises vollständig erlöschen und der Stromkreis erst nach Beseitigung der Störung wiederhergestellt werden kann.

Ersatzwiderstand mit selbsttätiger Kurzschlußvorrichtung. Wenn der Lichtbogen einer Lampe zu lang wird, so steigt die Klemmspannung der Nebenschlußspule, und diese zieht einen Eisenkern tiefer in sich hinein als bei normalen Verhältnissen. Durch den Eisenkern wird eine Sperrklinke ausgelöst, und es fällt dann ein Kohlenkontakt auf einen zweiten Kontakt. Hierdurch wird die Nebenschlußspule kurz geschlossen und ein neuer Stromkreis eingeschaltet, in dem ein Widerstand liegt, der Ersatzwiderstand, der dieselbe Energie absorbiert wie der Lichtbogen. Soll die Beseitigung der Störung vorgenommen werden, ohne daß der ganze Stromkreis unterbrochen wird, so ist für jede Lampe ein doppelpoliger Auschalter vorzusehen. Die beschriebene Vorrichtung funktioniert nur dann zuverlässig, wenn für jede Lampe außer der eigentlichen Lampenspannung noch eine größere Reservepannung vorhanden ist; denn es ist ja gleichsam die überschüssige Spannung die den Mechanismus betätigende Kraft¹⁾.

¹⁾ Würde eine geringe Spannungserhöhung genügen, so würde die Kurzschlußvorrichtung oft, ohne daß es nötig ist, funktionieren.

Es müssen bei Gleichstrom für jede der in Serie geschalteten Lampen mindestens 50 Volt zur Verfügung stehen. Für Dauerbogenlampen ist die selbsttätige Kurzschlußvorrichtung nicht verwendbar, da das bei diesen Lampen zuweilen vorkommende Aufflammen des Lichtbogens, das mit einer stärkeren vorübergehenden Spannungserhöhung verbunden ist, eine Ausschaltung herbeiführen würde. Meistens geschieht das Ausschalten der Kurzschlußvorrichtung, wenn die betreffende Lampe weiter brennen soll, von Hand.

Auch wenn eine größere Anzahl von Nebenschlußlampen (3 und mehr) hintereinander geschaltet sind, empfiehlt sich die Verwendung der selbsttätigen Kurzschlußvorrichtung, obschon hier die Gefahr, daß die Nebenschlußspule verbrennt, kleiner ist. Wenn nämlich eine Lampe erlischt, so schwingt das Regelwerk der übrigen lebhaft, und die Folge ist, daß die Kohlenstifte für kurze Zeit zur Berührung gebracht werden, sich voneinander trennen zc. Infolgedessen absorbiert jede Lampe (außer derjenigen, durch die die Störung verursacht wurde) eine von der normalen nicht sehr stark abweichende Spannung.

Glocken. Damit der Lichtbogen gegen Luftzug geschützt ist und abfallende glühende Kohlentheilchen keinen Schaden anrichten können, damit ferner das Auge durch den Lichtbogen nicht geblendet wird, umgibt man die Kohlen mit einer großen Glasglocke. Man benutzt entweder Klarglas- oder Opalglasglocken (Milchglas). Der Durchgang des Lichtes durch das Glas ist mit einer Absorption verbunden. Diese soll nach Uppenborns Kalender bei Klarglasglocken 6% und bei Überfangglasglocken¹⁾ 11% betragen. Nach Körting und Mathiesen gehen bei Verwendung von Opalglasglocken bis zu 50% für die Bodenbeleuchtung verloren, wenn die Lampen in einem Raume mit dunklen Wänden hängen. Bei Benutzung von Glocken aus Milchglas wird der Lichtbogen dem Auge ganz entzogen und eine gleichmäßigere Verteilung des Lichtes erzielt.

e) Schaltungen.

Wir haben zu unterscheiden zwischen der einfachen Serienschaltung, der einfachen Parallelschaltung und der Gruppenschaltung. Die letzte Schaltung erhält man, wenn zwei oder mehr Lampen in Serie und die so erhaltenen Gruppen parallel geschaltet werden.

Bei 50—55 Volt Netzspannung kann man nur die einfache Parallelschaltung anwenden. Sie gestattet, da jede Lampe von der anderen unabhängig ist, eine sehr weitgehende Teilung des Lichtes. Wird eine Compound-Maschine benutzt, so können die Lampen in weiten Grenzen ein- und ausgeschaltet werden, da die Compound-Maschine von selbst auf konstante Spannung reguliert. Dieses System hat den Nachteil, daß große Drahtquerschnitte erforderlich sind und für jede Lampe ein Vorschaltwiderstand, Sicherungen und ein Ausschalter vorzusehen sind.

¹⁾ Sie bestehen aus einer Lage von Klarglas, das auf der Innenseite mit einer dünnen Schicht von Opalglas bedeckt ist (Opalringglocken).

Bei der reinen Hintereinanderschaltung können hohe Spannungen benützt werden (kleine Drahtquerschnitte), die Installation wird vereinfacht. — Komplikationen werden verursacht durch die früher beschriebenen Sicherheitsvorrichtungen gegen das Durchbrennen der Nebenschlußspulen. Man bevorzugt für die Serienschaltung die Differentiallampe¹⁾.

Schaltungen bei 110 Volt: 1. Eine Dauerbrandlampe oder eine Doppelbogenlampe, d. h. eine Lampe mit 2 hintereinander geschalteten Lichtbogen. 2. Zwei Differential- oder Nebenschlußlampen. Die Paare werden

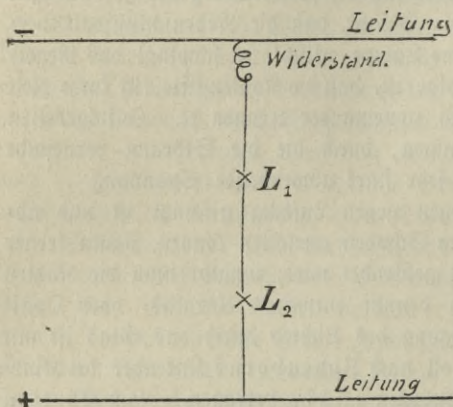


Fig. 198.

parallel geschaltet; für jedes Paar ein Vorschaltwiderstand, in dem 20—30 Volt erdroffelt werden (Fig. 198). 3. Nach dem System Hegner (zuerst von der Gesellschaft „Volta“ praktisch verwendet) werden drei Lampen hintereinander geschaltet — Dreischaltung. Es werden geeignete Kohlen verwendet, so daß der Lichtbogen bei 35 Volt Lampenspannung nicht zu klein wird. Es bleiben also nur 5 Volt für den Vorschaltwiderstand. Bei der nach der Hegnerschen Konstruktion gebauten Volta-Lampe wird ein

Überschreiten der Gesamtspannung durch ein von der Spannung der Lampengruppe abhängiges Relais verhindert, das, sobald diese Spannung einen gewissen Wert erreicht hat, besondere Betriebsorgane einschaltet, durch die die normale Spannung wiederhergestellt wird. — Das Einschalten erfolgt bei der Dreischaltung mittels eines Anlaufwiderstandes. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft benützt einen automatischen Vorschaltwiderstand. Dieser besteht aus einem vom Hauptstrom durchflossenen Solenoid, das einen Eisenkern in sich hineinzieht; durch den Eisenkern wird ein Gleitkontakt verschoben.

Die Lichtausbeute ist bei der Dreischaltung günstiger als bei der Hintereinanderschaltung von 2 Lampen, die jede mit 40—50 Volt brennen; sie ist aber keineswegs um 50% größer, da bei der Dreischaltung die Lichtbogen kleiner sind und in jedem Lichtbogen bei gleicher Stromstärke weniger Energie in Licht und Wärme umgesetzt wird. Ferner ist zu beachten, daß drei Glöckchen mehr Licht absorbieren als zwei. Immerhin wird ein nicht unbedeutender Gewinn bezüglich der Lichtausbeute erzielt. Genaue Messungen wurden von Professor Wedding ausgeführt²⁾. Er gelangte zu dem Resultate, daß der

¹⁾ Diese Lampe wird jedoch keineswegs „ausnahmslos“, wie in Uppenborns Kalender behauptet wird, für Serienschaltung benützt.

²⁾ G.-Z. J. 1899, S. 65.

spezifische Verbrauch (bezogen auf die mittlere hemisphärische Lichtstärke) bei einer 9 Amp.=Volta-Lampe ungefähr derselbe war wie bei einer gewöhnlichen Lampe (40 Volt, 9 Amp.). Für die Praxis kommt es mehr auf die Flächenhelligkeit an. Wedding fand, daß, wenn ein Saal einmal durch zwei Lampen alten Systems und dann durch drei Lampen für 35 Volt beleuchtet wurde, die durchschnittlichen Flächenhelligkeiten sich verhielten wie 1 : 1,77.

Zu berücksichtigen ist noch, daß die Auslagen für Kohlen, Amortisation und Verzinsung bei der Dreischaltung wesentlich höher sind. — Bedingung für ruhiges Brennen ist, daß bestes Kohlenmaterial verwendet wird und der Mechanismus tadellos funktioniert.

Wechselstrom von 110 Volt: Entweder 1 Dauerbrandlampe oder 1 bezw. 2 Lampen und Transformator oder Drosselspule oder 3 Lampen und Vorschaltwiderstand. Bei Hintereinanderschaltung sind für jede Nebenschlußlampe inkl. Spannungsverlust im Vorschaltwiderstande mindestens 38 Volt und für Differentiallampen (inkl. Vorschaltwiderstand) mindestens 34 Volt zu rechnen. Bei Drehstromanlagen sind zwei Fälle zu unterscheiden: 1. Eine neutrale Leitung (Ausgleichsleitung) ist nicht vorhanden. Die Lampen werden in drei Gruppen angeordnet; die erste Gruppe wird an die erste und zweite, die zweite an die erste und dritte, die dritte Gruppe an die erste und dritte Leitung angeschlossen (s. Fig. 150 S. 296). 2. Eine neutrale Leitung ist vorhanden; es werden dann alle drei Gruppen an die neutrale Leitung und jede Gruppe an eine der Hauptleitungen angeschlossen.

Die Schaltungen bei 220 Volt Netzspannung ergeben sich leicht aus den Schaltungen bei 110 Volt. Zu bemerken ist noch, daß man 5 Differentiallampen (für Gleichstrom) hintereinanderschalten kann.

f) Indirekte Beleuchtung, zerstreutes Licht.

Die indirekte Beleuchtung bezweckt, die Blendung des Auges und die Bildung von scharfen Schlagschatten durch den Lichtbogen zu verhüten und eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Lichtes zu erzielen. Total indirekt nennt man die Beleuchtung, wenn nur reflektiertes Licht zur Verwendung gelangt.

Werden Marglasglocken benutzt, so wird das Auge geblendet, und es entstehen scharfe Schlagschatten der von den Lichtstrahlen getroffenen Gegenstände. Durch Vergrößerung der Aufhängehöhe wird der erste Übelstand beseitigt, der zweite aber bleibt bestehen. Umgibt man den Lichtbogen mit einer Milchglasglocke, so wird die Lichtverteilung eine günstigere; die Beleuchtung des Bodens oder allgemeiner die Beleuchtung in horizontaler Richtung erleidet aber eine sehr starke Einbuße, weil ein größerer Prozentsatz des Lichtes absorbiert und mehr Licht zur Seite und nach oben geworfen wird als bei nacktem Lichtbogen. Dieses letztere Licht kann man für die Bodenbeleuchtung zum Teil ausnutzen, wenn man oberhalb des Lichtbogens einen Reflektor anbringt. Jaspas ordnete die Kohlen so an, daß die positive Kohle die untere war (invertierte Bogenlampe); der Lichtbogen sandte sein Licht gegen einen Reflektor, durch den es nach unten geworfen wurde. Als Reflektor kann man

auch die Decke des betreffenden Raumes benutzen, wenn sie einen weißen Anstrich hat. Nach Zumpners Messungen sollen zirka 80% des auffallenden Lichtes an einer mattweißen Fläche reflektiert werden (Herzog u. Feldmann, Handbuch der elektrischen Beleuchtung, S. 98). Die invertierte Bogenlampe leidet an dem Mangel, daß der Lichtbogen unruhig brennt. Der Krater fängt nämlich die an der negativen Kohle sich bildenden Kügelchen (aus Teer- und Kieselsäure) auf; dort verdampfen sie, und der Widerstand des Lichtbogens vermindert sich stark. Wenn also an die Beleuchtung eines Raumes hohe Anforderungen gestellt werden, so muß man die gewöhnliche Anordnung der Kohlen beibehalten. Man bringt dann meistens unter dem Lichtbogen einen großen emaillierten Schirm an, dessen Öffnung nach der Decke zu gerichtet ist. Das von dem Schirme schon stark diffus reflektierte (zerstreute) Licht gelangt nach der Decke, die einen hellen, am besten weißen Anstrich haben muß und wird dort zum zweiten Male diffus reflektiert. Durch die zweimalige Zerstreuung wird eine sehr gleichmäßige Verteilung des Lichtes erzielt, die selbst den hohen Anforderungen, wie man sie an die Beleuchtung von Zeichensälen stellt, vollständig genügt. Wenn das über den Reflektor hinausgehende (direkte) Licht stört, so kann man über dem Lichtbogen einen kleinen zweiten Reflektor anbringen.

Eine Vorrichtung, die zur vollen Wirksamkeit weder weißer Wände noch einer weißen Decke bedarf, ist der Oberlichtreflektor System Grabowski

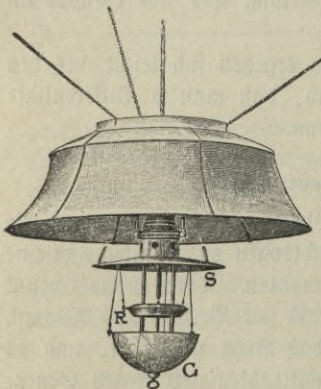


Fig. 199.

(Siemens-Schuckert). Dieser besteht aus einem transparenten weißen Reflektor (aus Leinwand oder dergl.), der durch 3 Drähte an der Zimmerdecke befestigt wird, einem Blechschirme *s* (s. Fig. 199), einem Glasringe *R* von dreieckigem Querschnitte und der Blende *G* aus Malabasterglas. Die Lichtstrahlen fallen nun 1. auf den Schirm, 2. auf den Reflektor (zirka 33%), 3. auf den Glasring (42%) und 4. auf die Blende (zirka 19%). Die unter 3. genannten Strahlen gehen durch den Ring hindurch, treten infolge der Brechung in ungefähr horizontaler Richtung aus und fallen auf den konischen Teil des Reflektors. Von den Strahlen, die die Blende treffen, wird ein Teil durchgelassen, ein Teil nach oben reflektiert.

Die Strahlen, die entweder direkt (2) oder nach erfolgter Reflexion (4) oder nach zweimaliger Brechung (3) den Reflektor treffen, werden z. T. durchgelassen und dienen zur Beleuchtung der oberen Partien des Zimmers, zum größten Teil aber (70%) werden sie diffus nach unten reflektiert.

Die dioptrische Methode erstrebt eine gleichmäßige Verteilung des Lichtes unter Reduzierung der Verluste, mit denen die Reflexion verbunden ist. Man bedeckt eine Glocke aus durchsichtigem Glas oder eine polygonale Laterne mit einem Negwerke von kleinen lichtbrechenden Körpern, von denen jeder eine Verteilung des auf ihn fallenden Lichtes bewirkt. Zuerst verwendete

man geripptes Glas; Trotter benutzte Prismen; Blondel konstruierte die Holophanglocke¹⁾. Diese Glocke besitzt äußere und innere Rippen und soll mittels derselben eine vorzügliche Zerstreuung des Lichtes über einen großen Winkel ohne großen Lichtverlust erzielt werden.

Zwölftes Kapitel.

Elektromotoren.

Die Verwendung der Elektromotoren zum Antriebe von Arbeitsmaschinen hat in dem letzten Dezennium außerordentlich schnell zugenommen. Während im Jahre 1894 nur zirka 5600 Elektromotoren an Elektrizitätswerke angeschlossen waren, waren es im Jahre 1901 schon über 141 000 Stück. Diese schnelle Verbreitung der Elektromotoren ist begründet in den großen Vorzügen, die der elektrische Antrieb vor jedem anderen besitzt; diese sollen nach Besprechung der verschiedenen Systeme hervorgehoben werden.

Wir wollen uns zunächst beschäftigen mit den

I. Gleichstrommotoren.

Jede Dynamomaschine kann sowohl für die Umwandlung mechanischer Leistung in elektrische als auch für Umwandlung elektrischer Leistung in mechanische Verwendung finden. Leitet man z. B. in eine Hauptstrommaschine (s. S. 162) Gleichstrom, so werden die Feldmagnete erregt, und die Pole üben auf die stromdurchflossenen Windungen des Ankers Kräfte aus, die so gerichtet sind, daß der Anker in eine rotierende Bewegung gerät. Die Rotation dauert so lange, als man Strom in die Maschine schiebt, da die den Anker treibenden Kräfte auch während der Rotation bestehen bleiben. Die auf einen Ankerdraht einwirkende Kraft ist bei jedem Elektromotor proportional der Stärke des magnetischen Feldes und der Ankerstromstärke.

Wenn man einen Leiter, durch den ein Strom bereits fließt, so bewegt, daß er die Kraftlinien eines Magnets schneidet, so wird in ihm gerade so gut eine elektromotorische Kraft induziert, wie wenn er von vornherein stromlos gewesen wäre. Da sich nun bei einem Elektromotor die Wicklung des rotierenden Ankers durch das magnetische Feld des Erregerkreises hindurchbewegt, so wird in ihm eine elektromotorische Kraft erzeugt; diese sucht einen Strom hervorzurufen, der dem in die Maschine hineingeleiteten entgegengesetzt gerichtet ist. Es folgt dies schon aus dem Satze von der Erhaltung der Kraft; wäre nämlich die elektromotorische Kraft gleich gerichtet, so würde die Maschine Energie abgeben, wir

¹⁾ Die Glocken leuchten an der ganzen Oberfläche gleich stark, und aus diesem Grunde hat ihnen der Erfinder nach dem Griechischen die Bezeichnung „holophane“ Glocken beigelegt.

Hätten zwei hintereinander geschaltete Generatoren vor uns. Man nennt daher die in dem Anker eines Elektromotors induzierte elektromotorische Kraft die Gegenspannung oder gegen elektromotorische Kraft. Bezeichnen wir die Netzspannung (Klemmspannung) mit E_1 , die Gegenspannung mit E_2 , den Ankerwiderstand mit w_a , so ist die Ankerstromstärke

$$J_a = \frac{E_1 - E_2}{w_a}.$$

Je größer also bei konstanter Netzspannung die gegen elektromotorische Kraft ist, umso weniger Strom fließt in den Anker.

Die Spannungsdifferenz $E_1 - E_2$ dient zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes im Anker. $E_2 \cdot J_a$ ist die mechanische Leistung, die der Anker abgeben könnte, wenn die in ihm erzeugte Wärme der einzige Energieverlust wäre. Die Größe der Gegenspannung E_2 hängt von der Stärke des magnetischen Feldes und von der Tourenzahl ab. Nun hat jeder Elektromotor das Bestreben, eine solche Tourenzahl anzunehmen, daß seine Gegenspannung der Spannung des zugeführten Stromes, gemessen an den Klemmen des Elektromotors, nahezu gleichkommt; beide Spannungen unterscheiden sich ja nur um den Betrag $w_a \cdot J_a$. Ändert man also die Stärke des magnetischen Feldes, so ändert sich die Tourenzahl. Wir werden hierauf bei der Besprechung der verschiedenen Elektromotorenarten näher eingehen.

Die Bestimmung des Drehungssinnes wird durch die Beachtung der folgenden Momente ermöglicht. 1. Wenn ein Generator Strom abgibt, so ist die Wechselwirkung zwischen den Polen und den Ankerdrähten eine solche, daß die Kräfte die Bewegung zu hemmen, den Anker also im entgegengesetzten Sinne zu drehen (zurückzuschleudern) suchen, wie es durch die Antriebsmaschine (Dampfmaschine) geschieht. Wird also der Elektromotor in demselben Sinne erregt wie als Generator, und gibt man dem Ankerstrom dieselbe Richtung wie eben, so läuft der Motor im entgegengesetzten Sinne wie als Generator. 2. Ändert man die Richtung eines Kraftlinienflusses, vertauscht man also die Polarität der Feldmagnete oder ändert man die Richtung des Ankerstromes, so ändert sich der Drehungssinn. Kehrt man also den Erreger- und den Ankerstrom um, so bleibt der Drehungssinn ungeändert. Dieses trifft z. B. zu, wenn man bei einem Hauptstrommotor die Zuleitungsdrähte vertauscht. [Man denke an die Regeln über das Vorzeichen eines Produktes aus zwei Faktoren.]

Anmerkung. Wir wollen bei dieser Gelegenheit zeigen, wie man die Polarität der Leitungen bestimmt. Ein Glaszylinder (Fig. 200) wird an dem einen Ende durch einen

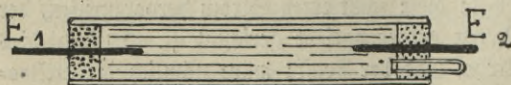


Fig. 200.

Kork oder Gummistopfen, durch den ein Draht hindurchgeht, geschlossen und dann mit einer Lösung von Kaliumsulfat, Kochsalz oder dergl., der man einige Tropfen einer alkoholischen

Phenolphthaleinlösung zugesetzt hat, gefüllt. Das andere Ende schließt man mittels eines Gummistopfens, durch den eine kleine Glasröhre und eine zweite Elektrode gehen und schmilzt die Glasröhre zu. Verbindet man die Elektroden E_1 und E_2 mit dem Reze,

so erfolgt Elektrolyse, und die Flüssigkeit wird an derjenigen Elektrode intensiv rot gefärbt, die an die negative Leitung angeschlossen ist. Durch Schütteln des Zylinders verschwindet die rote Farbe wieder (Poljucher).

Durchtränkt man Filzpapier mit obigem Lösungsgemische, so erhält man sogen. Polreagenzpapier. Vor dem Gebrauche wird das Polreagenzpapier angefeuchtet und auf eine isolierende Unterlage gelegt. Mit den Enden der Drähte, deren Polarität man bestimmen will, berührt man das Papier. — Noch vorteilhafter ist es nach Lüpke¹⁾, das Filzpapier mit Stärkekleister zu imprägnieren, welchem 1 Teil Jodkalium und ein wenig Phenolphthalein zugefügt sind. Es ist an reiner staubfreier Luft in einem trockenen und geschlossenen Glasgefäße aufzubewahren. Das angefeuchtete Papier färbt sich an dem negativen Pole rot, an dem positiven schwarzblau.

Die Ankerrückwirkung gibt bei den Elektromotoren ebenso wie bei Dynamomaschinen zu einer Funkenbildung Veranlassung, die bei den ersteren durch Bürstenrückschub aufgehoben wird. Die Verschiebung ist bei Motoren kleiner als bei der entsprechenden Dynamomaschine. In vielen Fällen, z. B. bei den sogen. Umsternmotoren, wie sie für Kräne u. verwendet werden, kann eine Bürstenverschiebung nicht vorgenommen werden. Hierauf wird bei der Konstruktion Rücksicht genommen.

Motoren mit kleiner Tourenzahl zeichnen sich vor solchen mit großer Tourenzahl dadurch aus, daß sie weniger zur Funkenbildung neigen, daß die Anlaufverluste geringer sind und ein Vorgelege in manchen Fällen in Wegfall kommen kann. Dagegen sind sie bei gleicher Leistung größer und teurer als solche von hoher Tourenzahl; ferner werden der Tourenabfall bei Belastung und der Wirkungsgrad ungünstiger.

Drehungsmoment. Denken wir uns auf der Umdrehungsachse des Ankers eine genügend starke Eisenstange senkrecht zur Achse befestigt, so müssen wir an dem freien Ende der Stange einen gewissen senkrecht zu ihr gerichteten Druck ausüben, wenn wir die Rotation des Ankers verhindern wollen. Diese Kraft ist um so kleiner, je länger der Hebelarm ist. Hat der Hebel eine Länge von 1 m, so ist die in Kilogramm ausgedrückte Kraft ein Maß für das Drehungsmoment.

1. Hauptstrommotoren.

Die Tourenzahl eines belasteten Gleichstrommotors hängt, wie wir sahen, von der Stärke des magnetischen Feldes und der Ankerstromstärke ab. Wir wollen nun zunächst annehmen, daß die Netzspannung konstant bleibe und zusehen, wie sich der Hauptstrommotor bei Belastungsänderungen verhält. Wächst die Belastung, so nimmt zunächst, wenigstens während einer sehr kurzen Zeit, die Tourenzahl ab; infolgedessen wird die Gegenspannung im Anker kleiner; der Ankerstrom wird also stärker. Da aber der durch die Magnetbewicklung fließende Strom dem Ankerstrom gleich ist, so wird das magnetische Feld stärker. Würde nun der Motor wieder seine ursprüngliche Tourenzahl annehmen, so würde die gegen elektromotorische Kraft im Anker, da ja das

¹⁾ Lüpke, Grundzüge der Elektrochemie.

magnetische Feld jetzt stärker ist wie eben, größer werden als vor der Belastungserhöhung. Der Motor würde also weniger Strom aufnehmen, d. h. er würde bei größerer Leistung weniger Energie verbrauchen. Da die Annahme, daß die Tourenzahl bei wachsender Belastung konstant bleibt, zu einem Widerspruche führt, so ist sie als eine falsche zu verwerfen. Wir gelangen also durch einen indirekten Beweis zu dem Resultate, daß die Tourenzahl eines Serienmotors mit steigender Belastung (mit zunehmender Stromstärke) abnimmt.

Wird der Motor schwächer belastet, so wird die Tourenzahl zunächst größer, die Gegenspannung steigt, der Strom wird schwächer, das Feld wird schwächer; auch aus diesem Grunde steigt die Tourenzahl. Bei Leerlauf (Abfallen des Nemens) nimmt der Serienmotor eine so enorm große Tourenzahl an, daß er in Stücke fliegen kann — der Motor geht durch. Aus dem Verhalten des Motors gegen Belastungsschwankungen folgt, daß er sich nur dann mit Sicherheit anwenden läßt, wenn eine plötzliche, vollkommene Entlastung ausgeschlossen ist (Ventilatoren, Exhaustoren bei direkter Kupplung).

Ein Vorzug des Serienmotors ist seine große Anlaufkraft. Diese Eigenschaft soll für einen bestimmten Fall nachgewiesen werden. Angenommen, die normale Stromstärke eines Serienmotors betrage 50 Amp. Da beim Einschalten eine Gegenspannung noch nicht vorhanden und der Ohm'sche Widerstand im Motor nur klein ist, so würde sich, wenn der Motor direkt an das Netz angeschlossen würde, im ersten Momente ein außerordentlich starker Strom in den Motor stürzen. Um den Anlaufstrom abzuschwächen, sei vor den Motor ein Widerstand (Anlasser) gelegt, der so groß sei, daß gleich nach dem Einschalten ein Strom von 100 Ampere zustande kommt. Da bei 100 Amp. der Ankerstrom die doppelte Stärke hat, so ist zunächst die Anzugskraft doppelt so groß. Da ferner das magnetische Feld stärker ist als bei normaler Stromstärke, so muß die Anzugskraft mehr als das Doppelte betragen. Würde das magnetische Feld bei 100 Amp. doppelt so stark sein wie bei 50 Amp., so würde die Anzugskraft das Vierfache derjenigen bei 50 Amp. sein. Nun wissen wir aber, daß nur innerhalb gewisser Grenzen die Stärke des magnetischen Feldes mit den Amperewindungen zunimmt, und innerhalb dieser Grenzen werden wir uns bei unseren Annahmen nicht mehr befinden; denn man wird den Motor so einrichten, daß das Eisen der Feldmagnete bei dem normalen Strome, in unserem Falle also bei 50 Amp., nicht weit von der Sättigungsgrenze entfernt ist. Inmerhin ist das magnetische Feld beim Einschalten stärker als bei der normalen Leistung des Serienmotors. Beträgt der Strom das $1\frac{1}{2}$ fache des normalen Stromes (75 Amp.), so ist das Anzugsmoment nahezu doppelt so groß wie das normale. Wegen seines großen Anzugmomentes, das dreimal so groß wie das normale Drehmoment sein kann, findet der Serienmotor bei Aufzügen, Kranen und vor allem bei Straßenbahnen Verwendung. Bei letzteren ist auch die Eigenschaft des Hauptstrommotors wertvoll, daß seine Tourenzahl mit der Belastung abnimmt. Bei Steigungen läuft er von selbst langsamer, auf ebener Bahn schneller.

Tourenänderung. 1. Wird vor den Serienmotor ein veränderlicher Widerstand gelegt, so kann man die Klemmspannung vermindern oder vermehren. Eine Verminderung der Klemmspannung hat aber zur Folge, daß die Tourenzahl abnimmt. Bei dieser Methode wird im Vorschaltwiderstande, da durch ihn ein starker Strom fließt, eine größere Energiemenge verbraucht. Bemerkenswert ist bei dieser Art der Regulierung, daß man zwar beliebige Geschwindigkeitsänderung erzielen kann, die Stromstärke aber konstant bleibt¹⁾; denn man macht in dem Bruche $\frac{E_1 - E_2}{w_a} E_1$ und E_2 kleiner, und die Differenz bleibt nahezu konstant.

2. Wird die Amperewindungszahl des magnetischen Feldes vergrößert, so läuft der Motor langsamer. Besteht also die Magnetbewicklung aus einzelnen Abteilungen, die abschaltbar angeordnet sind und hintereinander bzw. parallel geschaltet werden können, so kann man die Tourenzahl innerhalb weiter Grenzen regulieren. Diese Art der Tourenregulierung, die größere Verbreitung gefunden hat und die man wohl kurz die Spulenschaltung nennt, wollen wir an einem Beispiele erläutern. Der Motor sei ein vierpoliger; die 4 Magnetspulen seien mit s_1, s_2, s_3, s_4 bezeichnet. Werden die 4 Magnetspulen hintereinander geschaltet, so fließt durch jede Spule der ganze Strom J . Hat also jede Spule m Windungen, so ist die Amperewindungszahl gleich $4mJ$. Schalten wir s_1 bis s_4 parallel, so wird zwar der Widerstand im ganzen Motor etwas kleiner, aber die Änderung ist so unbedeutend, daß wir sie vernachlässigen dürfen. Es fließt also wieder der Strom J in den Motor, durch jede Spule also der Strom $\frac{J}{4}$. Die Amperewindungszahl ist also jetzt gleich $4m \cdot \frac{J}{4} = mJ$. Es mögen jetzt die Spulen paarweise parallel geschaltet und die so erhaltenen Gruppen hintereinander geschaltet werden (s. Fig. 201). Die Amperewindungszahl hat jetzt, wenn wir von der Änderung des Widerstandes wieder absehen, den Wert $4 \cdot m \cdot \frac{J}{2} = 2mJ$.

Berücksichtigen wir, daß eine Vergrößerung der Amperewindungszahl (Verstärkung des Feldes) eine Verringerung der Tourenzahl zur Folge hat²⁾, so ergibt sich, daß bei der ersten Schaltung die Tourenzahl die kleinste und bei der zweiten die größte ist. Indes verhalten sich die maximale und minimale Tourenzahl nicht

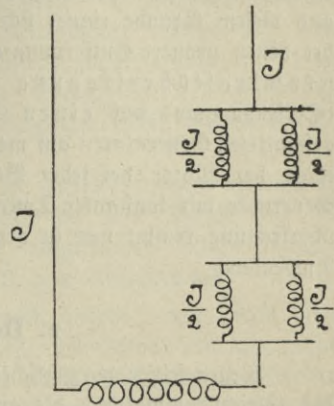


Fig. 201.

¹⁾ Siehe Fischer-Hinnen, Gleichstrommaschinen, S. 107.

²⁾ Bei gleichbleibender Tourenzahl würde unter Umständen die Gegenspannung größer als die Netzspannung sein, was natürlich nicht möglich ist.

wie 4 : 1, weil J nicht konstant und weil die Feldstärke nicht proportional der Amperewindungsanzahl ist. — Die Schaltungen der Spulen werden durch einen ziemlich komplizierten Mechanismus bewerkstelligt, den Kontroller (s. Regulatoren).

3. Legt man parallel zur Erregerwicklung S (Fig. 202) einen veränderlichen Widerstand R , so kann man den durch die Magnetspulen fließenden Strom

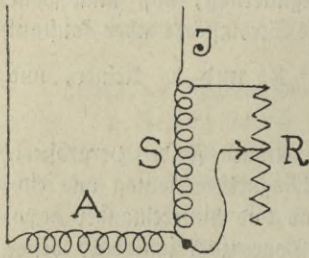


Fig. 202.

regulieren; denn nennen wir den ganzen Ankerstrom J , so fließt ein Teil i_1 durch S , der Rest i_2 durch R . Diese Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände in S und R . Macht man R kleiner, so wächst i_2 und i_1 nimmt ab. Man reguliert also die Feldstärke.

Natürlich kann man auch zwei der beschriebenen Methoden miteinander kombinieren.

4. In besonderen Fällen, wenn z. B. ein Straßenbahnwagen mit 2 oder mehreren Motoren ausgerüstet ist, kann man eine Tourenregulierung dadurch erzielen, daß man die Motoren parallel oder hintereinander schaltet. Diese Methode läuft auf eine Änderung der Klemmspannung hinaus.

Da der Spannungsverlust in einer Magnetspule eines Serienmotors wegen des geringen Widerstandes, den die Spule haben muß, nur einige Prozent der ganzen Netzspannung beträgt, so können Hauptstrommotoren leichter für hohe Spannungen gebaut werden als Nebenschlußmotoren. Schon aus diesem Grunde eignet sich der Hauptstrommotor für Kraftübertragungen, bei denen größere Entfernungen zu überwinden sind. Bei der sogen. Hauptstromkraftübertragung erfolgt die Übertragung von einem Generator (Seriendynamo) auf einen Serienmotor bzw. von mehreren hintereinander geschalteten Generatoren auf mehrere hintereinander geschaltete Motoren. Hierbei läuft der Motor bei jeder Belastung mit konstanter Tourenzahl, wenn der Generator mit konstanter Tourenzahl angetrieben wird. Diese Art der Kraftübertragung kommt nur in gewissen Fällen, z. B. im Bergwerksbetriebe, zur Anwendung.

2. Nebenschlußmotoren.

Wegen seiner vorzüglichen Eigenschaften hat der Nebenschlußmotor unter den Gleichstrommotoren die größte Verbreitung gefunden. Er hat zwar nicht ein so großes Anzugsmoment wie der Hauptstrommotor; dagegen besitzt er den Vorzug, daß er gegen Belastungsschwankungen nur in geringem Maße empfindlich ist. Es ergibt sich dies aus folgenden Betrachtungen: Bei einem Nebenschlußmotor für 120 Volt war nach Messungen die Ankerstromstärke bei Vollbelastung 60 Amp., der Ankerwiderstand 0,075 Ohm. Mithin war die Gegenspannung $120 - 60 \cdot 0,075 = 115,5$ Volt; denn es ist ja die

$$\text{Ankerstromstärke} = \frac{\text{Klemmspannung} - \text{Gegenspannung}}{\text{Ankerwiderstand}}$$

Bei Leerlauf verbrauchte der Motor 6 Amp.; seine Gegenspannung betrug also in diesem Falle 119,55 Volt, also noch nicht 4% mehr als bei Vollbelastung. Da nun das magnetische Feld von dem Ankerstrome fast unabhängig ist, also bei Leerlauf fast so stark ist wie bei Vollbelastung, so ist die Tourenzahl nahezu proportional der Gegenspannung. Daher betrug auch die Änderung der Tourenzahl innerhalb der Grenzen Leerlauf und Vollbelastung noch nicht 4%.

Daß die Tourenzahl bei Leerlauf nicht stetig wachsen kann, wie es beim Hauptstrommotor der Fall ist, ergibt sich aus folgenden Schlußfolgerungen: Bei Leerlauf ist die Klemmspannung und daher auch der Erregerstrom etwas größer als bei Belastung. Von dieser Änderung des magnetischen Feldes wollen wir aber absehen. Bei 1000 Touren betrage die Gegenspannung 110 Volt. Da die Gegenspannung proportional der Tourenzahl ist, so entspricht 1 Volt Gegenspannung einer Tourenzahl von $\frac{1000}{110}$; der ganzen Betriebsspannung entsprechen also $\frac{120 \cdot 1000}{110}$ Touren. Bei 120 Volt Gegenspannung würde dem Anker kein Strom mehr zugeführt werden; mithin stellt unser letzter Bruch die theoretisch maximale Tourenzahl dar.

Jeder Belastung entspricht eine bestimmte Tourenzahl; wenn auch die Änderungen so klein sind, daß man sie für den praktischen Betrieb vernachlässigen kann, so sind sie doch maßgebend für die Ankerstromstärke. Da jeder Tourenzahl eine bestimmte Gegenspannung entspricht, so entspricht jeder Belastung eine bestimmte Stromstärke. Der Elektromotor nimmt also ohne irgendwelche mechanische oder elektrische Regulierungsvorrichtung eine seiner jeweiligen Leistung entsprechende Energiemenge (Stromstärke \times Netzspannung) aus der Leitung. Es ist dies übrigens eine Eigentümlichkeit, die allen Arten von Elektromotoren gemeinsam ist.

Wenn die Netzspannung konstant ist, so ist, wenn man von der mit der Belastung wachsenden Ankerrückwirkung abieht, die eine Schwächung des magnetischen Feldes bewirkt, die Stärke des magnetischen Feldes konstant. Daher ist das Drehmoment direkt proportional dem Ankerstrom.

Anlaßwiderstand. Wie schon bemerkt, würde, wenn man einen Elektromotor ohne weiteres an ein Netz anschließt, ein Strom von sehr großer Stärke durch den Anker fließen. Bei dem eben als Beispiel gewählten Elektromotor würde im Momente des Einschaltens die Ankerstromstärke, da noch keine Gegenspannung vorhanden ist, wenn wir von dem Spannungsverluste in der Leitung und der Ankerreaktion in der Dynamo absehen, $\frac{120}{0,075} = 1600$ Amp.

betragen. Die Folgen würden ähnliche sein wie bei einem Kurzschlusse. Man muß daher beim Einschalten den in den Motor fließenden Strom abschwächen. An den Anlaßwiderstand eines Nebenschlußelektromotors muß man nun ganz andere Anforderungen stellen wie an den des Serienmotors. Würde man nämlich einen einfachen Kurbelheostat in die Zuleitung legen und diesen

beim Anlassen allmählich ausschalten, so würde man nicht nur den Ankerstrom, sondern, da die Klemmspannung vermindert wird, auch den Erregerstrom, also das magnetische Feld, schwächen. Das Anzugsmoment würde mithin aus zwei Gründen stark verringert werden. Die Anlaufwiderstände der Nebenschlußmotoren werden deshalb so eingerichtet, daß beim Einschalten der Erregerstromkreis nicht geschwächt wird. Wie dieses erreicht wird, ist aus unserer schematischen Fig. 203 zu ersehen. Berührt die Kurbel den

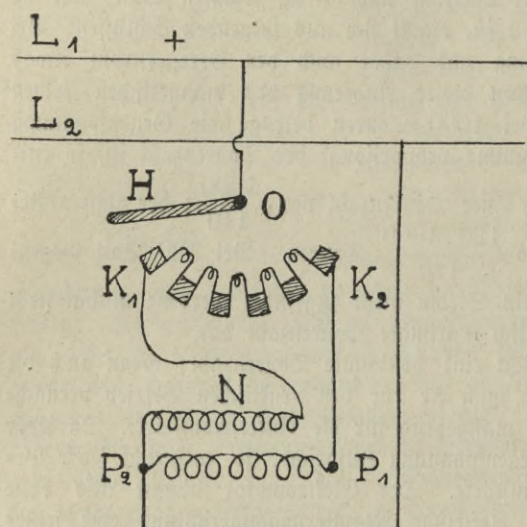


Fig. 203.

ersten Kontakt K_1 , so fließt Strom aus der positiven Leitung nach K_1 , durch die Erregerspulen N in die negative Leitung. Der Hauptstrom fließt zuerst durch alle Stufen des Anlaffers, ehe er in den Anker P_1, P_2 gelangt. Dreht man die Kurbel nach K_2 hin, so muß der Erregerstrom die zwischen K_1 und der Kurbel liegenden Stufen des Nebenschlusses durchfließen. Wir wollen nun zusehen, ob die Schwächung des Erregerstromes so bedeutend ist, daß sie uns zwingt, die besprochene Anordnung zu verwerfen¹⁾. Nennen wir die Netzspannung E , den normalen Anker-

strom J , den Erregerstrom, der ohne Anlaffer zustande kommt, i , den Widerstand in den Magnetspulen R und den Widerstand im ganzen Anlaffer W , so ist

$$i = \frac{E}{R} \text{ oder } \frac{1}{i} = \frac{R}{E}.$$

Der Anlaufwiderstand wird zweckmäßig so dimensioniert, daß bereits auf dem ersten Kontakte der Ankerstrom ungefähr gleich J ist; also ist, wenn wir den Ohmschen Widerstand im Anker im Vergleich zu W vernachlässigen,

$$W = \frac{E}{J} \text{ oder } \frac{W}{E} = \frac{1}{J}.$$

Bei guten Motoren mittlerer Größe beträgt der Nebenschlußstrom etwa 3% ($\frac{1}{33}$) des Hauptstromes; mithin ist

$$i = \frac{1}{33} J \text{ oder } \frac{1}{i} = \frac{33}{J}.$$

¹⁾ Siehe Handbuch der Elektrotechnik, Bd. 9, 2. Abtlg., S. 9.

Ist der Anlasser ganz eingeschaltet, so ist der Erregerstrom

$$i' = \frac{E}{R + W} \text{ oder } \frac{1}{i'} = \frac{R + W}{E}$$

$$\frac{1}{i'} = \frac{R}{E} + \frac{W}{E} = \frac{1}{i} + \frac{1}{J} = \frac{33}{J} + \frac{1}{J} = \frac{34}{J}$$

$$\text{Mithin } i' = \frac{J}{34}$$

Da sich die Tourenzahlen umgekehrt verhalten wie die Erregerströme, und diese sich verhalten wie 33:34, so ist die Erhöhung der Tourenzahl infolge der Schwächung des Erregerstromes durch den Anlasser (etwa 2%) für die Praxis ohne Bedeutung.

Auch der Energieverlust, der dadurch verursacht wird, daß der Erregerstrom den Anlasser beständig durchfließt, ist unbedeutend. Ist z. B. $J = 55$ Amp., $E = 110$ Volt, so macht man W ungefähr gleich 2 Ohm; es ist dann $i' = \frac{55}{34} = 1,62$ Amp. Mithin beträgt der Energieverlust im Anlasser pro Sekunde nur $2 \cdot 1,62^2 = 4,3$ Watt.

Die skizzierte Schaltung (Fig. 203) hat außer dem Vorzuge der Einfachheit noch einen anderen Vorzug. Denken wir uns nämlich den Anlasser durch einen einfachen Kurbelrheostat ersetzt. Wird jetzt der Motor ausgeschaltet, so wird der fast ungeschwächte Erregerstrom plötzlich unterbrochen. Da der Selbstinduktionskoeffizient in dem mit sehr vielen Windungen versehenen Elektromagneten einen hohen Betrag hat, so wird bei der plötzlichen Unterbrechung des Erregerstromes im Nebenschlusse eine außerordentlich große elektromotorische Kraft induziert, durch die die Isolation der Magnetbewicklung zerstört werden kann. Die schädliche Wirkung der Selbstinduktion wird vollständig beseitigt, wenn nach dem Ausschalten noch ein geschlossener Stromkreis vorhanden ist. Dieser wird bei unserer Anordnung gebildet durch den Nebenschluß, den Anlasser und die Ankerwicklung.

In Fig. 204 ist ein Schaltungsschema für einen Nebenschlußelektromotor mit Anlasser und Nebenschlußregulator dargestellt. Für die Nebenschlußbewicklung ist eine besondere Schiene vorgesehen (Nebenschlußschiene). Die gestrichelten Linien stellen die auf der Rückseite liegenden Drahtverbindungen dar. Liegt die Kontaktkurbel auf den schraffiert gezeichneten Isolierstücken, so ist der Motor außer Betrieb gesetzt. Bei der in der Figur gezeichneten Lage der beiden Kurbeln ist der Stromlauf, wenn die linke Hauptleitung die positive ist, folgender. 1. Hauptstrom: Nach P, durch die Spirale 1 des Anlassers, nach der großen Klemme, durch den Anker, nach der zweiten großen Klemme in die negative Leitung. 2. Nebenschlußstrom: Von P zur Nebenschlußschiene des Anlassers, zum Nebenschlußregulator, bei dem die Spiralen 1—5 durchfloßen werden, zur Endklemme (rechts) des Regulators, nach der großen Klemme links, durch die Magnetwicklung, in die negative Leitung des Netzes.

Will man die Drehrichtung des Ankers ändern, so legt man den dicken Draht, der in der Figur den Anlasser mit der linken, großen Klemme verbindet,

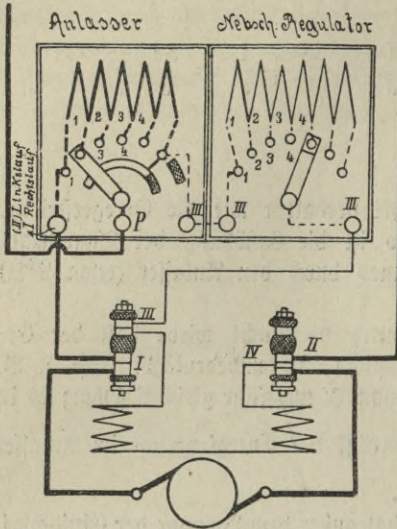


Fig. 204.

an die Klemme II und die negative Leitung an die große Klemme III. Verfolgt man jetzt wieder den Haupt- und Nebenschlußstrom, so findet man, daß nur der durch den Anker fließende Strom seine Richtung geändert hat.

Man sieht leicht ein, daß der Nebenschlußstrom nur durch den Nebenschlußregulator geschwächt wird, wenn man beachtet, daß an der Nebenschlußschiene eine Stromverzweigung beginnt, und daß der Magnetstrom den bequemeren Weg durch die Schiene vor dem Wege durch die Spiralen des Anlassers bevorzugt.

Beim Ausschalten findet der Extrastrom einen geschlossenen Stromkreis, bestehend aus der Magnetwicklung, dem Anker, dem Anlasser und dem Nebenschlußregulator.

Das Einschalten erfolgt durch langsame, ruckweise Bewegung der Kurbel, und zwar soll die Bewegung von Kontakt zu Kontakt entsprechend der sich steigenden Geschwindigkeit des Motors vorwärts schreiten.

Das Ausschalten des Anlassers muß möglichst rasch erfolgen. Schaltet man nämlich langsam aus, so wird der Ohmsche Widerstand allmählich vergrößert, so daß der Ankerstrom schwächer wird. Infolgedessen nimmt die Tourenzahl ab und mit ihr, da das magnetische Feld konstant bleibt, die Gegenspannung im Anker. Diese Abnahme der Gegenspannung bedingt wieder eine Zunahme der Stromstärke. Die Abnahme der Stromstärke erfolgt also nicht in der gewünschten Weise. Bei schneller Kurbeldrehung kommt ein Tourenabfall fast gar nicht in Betracht. Betrachten wir noch den Einfluß der Selbstinduktion bei langsamer und schneller Kurbeldrehung. Bei der Stromunterbrechung wirkt die Selbstinduktion im Sinne der Rückspannung; also wirkt der Selbstinduktion die elektromotorische Gegenkraft des Ankers entgegen. Daraus ergibt sich, daß die Selbstinduktion bei langsamer Kurbeldrehung im Momente der Unterbrechung des Ankerstromes in höherem Maße zur Geltung kommt als bei schneller Kurbeldrehung.

Um der Gefahr zu begegnen, daß die Ankerdrähte durch zu starke Ströme zu sehr erhitzt werden, was bei längere Zeit dauernder Überlastung des Motors oder dann eintreten kann, wenn der Netzstrom infolge einer Betriebsstörung eine Zeitlang ausgeblieben ist und dann wieder auftritt, versieht man vielfach den Anlasser mit selbsttätiger Ausschaltung. Näheres hierüber sowie über Anlasserkonstruktionen findet man in dem Kapitel Hilfsapparate.

Tourenregulierung. Das einfachste Mittel, die Tourenzahl zu ändern, besteht darin, daß man das magnetische Feld verstärkt oder schwächt. Zu dem Zwecke schaltet man, wie wir gesehen haben, in den Erregerstromkreis zwischen Anlasser und Elektromotor noch einen veränderlichen Widerstand ein (Nebenschlußregulator). Dieser Regulierungsart sind jedoch Schranken gesetzt durch die Funkenbildung. Je mehr man nämlich das Feld schwächt, um so mehr wird der Einfluß des Ankerstromes verstärkt, d. h. die Ankerückwirkung vergrößert. Bei normalen Motoren kann in der beschriebenen Weise eine Tourenänderung von zirka 20%, bei Verwendung größerer Modelle eine solche bis 1:4 erzielt werden. Wenn eine Tourenregulierung innerhalb größerer Grenzen verlangt wird, so benutzt man vielfach bei Zweileiteranlagen das Mittel, die Ankerwindungszahl zu verändern. Zu dem Zwecke versteht man den Anker mit zwei gegeneinander isolierten Wicklungen und zwei Kollektoren. Der Einfachheit halber wollen wir annehmen, daß der Elektromotor ein zweipoliger mit Ringanker sei (s. Fig. 69). Besteht jede Wicklung aus $2n$ Windungen, so sind, da sich der Strom an den Bürsten teilt, n Windungen hintereinander geschaltet, und es addieren sich die in ihnen induzierten elektromotorischen Gegenkräfte. Schalten wir die beiden Wicklungen hintereinander, und nennen wir die durchschnittliche elektromotorische Gegenkraft in einer Windung e , so ist die ganze Gegenspannung gleich $2ne$. Obwohl die Gegenspannung immer etwas kleiner als die Klemmspannung (Netzspannung) E ist, so wollen wir doch $2ne = E$ setzen. Der Motor mache jetzt u Touren. Wird nur eine der vorhandenen Wicklungen benutzt, oder werden die beiden Wicklungen parallel geschaltet, so kommen, wenn wir die Größe der Gegenspannung bestimmen wollen, n Windungen in Betracht. Nennen wir die in einer Windung induzierte durchschnittliche elektromotorische Kraft x , so ist $n \cdot x = E$, $x = \frac{E}{n} = 2e$. Da das magnetische Feld konstant ist, so muß die neue Tourenzahl des Motors gleich $2 \cdot u$ sein. Aus dem behandelten Beispiele ergibt sich, daß die Tourenzahl unter sonst gleichen Umständen (konstante Netzspannung, konstantes magnetisches Feld) umgekehrt proportional der Ankerwindungszahl ist. Betrachten wir noch kurz den Fall, daß die eine Wicklung n Windungen hat, in denen sich die induzierten elektromotorischen Kräfte addieren, und die andere $2n$ solcher Windungen besitzt:

1. Die erste Wicklung sei allein eingeschaltet, die Tourenzahl sei gleich u .
2. Die zweite Wicklung sei allein eingeschaltet, die Tourenzahl ist dann gleich $\frac{u}{2}$.
3. Die beiden Wicklungen seien hintereinander geschaltet, die Tourenzahl ist gleich $\frac{u}{3}$.

Endlich sei noch erwähnt, daß man bei passend gewähltem Verhältnis der Windungszahlen (z. B. 1:3) auch dadurch eine Tourenänderung herbeiführen kann, daß man die Wicklungen gegeneinander schaltet.

Bei einer nach dem Dreileitersystem eingerichteten Anlage kann man die

Nennspannung variieren. Es betrage z. B. die Spannung zwischen dem positiven Außenleiter und dem Mittelleiter 200 Volt, zwischen dem negativen Außenleiter und dem Mittelleiter 100 Volt. Wir können dann den Erregerkreis an die Spannungen 100 Volt, 200 Volt und 300 Volt anschließen.

Ein guter Nebenschlußelektromotor behält, auch wenn größere Netzschwankungen auftreten, seine Tourenzahl fast unverändert bei. Blicke nämlich das magnetische Feld trotz der Netzschwankungen ein konstantes, so würde eine Abnahme der Netzspannung eine Abnahme der Ankerstromstärke und diese wiederum eine Verringerung der Tourenzahl zur Folge haben. Nun wird aber zugleich mit der Netzspannung die Erregerstromstärke geringer und die hierdurch bedingte Schwächung des magnetischen Feldes¹⁾ veranlaßt den Motor, schneller zu laufen.

Umsteuerung. Für manche Antriebe ist es unerläßliche Forderung, daß man den Drehungssinn des Elektromotors nach Belieben ändern oder den Elektromotor umsteuern kann (Aufzüge, Kräne). Wir haben schon gesehen, daß man den Drehungssinn eines Elektromotors dadurch ändern kann, daß man entweder den Magnetstrom oder den Ankerstrom umkehrt. Die Umkehrung eines Stromkreises läßt sich nun an und für sich leicht bewerkstelligen; es geschieht dies mittels der sogen. Umschalter, die im Abschnitte Hilfsapparate beschrieben werden. In unserem Falle aber wird die Konstruktion einer Umsteuervorrichtung durch die Forderung erschwert, daß die Umkehrung der Stromrichtung erst dann erfolgen darf, wenn der Elektromotor zum Stillstand gekommen ist. Da der Stillstand des Elektromotors durch Bedienung des Anlaffers bewerkstelligt wird, so müssen, damit eine vorzeitige Umkehrung des Stromes ausgeschlossen ist, Anlasser und Umkehrvorrichtung zwangsläufig miteinander verbunden sein — Umkehr-Anlasser. Im einfachsten Falle besteht ein Umkehr-Anlasser aus zwei einfachen Anlassern mit gemeinsamem Nullpunkte und gemeinsamer Kurbel. Links und rechts vom Nullpunkte sind die Kontakte angeordnet. Dreht man die Kurbel aus der Nullstellung (Stillstand) nach rechts, so erhält der Ankerstrom (oder der Magnetstrom) eine solche Richtung, daß Rechtslauf des Elektromotors erfolgt; dreht man die Kurbel nach links (aus der Nullstellung), so wird der Ankerstrom (oder der Magnetstrom) kommutiert, es erfolgt also Linkslauf. Ist der Motor also im Betriebe und soll eine Umsteuerung erfolgen, so muß die Kurbel zuerst durch die Nullstellung gehen.

3. Compoundmotoren.

Im allgemeinen vereinigt der Compoundmotor (Motor mit gemischter Schaltung), weil er eine Hauptstrom- und Nebenschlußbewicklung besitzt, die Eigenschaften des Hauptstrom- und Nebenschlußmotors in sich, allerdings in

¹⁾ Wir haben gesehen, daß innerhalb gewisser Grenzen die Kraftlinienzahl des Eisens proportional ist der Amperewindungszahl. Kommen bei normaler Netzspannung diese Grenzen in Betracht, so ist die Änderung der Feldstärke proportional der Änderung der Netzspannung.

abgeschwächtem Maße. Denn einerseits ist die Anzahl der Amperewindungen des Nebenschlusses kleiner als bei einem Nebenschlußmotor für dieselbe Leistung; andererseits ist die Anzahl der Amperewindungen der Hauptstrombewicklung kleiner als bei einem Hauptstrommotor derselben Größe. Das Anzugsmoment ist größer als bei dem Nebenschlußmotor, aber kleiner als dasjenige des Hauptstrommotors. Denn man wählt wohl meistens die Nebenschlußbewicklung so, daß sich bei dem zugehörigen Strome das Feld nahe dem Sättigungszustande befindet, so daß die Zunahme der Kraftlinien, die dem Hauptstrome entspricht, nicht mehr proportional den Hauptstromamperewindungen ist.

Vergegenwärtigt man sich, wie sich der Nebenschlußmotor einerseits, der Hauptstrommotor andererseits bei Belastungsschwankungen verhält, so findet man, daß der Compoundmotor konstante Tourenzahl nicht einhalten kann. Die Tourenschwankungen liegen meistens innerhalb der Grenze von 10—20%, je nachdem die Anzahl der Hauptstromwindungen kleiner oder größer ist.

Da bei Leerlauf der Einfluß des Hauptstromes auf das magnetische Feld in den Hintergrund tritt, so verhält sich der Compoundmotor bei Leerlauf gerade so wie ein Nebenschlußmotor, er kann also nicht „durchgehen“.

Wirkungsgrad und Prüfung der Gleichstrommotoren. Unter dem Wirkungsgrade eines Elektromotors versteht man das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung. Die zugeführte Leistung kann mittels eines Amperemeters und eines Voltmeters leicht gemessen werden. Das Voltmeter ist mit den Klemmen des Elektromotors zu verbinden. Ist E die gemessene Klemmspannung und J der ganze in den Elektromotor fließende Strom (einschließlich Nebenschlußstrom), so ist die zugeführte Leistung gleich $E \cdot J$ Watt. Mit größeren Schwierigkeiten ist die Messung der von dem Elektromotor abgegebenen mechanischen Arbeit verknüpft. Da die direkte Messung der abgegebenen Leistung in der Praxis seitens des Abnehmers nicht selten Anwendung findet, so wollen wir auf dieselbe an dieser Stelle kurz eingehen.

Messung durch Abbremsung. Die Arbeit des Motors wird in Reibung (Wärme) umgesetzt. Auf die Achse des Motors wird eine Eisenscheibe vom Durchmesser r aufgekeilt (s. Fig. 205). B und B' sind Holzbacken, die eine dem Durchmesser der Bremscheibe entsprechende Rundung besitzen. Zieht man die Schrauben S an, so werden die Bremsbacken gegen die Scheibe gedrückt. H ist ein mit B fest verbundener Hebel. Wird der Motor in Betrieb gesetzt, so gerät die Bremscheibe in Rotation; die Schaltung muß so gewählt

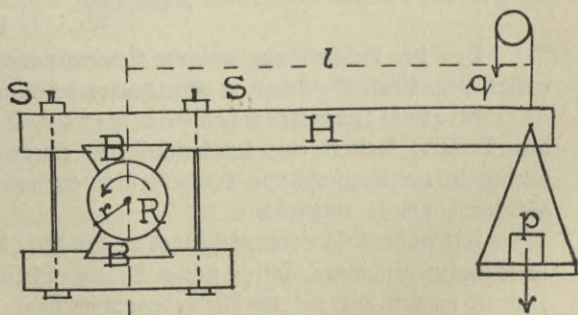


Fig. 205.

werden, daß die Drehung im Sinne des eingezeichneten Pfeiles erfolgt. Unsere Bremsvorrichtung würde sich ebenfalls drehen, wenn wir nicht das Ende des Hebels festhielten oder einen hinlänglich starken Druck gegen den Hebel ausübten. Offenbar muß dieser Druck um so größer sein, je mehr die Schrauben S angezogen sind, d. h. je größer der auf die Sekunde bezogene Reibungswiderstand ist. Statt einen Druck auf den Hebel auszuüben, belasten wir die Schale mit Gewichtsteinen P. Durch zwei Anschläge wird eine etwaige Drehung des Hebels begrenzt. Der Druck der Bremsbacken gegen die Scheibe wird so reguliert, daß der Motor die gewünschte Tourenzahl n macht. Hat das Gewicht P eine solche Größe, daß der Hebel H bei rotierender Bremscheibe die horizontale Richtung beibehält, so ist das Drehmoment, bezogen auf den Umfang der Bremscheibe, gleich dem Drehungsmomente des Gewichtes P. Bezeichnen wir also die Länge des Hebelarmes mit l und die Größe der Reibung mit Q , so ist

$$Q \cdot r = P \cdot l \text{ oder } Q = \frac{P \cdot l}{r}.$$

Wir wollen noch klar machen, was uns der Bruch $\frac{P \cdot l}{r}$ angibt: Denken wir uns ein Seil an dem Umfange der Bremscheibe R befestigt, das auf der Scheibe liegt, so wird das Seil aufgerollt, ohne daß der Motor seine Tourenzahl ändert, wenn an dem freien Ende des Seiles ein Gewicht von $\frac{P \cdot l}{r}$ kg hängt. Die Last $\frac{P \cdot l}{r}$ kg wird bei einer Umdrehung des Motors um $2r\pi$ Meter gehoben. Die einer Umdrehung entsprechende Arbeit beträgt also $2r\pi \cdot \frac{P \cdot l}{r} = 2\pi P \cdot l$ Kilogrammometer. Da der Motor in einer Minute n oder in 1 Sekunde $\frac{n}{60}$ Touren machen soll, so ist die Arbeit pro Sekunde gleich

$$2\pi \cdot P \cdot l \cdot \frac{n}{60} \text{ mkg.}$$

Dividieren wir noch durch 75 und multiplizieren wir mit 736, so erhalten wir die Leistung des Motors in Watt. Bezeichnen wir die so gefundene Wattzahl mit W , so ist der gesuchte Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{E \cdot J}{W}.$$

Von der Beschreibung anderer Konstruktionen (z. B. des Bremsdynamometers von Prof. Brauer in Karlsruhe) sehen wir ab.

Wirbelstrombremsen (Siemens & Halske) beruhen auf folgendem Prinzip: Rotiert eine Kupferscheibe in einem magnetischen Kraftfelde, so werden in der Kupferscheibe Wirbelströme erzeugt, die auf die Bewegung der Scheibe hemmend einwirken.

Die früher beschriebenen Methoden, den Wirkungsgrad einer Dynamomaschine zu bestimmen, lassen sich z. T. auf Elektromotoren übertragen. Besonders machen wir auf die Methode aufmerksam, die darin besteht, daß man die Leerlaufverluste bestimmt.

Bei der Prüfung der Elektromotoren ist auch die Temperaturzunahme zu bestimmen. Hierbei ist nach den Normalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker zu unterscheiden zwischen:

1. dem intermittierenden Betriebe, bei dem nach Minuten zählende Arbeitsperioden mit Ruhepausen abwechseln (Aufzüge, Kräne),
2. dem kurzzeitigen Betriebe, bei dem die Arbeitsperiode kürzer ist als nötig, um die Endtemperatur zu erreichen, und die Ruhepause lang genug, damit die Temperatur wieder annähernd auf die Lufttemperatur sinken kann,
3. dem Dauerbetriebe, bei dem die Arbeitsperiode so lang ist, daß die Endtemperatur erreicht wird.

Im ersten Falle wird die Temperaturzunahme gemessen nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes von 1 Stunde (normale Leistung), im letzten Falle nach Ablauf von 10 Stunden. Für die Größe der Temperaturzunahme gelten dieselben Bestimmungen wie für Dynamomaschinen.

Bezüglich der Behandlung der Elektromotoren verweisen wir auf Kap. 6.

II. Wechselstrommotoren.

1. Synchronmotoren.

Zwei Wechselstrommaschinen seien parallel geschaltet, und es werde die Nennspannung der einen Maschine verringert. Die erste Maschine gibt dann an die zweite Strom ab, und der Synchronismus bleibt bestehen. Die zweite Maschine läuft also als Motor. Stimmen die beiden Maschinen in der Polzahl p überein, so sind ihre Tourenzahlen einander gleich. Nun ist es nicht nötig, daß die zweite Maschine die gleiche Polzahl hat wie die erste; ist z. B. ihre Polzahl gleich $\frac{p}{2}$, so muß sie $2n$ Touren machen, wenn Synchronismus eintreten soll.

Zunächst ergibt sich aus den vorigen Betrachtungen, daß bei Synchronmotoren, die genau so gebaut sind wie die entsprechenden Generatoren, eine Felderregung durch Gleichstrom erfolgen muß. Den Gleichstrom für das Magnetssystem liefert entweder eine besondere Erregermaschine oder eine Akkumulatorenbatterie, oder man kommutiert einen Teil des der Maschine zugeführten Wechselstromes in Gleichstrom.

Anlauf. Ein Synchronmotor kann nicht von selbst angehen, er muß vielmehr, bevor man den Anker an das Netz anschließt, zuerst auf Synchronismus gebracht werden. Damit wir den Grund erkennen, wollen wir einen Draht des ruhenden Ankers, der sich einem Nordpole gegenüber befindet, ins Auge fassen. In dem Momente, in dem wir unsere Betrachtungen beginnen, fließe der in den Anker geleitete Strom in der Richtung von links nach rechts. Der Draht werde bei dieser Stromrichtung abgestoßen. Da sich nur nach sehr kurzer Zeit ($\frac{1}{100}$ Sek.) die Richtung des Netzstromes, also auch die Stromrichtung in unserem Drahte umkehrt, so geht die Abstoßung in eine Anziehung über; denn da die Drehungsgeschwindigkeit des Ankers nur langsam zunehmen kann,

so wird sich der Draht nach der Umkehr des Stromes noch nahezu an derselben Stelle befinden wie im Momente des Einschaltens. Anziehung und Abstoßung heben sich also auf. Ist aber der Motor auf Synchronismus gebracht, so kommt unser Ankerdraht in dem Augenblicke, in dem sich der Strom umkehrt, in den Bereich des auf den Nordpol folgenden Südpoles; da also der Kraftlinienfluß und die Stromrichtung ihr Vorzeichen gewechselt haben, so wirkt auf den Ankerdraht die Kraft in gleichem Sinne.

Prinzipiell unterscheidet sich der Einphasenmotor nicht von dem Serienmotor. Verfolgt man bei diesem einen Ankerdraht, so findet man, daß sich die Stromrichtung umkehrt, sobald der Draht durch die neutrale Zone geht. Gleichzeitig tritt der Draht aus dem Felde des Nordpols in das Feld des Südpoles.

Um den Motor auf Synchronismus zu bringen, benutzt man häufig einen Induktionsmotor, von dem später die Rede sein wird. Es müssen dann, bevor man den Motor mit dem Neze verbindet, die bei der Parallelschaltung der Wechselstromgeneratoren besprochenen Bedingungen erfüllt sein. Ist eine besondere Erregermaschine vorgesehen, die mit dem Motor mechanisch gekuppelt ist, oder ist der Motor mit einer Gleichstrommaschine, die Strom an ein Netz abgeben soll, gekuppelt, und steht außerdem Gleichstrom zur Verfügung, so kann man die Gleichstrommaschine für die Inbetriebsetzung benutzen. Arbeitet ein Generator auf einen Motor, so läuft der Motor mit an, wenn der von vornherein voll erregte Generator in Gang gesetzt wird. In diesem Falle ist, da der Generator zunächst mit geringer Tourenzahl läuft, die Periodenzahl beim Anlauf klein. Dem eben betrachteten Ankerdrahte des Motors steht also eine längere Zeit zur Verfügung, aus dem Bereiche eines Nordpols in den Bereich eines Südpoles oder umgekehrt zu wandern.

Bei mehrphasigen Synchronmotoren kann, ohne daß durch das Magnetssystem Strom fließt, ein Anlaufen erfolgen, wenn die Belastung gering ist, indem in dem Polgestelle Wirbelströme erzeugt werden und durch diese ein magnetisches Feld (näheres s. asynchrone Motoren).

Da der Synchronmotor zugleich als Wechselstrommaschine läuft, so kommen drei elektromotorische Kräfte in Betracht, nämlich die elektromotorische Kraft des in den Anker geleiteten Stromes, die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion und die infolge der Rotation des Ankers in den Ankerdrähten induzierte elektromotorische Kraft (gegenelektromotorische Kraft). Die zuletzt genannte Spannung ist nur abhängig von der Erregerstromstärke, da ja bei den verschiedensten Belastungen die Tourenzahl konstant ist, vorausgesetzt, daß sich die Periodenzahl des Generators nicht ändert. Man kann also bei gegebener Klemmenspannung (Netzspannung) eine ganz bestimmte Leistung (z. B. 1 KW) durch Variierung der Erregung bei verschiedener Ankerstromstärke, die offenbar durch die gegenelektromotorische Kraft beeinflusst wird, erzielen¹⁾. Berücksichtigen wir, daß die Leistung gleich ist Klemm-

¹⁾ Bei gegebener Klemmspannung muß $J \cdot \cos \varphi$, wenn der Motor eine bestimmte Leistung abgeben soll, einen gewissen Wert haben. In der Gleichung $x \cdot y = a$ kann man x und y sehr viele Werte beilegen.

spannung \times Ankerstrom $\times \cos \varphi$ — wo φ den Phasenverschiebungswinkel zwischen Kleinspannung und Ankerstrom bedeutet —, so folgt, daß sich mit der Erregung $\cos \varphi$ ändern muß. Denn wenn in einem Produkte aus drei Faktoren, das einen konstanten Wert hat, der erste Faktor konstant bleibt und der zweite variiert wird, so muß sich der dritte ändern. Für eine bestimmte Erregung wird $\cos \varphi$ gleich 1. Wird die Erregung noch weiter getrieben, wird der Synchronmotor übererregt, so erfolgt Voreilung des Stromes, durch die wie durch eine Kapazität ein Teil der in anderen an dasselbe Netz angeschlossenen Apparaten oder Motoren hervorgerufenen Phasenverschiebung kompensiert wird (Phasenregler). Die Vorzüge und Nachteile des Synchronmotors sollen noch kurz nebeneinander gestellt werden:

Vorzüge: Konstante Tourenzahl bei allen Belastungen, verträgt Überlastungen, Macheilung des Stromes kann vermindert, sogar Voreilung herbeigeführt werden.

Nachteile: Gleichstromerregung, Schwierigkeit beim Anlassen, bleibt bei sehr großen Überlastungen stehen, Tourenänderung so gut wie ausgeschlossen.

2. Asynchrone Motoren (Induktionsmotoren).

Wir wollen hier an erster Stelle die Mehrphasenmotoren behandeln, weil man in die Wirkungsweise dieser Motoren leichter einen Einblick gewinnen kann als in diejenige der Einphasenmotoren.

Entstehung eines Drehfeldes. Auf einen Eisenring (Fig. 206) seien zwei Paar Spulen gewickelt, deren Enden mit einer Zweiphasenstrommaschine verbunden sind; die Momentanwerte der beiden Ströme seien durch die Gleichungen gegeben

$$i_1 = J_1 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad \text{und}$$

$$i_2 = J_2 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{\pi}{2} \right).$$

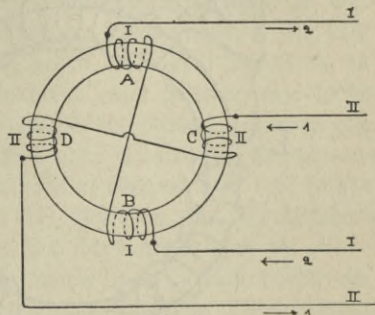


Fig. 206.

Wir wollen die Zustände im Ringe betrachten für die Zeitpunkte $t = 0$, $t = \frac{1}{4}T$, $t = \frac{1}{2}T$, $t = \frac{3}{4}T$.

1. $t = 0: i_1 = 0, i_2 = -J_2$.

Der durch das zweite Spulenpaar fließende Strom habe die Richtung des Pfeiles 1. Es entsteht dann in dem Ringe bei A ein Nordpol und bei B ein Südpol.

2. $t = \frac{1}{4}T: i_1 = J_1, i_2 = 0$.

Die Stromrichtung entspricht den Pfeilen 2. Der Nordpol befindet sich also jetzt bei C und der Südpol bei D.

3. $t = \frac{1}{2}T: i_1 = 0, i_2 = J_2$.

Der Strom fließt also durch das zweite Spulenpaar, aber in umgekehrter Richtung wie zur Zeit $t = 0$. Daher entsteht jetzt in B der Nordpol.

$$4. \quad t = \frac{3}{4}T: i_1 = -J_1, i_2 = 0.$$

Da sich die Stromrichtung im ersten Spulenpaare im Vergleich zu Nr. 2 umgekehrt hat, so befindet sich der Nordpol in D.

Man sieht also, daß der Nordpol und natürlich ebenso der Südpol während einer Periode einmal den Ring, den man den Ständer oder Stator nennt, durchläuft; es entsteht ein rotierendes magnetisches Feld, ein sogenanntes Drehfeld. Befindet sich innerhalb des Ringes ein Magnet oder ein Eisenstab, der sich um eine senkrecht zur Ringebene stehende Achse drehen kann, so wird er vom Drehfelde mitgenommen, er gerät in Rotation, und zwar stimmt seine Umdrehungszahl mit der Periodenzahl überein. Den Magnet wollen wir Rotor (Läufer) nennen.

Bewickeln wir einen Ring mit drei Spulen, die einen Abstand von 120° haben, etwa in der durch die Fig. 41 (S. 73) veranschaulichten Weise und verbinden wir die drei freien Enden mit einer Drehstromleitung, so wird in

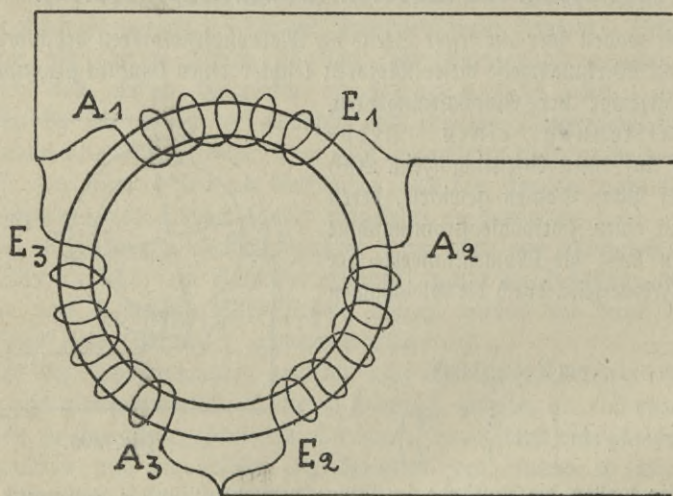


Fig. 207.

dem Ringe ebenfalls ein rotierendes magnetisches Feld erzeugt. Dasselbe gilt, wenn wir statt der Sternschaltung die Dreieckschaltung anwenden. Diese ist in Fig. 207 unter der Annahme, daß ein Ring mit drei Spulen bewickelt ist, schematisch dargestellt. Das Ende der ersten Spule, E_1 , ist mit dem Anfang der zweiten, A_2 , verbunden u., an die Verbindungsstellen werden die Leitungen gelegt. Dieselbe Schaltung erhält man, wenn man bei einem Grammeschen Ringe drei um 120° voneinander entfernte Punkte der in sich geschlossenen Wicklung durch Drähte mit drei Schleifringen verbindet.

In Fig. 208 ist der Ring mit sechs Spulen bewickelt. Je zwei Spulen sind hintereinander geschaltet; von den sechs freien Enden sind drei, nämlich a_1, a_3, a_5 , mit den drei Leitungen verbunden und die drei übrigen zu einem neutralen Punkte vereinigt (Sternschaltung).

In den bis jetzt kurz behandelten Fällen ist der feststehende Teil des Elektromotors, der sogen. Ständer, zweipolig gewickelt. Das Charakteristische der zweipoligen Ständerwicklung besteht darin, daß die Tourenzahl des Drehfeldes oder eines im Ringe drehbar angeordneten Magnets mit der Periodenzahl übereinstimmt, wenn wir von der Schließung absehen (s. S. 390).

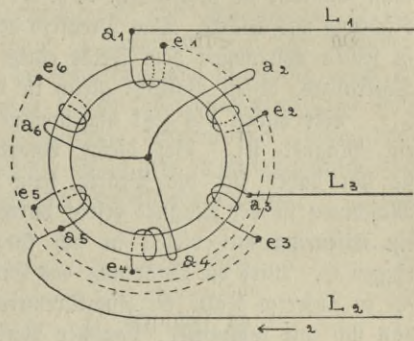


Fig. 208.

Ist die Periodenzahl des Wechselstromes 25 pro Sekunde, so macht der Motor schon 1500 Touren in der Minute. Diese Periodenzahl ist aber, wenn gleichzeitig Lampen brennen sollen, zu klein — das Licht würde flimmern. Bei der bei uns üblichen Periodenzahl von 50 pro Sekunde würde der Motor die enorme Tourenzahl 3000 in der Minute haben. Ein Mittel die Tourenzahl zu verringern ist die mehrpolige Wicklung. Würden wir die sechs Spulen in Fig. 208 auf den halben Umfang des Ringes gewickelt haben, so würde das Feld, da sich die Pole zwischen den Spulen bilden, während einer Periode eine halbe Umdrehung machen. Bewickelt man die freie Hälfte des Ringes genau so wie die erste Hälfte, und schaltet man die entsprechenden Spulen der ersten und zweiten Ringhälfte hintereinander, so rotiert unser Magnet mit der halben Tourenzahl wie eben, er macht also bei 50 Perioden des Drehstromes 1500 Touren. Die betreffende Wicklung des Ständers nennt man die vierpolige Wicklung. Eine bessere Ausnutzung würde man in diesem Falle erhalten, wenn man zwei zu einem Kreuze verbundene Eisenstäbe als drehbaren Teil benutzte.

Bei der sechspoligen Wicklung und der Periodenzahl 50 ist die Tourenzahl des Motors, da drei Perioden einer Umdrehung entsprechen, gleich $\frac{3000}{3} = 1000$.

Man kann also bei einer gegebenen Periodenzahl nicht jede beliebige Tourenzahl erreichen. Bei 50 Perioden sind folgende Tourenzahlen möglich:

3000	bei zweipoliger Ständerwicklung
1500	„ vierpoliger „
1000	„ sechspoliger „
750	„ achtpoliger „

Die angegebenen Tourenzahlen, die man die synchronen Umlaufszahlen nennt, werden aber, wie wir gleich sehen werden, nicht ganz erreicht.

Das rotierende Magnetfeld hat bei symmetrischen Mehrphasenströmen¹⁾ konstante Stärke, es oszilliert nicht. Die einphasigen Wechselstromfelder sind nicht konstant, sie oszillieren, d. h. der Kraftlinienfluß ändert fortwährend seine Richtung und Stärke. Das Drehfeld der Mehrphasenströme entspricht vollständig in seinen Wirkungen dem Felde eines rotierenden, durch Gleichstrom erregten Polkranzes, dessen Polzahl gleich ist der Polzahl des Ständers.

Wir haben bis jetzt angenommen, daß der bewegliche Teil des Motors ein Magnet sei. Bei dieser Anordnung ist die Wirkung eine geringe; sie hat daher für die Praxis keine Bedeutung erlangt. Bei den neueren Maschinen ist der Magnet ersetzt durch einen „Anker“, der im einfachsten Falle ein Eisenring mit vielen in sich kurz geschlossenen Windungen oder Drahtwindungen ist. Wird die Wicklung des Ständers an das Leitungsnetz angeschlossen — in unserem Falle an eine Drehstromleitung —, so wird ein Feld erzeugt, das sich mit konstanter, von der Periodenzahl des eingeleiteten Stromes abhängiger Geschwindigkeit dreht. Jede Windung des Läufers wird von Kraftlinien geschnitten, und es entstehen in ihr Induktionsströme. Die in den einzelnen Drähten des Ankers induzierten Ströme sind Wechselströme; diese liefern zusammen mit dem Drehfelde das der Belastung entsprechende Drehmoment. Man kann nachweisen, daß das Drehmoment um so kleiner wird, je größer die Selbstinduktion in der Motornwicklung ist. Das Drehmoment wächst bei gegebener Stärke des Drehfeldes mit der Stärke des im Läufer induzierten Feldes. Da dieses von der Anzahl der die Ankerdrähte schneidenden Kraftlinien abhängig ist, so folgt, daß gerade beim Anlaufen die Zugkraft (das Drehmoment) groß ist. — Wir haben früher gesehen, daß die Luft die Kraftlinien schlecht leitet und eine Vergrößerung des Luftzwischenraumes eine stärkere Streuung zur Folge hat. Damit nun möglichst viele Kraftlinien den Luftraum durchsetzen können, verringert man tunlichst den Abstand zwischen Ständer und Anker; man legt bei beiden die Wicklung in Lächer oder Nuten.

Der Käfiganker besteht aus einem Eisenzylinder (s. Fig. 209), an dessen

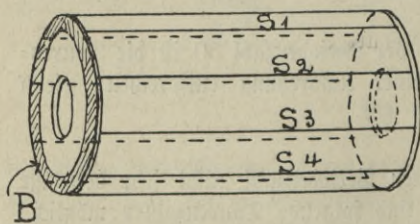


Fig. 209.

Oberfläche sich parallel zur Zylinderachse laufende Nuten oder Lächer befinden, die zur Aufnahme der Kupferdrähte oder Kupferstäbe S dienen; die Drähte werden an den beiden Seitenflächen des Zylinders durch Kupferbänder B miteinander verbunden. Den Käfiganker nennt man auch den pollosen Kurzschlussanker.

Werden die Drähte so miteinander verbunden, daß mehrere in sich kurz geschlossene Stromkreise entstehen, so bilden sich in dem Anker Pole (Kurzschlussanker mit Polen oder Phasenanker). Den Kurzschlussanker verwendet man wegen der großen Anlauf-

¹⁾ Bei Drehstrom, wenn die einzelnen Phasen 120° gegeneinander verschoben und die Phasenspannungen einander gleich sind.

stromstärke in der Regel nur für kleinere Motoren; nur für ganz spezielle Betriebe kommen Kurzschlussanker auch für größere Motoren in Frage. Man reduziert dann beim Anlaufen die Spannung mittels Transformatoren. Besteht die Ankerwicklung bei Drehstrommotoren aus drei Phasen (vergl. Fig. 207), wird der Anker also genau so gewickelt wie der Ständer, und führt man die drei freien Enden zu Schleifringen, so erhält man die offene Wicklung. Hierbei kann man sowohl Dreieckschaltung als auch Sternschaltung anwenden. Die drei Schleifringe werden mit einem dreiteiligen Widerstande verbunden. Ein solcher ist in Fig. 210 schematisch dargestellt; K_1 , K_2 , K_3 sind drei fest miteinander verbundene Kurbeln, O ist also der neutrale Punkt. Berühren die Kurbeln die drei letzten Kontakte a , b , c , so sind die Schleifringe S (in dem Schema durch Punkte angedeutet) kurz geschlossen.

Wir wollen uns jetzt klar machen, welchen Zweck die beschriebene Anordnung hat. Man kann einen asynchronen Motor vergleichen mit einem Transformator. Während jedoch bei einem Transformator die beiden Wicklungen einen gemeinsamen Eisenkern besitzen, hat bei einem asynchronen Motor jede Wicklung, nämlich die Läufer- und Ständerwicklung, ihren besonderen Eisenkern, außerdem sind die beiden Wicklungen durch einen Luftzwischenraum voneinander getrennt. Wird der Motor mit Kurzschlussanker eingeschaltet, so verhält er sich wie ein Transformator, dessen sekundäre Wicklung kurz geschlossen ist; bei einem solchen besitzt aber der primäre Strom eine große Stärke. Analog entsteht beim Einschalten des Motors ein Stromstoß, der auf die Stromerzeuger und die anderen Stromverbraucher nachteilig einwirkt. Man kann ja in die Zuleitungen zum Ständer Widerstände einschalten, durch die der aus den Leitungen in den Ständer fließende Strom verringert wird. Man schwächt aber dadurch das Drehfeld und damit das Anzugsmoment.

Wird nun, wie es bei Benutzung des Anlaffers geschieht, in jede Phase des Motors noch ein größerer Widerstand eingeschaltet, so können in dem Motor nicht mehr so starke Ströme entstehen, wie wenn die Schleifringe kurz geschlossen sind. Beachten wir, daß ein Transformator, dessen sekundäre Wicklung schwächer belastet wird, primär weniger Strom aufnimmt, so

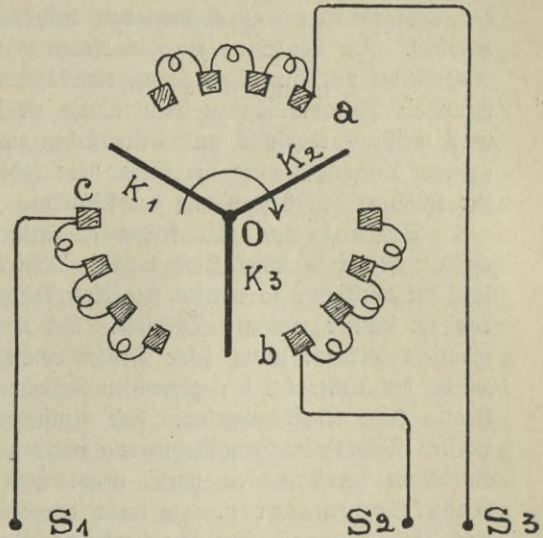


Fig. 210.

sehen wir, daß die Abschwächung der im Läufer induzierten Ströme (mittels des Anlaffers) eine Schwächung des Statorstromes zur Folge hat. Das Anlaufen der Motoren mit Schleifringanker erfolgt bei normalem Drehmomente ohne wesentliche Überschreitung der normalen Stromstärke.

Wenn ein Motor nach dem Anlassen lange Zeit mit konstanter Tourenzahl laufen soll, so empfiehlt es sich, nach dem Anlassen die Bürsten von den Schleifringen abzuheben, damit kein unnötiger Verschleiß stattfindet; auch wird durch das Abheben der Bürsten der Wirkungsgrad erhöht. Natürlich müssen, bevor die Bürsten entfernt werden, die Schleifringe kurz geschlossen werden.

Was die Ausführung der Drehstrommotoren anbelangt, so beschränken wir uns auf einige wenige Bemerkungen: Der magnetisch wirksame Teil des Stators wird aus Eisenblechen hergestellt und von dem Gehäuse umschlossen. Die Wicklung wird in Nuten verlegt, die mit Isolationsmaterial ausgekleidet werden. Man kann betriebsfähigere Motoren für große Leistungen, wenn die Polzahl nicht zu klein ist, bis zu 10000 Volt bauen. Der Rotor wird meistens ebenfalls aus Eisenblechen zusammengesetzt. Bei Motoren für größere Leistungen wird der Rotor von radialen Luftkanälen durchzogen, die zur Kühlung des Eisens und der Wicklung dienen.

Schlüpfung. Die früher angegebene Tourenzahl erreicht ein asynchroner Motor in Wirklichkeit nicht¹⁾. Wäre nämlich die synchrone Umlaufzahl die wirkliche, so würden die Ankerdrähte gerade so schnell rotieren wie das im Läufer erzeugte Drehfeld. Da nun im Läufer nur dann Ströme induziert werden, wenn seine Drähte von Kraftlinien geschnitten werden, so würde der Anker bei der gemachten Annahme stromlos sein, und der Motor könnte keine Kraft abgeben. Die Entstehung der Induktionsströme (eines zweiten Feldes) ist Grundbedingung für den Lauf. Weil das Ankerfeld durch Induktion hervorgerufen wird, nennt man die asynchronen Motoren auch Induktionsmotoren. Je mehr der Motor belastet wird, um so mehr muß die Tourenzahl von der synchronen Umlaufzahl verschieden sein; denn um so kräftiger müssen die Induktionsströme werden. Nennt man die synchrone Umlaufszahl n und die wirkliche n' , so ist $\frac{n - n'}{n} = \sigma$, also das Verhältnis

des Tourenabfalles zur synchronen Umlaufszahl, die sogenannte Schlüpfung des Motors. Multipliziert man σ mit 100, so erhält man die Schlüpfung in Prozenten der synchronen Umlaufszahl. Bei Leerlauf beträgt sie noch nicht 1%, bei Vollbelastung etwa 5–6%.

Die in dem Rotor erzeugten Wechselströme haben, da sie dadurch entstehen, daß die Kraftlinien des Drehfeldes die Drähte des Rotors schneiden, eine Periodenzahl, die durch $n - n'$ gegeben ist. Da $n - n'$ klein ist, so haben die induzierten Ströme eine geringe Frequenz. Nun wird aber die Impedanz, der scheinbare Widerstand, um so kleiner, je mehr sich ein Wechselstrom einem Gleichstrom nähert, d. h. je kleiner die Periodenzahl ist; daher ist für die

¹⁾ Wenn er sie erreichte, so wäre die Bezeichnung asynchroner Motor nicht am Platze.

Induktionsströme der scheinbare Widerstand der Rotorwicklung wenigstens bei Leerlauf nicht wesentlich größer als der Ohmsche. Es genügt also eine geringe induzierte elektromotorische Kraft, kräftige Ströme durch den Rotor zu treiben. Die im Rotor erzeugte Spannung ist von der Primärspannung ganz unabhängig; sie hängt, außer von der Schlüpfung, von der Stärke des Drehfeldes und der Anzahl der Windungen ab; während des Betriebes ist sie verhältnismäßig klein.

Da die Ankerspannung (Rotorspannung) mit der Schlüpfung wächst und die Schlüpfung im Momente des Einschaltens, in dem $n' = 0$ ist, 100% beträgt, so ist die Amperewindungszahl des Rotors beim Einschalten und während des Anlaufes verhältnismäßig groß. Das Anzugsmoment hat aber keineswegs den der großen Stromstärke entsprechenden Wert, weil infolge der Streuung ein großer Teil der Kraftlinien nutzlos verloren geht. Im allgemeinen ist das Drehmoment der Schlüpfung proportional.

Tourenregulierung. Wir haben gesehen, daß die Tourenzahl eines asynchronen Mehrphasenmotors, wenn wir von der Schlüpfung absehen, von der Periodenzahl (Umdrehungszahl) des Generators, z. B. der Drehstromdynamo, und von der Polzahl des Ständers abhängig ist. Man kann also die Tourenzahl des Motors zunächst dadurch ändern, daß man die Periodenzahl der Primärmaschine vergrößert oder verkleinert. Von diesem Mittel wird man aber in der Praxis kaum Gebrauch machen können. Die zweite Möglichkeit wäre die, die Polzahl des Ständers zu variieren. Die Ständerwicklung müßte also so eingerichtet werden, daß man durch Umschaltungen den Motor zu einem 2poligen, 4poligen etc. machen kann. Schon bei Motoren mit Kurzschlußanker würde die Wicklung eine recht komplizierte werden — um wieviel mehr bei Motoren, deren Läufer ausgeprägte Pole besitzen. Denn da bei diesen die Polzahl des Läufers mit derjenigen des Ständers übereinstimmen muß, so müßten beide Polzahlen geändert werden. Das einfachste Mittel, die Tourenzahl zu ändern, besteht darin, daß man die Schlüpfung künstlich vergrößert, und das kann dadurch geschehen, daß man in die Läuferwicklung einen veränderlichen Widerstand einschaltet oder den Anlaßer für die Regulierung benutzt. Schaltet man Widerstand ein, so werden die im Läufer induzierten Ströme geschwächt, und das geschieht, wenn die Schlüpfung wächst. Jedoch kann diese Art der Regulierung nur in engen Grenzen geschehen; natürlich ist sie mit einem Energieverluste verbunden.

Manchmal versteht man Drehstrommotoren mit sechs Klemmen; mit diesen sind die Anfänge der drei Phasen und deren Endpunkte verbunden. Auf diese Weise hat man es in der Hand, den Motor sowohl für Stern- als auch für Dreieckschaltung einzurichten, indem man außerhalb des Motors die nötigen Schaltungen vornimmt. Durch diese Anordnung erreicht man, daß man den Motor mit zwei verschiedenen Spannungen betreiben kann. Ist z. B. ein Motor so gewickelt, daß er, wenn Dreieckschaltung hergestellt ist, an ein Netz angeschlossen werden darf, in dem die Spannung zwischen zwei Leitungen

gleich 110 Volt ist, so kann derselbe Motor, wenn zur Sternschaltung übergegangen wird, mit $110\sqrt{3} = 188$ Volt betrieben werden. Denn da bei Sternschaltung die Phasenspannung gleich ist $\frac{\text{Netzspannung}}{\sqrt{3}}$ (s. S. 75), so

entsprechen 188 Volt Spannung zwischen zwei Leitungen 110 Volt Phasenspannung, und für diese Spannung soll der Motor gewickelt sein. Wenn man unseren Motor bei 110 Volt Netzspannung in Sternschaltung anlaufen läßt, so ist der Anlaufstrom im Stator bei Kurzschlußanker kleiner; bedient man sich bei offener Motorwicklung eines Anlassers, so ist die Zugkraft des Motors, da er mit zu kleiner Spannung betrieben wird, kleiner als bei Dreieckschaltung, und zwar läuft er nur mit $\frac{1}{2}$ — $\frac{2}{3}$ seiner normalen Zugkraft an.

Die Änderung der Drehrichtung erfolgt bei den asynchronen Mehrphasenmotoren dadurch, daß man die Drehrichtung des rotierenden Feldes ändert. Dieses geschieht bei Zweiphasenmotoren dadurch, daß man die Stromrichtung in einer Phase umkehrt, bei Drehstrommotoren dadurch, daß man zwei Phasen miteinander vertauscht. Die nötigen Änderungen werden mittels eines Reversierumschalters vorgenommen.

Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist bei Leerlauf am größten und nimmt mit der Belastung ab, wie bei Transformatoren. Bei Leerlauf hat $\cos \varphi$ einen zwischen 0,15 und 0,20 liegenden Wert. Daraus folgt, daß der Leerlaufstrom einen verhältnismäßig großen Wert hat; er trägt nach Uppenborn (Kalender für Elektrotechniker) etwa 25—35 % des normalen Betriebsstromes, und zwar gilt letztere Zahl für kleinere Motoren. Bei großen Mehrphasenmotoren ist $\cos \varphi$ bei voller Belastung nahezu gleich 0,9. Ist $\cos \varphi = 0,9$, so ist $\sin \varphi = 0,44$. Von 100 Amp., die in den Motor fließen, sind also noch nahezu 44 Amp. wattlos (man vergl. S. 65).

Die von einem asynchronen Motor aufgenommene Leistung in Watt ist, wenn E die Spannung zwischen zwei Klemmen, J die Stromstärke in einer Phase bedeutet,

bei Zweiphasenmotoren gleich $2E \cdot J \cdot \cos \varphi$,

„ Drehstrommotoren „ $\sqrt{3} \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi$.

Die Vorzüge der Mehrphasenmotoren vor den Gleichstrommotoren sind folgende: Die Mehrphasenmotoren laufen mit starkem Drehmoment an und besitzen eine große Überlastungsfähigkeit. Theoretisch ist zwar die Anlaufkraft eines Gleichstrommotors mit Serienschaltung ungefähr gleich derjenigen eines Drehstrommotors; für die Praxis aber kommt in Betracht, daß ein überlasteter Serienmotor stark zur Funkenbildung neigt. Eine Funkenbildung ist aber bei Mehrphasenmotoren wegen des Fehlens des Kollektors ausgeschlossen. Ferner kann man, wie schon gezeigt, Mehrphasenmotoren für viel höhere Spannungen bauen als Gleichstrommotoren, da der Teil, dem man den Strom zuführt, ruht.

Ein Nachteil des Drehstrommotors ist der Umstand, daß auch bei günstiger Bauart und normaler Belastung der Strom gegen die Spannung verschoben ist. Je nach der Größe und Güte des Motors schwankt $\cos \varphi$ zwischen 0,7—0,9, der Motor muß daher größer gebaut werden, als wenn

keine Phasenverschiebung vorhanden wäre. Von der Belastung des Netzes durch wattlose Ströme ist früher schon gesprochen worden. Die wattlosen Ströme bewirken im Generator einen Spannungsabfall (Ankerreaktion); denn wir haben gesehen, daß nachteiliger Strom schwächend auf das magnetische Feld des Generators wirkt. Die Versuche, den Generator gegen diesen Spannungsabfall zu compoundieren, hatten wenig Erfolg.

Das Heylandsche Diagramm. Einen tieferen Einblick in die Wirkungsweise der asynchronen Motoren gewinnt man, wenn man sich mit dem Heylandschen Diagramm bekannt macht. Die folgenden Darlegungen über unseren Gegenstand haben hauptsächlich den Zweck, auf ein genaueres Studium des Heylandschen Diagramms vorzubereiten und zu zeigen, welchen Wert die graphische Behandlung besitzt. Wir schließen uns bezüglich des Gedankenganges der von G. Schulz im „Handbuch der Elektrotechnik“, Band 9, befolgten Methode an. Wir betrachten einen Motor mit Schleifringen und denken uns die Bürsten abgehoben, so daß in dem Motor keine Induktionsströme entstehen können und der Motor keine Drehung ausführen kann. Schließt man den Stator an das Netz an, so fließt in die Wicklung ein Strom, den wir mit i bezeichnen wollen. Dieser Strom, der dem Leerlaufstrom eines Transformators entspricht, ist größtenteils wattloser oder Magnetisierungsstrom i_m , der das Drehfeld hervorbringt. Die Komponente von i , die zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes, zur Deckung der Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme dient, ist bei guten Motoren so klein, daß wir sie vernachlässigen können, zumal die beiden Komponenten nicht algebraisch, sondern geometrisch zu addieren sind (s. S. 65); wir setzen also $i_m = i$ und machen die nicht ganz zutreffende Annahme, daß der Strom i_m 90° gegen die Spannung des Netzes verschoben ist.

Wir haben schon mehrfach darauf hingewiesen, daß ein Drehstrommotor mit einem Transformator verglichen werden kann. Wollte man wirklich einen Drehstrommotor als Transformator benutzen, so müßte man den Motor festfeilen und an die Schleifringe Leitungen legen. Es besteht jedoch ein großer Unterschied zwischen Motor und Transformator, der durch den Luftspalt bedingt wird. Würde man nämlich die von den Schleifringen ausgehenden Leitungen durch induktionsfreie Widerstände (Glühlampen) miteinander verbinden, den Drehstrommotor also sekundär belasten, so würde man einen starken Spannungsabfall in dem Motor konstatieren. Diese Spannungsabnahme, die man bei einem guten Transformator nicht beobachtet, ist auf die Streuung zurückzuführen, die mit der Belastung wächst. Bezeichnen wir die im Ständer im ganzen durch den Magnetisierungsstrom erzeugten Kraftlinien mit K_s und die Anzahl der für die Induktion im Läufer in Betracht kommenden mit K_1 , so nennen wir

$$\frac{K_1}{K_s} = \sigma_1 \text{ den ersten Streukoeffizienten.}$$

Durch die in dem Läufer induzierten Ströme werden im Läufer Eisen ebenfalls Kraftlinien erzeugt, deren Anzahl gleich K_1' sei. Von diesen Kraftlinien gelangt nur ein Teil K_1' in den Ständer, und wir nennen

$$\frac{K_1'}{K_1} = \sigma_2 \text{ den zweiten Streukoeffizienten.}$$

Die Größen von σ_1 und σ_2 , die man der Einheit möglichst nahe zu bringen sucht, hängen von verschiedenen Umständen ab, vor allem von den Dimensionen des Luftzwischenraumes, ferner von der Dimensionierung der Ruten, der Drahtzahl pro Rute etc. Im allgemeinen sind σ_1 und σ_2 nur wenig voneinander verschieden und haben bei guten Motoren Werte, die in der Nähe von 0,97 liegen.

Um σ_1 zu bestimmen, kann man bei einem Motor mit Schleifringen folgendes Verfahren anwenden. Man schickt bei offenem Läuferstromkreise (abgehobene Bürsten) Strom in den Ständer und mißt gleichzeitig die Netzspannung und die im Motor induzierte Spannung; bei der letzteren Messung muß man sich eines sehr genauen Meßinstrumentes bedienen, da durch kleine Fehler das Resultat wesentlich beeinflusst wird. Haben Läufer und Ständer die gleiche Windungszahl, und wäre die Streuung gleich Null, so müßten die gemessenen Spannungen gleich groß sein. Wegen der Streuung aber ist, gleiche Windungszahlen vorausgesetzt, die sekundäre Spannung kleiner als die primäre. Aus den Spannungen kann man nun unter Berücksichtigung der Windungszahlen σ_1 berechnen. Um σ_2 zu ermitteln, schickt man in die Wickelung des feststehenden Rotors Drehströme und verfährt im übrigen wie bei der Bestimmung von σ_1 .

Wenn der Drehstrommotor als Motor läuft, so wächst mit der Belastung der Magnetisierungsstrom; denn mit der Belastung wächst die Schlüpfung, mit ihr die induzierte elektromotorische Kraft¹⁾ und mit dieser die Stärke des induzierten Stromes; der stärkere Strom hat aber eine größere Streuung und die vergrößerte Streuung ein Anwachsen des Magnetisierungsstromes zur Folge (s. Transformatoren). Mit der Belastung wächst natürlich auch der Arbeitsstrom, die Wattkomponente, d. h. die Komponente des Stromes, die sich in Phasegleichheit mit der Spannung befindet. Jedoch wachsen die beiden Komponenten nicht in demselben Verhältnisse. Da nun der Quotient aus dem Arbeitsstrom und dem resultierenden Strom gleich $\cos \varphi$ ist, so hat $\cos \varphi$ bei verschiedenen Belastungen verschiedene Werte. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ist am kleinsten bei Leerlauf und wächst mit der Belastung, aber nur bis zu einer gewissen Grenze; wird diese Belastungsgrenze überschritten, so nimmt $\cos \varphi$ wieder ab. Es gibt also bei jedem Motor ein Maximum für $\cos \varphi$. Setzen wir

$$\frac{\sigma_1 \sigma_2}{1 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} = f,$$

so läßt sich beweisen, daß der größte Wert, den $\cos \varphi$ haben kann, gleich ist

$$\frac{f}{2 + f} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{2 - \sigma_1 \sigma_2}.$$

Ist z. B. $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,97$, so ist $(\cos \varphi)_{\max} = 0,89$.

¹⁾ Der induzierte Strom wächst nicht in dem Maße, in dem die Schlüpfung zunimmt, weil mit zunehmender Schlüpfung die Periodenzahl des induzierten Stromes und damit die Reaktanz steigt.

Der günstigste Wert, den $\cos \varphi$ bei einem Motor erreichen kann, muß dann vorhanden sein, wenn der Motor seine normale Leistung abgibt.

Es sei in unserer Fig. 211 AB der Leerstrom eines Drehstrommotors, also die früher mit i_m bezeichnete Größe; ferner sei $BD = f \cdot AB$ und C der Mittelpunkt des über BD beschriebenen Halbkreises. Es ist dann AD der Kurzschlußstrom bei normaler Spannung, d. h. der Strom, der entsteht, wenn sich der Motor, etwa infolge zu starker Belastung, nicht dreht. Jeder Leistung des Motors entspricht ein Punkt des Halbkreises. Verbinden wir einen beliebigen Punkt G unseres Halbkreises mit A, und fällen wir das Lot GH, so ist AG der resultierende Strom, wie man ihn mit Hilfe eines Sitzdrahtamperemeters findet; und GH ist der zugehörige Arbeitsstrom. Offenbar ist der größte Arbeitsstrom gegeben durch CF. Je größer also der Radius unseres Halbkreises ist, desto größer ist die Überlastungsfähigkeit des Motors. Da

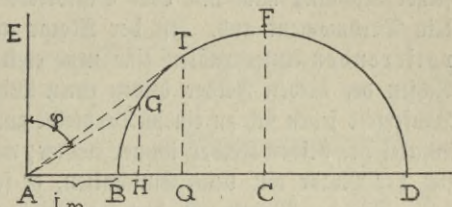


Fig. 211.

FC bezw. die Überlastungsfähigkeit und der Leerstrom durch die oben angegebene Beziehung miteinander verbunden sind, so folgt, daß man die Überlastungsfähigkeit steigern kann, wenn man den Magnetisierungsstrom vergrößert. Soll der Motor mit doppelter als der normalen Last — worunter wir die Last verstehen wollen, bei der $\cos \varphi$ ein Maximum ist — noch laufen, so muß der Magnetisierungsstrom i_m bei richtiger Wahl von σ_1 und σ_2 etwa 25—30% des bei voller Belastung vorhandenen resultierenden Stromes sein.

Für die dem Punkte G entsprechende Leistung ist $\sphericalangle AGH = \sphericalangle EAG = \varphi$. Zieht man von dem Punkte A die Tangente AT an den Kreis, so ist Winkel EAT der kleinste der Winkel, den die von A aus gezogenen und den Halbkreis schneidenden Geraden mit der Richtung der Spannung, nämlich mit AE, bilden. Der Punkt T entspricht also derjenigen Leistung des Motors, bei der $\cos \varphi$ ein Maximum ist, d. h. der normalen Belastung — wenigstens in den meisten Fällen. Der normale Arbeitsstrom ist durch TQ und der zugehörige Magnetisierungsstrom durch AQ gegeben, während durch AT der der normalen Leistung entsprechende resultierende Strom gemessen wird.

In Wirklichkeit ist die Konstruktion des Heylandschen Diagramms komplizierter als in unserer Darstellung, gewährt dafür aber auch einen größeren Nutzen.

Kaskadenschaltung. Zwei mechanisch gekuppelte Drehstrommotoren sind so geschaltet, daß der Stator des zweiten Motors mit den drei Schleifringen des ersten Motors verbunden ist. Dem zweiten Motor werden also keine Ströme aus dem Reze zugeführt, sondern nur die in dem Motor des ersten Motors induzierten Ströme. Die Tourenzahl des zweiten Motors hängt von der Frequenz des zugeführten Stromes und diese von der Schlüpfung und der synchronen Tourenzahl des ersten Motors ab. Die Anordnung ermöglicht eine weitgehende Tourenvariation (s. G.-L. Z. 1903, S. 1).

Asynchrone Einphasenmotoren. Da die Einphasen-Induktionsmotoren nicht von selbst angehen und bei Überlastungen stehen bleiben, so erfreuen sie sich keiner großen Beliebtheit. Man wendet den Einphasenstrom eben nur da an, wo die Benutzung elektrischer Energie für Kraftzwecke gegenüber der Verwendung für Beleuchtungszwecke eine untergeordnete Rolle spielt. Wegen der geringen Verbreitung, die die Einphasenmotoren gefunden haben, sollen sie nur kurz behandelt werden.

Wenn der Anker ruht, so wird durch das pulsierende bzw. oszillierende Feld des Stators in dem Rotor ein Feld erzeugt. Da aber dieses Feld seiner Richtung nach mit dem Statorfelde zusammenfällt, so üben die Felder kein Drehmoment aus. Ist der Motor auf Touren gebracht, so wird in den rotierenden Ankerdrähten eine neue elektromotorische Kraft induziert, und die Achsen der beiden Felder bilden einen Winkel von nahezu 90° ; Ankerfeld und Läuferfeld setzen sich zu einem Drehfelde zusammen. Mit der Belastung wird der Winkel der beiden Felder immer kleiner; wenn er Null Grad beträgt, so verhält sich der Motor wie beim Einschalten, er fällt aus dem Tritt und bleibt stehen.

Da der Motor nur dann arbeitet, wenn sich sein Anker nahezu synchron mit dem Wechselfelde dreht, so muß er vor der Belastung künstlich auf Touren gebracht werden. Zu diesem Zwecke läßt man ihn beim Einschalten als Zweiphasenstrommotor laufen, indem man den Ständer mit einer zweiten Wickelung versehen, die räumlich gegen die Hauptwicklung um 90° versetzt ist. Diese zweite Wickelung nennt man die Hilfswicklung.

Wir wollen annehmen, daß die beiden Wickelungen parallel geschaltet seien (vergl. Fig. 212). Der Motor würde sich nun beim Anlaufen genau so wie ein Zweiphasenmotor verhalten, wenn die beiden Ströme um 90° gegeneinander verschoben wären. Diese Verschiebung kann man praktisch nicht erreichen, weil in der Hauptwicklung der Strom eine größere Phasenverschiebung besitzt. Die Phasenverschiebung in der Hauptwicklung kann man durch Einschaltung eines Kondensators (C in Fig. 212) oder durch Vergrößerung des Ohmschen Widerstandes verringern. Andererseits muß man die Phasenverschiebung des durch die Hilfswicklung fließenden Stromes möglichst groß machen.

Da die Phasenverschiebung mit der Selbstinduktion wächst, so erhöht man die Selbstinduktion in der Hilfswicklung dadurch, daß man eine Drosselpule vorschaltet (s. Fig. 213).

In der Praxis wendet man eine der beiden Methoden an, eine künstliche Phasenverschiebung herbeizuführen. Als Kondensator benutzt man entweder Flüssigkeitskapazitäten oder trockene Seifenkapazitäten. Erstere bestehen aus einer Reihe von dünnen Eisenplatten, die in Sodabüsung eintauchen,

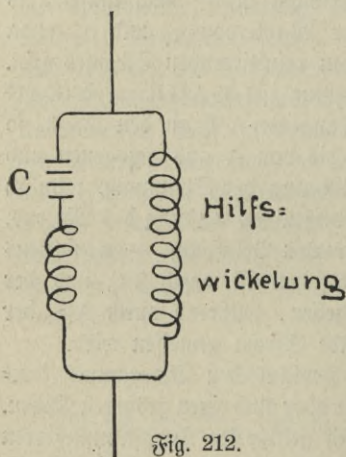


Fig. 212.

legtere aus Eisenplatten, die durch dünne Schichten aus Seife und Gazefireifen voneinander getrennt sind. Beide leiden an verschiedenen Übelständen, weshalb man meistens die Einschaltung einer Selbstinduktion in die Hilfswicklung vorzieht. Bei der Parallelschaltung der beiden Wicklungen läuft der Motor besser an. Da aber beim Anlauf ein starker Stromstoß entsteht, so zieht man die Hintereinanderschaltung vor, besonders dann, wenn man den Ankerstrom nicht durch einen Anlaufwiderstand schwächen kann (Motoren mit

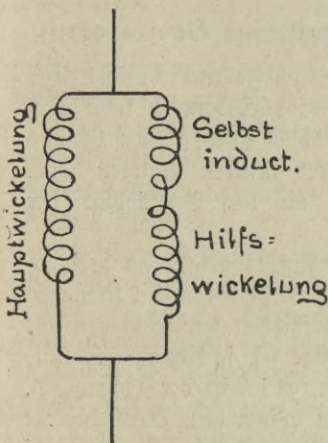


Fig. 213.

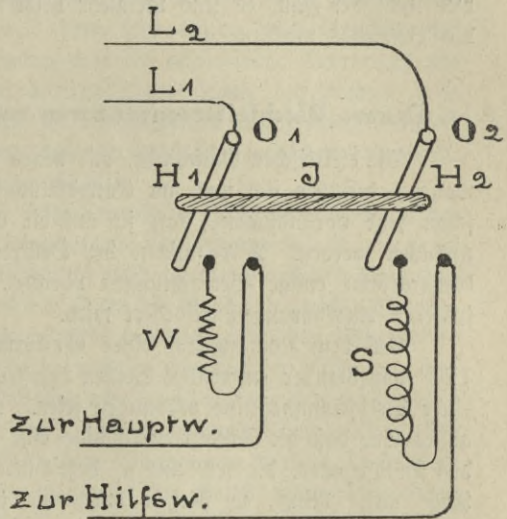


Fig. 214.

Schleifringen). Hat der Motor seine normale Tourenzahl erreicht, so wird die Hilfswicklung kurzgeschlossen. In Fig. 214 ist eine von Tesla angegebene Anordnung dargestellt. Die beiden Metallhebel H_1 und H_2 mit den Drehungspunkten O_1 und O_2 sind durch J (aus isolierendem Material) mit einander verbunden. W ist ein induktionsfreier Widerstand, S eine Spule von möglichst kleinem Ohmschen Widerstande, aber möglichst großer Selbstinduktion.

Durch die Hilfsphase wird dem Motor kein nennenswertes Anlaufmoment erteilt. Motoren mit Kurzschlussanker laufen nur leer, solche mit gewickeltem Anker mit Riemen auf einer Leerscheibe an. Trotzdem verbrauchen die Einphasenmotoren beim Einschalten einen starken Strom, der manchmal den normalen um 50% übersteigt. — $\cos \varphi$ ist kleiner als bei Drehstrommotoren.

Dr. M. Corsepins beschreibt in der Elektrotechnischen Zeitschrift ¹⁾ einen von ihm konstruierten Einphasenmotor, der bei verhältnismäßig geringer Stromstärke mit mehrfacher Überlastung angeht. Der Motor besitzt zwei Läufer, einen Haupt- und einen Hilfsäufer, die wir mit A und B bezeichnen wollen. A ist mit der Achse fest verbunden und hat Schleifringe; B ist lose angeordnet

¹⁾ *E.-T. Z.* 1903, S. 1012.

und besitzt Kurzschlußwicklung. Beide Läufer werden von einem Ständer umschlossen. Beim Anlassen setzt sich B leer und dann A mit Anzug in Bewegung. — Die Bewicklung des Ständers ist in zwei Teile zerlegt, „die ineinander greifen oder, wie man sagt, um 90° gegeneinander verschoben sind“. Eine solche Zweiteilung findet bei den üblichen Einphasenmotoren zwar auch statt; jedoch ist die Hilfswicklung nach dem Anlauf eine tote Wicklung, die einen Teil des Wicklungsraumes fortnimmt. Dies ist hier nicht der Fall, es sind vielmehr beide Wicklungen des Ständers während des Betriebes wirksam.

3. Neuere Wechselstrommotoren und asynchrone Generatoren.

Die elektrischen Maschinen, mit denen wir uns im Folgenden beschäftigen wollen, befinden sich noch im Entwicklungsstadium; aber dennoch kann man schon jetzt voraussagen, daß sie auf die Elektrotechnik einen großen Einfluß ausüben werden. Wir schicken der Besprechung der neueren Motoren bezw. Generatoren einige Betrachtungen voraus, durch die das Verständnis der späteren Ausführungen gefördert wird.

Auf dem Kommutator eines Grammeschen Ringes mögen an drei um 120° voneinander entfernten Stellen Bürsten liegen, die mit den drei Klemmen einer Drehstrommaschine verbunden seien. Der Einfachheit halber wollen wir annehmen, daß die Drehstrommaschine eine zweipolige sei, so daß die Frequenz des Drehstromes, die wir mit n_1 bezeichnen wollen, gleich ist der Tourenzahl. Ruht unser Ring, so fließen durch die einzelnen Windungen Wechselströme mit der Periodenzahl n_1 , wie in dem Stator eines Drehstrommotors bei Dreieckschaltung. Wird aber unser Ring auf irgend eine Weise mit einer Geschwindigkeit gedreht, die der Periodenzahl n_1 entspricht, macht er also in unserem Falle in jeder Sekunde n_1 Touren, so ändert der Strom in den einzelnen Windungen seine Richtung nicht; er wird also in Gleichstrom umgewandelt. Man erkennt dies, wenn man ein Drahtstück auf seinem Wege verfolgt: Wir wollen die drei Spulen der Drehstrommaschine, die in Fig. 41 auf S. 73 schematisch gezeichnet ist, mit s_1, s_2, s_3 und die Bürsten unseres Ringes mit b_1, b_2, b_3 bezeichnen; ferner sei b_1 mit s_1 durch eine Leitung verbunden, ebenso b_2 mit s_2 , b_3 mit s_3 . In dem Momente, in dem wir unsere Betrachtungen beginnen, möge sich s_1 gegenüber dem Nordpole der Drehstrommaschine befinden; durch das betrachtete Drahtstück, das unter der Bürste b_1 liege, fließe ein Strom von oben nach unten. Nach $\frac{1}{3}$ Periode nimmt Spule s_2 die Lage ein, die eben s_1 hatte; da nun mittlerweile unser Drahtstück infolge der Drehung des Ringes $\frac{1}{3}$ Umdrehung gemacht hat, und daher unter der Bürste b_2 liegt, so fließt durch unser Drahtstück wieder ein Strom von oben nach unten usw. Obschon durch die einzelnen Windungen Gleichstrom fließt, so entsteht dennoch ein Drehfeld; denn die Richtung des augenblicklichen Kraftlinienflusses hängt von den Potentialen ab, welche die Bürsten in dem betreffenden Momente haben, und diese werden durch die Drehung des

Ringes nicht beeinflusst. Das Feld rotiert also synchron, mag der Ring ruhen oder rotieren. Bei Synchronismus verhält sich der Ring wie ein durch Gleichstrom erregter, mit der Tourenzahl n_1 rotierender Elektromagnet. Ist der Ring mehrpolig gewickelt, und läuft er synchron mit der Drehstrommaschine, so verhält er sich wie ein durch Gleichstrom erregter, rotierender Polkranz einer Wechselstrommaschine. Rotiert der Ring unterschynchron, ist also seine Tourenzahl n_2 kleiner als n_1 , so werden die Windungen von Wechselströmen durchflossen, aber die Frequenz dieser Ströme ist kleiner als n_1 und gegeben durch die Differenz $n_1 - n_2$. Auch jetzt rotiert das Drehfeld mit der vollen Periodenzahl n_1 . Wir können also die beschriebene Anordnung als Frequenzwandler bezeichnen. Bei übersynchronem Laufe des Ringes, d. h. wenn $n_2 > n_1$, erhalten wir wieder in den einzelnen Windungen Wechselströme; wir werden aber gleich sehen, daß ein Unterschied zwischen dem übersynchronen und unterschynchronen Gange besteht.

Wie früher gezeigt, wächst der scheinbare Widerstand bezw. die Reaktanz einer Spule mit der Frequenz des eingeleiteten Wechselstromes. Da nun bei synchronem Gange des Ankers die Periodenzahl des durch die Windungen fließenden Stromes gleich Null ist, so ist in diesem Falle die Reaktanz gleich Null oder der scheinbare Widerstand, die Impedanz, fällt mit dem wirklichen Widerstande (dem Ohmschen) zusammen. Je mehr n_1 und n_2 voneinander differieren, um so mehr kommt die Reaktanz zur Geltung, um so größer wird der scheinbare Widerstand. Wenn der Ring nicht weit vom synchronen Laufe entfernt ist, so genügt eine geringe Spannung, durch seine Windungen stärkere Ströme zu schicken oder ein kräftiges Drehfeld zu erzeugen. Bei Synchronismus ist offenbar $\cos \varphi$, der Leistungsfaktor, gleich 1; rotiert der Ring unterschynchron, so ist der Strom gegen die Spannung verschoben, und zwar ist wie bei ruhendem Ringe das Maximum der Stromstärke später vorhanden als das Maximum der Spannung, der Strom hat also Nacheilung; rotiert der Ring übersynchron ($n_2 > n_1$), so eilt der Strom der Spannung vor, unser Kollektoranker verhält sich also wie ein Kondensator (Kapazitätswirkung).

Wir wollen jetzt annehmen, daß sich auf der Welle eines Drehstrommotors zwei Anker (Ringe) mit Wicklungen befinden: die eine Wicklung (I in Fig. 215) sei eine gewöhnliche Kurzschlußwicklung, soll also dem Rotor der gewöhnlichen Drehstrommotoren entsprechen; die andere Wicklung sei mit einem Kollektor verbunden, auf dem drei Bürsten mit je 120° Abstand liegen¹⁾. Der Einfachheit halber ist in unserer Figur der Kollektor weggelassen und angenommen, daß die Bürsten direkt auf der blanken Wicklung schleifen. Der letzteren Wicklung werde Drehstrom aus dem Netze

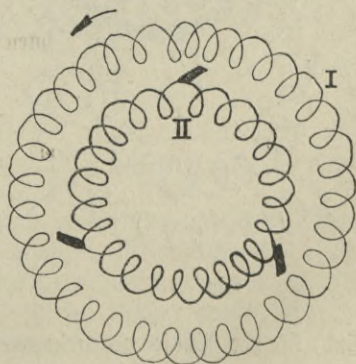


Fig. 215.

¹⁾ Gl. II. 1903, Nr. 81.

zugeführt. Rotiert die Welle nicht — was beim Einschalten der Fall ist —, so wird die Motorwicklung I in jeder Sekunde von dem Statorfelde n_1 mal geschnitten, es entstehen also in ihr Wechselströme von der vollen Periodenzahl n_1 . Wie wir wissen, hat bei ruhender Welle auch der durch die Wicklung II fließende Wechselstrom die Periodenzahl n_1 . Läuft der Motor synchron — was nahezu bei Leerlauf der Fall ist —, so wird die Wicklung I von Kraftlinien nicht geschnitten. Statt dessen können wir auch sagen, daß die Periodenzahl des in der Wicklung induzierten Stromes gleich Null ist. Genau dasselbe gilt aber auch von der Wicklung II; denn bei synchronem Laufe wird der zugeführte Drehstrom in Gleichstrom verwandelt. Bei Belastung dreht sich der Motor unterschynchron, die Tourenzahl möge $n_2 = \delta$ sein. Es zirkulieren jetzt durch die beiden Wicklungen Drehströme von der Periodenzahl δ . Also kurz gesagt: Die Frequenz der in der Motorwicklung I induzierten Ströme (durch das Statorfeld) ist stets gleich der Periodenzahl der durch den Gleichstromanker fließenden Ströme. Es wird daher nichts geändert, wenn wir die beiden Wicklungen zu einer vereinigen. Damit in diesem Falle der Anker gleichzeitig ein Kollektoranker und ein Kurzschlussanker ist, müssen, wie Heyland vorgeschlagen hat, die Lamellen des Kollektors durch Widerstände überbrückt, also leitend miteinander verbunden werden. Wir haben jetzt auch bei Synchronismus im Rotor starken Strom, was bei den gewöhnlichen Drehstrommotoren nicht der Fall ist. In Wirklichkeit haben die Brücken den Zweck, die Funkenbildung an den Bürsten zu verringern; die Extraströme können sich nämlich in den Widerständen ausgleichen.

Es sei jetzt in der vorigen Figur die Wicklung I die Statorwicklung und II die Motorwicklung; beiden Wicklungen werde Strom zugeführt. Das Drehfeld des Stators rotiere im Sinne des Pfeiles. Liegt jede Bürste unterhalb derjenigen Windung des Stators, die mit der Leitung verbunden ist,

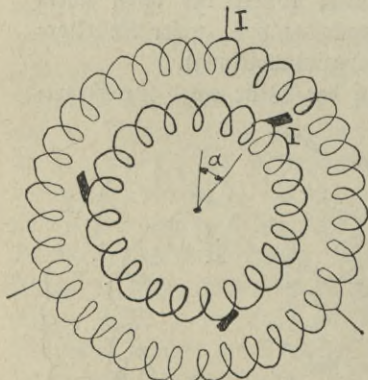


Fig. 216.

so fällt das Drehfeld des Rotors zusammen mit dem Drehfelde des Stators. Es ist so, als ob zwei auf derselben Achse befestigte, genau übereinanderliegende Magnetstäbe rotierten. Verschiebt man jede der drei Bürsten um einen Winkel α , so bilden die beiden Drehfelder ebenfalls einen Winkel α , oder sie sind gegeneinander verschoben, und es kommt ein Zugmoment zustande. Betrachten wir jetzt eine Statorwindung unter der Annahme, daß die Bürsten die in der Fig. 216 angedeutete Stellung haben. Es entstehen in ihr zwei elektromotorische Kräfte, die eine wird durch das Statorfeld, die andere durch das Rotorfeld erzeugt. Die induzierten Ströme

sind in der Phase gegeneinander verschoben. Bei 90° Bürstenverschiebung würden die beiden Ströme, wenn wir von der Selbstinduktion im Stator

absehen, senkrecht aufeinander stehen, d. h. wir können den einen Strom als Wattstrom, den anderen als Magnetisierungsstrom ansehen. Verschiebt man die Bürsten aus der anfänglichen Lage (Fig. 216) in der Richtung des Pfeiles, so entsteht ein wattloser Strom im Stator, der den nachteilenden ganz oder teilweise kompensiert.

Wir gehen jetzt zu einer kurzen Besprechung der neueren Maschinen von A. Heyland und ähnlicher Konstruktionen über. Selbstverständlich können wir hier, wo es sich nur um ein kurzes Referat handelt, nicht auf die Frage eingehen, ob und inwieweit die neueren Maschinen Variationen eines von G. Bürges schon im Jahre 1891 beschriebenen, von ihm erfundenen Kollektormotors sind. Die Heylandsche Konstruktion¹⁾ bezweckt in erster Linie die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung zu vermeiden und infolgedessen zu ermöglichen, daß der Luftzwischenraum zwischen Stator und Rotor größer sein darf (s. S. 388). Dieses wird dadurch erreicht, daß das Drehfeld nicht im Stator, sondern im Rotor erzeugt wird. Da der Rotor nahezu synchron läuft, so ist, wie wir gesehen haben, eine viel geringere elektromotorische Kraft erforderlich, als wenn das Drehfeld in dem feststehenden Stator erzeugt wird. Daher wird dem Rotor nicht die ganze Netzspannung zugeführt, sondern nur ein geringer Teil derselben (s. Fig. 217). Die Ströme müssen in die geschlossene Wicklung so „hineinlanciert werden, daß sie genau die gleiche Richtung und Phase erhalten, wie die Magnetisierungsströme des Stators, die sie kompensieren (beseitigen, aufheben) sollen“. Dies geschieht, wenn die Bürsten in die richtige Stellung zum Stator gebracht werden.

In der ersten Veröffentlichung nimmt Heyland an, daß der Anker ein Kurzschlussanker oder Käfiganker sei, und daß die Bürsten auf einem der beiden Ringe schleifen, durch die die Wicklung (die Kupferstäbe) kurzgeschlossen wird. Dieser Ring ist in der Figur 217 mit R bezeichnet. „Man wird zwar im allgemeinen keinen Käfiganker verwenden, weil die Ströme unter den Bürsten zu groß würden, dagegen

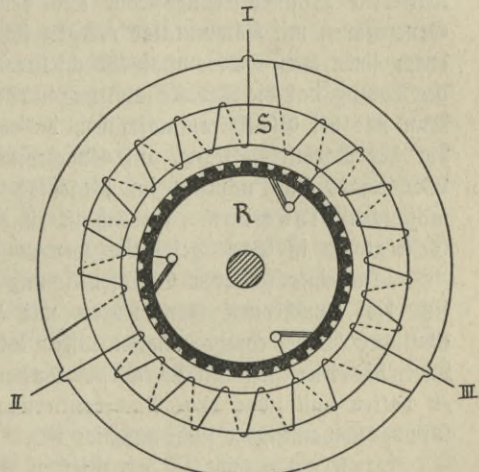


Fig. 217.

kann man z. B. einen gewickelten Anker durch einen Ring schließen, dessen Widerstand zu dem der Wicklung in einem gewissen Verhältnisse steht.“ Da dieser Ring einen Nebenschluß zur Erregerwicklung bildet, so geht ein Teil des Erregerstromes in dem Ringe verloren. Dieser Verlust spielt aber, da der Erregerstrom an sich stark reduziert ist, keine Rolle.

¹⁾ Siehe G.-Z. 3. 1901, S. 633; 1902, S. 560.

In der praktischen Ausführung ist es zweckmäßig, statt eines einzigen Ringes einen Kommutator zu verwenden, dessen einzelne Segmente durch Leiter von geringem Widerstande miteinander verbunden sind (s. Fig. 218).

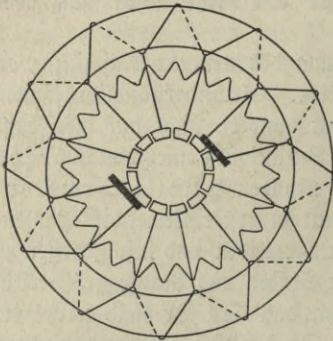


Fig. 218.

Schließlich kann man auch gleichzeitig eine Kurzschlußwicklung und eine zweite Erregerwicklung mit Kommutator anwenden.

Trennt man den Motor von dem Netze, und treibt man ihn durch die Transmiffion an, so läuft die Maschine als Generator weiter und erregt sich selbst wie eine Gleichstromnebenschlußmaschine. Es ist hier übrigens zu bemerken, daß jeder Drehstrommotor eine umkehrbare Maschine ist, d. h. derselbe Drehstrommotor, der beim Betriebe unter Synchronismus mechanische Arbeit auf Kosten

zugeführter elektrischer Leistung abgibt, kann, wenn seine Tourenzahl durch eine Kraftmaschine so weit gesteigert wird, daß sie größer wird als die synchrone, elektrische Leistung an das Netz abgeben. Jedoch erregt sich die Maschine (der gewöhnliche Drehstrommotor) nicht selbst, man muß ihr vielmehr den zur Erzeugung des Drehfeldes erforderlichen wattlosen Magnetisierungsstrom aus dem Netze zuführen. Die asynchronen Generatoren mit Kommutator erregen sich aber selbst, nachdem sie von außen durch einen kurzen Stromstoß (Wechselstrom) angeregt sind; außerdem haben sie den Vorzug, daß die Parallelschaltung in ebenso einfacher Weise ausgeführt werden kann wie bei Gleichstrommaschinen, da es nicht erforderlich ist, die Maschinen vor der Parallelschaltung auf Synchronismus zu bringen. Tourenzahl und Wechselzahl sind nämlich im Gegensatz zu den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen asynchron. Endlich ist zu erwähnen, daß die neuen asynchronen Generatoren in Serie geschaltet werden können.

In einer späteren Veröffentlichung hat Heyland¹⁾ nachgewiesen, daß sich die asynchronen Generatoren mit Kommutator oder Kurzschlußring in ähnlicher Weise compoundieren lassen wie Gleichstrommaschinen. Die Compoundierung hat den Zweck, bei konstanter Erregung die Spannung konstant zu halten und zwar ohne Nachregulierung, die ja überhaupt bei schnellen Belastungsschwankungen nicht möglich ist.

Heyland zeigt in der zitierten Arbeit zunächst, wie ein gewöhnlicher (normaler) Generator compoundiert werden kann. Als Beispiel dient ein Einphasenmotor mit zwei Polen: Auf dem rotierenden Polrade befindet sich eine Gleichstromwicklung, der mittels zweier Schleifringe Strom zugeführt wird. Außerdem ist auf dem Polrade eine gleichmäßig verteilte, mit einem Kollektor in Verbindung stehende Wicklung angebracht, der durch zwei Bürsten der im Anker erzeugte Strom zugeführt wird. Da stets Syn-

¹⁾ E.-Z. 3. 1901, S. 1021.

Chronismus besteht (die Tourenzahl des Polrades stets mit der Periodenzahl übereinstimmt), „so unterliegt die Compoundwicklung keinerlei Induktion elektromotorischer Kräfte, und die Spannung zwischen den Bürsten ist lediglich bestimmt durch den Widerstand der Wicklung, d. h. sehr klein“. Dieser Strom kompensiert bei richtiger Wahl der Verhältnisse und geeigneter Bürstenstellung die Rückwirkung des Ankers. — Viel einfacher liegen die Verhältnisse bei dem von Heyland konstruierten Asynchrongenerator, der in Fig. 219 schematisch gezeichnet ist; hier fallen die Pole und die Polwicklung ganz fort, die beschriebene Compoundwicklung ist schon vorhanden in Gestalt der Kurzschlußwicklung, und es genügt die Anbringung zweier neuen Bürsten B. Durch die Bürsten b_1 und b_2 wird der Kurzschlußwicklung aus einigen Windungen des Ankers (Stators) S Magnetisierungsstrom zugeführt, der mittels eines Widerstandes w noch variiert werden kann¹⁾.

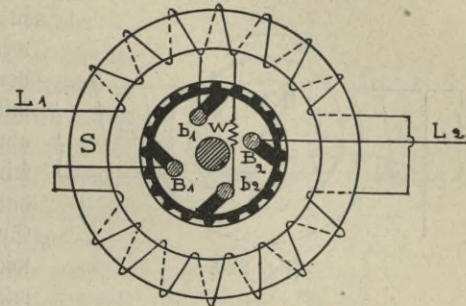


Fig. 219.

Einphasenmotor ohne Phasenverschiebung von Marius Latour²⁾. Ein gewöhnlicher Seriengleichstrommotor kann mit Einphasenstrom angetrieben werden. Da sich nämlich die Richtung des Stromes und die Richtung des Feldes stets gleichzeitig umkehren, so behält das auf den Anker ausgeübte Drehmoment denselben Sinn. Der Größe nach schwankt aber das Drehmoment wegen der periodisch sich ändernden Stärke des Stromes zwischen dem Werte Null und einem Maximum. Durch das wechselnde Feld werden in den durch die Bürsten kurz geschlossenen Ankerwindungen elektromotorische Kräfte induziert, die zu einer starken Funkenbildung Veranlassung geben. Ferner entsteht eine starke Phasenverschiebung. Es sind Versuche gemacht worden die Phasenverschiebung des Serienmotors zu kompensieren. Wir glauben jedoch von einer Beschreibung der verschiedenen Konstruktionen Abstand nehmen zu können³⁾.

Latour geht in seiner ersten Veröffentlichung aus von dem Thomson'schen Repulsionsmotor, der in Fig. 220 schematisch dargestellt ist. St sind zwei lamellierte Pole, deren Wicklung mit einem Einphasenstromnetz ver-

¹⁾ Im Jahre 1903 sind zahlreiche Arbeiten von Heyland und anderen Forschern über den hier nur kurz behandelten Gegenstand in der *E.-T. Z.* erschienen.

²⁾ Siehe *E.-T. Z.* 1903, S. 109, 453, 877.

³⁾ Während der Drucklegung ist eine Übersicht über die einphasigen Wechselstrom-Kommutatormotoren von M. Dsnos in der *E.-T. Z.* (1904, Nr. 1 und 2) gegeben, in der auch die Arbeitsweise und Regelung beschrieben sind.

bunden seien. R sei ein Grammescher Ring mit zwei Bürsten B_1, B_2 , die durch einen dicken Draht kurz geschlossen sind. Die Bürsten sind gegen die Achse der Statorwicklung um einen gewissen Winkel verschoben. Beim Anlaufen wirkt diese Anordnung wie ein Transformator, dessen sekundäre Wickelung kurz geschlossen ist, und es entsteht in dem Anker ein Drehmoment wie

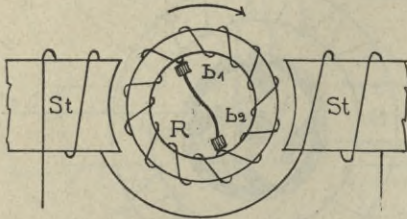


Fig. 220.

in einem gewöhnlichen Serienmotor, wenn die Bürsten aus der Pollinie verschoben sind. Da das Drehmoment mit zunehmender Geschwindigkeit stark abnimmt, so hat der Repulsionsmotor keine Verwendung gefunden. Latour hat vorgeschlagen, die in getrennten Spulen (s. Fig. 220) angeordnete Polwicklung durch eine verteilte Nutenwicklung zu ersetzen. Das Anlaufmoment eines solchen Motors ist eben so groß wie bei einem mehrphasigen Induktionsmotor mit Widerständen in dem Motor. Eine bemerkenswerte Eigenschaft des Repulsionsmotors ist es, daß man bei keiner Geschwindigkeit in Widerständen Energie verbrauchen muß, da der Kurzschluß zwischen den Bürsten immer widerstandslos (sehr klein) sein muß. Der Motor mit fester Bürstenstellung arbeitet in ähnlicher Weise wie der Serienmotor: er hat sein maximales Drehmoment bei Stillstand und abnehmendes Drehmoment bei wachsender Tourenzahl. Wenn also die Frage der Kommutierung gelöst wäre, so würde sich der Repulsionsmotor sehr gut eignen für Hebezeuge und Traktionszwecke (elektrische Bahnen); aber er würde nicht als Werkstattmotor taugen. Außerdem besitzt er den schwerwiegenden Nachteil, daß sein Leistungsfaktor sehr klein ist.

Die neue Anordnung Latours bezweckt, eine vorzügliche Kommutierung und einen Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) gleich 1 zu erzielen. Wenn man, wie wir schon gesehen haben, einem Gleichstromanker mittels p Bürsten, die gleichmäßig auf der Peripherie eines Kollektors verteilt sind, p -phasigen Wechselstrom zuführt, so wird bei Synchronismus die Induktanz des Ankers gleich Null und oberhalb des Synchronismus wirkt der Anker wie ein Kondensator, d. h. es erscheint wieder eine wattlose Komponente, jedoch hat der Strom Voreilung. Wenn man aber dem Anker einphasigen Wechselstrom durch zwei um 180° versetzte Bürsten zuführt, so bleibt die Induktanz bei jeder Geschwindigkeit des Ringes konstant. Man kann jedoch die gewünschte Wirkung bei einphasigem Wechselstrom dadurch erreichen, daß man noch ein zweites Paar Bürsten anordnet, die unter sich kurz geschlossen sind (s. Fig. 221). Mittels der Bürsten B_1, B_2 wird der Wickelung Strom zugeführt; dieser erzeugt ein pulsierendes Feld in der Richtung der Verbindungslinie der Bürsten. Da das Feld bezüglich seiner Richtung an die Bürsten gefesselt ist, so behält es seine Richtung bei, auch wenn der Ring rotiert. Wenn aber ein Ring mit Wickelung in einem feststehenden Felde rotiert, so werden in seinen Windungen elektromotorische Kräfte induziert. Die Linie $b_1 b_2$ senkrecht zu B_1, B_2 entspricht der

indifferenten Zone einer zweipoligen Maschine. Wir können also kurz sagen, daß zwischen den Bürsten b_1 und b_2 induzierte Spannungen bestehen. Es fließt daher durch den Kurzschluß ein Induktionsstrom i^1). Die induzierte Spannung zwischen den Bürsten ist in Phase mit dem Strom J ; der Strom i aber ist als Kurzschlußstrom gegen die induzierte Spannung, also auch gegen den Strom J , um 90° verschoben. Der Strom i erzeugt nun ein neues Wechselfeld, dessen Richtung in jedem Momente durch b_1, b_2 gegeben ist. Man schneidet die Windungen des Ringes auch die Kraftlinien dieses neuen Wechselfeldes; es werden demnach in ihnen elektromotorische Kräfte induziert, und zwar haben wir jetzt B_1, B_2 als indifferente Zone anzusehen. Die zwischen den Bürsten B induzierte elektromotorische Kraft ist mit dem Kurzschlußstrom in Phase, aber gegen den Strom J um 90° verschoben. Endlich ist zu berücksichtigen, daß infolge der Selbstinduktion durch den zugeleiteten Strom in dem Ringe eine elektromotorische Kraft induziert wird. Diese ist, wenn man von dem Ohmschen Widerstande des Ringes absteht, gegen den Strom J um 90° verschoben. Für die Bürsten B kommen also im ganzen zwei induzierte Spannungen, die beide bei unseren Annahmen um 90° gegen J verschoben sind, in Betracht. Diese beiden Spannungen, die sich bekämpfen, sind bei Synchronismus einander gleich oder heben sich auf, d. h. die Induktanz des Ringes ist gleich Null. Notiert der Ring übersynchron, so ändert die Differenz der Spannungen ihr Vorzeichen, d. h. der Ring verhält sich wie eine Kapazität.

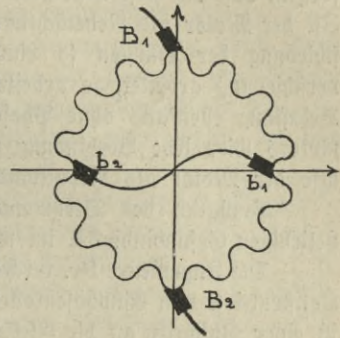


Fig. 221.

Latour weist ferner nach, daß die Kommutierung unter den Hauptbürsten bei jedem Gange und unter den Nebenbürsten bei Synchronismus vollkommen ist.

Kombiniert man den beschriebenen Rotor mit einem gewöhnlichen Einphasenstator, so erhält man einen einphasigen Motor ohne Phasenverschiebung. Denn die Phasenverschiebung des Stators kann ebenfalls kompensiert werden durch den Rotor.

In Fig. 222 sind Stator und Rotor hintereinander geschaltet. Man kann den Stator und Rotor aber auch parallel schalten. Im letzteren Falle muß man, da für den Stator (dessen Induktanz sehr klein bezw. gleich Null ist) eine geringe Spannung genügt, die Netzspannung mittels eines zwischengeschalteten Transformators erniedrigen.

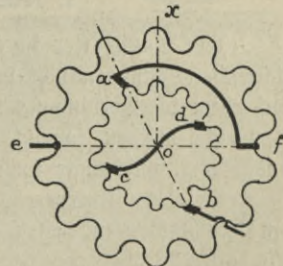


Fig. 222.

¹⁾ Der eingeleitete Wechselstrom kann nicht von e nach d fließen, weil, wenn man von der Induktion absteht, e und d stets dasselbe Potential haben.

Bei Leerlauf kann der Motor synchron, untersynchron und übersynchron laufen; welche Geschwindigkeit der Motor annimmt, hängt von der Bürstenstellung ab. Bei Belastung wird die Tourenzahl, unveränderliche Bürstenstellung vorausgesetzt, um einige Prozent kleiner. Es empfiehlt sich, dafür zu sorgen, daß die Geschwindigkeit bei Belastung dem Synchronismus nahe kommt. Ist der Motor als Nebenschlußmotor geschaltet, und hat man ihn durch Verschiebung der Bürsten so einreguliert, daß er bei Leerlauf ohne Phasenverschiebung arbeitet, so arbeitet er, wie die Untersuchungen gezeigt haben, bei Belastung ebenfalls ohne Phasenverschiebung. Beim Anlauf des Nebenschlußmotors wird jede Verbindung zwischen Stator und Rotor aufgehoben, so daß also der Motor als Repulsionismotor arbeitet.

Bezüglich des Drehmomentes ist noch zu bemerken, daß es bei einer beliebigen Geschwindigkeit im wesentlichen eine Funktion der Bürstenstellung ist.

Die Ingenieure Dr. Eichberg und Winter haben sich ebenfalls mit der Konstruktion von Einphasenkollektormotoren beschäftigt und, wie Dr. Eichberg in einer Zuschrift an die Elektrotechnische Zeitschrift erklärt, die von Latour veröffentlichte Anordnung schon im Jahre 1901 zum Patent angemeldet. Regelbare Wechselstrommotoren mit Ankererregung nach der Anordnung von Eichberg und Winter, wurden von der Union Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin eingehend gepriift; die Motoren sollen beim Anlauf und Lauf funkenfrei arbeiten und alle guten Eigenschaften der Gleichstrombahnmotoren zeigen¹⁾.

Die neueren Einphasenmotoren werden, wenn sich die Hoffnungen, die die Erfinder in sie setzen, erfüllen, von der größten Bedeutung für den Betrieb von elektrischen Bahnen sein, für die bis jetzt ja fast ausschließlich Gleichstrom von 500—600 Volt zur Verwendung gelangt.

Dreizehntes Kapitel.

Hilfsapparate.

1. Auschalter und Umschalter.

Ein Ausschalter ist ein Apparat, der jederzeit eine Unterbrechung stromführender Leitungen von beliebiger Dauer gestattet; der Umschalter ermöglicht außerdem die Verbindung der unterbrochenen Leitung mit einer anderen. Die Apparate werden sowohl für Handbetrieb als auch für selbsttätige Wirkung ausgeführt, und zwar sowohl einpolig als auch mehrpolig.

Bei jeder Unterbrechung eines stromführenden Leiters entsteht bekanntlich ein Öffnungsfunken, dessen Intensität — die bei Gleichstrom wesentlich größer ist, als es bei Wechselstrom der Fall ist — mit der Höhe der von dem Leiter übertragenen Energie zunimmt und dessen Länge mit der Spannung des durch den Leiter

¹⁾ Nach Abschluß dieses Kapitels ist ein längerer Aufsatz von Dr. Eichberg erschienen in der *E. T. Z.* 1904, Nr. 4; *Zeitschrift für Elektrotechnik* 1904, Nr. 9 und 10.

fließenden Stromes wächst; bei höheren Spannungen nimmt er den Charakter einer großen Stichtlamme an. Der Ausshalter muß daher so gebaut sein, daß ein Stehenbleiben des Lichtbogens zwischen seinen Kontakten nach erfolgter Stromunterbrechung ausgeschlossen ist. Dieses kann auf dreierlei Weise erreicht werden.

1. Man vergrößert den Abstand der Kontakte, zwischen denen der Lichtbogen entstehen kann, der Stromspannung entsprechend.
2. Man sorgt für eine Beseitigung des Flammenbogens durch zweckentsprechende Ausführung des Apparates als Hörner- oder Röhrenschalter zc., oder durch Anordnung eines magnetischen Blasfeldes.
3. Man schaltet zwischen die betreffenden Kontakte einen Stoff, der einen höheren Widerstand hat, als die Luft, z. B. Öl.

Nach der ersten Methode werden die Hebel-Ausshalter und Umschalter bis zu einer Höchstspannung von etwa 6000 Volt gebaut; für höhere Spannungen würde der Apparat zu groß und damit unhandlich werden. In Fig. 223 ist ein Ausshalter, der für eine Maximalspannung von etwa 750 Volt verwandt werden kann, gezeichnet; in der einpoligen Ausführung besteht er aus einer mit einem isolierten Handgriffe versehenen Kupferschiene von der Gestalt eines Messers, dessen Querschnitt für verschiedene Stromstärken verschieden ist und dessen Länge sich nach der Stromspannung richtet. Das Messer ist einseitig drehbar gelagert; der Drehpunkt wird zur Herstellung der einen Leitungsverbindung mit einer Klemme oder einem Komus versehen. In einem der Messerlänge entsprechenden Abstände wird ein geschlichter Federkontakt auf isolierter Grundlage, entweder der Unterlagsplatte des Apparates oder einem besonderen Isolator befestigt, mit dem das andere Leitungsende in gleicher Weise verbunden wird wie vorher; das Messer wird bei Stromschluß in den Federkontakt gedrückt. Auf reichliche Bemessung der Kontaktflächen und innige Berührung derselben mit der Kupferschiene ist ein Hauptaugenmerk zu richten, da andernfalls erhebliche Energieverluste durch die Übergangswiderstände und unzulässige Erhitzungen der Kontakte nicht ausbleiben.

Fig. 224 zeigt einen dreipoligen Hebelumschalter in einer dem vorstehenden Apparate analogen Ausführung.

In Fig. 225 ist ein auf dem nämlichen Prinzip beruhender Hochspannungshebelausshalter dargestellt, der für Spannungen bis zu etwa 6000 Volt verwandt werden kann. Wird der Apparat auf dem Schaltbrette montiert,

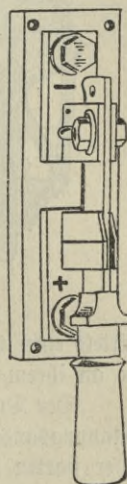


Fig. 223.

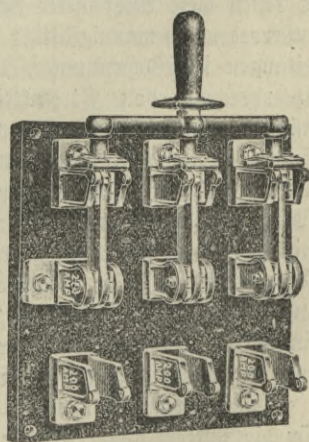


Fig. 224.

so ordnet man ihn auf der Rückseite desselben derart an, daß nur der isolierte Handgriff zur Bedienung des Schalters aus der Schalttafel hervorragt. Bei Benutzung als Einzelapparat in geschlossenen Räumen wird dieser Schalter zweckmäßig in einem Gehäuse aus perforiertem Eisenblech untergebracht. Auch für Freileitungen kann er Verwendung finden; in diesem Falle tritt an die Stelle des isolierten Handgriffes eine isolierte Öse, und die Bedienung erfolgt

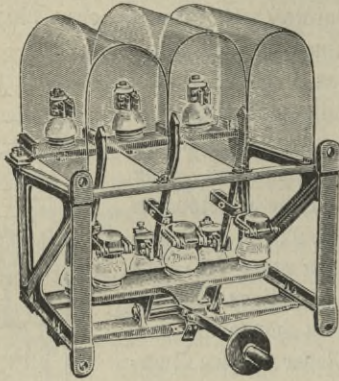


Fig. 225.

mittels einer Stange aus nicht leitendem Material, die an ihrem oberen Ende einen Haken trägt.

Der Drehpunkt des Hebels wird bei Niederspannungsausaltern häufig unter die Einwirkung einer starken Federkraft gestellt, um die Stromunterbrechung zu beschleunigen; ein solcher Ausschalter heißt Momentenschalter. Die Formen, in denen diese Ausschalter hergestellt werden, sind außerordentlich mannigfaltig; für die Installationsleitungen in Wohnräumen, bei denen es sich um Unterbrechung von Stromkreisen mit verhältnismäßig geringen Energiemengen von niedriger Spannung handelt, benutzt man mit Vorliebe die runde Form der Kapselmomentenschalter, die auf der Wand angebracht oder in den Verputz gelegt und mittels eines festen oder abnehmbaren Griffes oder Schlüssels bedient werden. Diese Schalter werden sowohl als einpolige und mehrpolige Ausschalter, wie als Umschalter ausgeführt. In Fig. 226 ist ein solcher Momentenschalter dargestellt; der Deckel ist abgenommen, so daß man die innere Einrichtung erkennen kann.

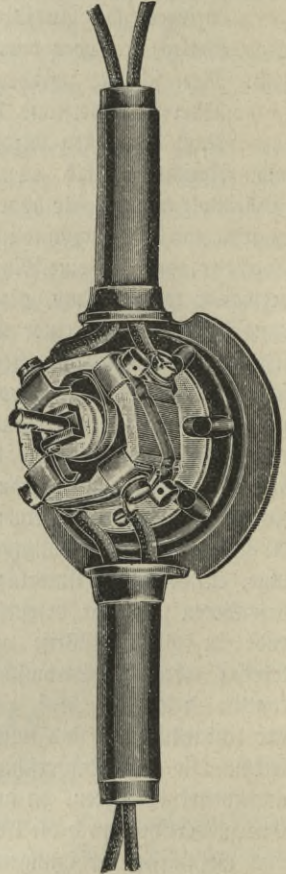


Fig. 226.

Die nach der zweiten und dritten Methode gebauten Ausschalter sind für die Unterbrechung großer Energiemengen bei hohen Spannungen — bis zu 30000 Volt — wie sie bei Überlandzentralen mit großen Entfernungen

der Konsumstellen von den Stromerzeugern häufig Verwendung finden, bestimmt. An Stelle des isolierten Handgriffes tritt bei diesen Apparaten wegen der mit ihrer Bedienung verbundenen Gefahr eine indirekt wirkende Antriebsvorrichtung, z. B. ein Hebelmechanismus oder dergl.

Die Wirkung der Hörneraus schalter (Fig. 227) beruht darauf, daß der Stromschluß durch eine metallische Verbindung der beiden die Endpunkte des zu unterbrechenden Stromkreises bildenden Hörner mittels eines zweckentsprechend geformten Kupferbügels hergestellt und die Öffnung durch plötzliche Entfernung dieses Bügels vermitteltst eines Hebelwerkes bewirkt wird. Der hierbei zwischen den Hörnern an ihrem Fußende auftretende Lichtbogen wird nach oben getrieben (s. S. 306) und reißt wegen der zunehmenden Vergrößerung des Hörnerabstandes bald ab. Fig. 227 zeigt den Apparat in dreipoliger Ausführung.

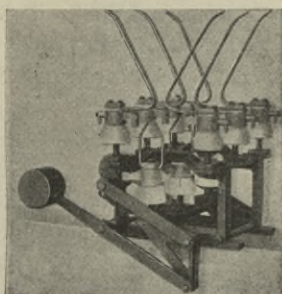


Fig. 227.

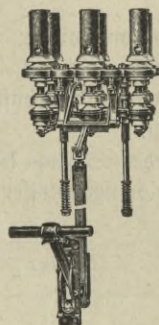


Fig. 228.

Der Hochspannungsröhrenaus schalter (Fig. 228) besitzt für jeden Pol eine Röhre aus feuerfestem Material, in der sich ein mit Kolbenführung versehener Kontakt befindet, der wiederum vermitteltst eines Hebelwerkes bewegt wird; am oberen Ende der Röhre befindet sich der feste Kontakt von zweckentsprechender Form und reichlichen Abmessungen. Werden die Kontakte behufs Stromunterbrechung plötzlich auseinander gerissen, so geht der bewegliche Kontakt in der Röhre nach unten, wobei der Kolben einen starken Luftstrom einsaugt, der den auftretenden Flammenbogen unterdrückt.

Bei dem Hochspannungs-Ölaus schalter befinden sich die Aus schalterkontakte in einem reichlich großen Ölbad; dieselben werden, wie es bei allen Hochspannungsapparaten der Fall ist, durch mechanische Hebelantriebsvorrichtungen bedient. Das Öl setzt dem beim Öffnen des Schalters entstehenden Flammenbogen vermöge seiner geringen Leitungsfähigkeit einen bedeutenden Widerstand entgegen; außerdem führt es eine rasche und ausgiebige Kühlung der Kontakte herbei, und die infolge der Bewegung auftretenden starken Wirbelungen des Oles suchen den Lichtbogen zu zerreißen. Diese sämtlichen Momente tragen dazu bei, daß die Bildung der Öffnungsfunken auf ein äußerst geringes Maß beschränkt wird, infolgedessen solche Schalter

für Spannungen bis zu 30 000 Volt verwandt werden können und erfahrungsgemäß durchaus betriebssicher arbeiten. Ein dreipoliger Mausehschalter ist in Fig. 229 abgebildet. Der Ölwechsel ist wegen seiner präzise wirkenden

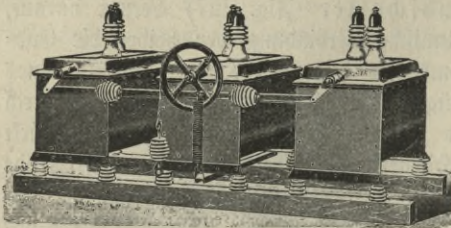


Fig. 229.

Funkenlöscheinrichtung außer in Hochspannungsanlagen auch in mit explosibelen Gasen erfüllten Räumen, z. B. in Schlagwettergruben, Naphthabetrieben, ferner in Pulverfabriken usw., in denen ein offener Lichtbogen überhaupt nicht entstehen darf, mit Vorteil verwendbar.

Häufig ist das Bedürfnis vorhanden, eine Lampengruppe,

einen Elektromotor u. dergl. von einer entfernten Stelle aus einz- und auszuschalten. Hierzu dienen indirekt wirkende Ausschalter, deren Wirkungsweise und Konstruktion an Hand der nachstehenden Figuren beschrieben werden soll.

In dem Schema (Fig. 230), das sich auf eine Dreileiteranlage bezieht, bedeutet K die angeschlossene Lampengruppe, die mittels des vom Elektromagnet M

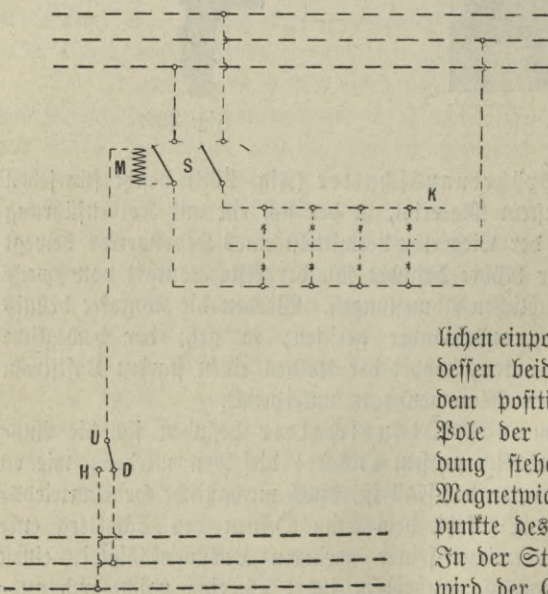


Fig. 230.

beeinflussten doppelpoligen Fernschalters S von einer entfernten Stelle aus einz- und ausgeschaltet werden soll. Zu diesem Zwecke wird die Wicklung des Magnets M durch eine dünne Leitung mit dem Drehpunkte U eines an der Ausschaltstelle, z. B. in der Zentrale, befind-

lichen einpoligen Umschalters verbunden, dessen beiden Kontakte H und D mit dem positiven bzw. dem neutralen Pole der Sammelschienen in Verbindung stehen; das zweite Ende der Magnetwicklung M wird mit dem Drehpunkte des Umschalters S verbunden. In der Stellung UH des Umschalters wird der Elektromagnet M erregt und der Ausschalter eingeschaltet; sobald dieses geschehen, ist der Elektromagnet

stromlos, da er jetzt an Punkten gleichen Potentials liegt. In der Stellung UD des Umschalters erhält der Elektromagnet zuerst vollen Strom, der Schalter wird

infolgedessen von den Kontakten weggezogen und nach erfolgter Ausschaltung ist der Elektromagnet wiederum stromlos. In Fig. 231 ist ein zweipoliger Ausshalter dieses Systems in geschlossenem Zustande dargestellt. Der Apparat wird als einpoliger Schalter auch für Zweileiteranlagen ausgeführt.

Um die Leerlaufverluste der Transformatoren zu Zeiten schwacher Netzbelastung zu vermindern (vergl. S. 235), hat man Transformatoren-Fernschalter konstruiert, die das Ausschalten einzelner Transformatoren aus dem primären Stromkreise gestatten; ein solcher ist in den Fig. 232 u. 233 dargestellt.

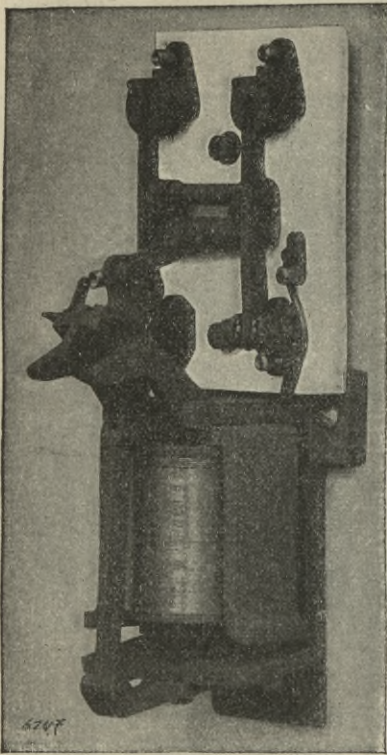


Fig. 231.

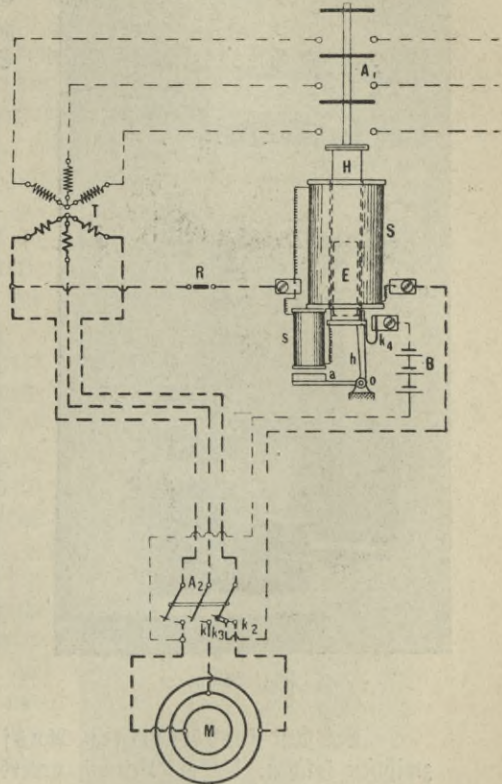


Fig. 232.

Der Apparat wirkt folgendermaßen: Wird der Schalter A_2 (Fig. 232) des Motors M im sekundären Stromkreise des Transformators T geschlossen, so wird dadurch gleichzeitig ein Stromkreis eingeschaltet, der von der Hilfsstromquelle B , der Kontaktfeder k_4 und der kleinen Magnetspule s gebildet wird. Der Elektromagnet s wird infolgedessen erregt und der Anker a angezogen. Gleichzeitig wird der mit a fest verbundene Hebel h , dessen Ende die den Eisenkern E einschließende Hülse H stützt, um o gedreht; hierauf fällt die Hülse nach unten und bewirkt das Schließen des Hochspannungsaus Schalters A_1 . —

Beim Wiederöffnen des Schalters A_2 wird zunächst der Kontakt k_3 geschlossen und die Magnetspule S kräftig durch sekundären Wechselstrom erregt. Dadurch wird der Eisenkern E in der Spule S gehoben, die Hülse H gleichzeitig nachgezogen und der Hochspannungsschalter A_1 in seine Ausschaltstellung geführt. Ein Zurückfallen der Schaltvorrichtung wird durch das Vorfallen des stützenden Hebels h unter die Hülse H verhindert. Der Schaltapparat wird sowohl für Einphasen- als auch für Mehrphasenstromanlagen hergestellt; er bleibt in den Ruhelagen stromlos, verbraucht keine Energie und macht kein Geräusch. Fig. 233 zeigt den Ausschalter in geschlossener Stellung.

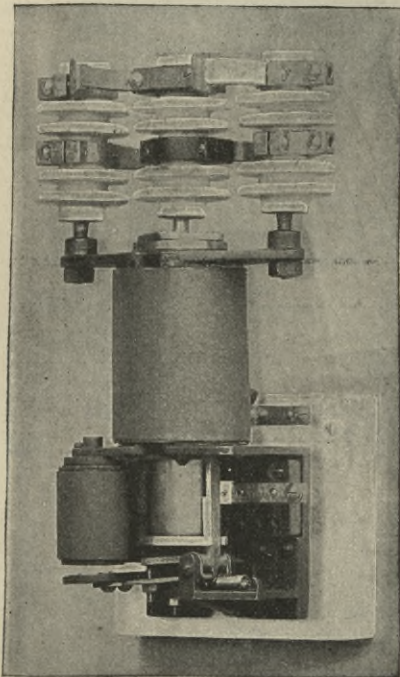


Fig. 233.

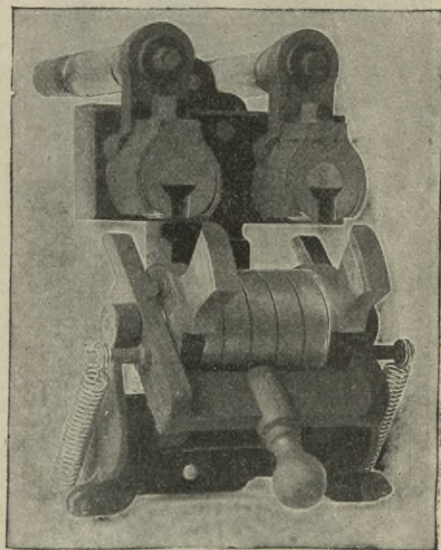


Fig. 234.

Bei den selbsttätigen Ausschaltern haben wir zu unterscheiden zwischen solchen, die die Leitung unterbrechen, wenn der Strom — etwa infolge einer der Maschinenspannung entgegen gerichteten Spannung einer zweiten Stromquelle, z. B. Akkumulatoren — unter einen bestimmten Betrag sinkt, den Minimalausschaltern, und solchen, die einen Stromkreis gegen unzulässige Überlastungen schützen, den Maximalausschaltern. Die Apparate werden sowohl für Gleichstromkreise als auch für Wechselstromkreise gebaut.

Der selbsttätige Minimalwechsler für Gleichstrom (Fig. 234) besteht aus einem Hebelschalter, der mit einem Elektromagnet und einer Feder verbunden ist; oberhalb desselben befindet sich ein festes Eisenstück, das für den Elektromagnet den Anker bildet. Im eingeschalteten Zustande wird der Elektromagnet vom Hauptstrom durchflossen, dadurch erregt und von dem Eisenstücke

festgehalten. Geht die Spannung zurück, so überwiegt die Spannkraft der Feder allmählich die Zugkraft des Elektromagneten, und der Ausshalter wird durch den entgegengesetzt gerichteten Zug der Feder von seinen Schaltkontakten abgerissen. Der Apparat findet hauptsächlich im Ladestromkreise von Akkumulatoren sowie in Verbindung mit Anlaufwiderständen bei Gleichstromelektromotoren Verwendung; im letzteren Falle schützen sie den Motor nach vorausgegangener Stromunterbrechung vor versehentlichem Wiedereingangssetzen bei kurz geschlossenem Anlasser.

Als selbsttätige Maximalausshalter sind in erster Linie die in Kap. 8 behandelten Schmelzsicherungen zu erwähnen. Der Umstand jedoch, daß diese Apparate gegen sehr kurz dauernde Überlastungen keinen Schutz gewähren, und daß bei länger dauernden Überlastungen das Einsetzen neuer Schmelzstücke mit Umständen und Zeitverlust verknüpft ist, hat zur Konstruktion besonderer Maximalausshalter geführt, von denen wir nachstehend einen besonders für Straßenbahnspiseleitungen geeigneten Apparat beschreiben.

Der Stromschluß wird durch ein Hauptkontaktstück *c* (Fig. 236) und ein im Nebenschlusse dazu liegendes Hilfskontaktstück *d* bewirkt. Sowohl *c* wie *d* sind federnd angeordnet; sie stehen nicht in starrer Verbindung miteinander, sondern kommen beim Ein- und Ausschalten nacheinander in bezw. außer Kontakt. Das Stück *d* wird von einer Hülse getragen, die den zylindrischen nach oben verlängerten Träger *t* des Kontaktstückes *c* umschließt. Am unteren Ende von *t* ist eine Röhre *m* befestigt, die samt dem Träger *t* an den Stellen *q* und *r* senkrecht geführt wird. Durch den Handgriff *g* wird ein Kniehebel betätigt, der mit einer Sperrklinke *i*, die in einen Vorsprung *v* der Röhre *m* eingreift, in Verbindung steht. Stellung 1 des Schemas zeigt den unteren Teil des Apparates in ausgeschalteter Stellung, in welcher die das Stück *d* tragende Hülse auf dem Kopfe des verlängerten Trägers *t* ruht. Wird der Hebel *g* nach unten gedrückt, so wird durch die Sperrklinke *i* die Röhre *m* und der Träger *t* mitgenommen. Hierbei kommt zunächst das Stück *d* mit den Stücken *a* und *b* in Berührung, gegen die es durch die Feder *f* fest angedrückt wird. Bei der Weiterbewegung kommt

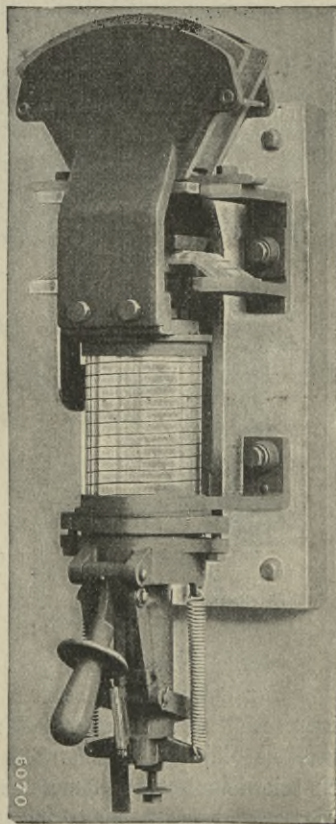
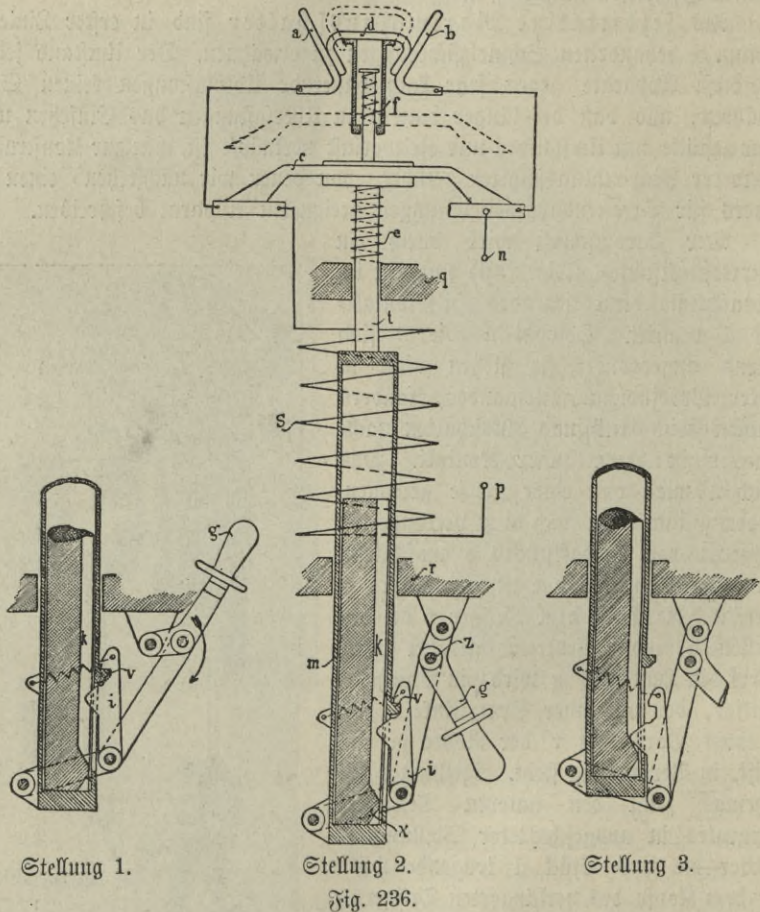


Fig. 235.

auch das Kontaktstück *c* zum Schlusse. In der Stellung 2 ist der Apparat eingeschaltet. Steigt die Stromstärke über ein gewisses Maß, so wird der innerhalb der Röhre *m* befindliche Eisenkern *k* von der Stromspule *s* nach oben gezogen, wobei die Sperrklinke *i* durch die Nase *x* ausgelöst wird. Dadurch wird die Röhre *m* frei, der Träger *t* folgt der Kraft der Feder *e*, die ihn nach oben schnellst; hierbei kommt zuerst der Hauptkontakt *c* und darauf der Nebenkontakt *d* zur Ausschaltung.



Der Kontakt *d* bewirkt hauptsächlich, daß der Lichtbogen nur an diesem leicht auswechselbaren Teile entstehen kann; ein solcher wird indessen durch die blasende Wirkung des magnetischen Feldes ausgelöscht, das zwischen den beiden in der Abbildung des Apparates (Fig. 235) sichtbaren, im Schema (Fig. 236) dagegen nicht eingezeichneten Eisenplatten erzeugt wird, die, vor und hinter den Stücken *a*, *b*, *d* angeordnet, die Pole eines von der Spule *s*

erregten Elektromagneten bilden. Stellung 3 ist diejenige des unteren Teiles des Apparates, die er nach der automatischen Aussschaltung einnimmt; dieselbe wird von dem Apparate so lange festgehalten, als die unzulässige Überlastung der Leitung besteht.

Ein selbsttätiger, bei Rückgang der Spannung wirkender Aussschalter für Wechselstromleitungen ist in der Fig. 237 dargestellt. Dieser Schalter ist, analog dem auf S. 412 beschriebenen Minimalaussschalter für Gleichstrom, in erster Linie dafür bestimmt, ein- oder mehrphasige Wechselstrommotoren, die etwa infolge einer Betriebsstörung in der Zentrale stehen geblieben waren, vor Beschädigungen zu schützen, denen sie bei ihrer Wiederinbetriebsetzung ausgesetzt sind, wenn der Anlasserhebel versehentlich nicht in die Nullstellung zurückgedreht worden ist.

Der zwei- und dreipolig ausgeführte Apparat wird durch eine Klinke geschlossen, während eine Feder den Schalter zu öffnen sucht. An einem durch eine Spannungsspule erregten lamellierten Magnete hängt schwebend ein Anker, der aus Draht hergestellt wird, um Geräusch zu vermeiden. Sinkt die Spannung auf ein gewisses Maß, so fällt der Anker nach unten und schlägt die Klinke zurück; die Feder kommt zur Wirkung und öffnet den Schalter. Durch diese Bewegung wird der Anker gleichzeitig wieder gehoben, so daß er nach Wiedereinschaltung sofort zu neuer Wirkung bereit ist.

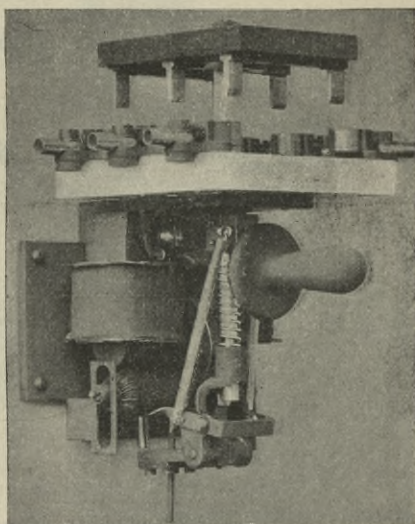
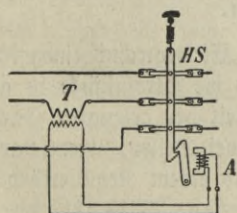
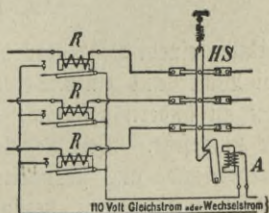


Fig. 237.



Schema I.



Schema II.

Fig. 238. ¶

Als selbsttätiger Maximalaussschalter für Wechselstromleitungen wird mit Vorteil der auf S. 410 beschriebene Aussschalter verwandt. Der Schalter wird zu diesem Zwecke mit einem Auslösemagnet verbunden (Fig. 238), der entweder direkt durch den transformierten Hauptstrom

nach Schema I beeinflusst wird, oder durch Maximalrelais, die von einer niedrig gespannten Hilfsstromquelle aus erregt werden (Schema II). Die Anordnung nach Schema I genügt für Drehstromanlagen mit annähernd gleicher Belastung der drei Zweige. Bei Generatoren verwendet man zweckmäßig in zwei Zweigen je ein Relais; bei längeren Fernleitungen ist in jedem Zweige ein Relais (kein Transformator) vorzuziehen.

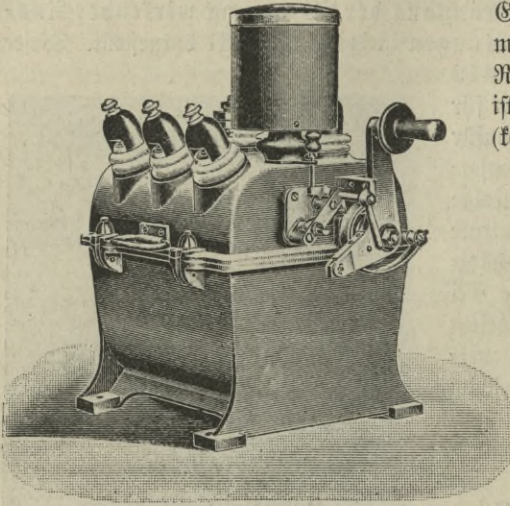


Fig. 239.

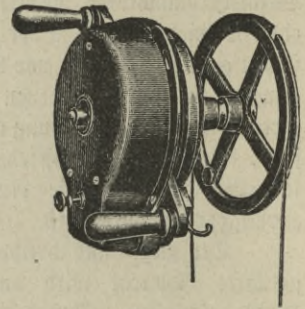


Fig. 240.

Die in Fig. 240 abgebildete Auslösevorrichtung kommt für indirekt betätigte Schalter in Betracht; dieselbe dient gleichzeitig als Antriebsvorrichtung, indem sie mit dem entfernt stehenden Schalter durch Seilantrieb oder durch Gestänge verbunden wird, und enthält den gesamten Sperrmechanismus sowie den Auslöse-Elektromagneten. Die Vorrichtung ist endlich so eingerichtet, daß ein Auslösen auch dann möglich ist, wenn die Schaltkurbel festgehalten wird.

2. Die Regulatoren.

Unter einem Regulator versteht man in der Elektrotechnik einen Apparat, der den Widerstand eines Stromkreises und damit die Stromstärke in gewissen Grenzen zu ändern gestattet; hierbei wird ein Teil der erzeugten Energie in Wärme umgesetzt. Der Regulator besteht aus zwei Teilen, einem variablen Zusatzwiderstande aus stromleitendem Material und einem Regulierkörper.

Wir unterscheiden bezüglich des variablen Widerstandes mit Rücksicht auf das Material:

Metallwiderstände, die aus Drahtspiralen, Metallbändern oder sonstigem festen Widerstandsmaterial hergestellt sind.

Flüssigkeitswiderstände, die aus einer stromleitenden Flüssigkeit, meistens einer Sodablösung bestehen, deren Widerstand durch mehr oder weniger tiefes Eintauchen der Elektroden geändert wird.

Je nach der Art, wie die im Widerstande entwickelte Wärme fortgeleitet wird, der Apparat also sich abkühlt, unterscheiden wir ferner:

Luftgekühlte Regulatoren, bei denen das Widerstandsmaterial auf allen Seiten von Luft umgeben ist.

Regulatoren mit Ölkühlung, bei denen der aus Metallspiralen — Neusilber zc. — bestehende Zusatzwiderstand sich in einem Ölbad befindet, das die in den Spiralen entwickelte Wärme sehr rasch aufnimmt.

Bezüglich der Regulierkörper unterscheiden wir:

Kurbelregulatoren, bei denen der Regulierkörper im wesentlichen aus einem Serienschalter besteht, der eine auf einer Anzahl von Kontakten schleifende Kurbel besitzt. Die Kurbel wird mit dem einen Endpunkte des zu variierenden Stromkreises verbunden, während der andere Endpunkt mit dem letzten Kontakte des Apparates in Verbindung steht; zwischen dem ersten und letzten Kontakte befindet sich der durch die übrigen Kontakte in bestimmtem Verhältnisse abgestufte Zusatzwiderstand.

Walzenregulatoren oder Controller, deren Regulierkörper die Form einer mittels Hebels oder Handrades drehbaren zylindrischen Walze hat (s. Fig. 241). Bei kleineren Apparaten, z. B. Straßenbahnkontrollern, sind die festen Kontaktstücke direkt auf der Walzenoberfläche angeordnet und bestehen aus Metallstreifen; die ebenfalls metallischen Kontakthämmer sind um einen Drehpunkt beweglich und werden durch Federkraft gegen die Oberfläche der Walze angebrückt. Bei größeren und stark beanspruchten Apparaten, z. B. Steuerwalzen für schwere Hebezeuge, Walzenzug-Elektromotoren usw., werden die Kontaktvorrichtungen zweckmäßig aus Kohle hergestellt und außerhalb der Schaltwalze angeordnet. Die letztere besitzt auf ihrer Oberfläche eine Anzahl Segmente, durch die die beweglichen Kontakte gegen die festen angebrückt, bezw. von diesen abgehoben werden.

Automatische Regulatoren, deren Regulierkörper eine selbsttätig wirkende Antriebsvorrichtung besitzt. Die letztere besteht entweder aus einem mechanischen Getriebe oder einem Elektromotor. Als Beispiel für den ersten Fall diene folgende Anordnung der Siemens-Schuckertwerke: Auf der Achse des Regulierkörpers sitzt ein Zahnrad, mit dem der Schleiffkontakt zur Veränderung des Zusatzwiderstandes fest ver-

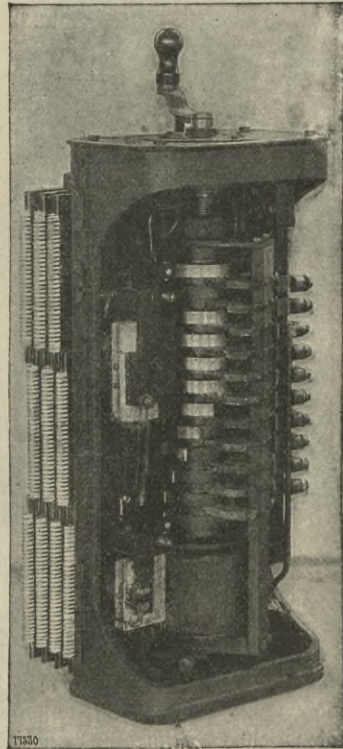


Fig. 241.

bunden ist. Mit dem Zahnrade können zwei Sperrklinken in Eingriff gebracht werden, die es in der einen oder anderen Richtung drehen und von einer vorhandenen Transmission in Schwingungen versetzt werden. Der Eingriff erfolgt unter dem Einflusse zweier Elektromagnete, mit deren Ankern die Sperrklinken in Verbindung stehen; die Elektromagnete selbst werden von einem Spannungsrelais betätigt. — Im zweiten Falle treibt der Elektromotor die Achse des Regulierkörpers gewöhnlich mittels eines Schneckengetriebes an, und seine Drehrichtung wird durch das Spannungsrelais beeinflusst.

Zu den automatischen Regulatoren gehören auch die Umkehranlasser für Aufzüge, die sowohl für den Betrieb mit Gleichstrom wie mit Wechsel-

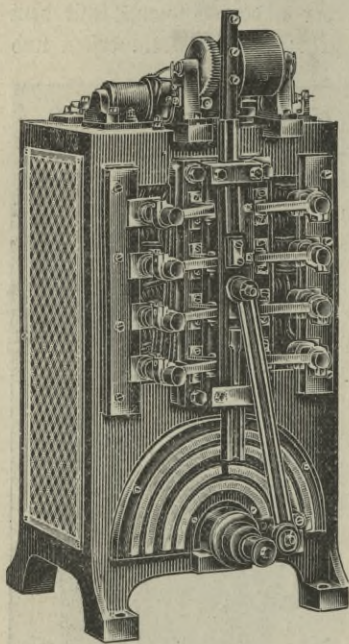


Fig. 242.

strom gebaut werden. Die Gleichstromapparate bestehen in der Ausführung der Siemens-Schuckertwerke (Fig. 242), die beispielsweise besprochen werden möge, im wesentlichen aus einem Hauptauschalter, einem Umschalter zur Änderung des Drehsinnes des Antriebsmotors für die Aufzugswinde und einem unterteilten Anlaufwiderstande nebst zugehörigem Kontaktapparat. Der letztere setzt sich aus einer Anzahl fester und einer entsprechenden Zahl beweglicher Kohlenkontakte zusammen, die durch Federkraft gegeneinander gepreßt werden. Die beweglichen Kontakte sind an einer Schubstange befestigt, die von einem kleinen Hilfsmotor mittels einer lösbaren magnetischen Kuppelung und eines Schneckengetriebes angetrieben wird. Die Schubstange treibt auch den vorerwähnten Umschalter durch eine Pleuelstange und Kurbel an. Die Schaltung wird so getroffen, daß der Antriebsmotor der Winde bei der Abwärtsbewegung des Aufzuges als Generator arbeitet und so als Bremse wirkt. Endlich ist noch ein Überlastungsrelais zu erwähnen,

das notfalls eine Unterbrechung der Stromzufuhr gestattet. Sämtliche Teile des Apparates befinden sich in bezw. an einem gußeisernen Gehäuse vereinigt. Das Einschalten resp. Ausschalten des Apparates geschieht vermittelst eines Steuerseiles entweder vom Fahrkorbe oder von festen Bedienungsstellen außerhalb des Fahrschachtes aus durch Drehung der Welle des Umschalters in Links- oder Rechtsstellung für Vorwärts- oder Rückwärtsgang bezw. in Mittelstellung für Stillstand; die weitere Betätigung geschieht automatisch durch den Hilfsmotor.

Die Anordnung der Drehstromapparate der genannten Firma ist der vorstehend beschriebenen ähnlich (Fig. 243). Nur steht hier die Umschalterkurbel

mit der Schubstange nicht durch die Pleuelstange in fester Verbindung, sondern die Stange stützt sich mittels eines Querstückes lose auf die Kurbel. Die Kurbel kann daher unabhängig von der Stange rasch gedreht werden; geschieht dieses, so fällt die mit einem regulierbaren Dpuffer verbundene Schubstange durch ihr Eigengewicht langsam nach unten, die an ihr befestigten Gleitkontakte gleiten über die am Gehäuse angeordneten festen Kontaktstücke und verändern den Anlaufwiderstand. Die Kontakte bestehen auch bei diesem Apparat aus Kohle; dagegen fällt bei demselben der Hilfsmotor weg. Durch das Steuerseil wird die Kurbelwelle des Umschalters gedreht; hierbei drückt die Kurbel die Schubstange nach oben, wenn der Apparat aus der Fahrstellung in die Haltestellung übergeht.

An Stelle der mechanischen Steuerungen der Umkehranlasser durch Seil und Kurbel verwendet man neuerdings vielfach und mit Vorteil die sogenannten Druckknopfsteuerungen. Bei diesen geschieht die Inbetriebsetzung der Anlasser durch elektromagnetische Schaltapparate, die durch Kontaktknöpfe mit Hilfe von Relais betätigt werden. Im Fahrkorbe befindet sich eine der Anzahl der Stockwerke entsprechende Zahl von Kontaktknöpfen; außerdem wird in jedem Stockwerke an der Außenseite des Fahrschachtes ein solcher Knopf angebracht, der mit dem zugehörigen Druckknopf im Fahrkorbe korrespondiert. Die Einrichtung wird so getroffen, daß durch Drücken ein und desselben Knopfes im Fahrstuhl nach der betreffenden Etage herauf- und heruntergefahren wird; ferner kann der Aufzug durch Druck auf den ebenfalls im Fahrstuhl befindlichen Haltknopf an jeder Stelle angehalten werden. Durch Druck auf die Knöpfe in den Etagen an der Außenseite des Fahrschachtes kann der Fahrstuhl herangeholt und — bei entsprechender Einrichtung — nach jeder anderen Etage hingesteuert werden. Endlich stellt der Fahrstuhl den Aufzugsmotor selbsttätig ab, wenn er auf der betreffenden Etage angelangt ist. Die Druckknopfsteuerungen arbeiten mit großer Sicherheit; eine irrtümliche oder mißbräuchliche Anwendung der Steuerung und damit eine Gefährdung des Aufzuges durch Drücken eines weiteren Knopfes nach erfolgter Ingangsetzung wird durch den Umkehranlasser verhindert, der die Zuleitung zu den Druckknöpfen abschaltet, sobald er in Tätigkeit tritt. Ein besonderer Führer für den Fahrstuhl ist daher nicht erforderlich.

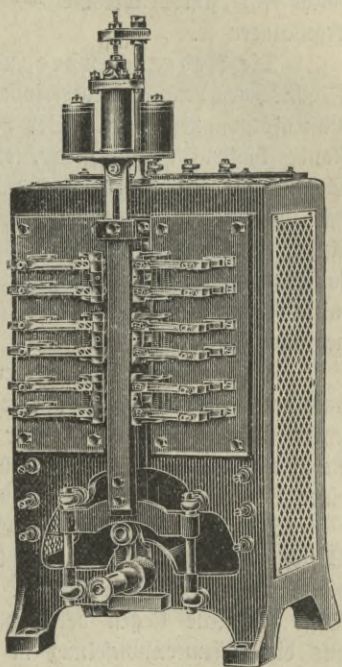


Fig. 243.

Hinsichtlich ihrer Wirkung unterscheiden wir Regulatoren für schwächere Ströme — in erster Linie Nebenschlußregulatoren für Dynamomaschinen, und solche für starke Ströme — Anlasser für Elektromotoren, Fernleitungsregulatoren zc.

Die Nebenschlußregulatoren werden gewöhnlich als luftgekühlte Flachrahmen-Regulierwiderstände, bei größeren Ausführungen auch wohl in Kastenform angeführt. Der Regulierkörper wird entweder mit dem Widerstande konstruktiv verbunden, oder er wird von demselben getrennt auf dem Schaltbrette angeordnet; in diesem Falle müssen die Widerstandsstufen mit den Regulierkontakten durch besondere Leitungen verbunden werden. Außer der gewöhnlichen Anordnung der Kurbelrheostaten gibt es noch eine kollektorförmige Ausführung des Regulierkörpers, bei der der Schleifkontakt mittels eines Handrades bedient wird und die Kontakte kreisförmig angeordnet sind.

Die Nebenschlußregulatoren können sowohl für Handbetrieb als auch für automatischen Antrieb gebaut werden; auch werden sie öfters für Fernantrieb unter Zuhilfenahme Gallecher Ketten u. dergl. eingerichtet. Um den Extrastrom unschädlich zu machen, empfiehlt es sich, die Nebenschlußregulatoren mit einer Magnet-Kurzschlußvorrichtung auszustatten.

Wesentlich größere Schwierigkeiten wie die durch verhältnismäßig schwache Ströme beanspruchten Nebenschlußregulatoren bieten in konstruktiver Hinsicht die Starkstromregulatoren, insbesondere die Anlasser für Elektromotoren. Diese Apparate liegen bekanntlich im Hauptstromkreise; insolgedessen ist nicht nur die Wärmeentwicklung in den Widerstandsstufen unter Umständen eine ganz bedeutende, sondern es entstehen auch an den Kontakten des Regulierkörpers beim Übergange von der einen zur anderen Stellung beträchtliche Öffnungs- und Schließungsfunken, die häufig die Form einer Stichflamme annehmen und den Regulierkörper natürlich schnell abnutzen. Um den nachteiligen Einfluß dieser Erscheinungen auf ein möglichst geringes Maß zu reduzieren, hat man für die verschiedenen Betriebsfälle eine Reihe von Spezialkonstruktionen geschaffen, deren prinzipielle Unterschiede vorstehend festgestellt sind. Im folgenden wollen wir auf das Verwendungsgebiet der einzelnen Apparate etwas näher eingehen.

Für stärkere Beanspruchungen durch häufig wiederholte Stromstöße von großer Intensität oder auch durch länger dauernde Ströme von kleinerer Stärke verwendet man im allgemeinen die luftgekühlten Apparate, die natürlich wegen des verhältnismäßig geringen Wärmeleitungsvermögens der Luft reichliche Abmessungen erhalten müssen. Solche Regulatoren stellen sich daher nicht nur in der Herstellung verhältnismäßig teuer, sondern sie nehmen auch einen großen Raum in Anspruch und erwärmen unter Umständen beträchtlich die sie umgebende Luft. Diese Übelstände vermeidet man bei Apparaten, die nur selten und kürzere Zeit von stärkeren Strömen beansprucht werden, durch Verwendung der Ölregulatoren. Fig. 244 zeigt einen solchen, zum Anlassen großer Drehstrommotoren bestimmten Apparat. Für den im Ölbad befindlichen Zusatz-

widerstand kann nämlich eine verhältnismäßig hohe Stromdichte der Spiralenquerschnitte angenommen werden, weil das Öl die in den Widerstandsspiralen auftretende Wärme sehr rasch aufnimmt; infolgedessen erhalten diese Apparate im Verhältnisse zu ihrer zulässigen Belastung geringe Abmessungen, stellen sich in der Herstellung billig und nehmen wenig Raum in Anspruch. Bei länger dauernder Inanspruchnahme besteht in dessen die Gefahr, daß die Temperatur des Öles eine unzulässig hohe wird. Daher sind die Ölregulatoren beispielsweise als Anlasser für Elektromotoren nur dann zulässig, wenn die Apparate nur selten benutzt, die Elektromotoren also selten ein- und ausgeschaltet werden. Zur Regulierung der Tourenzahl des Motors durch Änderung des Hauptstromes dürfen Ölregulatoren nicht verwendet werden.

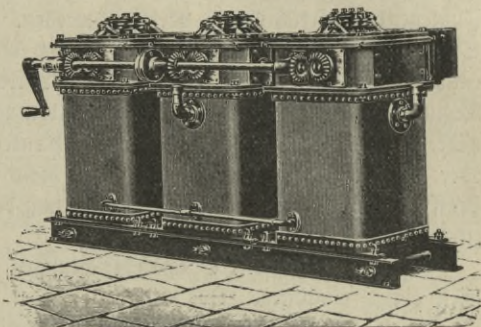


Fig. 244.

Die Leistung der Apparate kann dadurch gesteigert werden, daß man den Ölbehälter mit Wasserberieselung versieht, die eine raschere Abkühlung des Ölbadens bewirkt.

Bei den luftgeköhlten Regulatoren und kleineren Apparaten wird der Zusatzwiderstand mit dem Regulierkörper zu einem Flachrahmenregulator vereinigt, gerade so, wie es bei den Nebenschlußregulatoren der Fall ist. Als Anlasser für Elektromotoren sind solche Apparate für kleinere Leistungen bis etwa 30 PS verwendbar; sie können für häufiges Ein- und Ausschalten, sowie für Tourenregulierung durch Veränderung des Hauptstromes benutzt werden.

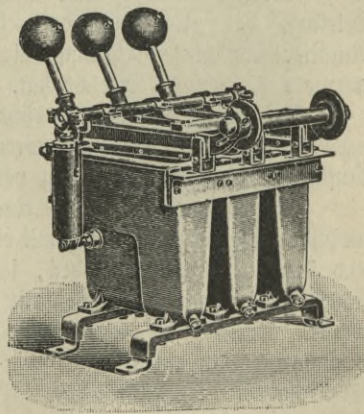


Fig. 245.

Die Flüssigkeitswiderstände sind als Anlasser für Elektromotoren von kleiner und mittlerer Leistung bis etwa 150 PS auch für häufigeres Ein- und Ausschalten verwendbar, bei Nebenschlußmotoren nur in Verbindung mit einem Magnetausschalter. Größere Flüssigkeitsanlasser erhalten eine Dämpfungspumpe, die ein allzu rasches Eintauchen der Elektroden des Apparates in das Bad verhindert (s. Fig. 245). Bei der Benutzung dieser Regulatoren ist darauf zu achten, daß die Sodablösung nicht zu heiß wird und ins Kochen gerät; sollte dieses eintreten, so ist dem Apparate genügend Zeit zur Abkühlung zu lassen.

Für größere Leistungen und stärkere Inanspruchnahme durch häufiges Ein- und Ausschalten, Änderungen der Tourenzahlen und des Drehsinnes der Motoren kommen Steuerwalzen in Frage, die bei besonders schweren Betrieben, wie bereits erwähnt, mit auswechselbaren Kohlenkontakten und elektromagnetischen Funkenentziehvorrichtungen versehen werden. Die Widerstände werden von den Steuerwalzen entweder getrennt montiert oder mit denselben verbunden und entweder seitlich angeordnet oder unterhalb derselben angebracht; sind die Regulatoren im Betriebe starken Erschütterungen ausgesetzt, so wird der Zusatzwiderstand zweckmäßig nicht aus Drahtspiralen hergestellt, sondern aus Drähten oder Bändern, die auf Isolierrollen montiert und über einen Eisenrahmen straff gespannt werden, um eine Berührung der Widerstandsstufen untereinander zu verhindern.

Von den vielen Spezialeinrichtungen der Anlasser für Elektromotoren seien einige wichtigere erwähnt:

Die Anlasser für Nebenschlußelektromotoren werden vielfach mit einer selbsttätig wirkenden Vorrichtung versehen, die den ganzen Anlaßwiderstand einschaltet und bei Rückgang der Spannung des zugeführten Stromes in Wirkung tritt. Durch diese Einrichtung wird verhindert, daß der Motor bei nicht eingeschaltetem Anlasser versehentlich unter Strom gesetzt werden kann; sie erfüllt daher einen ähnlichen Zweck wie der früher erwähnte selbsttätige Ausschalter. Der Anlasser kann ferner mit einer Einrichtung versehen werden, die eine selbsttätige Unterbrechung des Hauptstromkreises bei unzulässig hoher Belastung des Elektromotors bewirkt. Auf die Beschreibung von speziellen Ausführungen, die auf verschiedene Weise möglich sind, müssen wir verzichten.

Drehstrommotoren mit Schleifringankern erhalten häufig eine auf der Wirkung der Zentrifugalkraft beruhende selbsttätige Bürstenabhebe- und Anlasser-Kurzschlußvorrichtung, die in Tätigkeit tritt, sobald der Motor seine normale Tourenzahl erreicht hat.

Um ein zu schnelles Ausschalten der Widerstandsstufen des Anlassers zu verhindern, werden die Regulatoren manchmal mit einer Einrichtung für zwangsläufige, sprungweise Schaltung versehen.

Die Magnetregulatoren einer Reihe parallel arbeitender Wechselstrommaschinen werden zweckmäßig mit einer gemeinsamen Steuerwelle durch Schnecken und Schneckenräder verbunden, so daß bei sämtlichen Maschinen die erforderlichen Änderungen der Intensität des magnetischen Feldes gleichzeitig bewirkt werden können; die Steuerwelle kann sowohl von Hand bedient als auch automatisch von einem unter dem Einflusse der Wechselstromspannung stehenden Elektromotor betätigt werden.

Bei Hebezeugen ist es ein Haupterfordernis, den Lasthebemotor vor der Annahme unzulässig hoher Tourenzahlen zu schützen, die bei nicht selbsthemmenden Getrieben, z. B. Stirnradvorgelegten beim Senken der Last, ferner bei Serienhubmotoren auch gelegentlich des Aufziehens des leeren Hafens eintreten können. Zu diesem Zwecke werden die Gleichstromsteuerwalzen mit Senkbremsstellungen ausgestattet und in diesen der Stromkreis des Motors nach

Abfschaltung vom Neze auf die Widerstände des Anlaffers geschaltet, so daß er als Generator wirkt. Durch Veränderung der Widerstände kann die Tourenzahl des in Bremsstellung befindlichen Motors beliebig eingestellt werden. Um gleich in den ersten Senkbremstellungen eine kräftige Stromerzeugung des als Generator geschalteten Motors zu erhalten, wird in denselben nach einem den Siemens-Schuckertwerken patentierten Verfahren der Motor vom Neze aus erregt; die Einrichtung wird gleichzeitig so getroffen, daß bei etwaigem Ausbleiben des Netzstromes der Motor sich selbst erregt. Endlich wird meistens zur weiteren Vergrößerung der Betriebssicherheit eine ebenfalls von der Steuerwalze abhängige elektrische Haltebremse verwendet, die die Aufgabe hat, bei ausgeschaltetem Motor die Last in ihrer jeweiligen Stellung festzuhalten. Diese Haltebremse¹⁾ wird gewöhnlich als Lüftungsbremse ausgeführt, indem sie während der Lastbewegungen die Bremse durch Heben des Bremsgewichtes lüftet. Um die hierbei stoßweise auftretende und große Energie verzehrende Wirkung der Brems-Elektromagnete zu verbessern, sind verschiedene Ausführungsformen dieser Apparate hergestellt worden. Erwähnt sei ein sogen. Sparmagnet (Fig. 246), bei dem durch einen vom Anker betätigten besonderen Schalter kurz vor Beendigung des Hubes ein Vorschaltwiderstand vor die Erregerspule gelegt und dadurch der

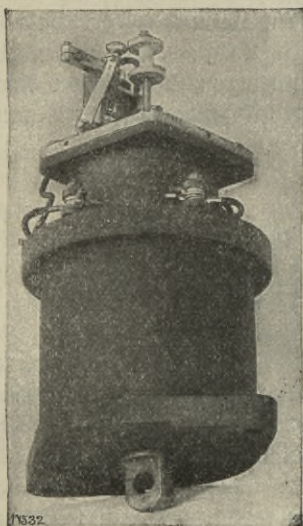


Fig. 246.

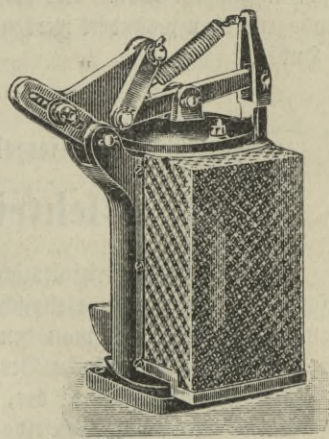


Fig. 247.

bei Hubbeginn starke Strom beträchtlich abgeschwächt wird; der Apparat hat außerdem einen Luftkatarakt zur Milderung der Stöße. Fig. 247 zeigt einen Anliehebremsmagnet mit angebautem Emaillewiderrstand, der variable Über-

¹⁾ Diese Apparate sollen wegen ihrer Wichtigkeit für elektrisch betriebene Hebe-
werke und ihres engen Zusammenhanges mit den Steuerwalzen an dieser Stelle er-
wähnt werden.

sehung zwischen Kraft und Last durch Einschaltung eines Kurbelvierecks zwischen Magnetanker und Bremsgewicht besetzt; das Viereck schwingt zwischen einer Totlage für die Kraft und einer solchen für die Last derart, daß sich Kraft und Last stets nahezu das Gleichgewicht halten.

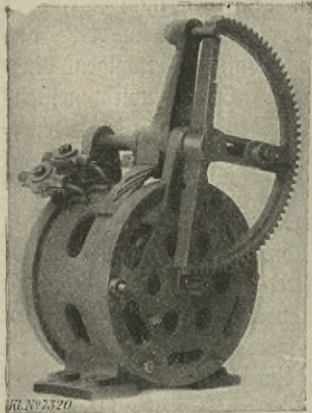


Fig. 248.

Der Hub des Bremsgestänges ist bei gleicher Hubarbeit durch Verschiebung des Angriffspunktes der Last in dem mit einem Langloche versehenen Winkelhebel innerhalb weiter Grenzen einstellbar. Der induktionsfreie, angebaute Parallelwiderstand dient dazu, die beim Ausschalten auftretenden Induktionsströme unschädlich zu machen.

Endlich sind auch Drehstrom-Bremsmagnete konstruiert worden, bestehend aus einem kleinen Drehstrommotor, der mittels eines auf seiner Achse sitzenden Nüssels einen Zahnbogen antreibt, dessen Lagerung mit dem Motorgestelle konstruktiv verbunden ist (Fig. 248). An einem Arme des Zahnbogens befindet sich ein Langloch, in dem das Bremsgewicht aufgehängt wird. Der Abstand des Aufhängepunktes von der Achse des Zahnbogens kann verändert werden; ein federnder Anschlag dient zur Begrenzung des Hubes.

Vierzehntes Kapitel.

Elektrizitätszähler.

Zweck. Die Elektrizitätszähler haben die Aufgabe, die an den einzelnen Konsumstellen verbrauchte elektrische Energie zu messen und so zu registrieren (zusammenzuzählen), daß man den Stromkonsum entweder ohne weiteres ablesen oder durch eine einfache Berechnung bestimmen kann.

Der einfachste Fall ist der, daß nur ein Apparat angeschlossen ist, der stets dieselbe oder nahezu dieselbe Energie verbraucht, z. B. ein Elektromotor, der einen Zimmer-Ventilator antreibt. Es genügt dann, die Zeit zu kennen, während deren der Stromkreis geschlossen ist (Zeitähler).

Wenn die Spannung an der Konsumstelle konstant bleibt, so hängt die verbrauchte elektrische Energie lediglich von der Elektrizitätsmenge ab. Wird diese gemessen, so erhält man die konsumierten Wattstunden durch Multiplikation mit der Netzspannung. Zähler, die nur die Amperestundenzahl registrieren, nennt man Amperestunden- oder Coulombzähler.

Da die Netzspannung, an der Konsumstelle gemessen, bei einer ausgedehnten Anlage nicht konstant gehalten werden kann, vielmehr Schwankungen

nach oben und unten unvermeidlich sind, so ist im allgemeinen von der Benutzung der Amperestundenzähler abzuraten (obwohl sie einfacher und billiger sind). Die meisten neueren Zähler sind so eingerichtet, daß die Wattstunden- bzw. Kilowattstundenzahl registriert wird; man nennt derartige Apparate Wattstundenzähler.

Anforderungen. Man stellt an die Elektrizitätszähler eine ganze Reihe von Anforderungen. Die Konstruktion des Zählers muß möglichst einfach sein, die Reibung darf nur klein sein und soll sich im Laufe der Zeit nicht bzw. nur in ganz geringem Maße ändern, weil sonst die Messung mit der Zeit ungenauer wird. Auf gute Lagerung der Drehungsachse ist daher große Sorgfalt zu verwenden. Ferner soll der eigene Stromverbrauch des Zählers nur gering sein. Bezüglich der mechanischen Konstruktion verlangt man noch, daß die Montage eine einfache, daß der Zähler einer sehr geringen oder gar keiner Wartung bedarf, und daß er transportfähig ist.

Da der Stromverbrauch einer Konsumstelle in weiten Grenzen schwankt, so muß die Messung bei den verschiedensten Belastungen möglichst genau sein und schon bei einem kleinen Prozentsatz der normalen Belastung beginnen. Nach den gesetzlichen Bestimmungen „darf die Abweichung der Verbrauchsanzeige nach oben oder nach unten von dem wirklichen Verbrauch bei einer Belastung zwischen dem Höchstverbrauch, für welchen der Zähler bestimmt ist, und dem zehnten Teile desselben nirgends mehr betragen als 0,6 % dieses Höchstverbrauchs, vermehrt um 6 % des jeweiligen Verbrauchs, und ferner bei einer Belastung von $\frac{1}{25}$ des obigen Höchstverbrauchs nicht mehr als 2 % des letzteren. Auf Zähler, die in Lichtanlagen verwendet werden, finden diese Bestimmungen nur insoweit Anwendung, als die anzuzeigende Leistung nicht unter 30 Watt sinkt“ (Vorschriften betreffend Wechselstromzähler s. später). Wir wollen diese Bestimmungen an Beispielen erläutern¹⁾.

Die höchste zulässige Belastung des Zählers sei 3000 Watt. Liegt der Konsum zwischen 300 Watt und 3000 Watt, beträgt er z. B. 500 Watt, so setzt sich der Fehler oder die Abweichung der Angabe des Zählers nach oben (+) oder nach unten (–) von dem wirklichen Verbrauche (500 Watt) zusammen aus 0,6 % von 3000, also 18 Watt, und 6 % von 500 Watt = 30 Watt. Der Fehler darf also 48 Watt betragen, d. h. 9,6 % des momentanen Verbrauchs. Ist die Belastung des Zählers gleich der Höchstbelastung, so darf der Fehler nicht mehr als $\pm 6,6\%$ von 3000 Watt betragen.

Die Belastung betrage $\frac{1}{25}$ des Höchstverbrauchs = $\frac{1}{25} \cdot 3000 = 120$ Watt. Der Fehler darf dann „nicht mehr“ als $\pm 2\%$ von 3000 Watt, d. h. nicht mehr als 60 Watt betragen oder 50 % des augenblicklichen Verbrauchs.

Aus diesen Beispielen ersieht man, daß die gesetzlichen Bestimmungen sehr tolerant sind. Die meisten Firmen garantieren übrigens für ihre Zähler eine größere Genauigkeit der Messung als die zitierten Vorschriften verlangen.

Zur Verhütung des Leerlaufs, d. h. Drehung der beweglichen Teile

¹⁾ G.-Z. 3. 1901, S. 532.

(also Registrierung von elektrischer Energie), wenn der Konsument keinen Strom verbraucht, sollten besondere Vorrichtungen getroffen werden. Bei manchen Zählern läßt sich diese Anforderung nicht realisieren. Für diesen Fall wird in den gesetzlichen Bestimmungen vorgesehen, daß der Vorlauf oder Rücklauf nicht mehr als $\frac{1}{2}\%$ des Höchstverbrauchs betragen darf.

Wenn bei Wechselstrom eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung nicht besteht (Glimmlampenbeleuchtung), so gelten dieselben Bestimmungen wie für Gleichstrom. Ist der Strom gegen die Spannung verschoben, so darf der Fehler größer sein als bei Gleichstrom; ist der Leistungsfaktor gleich $\cos \varphi$, so darf der Fehler so viel Prozent der jeweiligen Belastung mehr betragen (im Vergleich zu Gleichstrom) wie durch $2 \cdot \operatorname{tg} \varphi$ angegeben wird; ist z. B. $\varphi = 45^\circ$, so darf der Fehler 2% größer sein, da $\operatorname{tg} 45^\circ = 1$.

Zu den zahlreichen, bis jetzt aufgezählten Anforderungen, die man an Zähler stellt, kommen noch folgende hinzu. Es muß dafür gesorgt werden, daß der Konsument den Zähler nicht beeinflussen, z. B. verhindern kann, daß der ganze Strom durch die Hauptspule geht. Der Zähler muß unempfindlich gegen äußere magnetische Felder sein, wie sie durch Eisen, Magnete oder Starkströme erzeugt werden. In vielen Fällen ist es von Wichtigkeit, daß der Zähler auf Stromänderungen schnell reagiert (geringes Gewicht des beweglichen Systems). Dies gilt besonders für Zähler, die nur von Zeit zu Zeit registrieren; denn bei diesen können sich, wenn die Belastung plötzlich und stark schwankt (Theaterbeleuchtung, Elektromotoren), größere Abweichungen vom wirklichen Verbräuche ergeben. Der Zähler muß stärkere Überlastungen vertragen können, und endlich dürfen Kurzschlüsse nur einen geringen Einfluß ausüben.

Die Einteilung der Elektrizitätszähler nach dem Zwecke, dem sie dienen (Zeitähler, Amperestundenzähler, Wattstundenzähler), ist schon besprochen worden. Ferner kann man die Zähler nach der Art des Stromes, der gemessen wird, in Gleichstrom-, Wechselstrom- und Drehstromzähler einteilen. Diese Trennung ist aber keine scharfe, weil viele Gleichstromzähler ohne weiteres oder nach geringfügigen Abänderungen auch für die Messung von Wechselströmen benutzt werden können. Mit Rücksicht auf die zur Verwendung kommenden mechanischen Hilfsmittel lassen sich die jetzt gebräuchlichen Zähler in Uhren- und Motorzähler einteilen. Wählt man als Einteilungsprinzip die Wirkung, die der elektrische Strom ausübt, so kann man unterscheiden zwischen elektrochemischen Zählern¹⁾, zwischen Zählern, bei denen die anziehende oder abstoßende Kraft des in einer festen Spule fließenden Stromes auf den in eine oder mehrere bewegliche Spulen eingeleiteten Strom als Antriebskraft benutzt wird (elektromagnetische Zähler, Motorzähler), und zwischen solchen, bei denen die Kraft, die ein Drehfeld auf einen beweglichen Leiter ausübt, ein Maß für den Elektrizitätsverbrauch ist.

¹⁾ Nur für Gleichstrom, werden bei uns kaum noch benutzt; sie basieren auf dem Faradayschen Gesetze über die Elektrolyse.

Die Zeitzähler bestehen aus einem Uhrwerke, das bei Stromdurchgang ausgelöst wird, oder aus einem Zählwerke, das durch den Strom in Bewegung gesetzt wird. Eine sehr einfache Konstruktion ist in Fig. 249 abgebildet. U ist eine schwere Uhrrose, wie sie in Uhren statt des Pendels benutzt wird. An der Peripherie der Uhrrose ist ein Anker a aus weichem Eisen befestigt, auf den ein Elektromagnet einwirkt. Wird der Schalter S geschlossen, so fließt ein Strom durch den Vorschaltwiderstand und die Elektromagnetwicklung, und die Pole ziehen den Anker an. Sobald aber a in der Nähe der Pole ist, wird der Elektromagnet kurz geschlossen und verliert in diesem Augenblicke seinen Magnetismus. Die Uhrrose schwingt infolge ihrer Trägheit weiter, kehrt um, und das Spiel wiederholt sich. Da der Stromkreis des Elektromagneten selbst nicht unterbrochen wird, werden die Unterbrechungsfunken vermieden, so daß die Kontakte geschont werden.

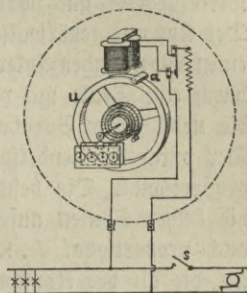


Fig. 249.

Infolge zu hoher Spannung kann die Schwingungsweite und daher auch die Schwingungsdauer zu groß werden, was falsches Registrieren zur Folge hat, da jeder normalen Schwingung ein Vorrücken der Zeiger um einen bestimmten Betrag entspricht. Um das zu verhüten, ist eine besondere Vorrichtung angebracht, die ein ein- oder mehrmaliges Ausbleiben des magnetischen Anzuges bewirkt. Die Elektromagnetspule bleibt also so lange kurzgeschlossen, bis die Schwingungsdauer ihren normalen Betrag hat.

Der Kron-Zähler (Uhrenzähler). An dem unteren Ende eines Uhrpendels ist ein Magnet m befestigt (s. Fig. 250). Befindet sich unterhalb m eine Drahtspirale, deren Windungen horizontal liegen, so wirkt, wenn ein elektrischer Strom durch die Spule fließt, außer der Schwerkraft (und dem Erdmagnetismus) noch die anziehende oder abstößende Kraft der Spule auf den Magnet. Das Pendel schwingt also schneller oder langsamer, wenn ein Strom durch die Spule fließt. Man wählt die Stromrichtung so, daß das Pendel schneller schwingt, seine Schwingungszahl also größer wird, als wenn die Spule stromlos ist. Das linke Pendel trägt an seinem unteren Ende ein Messinggewicht und wird durch den Strom nicht beeinflusst. Nennen wir die Schwingungszahlen des linken und rechten Pendels N und N', so ist $N' = N$, wenn $J = 0$. Ist aber $J > 0$, so ist $N' > N$, und man kann es so einrichten, daß $N' - N$ proportional J gesetzt werden darf. Die Bewegung der Pendel wird auf ein gemeinsames Zählwerk übertragen und zwar in der Weise, daß beide Pendel

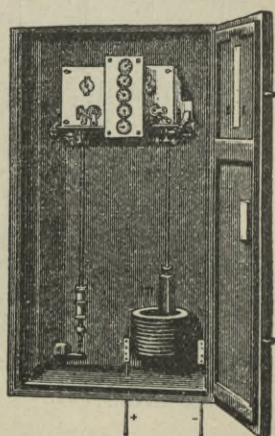


Fig. 250.

das Zählwerk im entgegengesetzten Sinne beeinflussen. Haben beide Pendel dieselbe Schwingungszahl, so bleibt das Zählwerk ruhig stehen; wird aber das rechte Pendel durch den Strom beschleunigt, so wird die Achse des Zählwerks gedreht, und zwar um so schneller, je größer $N'-N$, bzw. je größer J ist. Der Apparat gehört also zu den Amperestundenzählern. Soll das Instrument in einen Wattstundenzähler umgeändert werden, so muß der Magnet m in Fig. 250 durch eine Spule mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes ersetzt werden, die nebst einem Vorschaltwiderstande im Nebenschlusse liegt (wie ein Voltmeter). Der durch die Pendelspule fließende Strom i ist also stets der Netzspannung E proportional. Die beschleunigende Kraft ist die elektrodynamische Wirkung, die die beiden Spulen aufeinander ausüben, ist also proportional $J \cdot i$ und mithin auch proportional $J \cdot E$. $N'-N$ hängt also jetzt von der elektrischen Energie ab, die an der Konsumstelle verbraucht wird.

Die alten Aronzähler litten an verschiedenen Übelständen, zu denen auch das Aufziehen der beiden Uhrwerke gehörte. Die Mängel sind bei den vollkommensten Uhrenzählern beseitigt. Um eine möglichst große Differenz

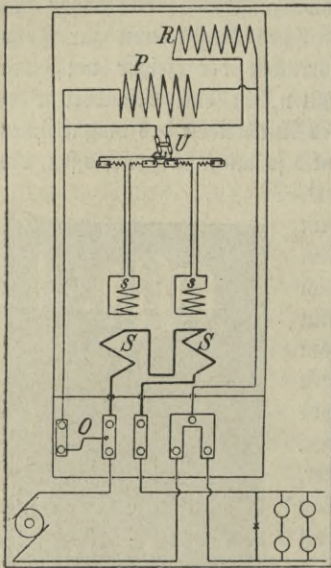


Fig. 251.

der Schwingungszahlen zu erzielen, werden zunächst kurze und leichte Pendel (von etwa 10 cm Länge) benutzt. Jedes Pendel macht normal zirka 12 000 Schwingungen in der Stunde und bei normaler Belastung zirka 2500 Schwingungen pro Stunde mehr bzw. weniger. Der Hauptstrom fließt durch zwei hintereinander geschaltete Spulen S (s. Fig. 251), die aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes bestehen; ein Nebstrom geht durch die Pendelspulen s und den Widerstand R . Die Stromrichtungen sind so gewählt, daß der Gang des einen Pendels s beschleunigt und der des anderen verzögert wird. Die Differenz der Schwingungszahlen ist der verbrauchten elektrischen Energie proportional. Jedes Pendel wirkt auf ein Uhrwerk; diese beiden Uhrwerke arbeiten so auf ein drittes Werk, das Differentialwerk, daß letzteres die Differenz der Schwingungszahlen der beiden Pendel auf das Zählwerk überträgt. Von den fünf Zifferblättern zeigt

das erste die Giner (Hektowattstunden), das folgende die Zehner usw. an. Der zweite Zeiger muß also in der Zeit um einen Teilstrich vorrücken, in der der erste einen ganzen Umlauf macht.

Das Aufziehen der Uhrwerke besorgt der elektrische Strom selbst. Der wichtigste Teil des Aufzuges ist ein Elektromagnet mit der Spule P , der auf einen schwingenden Anker wirkt und von Zeit zu Zeit eingeschaltet wird.

Wenn in stromlosem Zustande die beiden Pendel einen Gangunterschied aufweisen, so wird der Zähler, auch wenn der Konsument keinen Strom verbraucht, registrieren und den wirklichen Stromverbrauch falsch messen. Um nun Gangfehler zu eliminieren, ist eine Umschaltvorrichtung (in der schematischen Figur mit U bezeichnet) vorhanden, durch die in Perioden von ungefähr 20 Sekunden die Drehungsrichtung des Zählwerks abwechselnd umgekehrt wird. Damit nun bei Stromdurchgang der Einfluß der Umkehrung keinen Einfluß ausübt, wird gleichzeitig der durch die beiden Pendelspulen fließende Strom umgekehrt. Hatte also vor der Umschaltung das linke Pendel einen beschleunigten und das rechte Pendel einen verzögerten Gang, so hat nach der Umkehrung das linke Pendel einen verzögerten und das rechte einen beschleunigten Gang. Der Zähler registriert daher den Stromverbrauch in einem Sinne ¹⁾.

Soll der beschriebene Zähler in einer Dreileiteranlage Verwendung finden, so wird jede der beiden Hauptstromspulen in einen Außenleiter eingeschaltet; natürlich werden die Stromrichtungen auch jetzt so gewählt, daß die beiden Pendel im entgegengesetzten Sinne beeinflusst werden.

Die Zähler können ebensogut für Gleichstrom wie für Wechselstrom Verwendung finden. Denn bei Wechselstrom ändert sich die Richtung des Stromes in der Hauptstromspule und in der zugehörigen Nebenschlußspule gleichzeitig. Wenn also ein Pendel bei einer bestimmten Stromrichtung Voreilung hat, so eilt es auch vor, wenn sich der Strom umgekehrt hat.

Die Motorzähler (auch Thomson-Zähler genannt) sind Wattstundenzähler. Sie zeichnen sich durch große Einfachheit der Konstruktion aus und haben, da sie allen Anforderungen genügen, große Verbreitung gefunden. Der Hauptteil des Zählers ist ein kleiner Elektromotor, bei dessen Aufbau man kein Eisen verwendet, damit die Angaben des Zählers bei abnehmendem und wachsendem Strome nicht voneinander abweichen (s. Hysteresis). Der Motor besteht aus einer oder mehreren (gewöhnlich zwei) vom Hauptstrome durchflossenen, aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes bestehenden Spulen (F in Fig. 252), die dieselbe Rolle spielen wie die Feldmagnete eines Elektromotors, und einem gewöhnlich mit Trommelwicklung versehenen leichten Anker. Ein solcher ist in Fig. 253 besonders dargestellt (Union, Elektr.-Ges.). Der

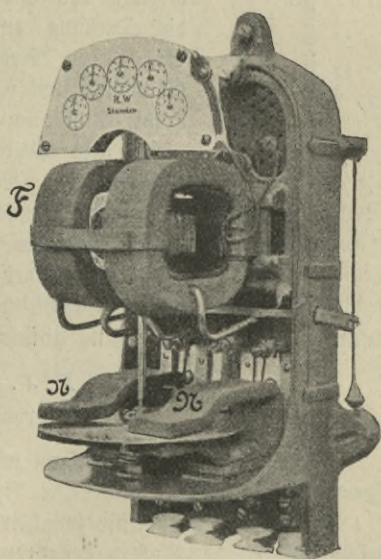


Fig. 252.

¹⁾ Näheres siehe G.-L. 3. 1897, Nr. 26.

Kollektor *c* wird aus einzelnen Silberstäbchen zusammengesetzt, weil das Dryd des Silbers ungefähr dasselbe Leitungsvermögen hat wie das Metall selbst. Auf dem Kollektor schleifen Bronzebürsten mit Silbereinlage. Die Trommelwicklung wird aus sehr dünnem Drahte hergestellt und liegt mit einem vorgeschalteten sehr großen Widerstande im Nebenschlusse; sie wird also stets von einem der Spannung *E* proportionalen schwachen Strome durchflossen (vergl. das Schaltungsschema Fig. 254). Wird der Strom *J* verbraucht, so fließt dieser durch die Feldspulen, und der Anker gerät in Rotation.

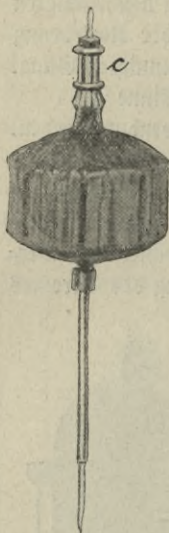


Fig. 253.

Wird der Strom *J* verbraucht, so fließt dieser durch die Feldspulen, und der Anker gerät in Rotation. Soll die Drehungsgeschwindigkeit des Ankers bei verschiedener Belastung dem Stromkonsum proportional sein, so muß dem Motor Gelegenheit gegeben werden Arbeit zu leisten. Um dies zu erreichen, befindet sich auf der Motorachse eine Kupferscheibe, die sich durch magnetische Felder bewegt, wenn der Anker rotiert (Dämpfung). Die Magnetfelder werden bei dem in Fig. 252 abgebildeten Zähler durch die Pole zweier Hufeisenmagnete *N* gebildet. Bei der Rotation der Scheibe entstehen in ihr Wirbelströme, die eine solche Richtung haben, daß sie die Bewegung der Scheibe zu hemmen suchen. Die Kraft, die die Drehung zu verhindern sucht, ist proportional der Stärke der Wirbelströme, und diese ist proportional der Geschwindigkeit *v*, mit der sich die Scheibe bezw. der Anker dreht, kann also gleich $K \cdot v$ gesetzt werden. Da die Arbeit gleich dem Produkte aus Kraft und Weg ist, so ist die Leistung des Motors proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit ($K v \times v = K \cdot v^2$). Andererseits ist die den Anker treibende Kraft proportional *J* und *i*, oder da *i* proportional der Spannung, proportional *E* · *J*; mithin

erhält man für die Arbeit auch den Ausdruck: $C \cdot (E \cdot J) v$. Es besteht also, wenn man von der Reibung absieht, die Gleichung

$$C \cdot E \cdot J \cdot v = K \cdot v^2 \text{ oder}$$

$$E \cdot J \text{ proportional } v.$$

Die Drehung des Ankers wird durch eine Schnecke auf das Zählwerk übertragen.

Die Proportionalität zwischen der elektrischen Energie und der Drehungsgeschwindigkeit des Ankers besteht nur, wenn man die Reibung vernachlässigen kann. Dieses wird aber umso weniger statthast sein, je geringer die Belastung im Vergleiche zur Höchstbelastung ist. Um den Einfluß der Reibung an den Bürsten und in den Lagern, sowie in dem Zählwerke zu kompensieren, werden die Feldspulen mit einer zusätzlichen Wicklung („Compoundwicklung“) versehen, die mit dem Anker in Serie geschaltet ist und so abgeglichen oder eingestellt wird, daß die hinzukommende elektrodynamische Kraft zwischen dem Strome in der Hilfsspule und dem Ankerstrome den Reibungswiderständen

gleichkommt. Der Zähler läuft infolge dieser Anordnung schon bei sehr geringem Verbrauchsstrom an.

Bei der Eichung wird die Umlaufgeschwindigkeit des Ankers so reguliert, daß man auf den Zifferblättern die verbrauchte elektrische Energie direkt ablesen kann, eine Multiplikation mit einer Konstanten also nicht erforderlich ist. Es geschieht dies in der Weise, daß man die Stärke der Dämpfung durch Verschieben der permanenten Magnete N variiert.

Da der Thomson-Zähler nach dem Prinzip des Wattmeters gebaut ist, so kann er sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom beliebiger Wellenform und Periodenzahl benutzt werden.

Die Schaltung des Zählers kann aus den schematischen Fig. 254 und 255 ersehen werden. In diesen Figuren sind die Feldspulen mit S und die Hilfspulen mit s bezeichnet. Die zweite Figur bezieht sich auf ein Dreileitersystem.

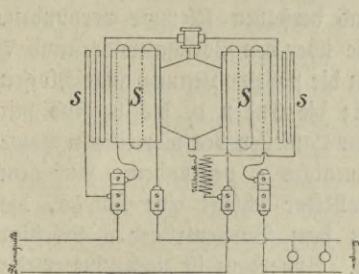


Fig. 254.

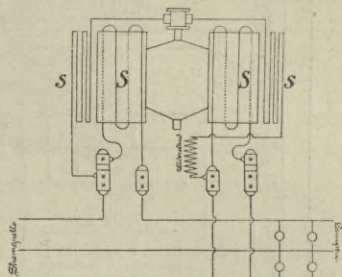


Fig. 255.

Der Zähler der Firma G. Hummel unterscheidet sich von dem Thomson-Zähler dadurch, daß er statt des gewöhnlichen Trommelankers einen Anker mit offener Wicklung besitzt, wie sie die Thomson-Houston-Bogenlichtmaschinen haben (s. S. 157). Der Anker kann bei dieser Schaltung, da eine geringere Windungszahl genügt, leichter sein; ferner ist es möglich die Zahl der Kollektorlamellen auf drei zu reduzieren, so daß der Durchmesser des Kollektors kleiner wird (Verringerung der Reibung an den Bürsten).

Die Firma Hartmann & Braun verwendet bei ihren Motorzählern einen dreispuligen Anker (s. Fig. 256, in der w_1, w_2, w_3 Vorschaltwiderstände und a, b, c die drei Ankerwindungen sind). Die Stromzufuhr erfolgt durch die Achse des Ankers, so daß nur eine Bürste erforderlich ist. Auf diese Weise wird der Reibungsfehler so sehr verkleinert, daß man ohne Zusatzspule (Compoundwicklung) auskommt und einen in der Konstruktion sehr einfachen Zähler erhält.

Von derselben Firma wird ein Amperestundenzähler hergestellt, bei dem zwei mit ungleichnamigen Polen nahe übereinander gestellte Hufeisenmagnete das feste Feld liefern, während

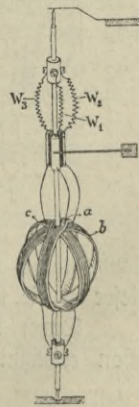


Fig. 256.

der Anker aus Flachspulen besteht; diese sind auf einer dünnen Aluminiumscheibe befestigt und drehen sich in dem schmalen Zwischenraume zwischen den Magnetpolen und der Scheibe¹⁾.

Der Flügelwattstundenzähler der Siemens-Schuckertwerke besteht aus zwei Hauptstromspulen H (Fig. 257 und 258), die in je einen Leiter,

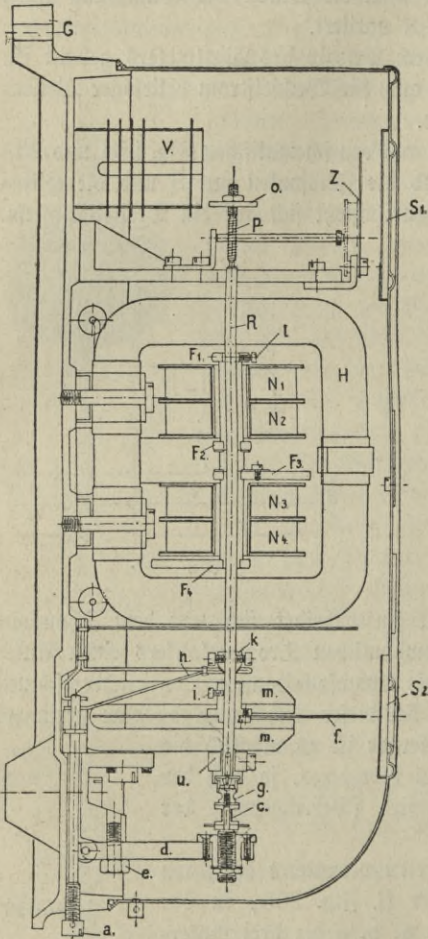


Fig. 257.

Kommutator schleift, nach dem Schleifringe, in die zweite Bürste und aus dieser in die negative Leitung.

Durch den Hohlraum der Nebenschlußspulen geht eine vertikale (eben schon erwähnte) Achse R, über die zwei Eisenrohre geschoben sind. Jedes

bei Dreileiteranlagen in je einen Außenleiter eingeschaltet werden, vier Nebenschlußspulen N_1 bis N_4 , dem Kollektor nebst Bürsten, den Eisenflügeln, der Dämpfung und dem Zählwerke. Nennen wir die vier Anfänge der Nebenschlußspulen a_1 bis a_4 und die vier Enden b_1 bis b_4 , so sind a_1 bis a_4 mit ein und derselben Klemme verbunden, die über den Vorschaltwiderstand V an die positive Leitung angeschlossen ist; die Enden b_1 bis b_4 sind mit den Lamellen des vierteiligen Kommutators c verbunden. Auf dem Kollektor schleift eine Bürste, die an dem Bürstenträger u befestigt ist. Außerdem ist noch eine zweite Bürste angeordnet, die auf einem Ringe g schleift. Diese zweite Bürste ist mit der negativen Leitung verbunden. Kollektor und Schleifring sind feststehend angeordnet, während sich die Bürsten mit der Achse R drehen. Durch die beschriebene Anordnung wird erreicht, daß eine Nebenschlußspule nach der anderen vom Strome durchflossen wird. Berührt z. B. die Kommutatorbürste diejenige Lamelle, die mit b_1 verbunden ist, so fließt der Strom aus der positiven Leitung durch V, N_1 , die Bürste, die auf dem

¹⁾ G.-L. 3. 1902, S. 581.

Eisenrohr trägt zwei Eisenflügel (s. Fig. 259); es entstehen so zwei Z-förmige Eisenkörper. Diese werden auf der Achse R so befestigt, daß die vier Flügel F_1 bis F_4 nach den vier Himmelsrichtungen orientiert sind. Liegen also F_3 und F_4 in der Zeichenebene, so stehen F_1 und F_2 senkrecht zu ihr (oberhalb und unterhalb).

Es fließe nun der Strom zuerst durch die Spule N_1 und magnetisiere dadurch das Eisenstück F_1 , F_2 , so daß F_1 ein Südpol und F_2 ein Nordpol wird. Das von den Hauptstromspulen erzeugte Feld, dessen Achse in horizontaler Richtung verläuft, übt auf das erwähnte Flügelpaar ein Drehmoment aus, so daß sich die Flügel in die Achse des magnetischen Feldes einzustellen suchen. Ehe das Flügelpaar die erwähnte Lage eingenommen hat, schaltet der

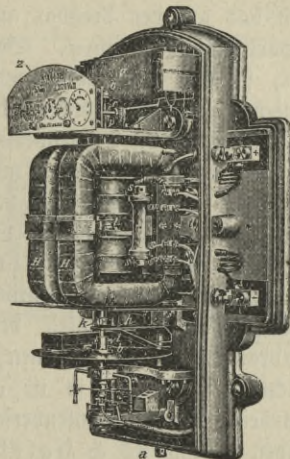


Fig. 258.

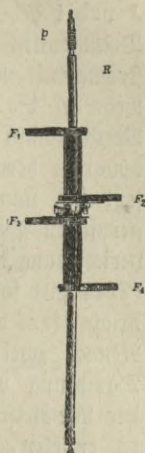


Fig. 259.

Kommutator den Strom auf die Spule N_4 um; jetzt wird das untere Flügelpaar magnetisiert, und es erfolgt eine weitere Drehung um 90° . Hierauf werden der Reihe nach die Spulen N_2 und N_3 vom Strome durchflossen. Die von dem Motor entwickelte Energie wird von der Dämpfung, bestehend aus einer Kupferscheibe k und zwei permanenten Stahlmagneten m aufgenommen.

Um die Funkenbildung am Kommutator zu vermeiden, ist parallel zu jeder Nebenschlußspule ein induktionsfreier Widerstand gelegt, in dem der entstehende Öffnungsextrastrom verläuft.

Wechselstromzähler nach dem Ferraris-Prinzip. Bei den Motorzählern sind Bürsten erforderlich, und es läßt sich nicht vermeiden, daß sich die Reibung und mit ihr die Konstante des Zählers im Laufe der Zeit ändert. Durch die Reibung wird ferner das Anlaufen des Zählers bei geringer Belastung erschwert. Die hierdurch bedingten Komplikationen fallen fort, wenn die Drehkraft eines Drehfeldes auf einen Rotationskörper der Konstruktion des Elektrizitätszählers zugrunde gelegt wird. Der bewegliche Teil solcher Zähler ist von der denkbar einfachsten Form; er besteht aus einer Scheibe oder einem Zylinder oder einem glockenförmigen Körper aus Metall, der in Steinen sehr empfindlich gelagert ist und ein Anlaufen bei sehr geringer Belastung ermöglicht.

Bei den Zählern für einphasigen Wechselstrom wird das Drehfeld durch zwei Magnetssysteme hervorgebracht, deren Achsen sich unter einem rechten Winkel schneiden. Die Hauptstromwicklung besteht aus nur wenigen Windungen eines dicken Drahtes, die Wicklung der Nebenschlußmagnete aus vielen Windungen feinen Drahtes. Da die Selbstinduktion in der ersteren Wicklung

klein und in der letzteren groß ist, so sind die erzeugten magnetischen Felder zeitlich gegeneinander verschoben. Infolgedessen erzeugen die beiden Magnetssysteme ein Drehfeld (ähnlich wie bei Zweiphasenströmen).

Sind J und i die Ströme und beträgt die Phasenverschiebung zwischen J und i φ° , so ist das auf den drehbar angeordneten Metallkörper ausgeübte Drehmoment proportional $J \cdot i \cdot \sin \varphi$. Soll aber der Zähler die Wechselstromarbeit messen, so muß das Drehmoment proportional $E \cdot J \cdot \cos \psi$ sein, wenn ψ die Phasenverschiebung zwischen der Betriebsspannung E und dem Verbrauchsstrome J ist (also die Phasenverschiebung, die durch die Verbrauchsvorrichtungen hervorgerufen wird). Die eben mit φ bezeichnete Phasenverschiebung setzt sich nun aus dem Summanden ψ und der im Zähler selbst hervorgerufenen Phasenverschiebung zusammen. Sorgt man dafür, daß die Eigenverschiebung des Zählers gleich 90° ist, so ist $\sin \varphi = \sin(90 + \psi) = \cos \psi$. (Dies gilt sowohl für positiven wie negativen Wert von ψ .) In dem Ausdruck für die Drehungsgeschwindigkeit des Rotationskörpers v stehen im Nenner zwei quadratische Glieder; können diese im Vergleich zur Größe der Dämpfung vernachlässigt werden, so ist v proportional $E \cdot J \cdot \cos \psi$ oder der Wechselstromarbeit. Um die Phasenverschiebung von 90° zwischen J und i zu erzielen, wenden Siemens & Halske eine von Görgeß angegebene Brückenschaltung in etwas modifizierter Form an; vor die Brücke wird eine Drosselspule geschaltet¹⁾. Die Firma Hartmann & Braun benutzt eine Schaltung, bei der ein Transformator und ein Widerstand Verwendung finden.

Siemens-Schuckert wenden bei ihren nach dem Ferraris'schen Prinzip gebauten Zählern eine Einrichtung an, die den Zähler gegen äußere Erschütterungen unempfindlich macht und zu einer bedeutenden Verringerung der Lagerreibung führt. Das untere Ende der vertikalen Achse ruht auf einer Blattfeder (einem federnden Metallstreifen), an deren unteren Seite ein kleiner Eisenanker befestigt ist. Der Anker schwebt oberhalb eines kleinen Elektromagnets, der durch den Wechselstrom erregt wird, und vibriert bei Stromdurchgang, indem er in schnellem Wechsel angezogen und abgestoßen wird. Diese Vibrationen werden auf die Feder und von dieser auf die Achse übertragen, so daß die Achse gewissermaßen schwebt. Diese Einrichtung entspricht der früher erwähnten Hilfspule, die zur Kompensierung der Reibung dient.

Der Zähler von Blathy, dessen Schema in Fig. 260 abgebildet ist, hat folgende Konstruktion. Eine Aluminiumscheibe s , die um die Achse A leicht drehbar angeordnet ist, wird von einem Hauptstromelektromagnet H und einem Nebenschlußelektromagnet N umfaßt. Bei Stromentnahme an der Konsumstelle rotiert die Scheibe. Dieser Drehung wirkt der permanente Magnet M in bekannter Weise entgegen. Die Drehung wird durch ein Schneckenrad auf das Zählwerk übertragen. Wird der Hauptstrom ausgeschaltet, so übt das Nebenschlußfeld auf den rotierenden Teil ein kleines Drehmoment aus, so daß der Zähler (auch infolge der Trägheit) einen Leerlauf hat. Damit der Zähler,

¹⁾ Näheres siehe G.-Z. 3. 1901, S. 657.

sobald die Hauptspule stromlos wird, nach kurzer Zeit stehen bleibt, werden in der Scheibe an zwei gegenüberliegenden Stellen Löcher oder Schlitze angebracht. Kommen während der Drehung der Scheibe die Ausschnitte in den Bereich des Nebenschlußfeldes, so haben die in ihr erzeugten Ströme ein

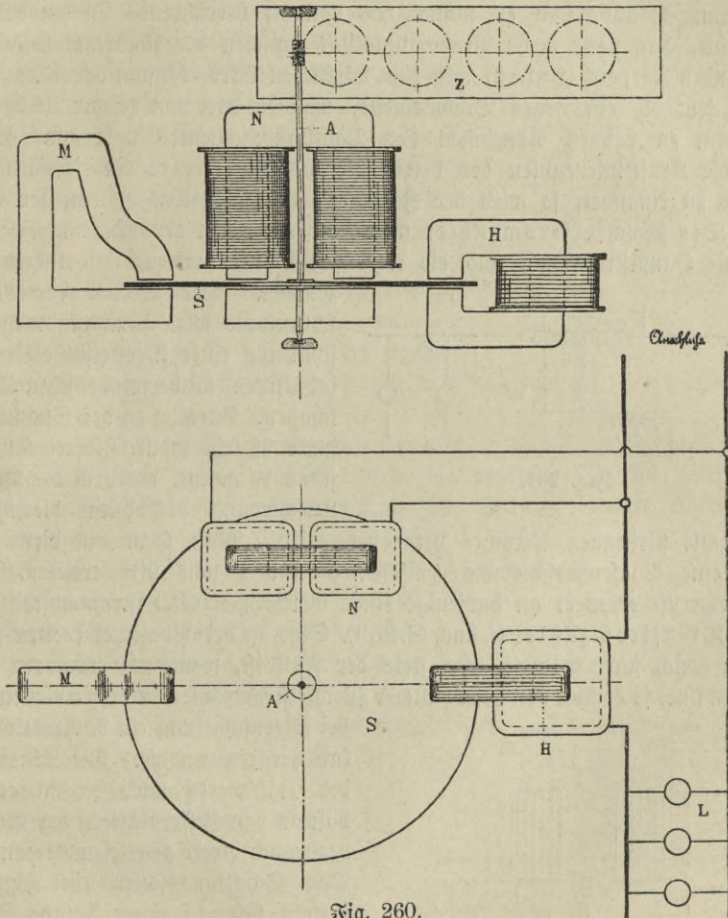


Fig. 260.

Minimum. Ist die Scheibe in diese Stellung gekommen, so ist sie nach der einen oder anderen Seite nur mit Aufwand einer gewissen Kraft drehbar; sie wird also festgehalten.

Zähler von Raab. Um die Angaben des Wechselstromzählers von der Phasenverschiebung in den Stromverbrauchern unabhängig zu machen, läßt Raab den Hauptstrom mit zwei Nebenschlußströmen zusammenwirken, von denen der erste eine möglichst große, der zweite eine möglichst kleine Verschiebung gegen die Spannung hat. Zu dem Zwecke wird vor die eine Neben-

schlußspule (N_1) eine Drosselspule und vor die andere, N_2 , ein induktionsfreier Widerstand geschaltet. Bei Glühlampenbeleuchtung wird das Drehmoment fast nur von dem Hauptstromfelde und dem Felde von N_1 hervorgerufen; die beiden Felde sind dann um nahezu 90° gegeneinander verschoben. Kommen zu den Lampen Motoren, so tritt eine Phasenverschiebung zwischen J und der Spannung E auf, und es nimmt das von N_1 herrührende Drehmoment so rasch ab, daß nicht mehr Proportionalität zwischen der Umdrehungszahl des rotierenden Körpers (Ankers) und dem wirklichen Stromkonsum besteht. Jedoch liefert jetzt N_2 ein neues Drehmoment, welches das von N_1 unterstützt und so einem zu raschen Abnehmen des Totaldrehmomentes vorbeugt. Bringt man die Kraftlinienzahlen der beiden Nebenschlußfelder in ein richtiges Verhältnis zu einander, so wird der Zähler zu einem exakten Wattmesser.

Der Wechselstromzähler von Hummel. In dem Schema Fig. 261 sind die Hauptstromspule und die Nebenschlußspule senkrecht zu einander gezeichnet. Der Strom der Nebenschlußspule wird zunächst durch Vorschaltung einer Drosselspule D (eines induktiven Widerstandes) stark verschoben. Parallel zu der Spannungsspule ist ein induktionsfreier Widerstand W gelegt, wodurch die Phasenverschiebung des durch die Neben-

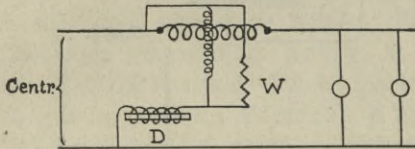


Fig. 261.

schlußspule fließenden Stromes vergrößert wird. Man kann auf diese Weise leicht eine Phasenverschiebung zwischen J und i von 90° erzielen. Das Magnetgerüst erinnert an dasjenige einer vierpoligen Gleichstrommaschine.

Drehstromzähler (s. auch S. 259). Sind die drei Phasen einer Drehstromanlage gleich stark belastet, was stets der Fall ist, wenn nur Motoren angeschlossen sind, so genügt ein gewöhnlicher Wechselstromzähler, in dessen Nebenschluß

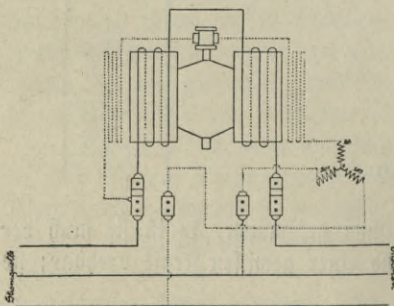


Fig. 262.

bei Sternschaltung ein Nullpunkt künstlich hergestellt wird. Die Übersetzung des Zählwerks wird so eingerichtet, daß an den Zifferblättern der Gesamtverbrauch direkt abgelesen werden kann. Das Schaltungschema in Fig. 262 bezieht sich auf einen Zähler System Thomson. Bei ungleich belasteten Phasen kommt man, wie eine rechnerische Überlegung zeigt (vergl. S. 260), mit zwei normalen Apparaten aus. Die algebraische Summe der beiden Zählerangaben ergibt den Gesamtverbrauch.

Es ist jedoch einfacher, wenn die Messung in einem Zähler erfolgt, so daß man die Ablesung nur an einem Zifferblatte vorzunehmen hat. Der Thomson-Zähler für Drehstrom besteht aus zwei auf derselben Achse sitzenden Ankers;

zu jedem Anker gehören zwei Feldspulen (s. Fig. 263). Der Hauptstrom des einen Leiters durchfließt eine obere und eine untere Spule, der Hauptstrom des zweiten Leiters geht durch die beiden anderen Feldspulen. Vom dritten Leiter zweigt sich eine Nebenschlußleitung ab, führt zu einem Widerstande w_1 und teilt sich hinter diesem. Die beiden Zweige führen zu den Kollektoren der beiden Anker und von diesen durch zwei weitere Widerstände zu den beiden anderen Leitern. Nennen wir also die Leitungen in Fig. 263 oben anfangend L_1, L_2, L_3 und die Ströme in diesen Leitungen i_1, i_2, i_3 , so kommen i_1 und i_2 als Hauptströme zur Geltung; die obere Ankerwicklung ist mit L_3 und L_1 , die untere mit L_3 und L_2 verbunden. Die momentanen Ankerströme sind also proportional den augenblicklichen Spannungen e_2 und e_1 . Die Schaltung entspricht mithin der früher für Dreieck- und Sternschaltung abgeleiteten Gleichung: Drehstromarbeit = $e_2 i_1 - e_1 i_2$.

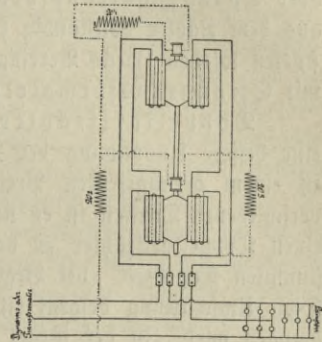


Fig. 263.

In Drehstromanlagen werden zuweilen vier Leitungen, drei Hauptleitungen und die Nullleitung verlegt, wovon letztere die neutralen Punkte miteinander verbindet. Für dieses Verteilungssystem hat Aron¹⁾ einen Uhrenzähler konstruiert, der eine solche Anordnung hat, daß er bei Stern- und Dreieckschaltung richtig mißt, und zwar auch dann noch, wenn die Phasen beliebig verschieden belastet sind. Nennt man die Ströme in den drei Hauptleitungen, die in unser Fig. 264 mit A, B, C bezeichnet sind, J_a, J_b, J_c und die Spannung

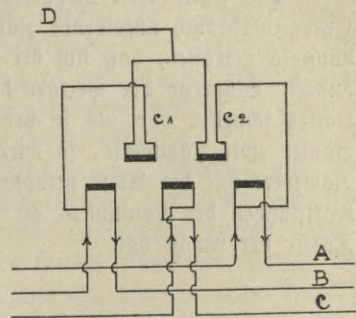


Fig. 264.

zwischen der Hauptleitung A und der vierten Leitung e_1 ,

zwischen der Hauptleitung B und der vierten Leitung e_2 ,

so ist die Arbeit = $J_a \cdot e_1 + J_b \cdot e_2 - J_c \cdot (e_1 + e_2)$.

Dieser Gleichung entsprechend enthält der Zähler (Fig. 264) drei Stromrollen und zwei die Spannungsrollen tragende Pendel. Die Pendel sind so aufgehängt, daß jedes durch zwei Stromrollen beeinflusst wird. Diejenige Spannungsspule, auf die die Ströme J_a und J_c einwirken, wird von einem e_1 , der Spannung zwischen dem Nullleiter D und der Leitung A, proportionalen Strome durchflossen, und diejenige, die von den Strömen J_b und J_c beeinflusst wird, mißt e_2 . Der Strom J_c , der auf die beiden Spannungsrollen ein-

¹⁾ G.-T. 3. 1901, S. 215.

wirkt, wird, weil das Vorzeichen des letzten Gliedes unserer Gleichung negativ ist, im entgegengesetzten Sinne geführt wie J_a und J_b .

Wechselstromzählern für hohe Spannungen werden Zusatzdrosselspulen oder Spannungstransformatoren vorgeschaltet, damit die Hochspannung aus dem Zähler vollständig ferngehalten wird. Zähler für sehr hohe Stromstärken werden zwecks Verringerung des durch den Zähler fließenden Stromes mit Stromtransformatoren versehen.

Doppeltarifzähler. Viele Elektrizitätswerke geben am Tage, um eine bessere Ausnutzung der Maschinen herbeizuführen, die elektrische Energie zu einem herabgesetzten Preise ab. Bei der Abgabe von Strom zu zwei verschiedenen Tarifen ist es notwendig, entweder zwei Zähler aufzustellen oder einen Doppeltarifzähler zu verwenden. In beiden Fällen muß zu einer bestimmten Tageszeit (bei Beginn der Dunkelheit) eine Umschaltung erfolgen. Diese Umschaltung besorgt eine Pendeluhr, die von Hand oder elektrisch aufgezogen wird. In der Regel ist das Zifferblatt der Uhr in 2×12 Stunden eingeteilt, und es sind auf ihm außer dem Zeitzeiger zwei mit den Buchstaben A. h. T. (Anfang hohen Tarifs) und E (Ende) bezeichnete, verstellbare kleine Zeiger angebracht. Durch Verstellen der beiden letzteren Zeiger (Stellzeiger) kann man Anfang und Ende des hohen Tarifs auf eine beliebige Zeit verlegen. Kommt der Zeitzeiger mit einem der Stellzeiger zur Deckung, so wird für kurze Zeit ein neuer Stromkreis geschlossen, durch den ein Elektromagnet (Relais) erregt wird, der die Umschaltung besorgt.

Die eigentlichen Doppeltarifzähler haben entweder ein oder zwei den Energieverbrauch anzeigende Zählwerke. Im ersteren Falle wird die Anordnung so getroffen, daß sich bei jeder Umschaltung die Konstante des Zählers ändert. Während der Periode des hohen Tarifs rücken die Zeiger des Zählwerkes schneller vor als in der Periode des niedrigen Tarifs. Enthält der Zähler zwei Zählwerke, so wird bei der Umschaltung das obere oder untere Zählwerk mit der Achse gekuppelt, so daß man erkennen kann, wieviel Kilowattstunden der Konsument zu dem einen und wieviel er zu dem anderen Tarife verbraucht hat.

Fünfzehntes Kapitel¹.

Projektierung und Ausführung.

Die Grundlage der Projektierung ist der Stromverbrauch, dessen Höhe bezw. Verlauf während eines Winter- und eines Sommertages zuerst festgestellt werden muß. Bei öffentlichen Zentralanlagen geschieht dieses am einfachsten dadurch, daß man den Konsumenten auf Anschlußanlagen zweckentsprechend

¹ Anmerkung. Wenn in diesem Kapitel mehrfach in früheren Abschnitten Mitgeteiltes wiederholt wird, so geschieht dieses in der Absicht, ein möglichst abgerundetes Ganzes zu bieten.

formulierte Anmeldebogen unterbreitet, in die sie ihren Bedarf an Glühlampen, Bogenlampen, Heizkörpern, Elektromotoren zc., ferner die wahrscheinliche tägliche Benutzungsdauer, sowie die maximale Anzahl der voraussichtlich gleichzeitig im Betriebe befindlichen Stromverbraucher einzutragen haben. Aus den erhaltenen Angaben, die, wenn nötig, auf Grund des vorliegenden statistischen Materials zu korrigieren und zu ergänzen sind, wird die Stromverbrauchskurve für den kürzesten Wintertag angenähert festgestellt; aus dieser kann auch die Kurve für den kürzesten Sommertag in einfacher Weise unter Benutzung der Statistik¹⁾ hergeleitet werden. In einzelnen Fällen, z. B. Bahnhofsanlagen, Fabrikzentralen u. dergl., ergeben sich die erforderlichen Unterlagen bezüglich der Beleuchtung einfach und leicht mit genügender Genauigkeit aus den Arbeitszeiten. Inbezug auf den Stromverbrauch der Elektromotoren genügt es, bei kleineren Anlagen zirka 75%, bei großen zirka 50—60% als gleichzeitig arbeitend anzunehmen, falls nicht auch hierüber genauere Angaben erhältlich. Spezialanlagen, wie Bergwerke zc., erfordern meist ein eingehendes Studium zur Feststellung des Kraftbedarfs und seiner Veränderungen; bei solchen Anlagen lassen sich daher allgemein gültige Angaben nicht machen.

Nach der Feststellung des Stromverbrauchsdiagramms und mit Benutzung desselben ist nun die wichtigste Frage der ganzen Projektierung zu entscheiden: Nach welchem Stromsystem muß die Anlage gebaut werden? Bevor wir jedoch dieser Frage näher treten, empfiehlt es sich, uns die wichtigsten Eigentümlichkeiten der verschiedenen Systeme ins Gedächtnis zurückzurufen, wobei wir uns auf den Gleichstrom, den ein- und dreiphasigen Wechselstrom beschränken.

Das elektrische Glühlicht ist indifferent inbezug auf das Stromsystem. Das Bogenlicht dagegen ist bei Gleichstromlampen ein wesentlich ausgiebigeres, insoweit Bodenbeleuchtung in Frage kommt, als bei Wechselstromlampen (vergl. S. 344). Um annähernd gleiche Bodenbeleuchtung zu erhalten, muß man bei Verwendung von Wechselstrombogenlampen die 1,6—1,8fache Energie aufwenden, wie bei Gleichstrombogenlampen. Inbezug auf das Bogenlicht ist daher der Gleichstrom dem Wechselstrom entschieden überlegen. Die neueren Effektbogenlampen und die Dauerbrandlampen werden sowohl für Gleichstrom wie für Wechselstrom gebaut; hierbei treten die Vorzüge des Gleichstromes nicht so in den Vordergrund wie bei den normalen Lampen, zumal die Effektbogenlampen im allgemeinen mehr für die Beleuchtung freier Plätze gebraucht werden, bei denen es auf eine besonders intensive Bodenbeleuchtung nicht so sehr ankommt.

Mit Rücksicht auf die Elektromotoren hat jedes Stromsystem bestimmte Vorzüge, die für seine Wahl bei überwiegendem Stromverbrauche für Kraftzwecke von ausschlaggebender Bedeutung sein können.

Der Gleichstrommotor besitzt vor allen anderen den Vorzug einer weitgehenden Regulierung der Tourenzahl. Diese Regulierung kann auf zweierlei

¹⁾ Vergl. Statistik der Elektrizitätswerke. — Uppenborn, Kalender für Elektrotechniker, u. a.

Weise bewirkt werden, nämlich durch Veränderung der Intensität des magnetischen Feldes und durch Erhöhung bzw. Erniedrigung der Spannung des dem Motor zugeführten Stromes; durch Vereinigung beider Reguliermethoden kann natürlich der Regulierbereich entsprechend vergrößert werden. Die Änderung des magnetischen Feldes gestattet bei normalen Nebenschlußelektromotoren eine Geschwindigkeitsänderung nach oben von etwa 15 %, und bei solchen, die speziell für Tourenregulierung gebaut sind (unter Verwendung entsprechend größerer Maschinenmodelle), eine Änderung der Geschwindigkeit bis auf etwa das vierfache der Grundtourenzahl mit allmählichen (also nicht sprungweise stattfindenden) Übergängen von einer Geschwindigkeit zur anderen; die Leistung des Motors bleibt in diesem Falle bei allen Geschwindigkeiten dieselbe, ohne daß nennenswerte Energieverluste mit der Regulierung verbunden wären (Antrieb von Werkzeugmaschinen zc.). Durch Änderung der Stromspannung, die am einfachsten durch eine Mehrleiteranordnung oder Zwischenschaltung eines Umformers erzielt wird, wenn man energieverzehrende Widerstände vermeiden möchte, läßt sich der Regulierbereich in fast beliebigem Umfange vergrößern; beim Übergange von einer Geschwindigkeit zur anderen ändert sich jedoch in diesem Falle gleichzeitig die Leistung des Nebenschlußmotors (Antrieb von Zeugdruckmaschinen, Papiermaschinen zc.). Es sei besonders hervorgehoben, daß die sämtlichen vorstehenden Änderungen des Betriebszustandes des Nebenschlußmotors vollkommen unabhängig von den Stromerzeugern bewirkt werden, also keinerlei Änderungen des Betriebszustandes der Generatoren bedingen. Der Nebenschlußmotor und in noch höherem Maße der Compoundmotor sind ferner bezüglich ihrer Geschwindigkeit nahezu unabhängig von den Änderungen ihrer Belastungen zwischen Leerlauf und Vollast (Antrieb von Transmissionen für gleichmäßig arbeitende Werkzeugmaschinen).

Der Gleichstrommotor mit Hauptstromwicklung hat folgende Vorzüge: Er vermag bei reduzierter Tourenzahl das Mehrfache des normalen Drehmomentes zu entwickeln, während sich seine Geschwindigkeit mit abnehmender Belastung allmählich bis zur vollen Höhe steigert. Der Hauptstrommotor eignet sich daher in hervorragender Weise zum Betriebe von Zentrifugen, elektrischen Fahrzeugen u. dergl. Ferner kann der Hauptstrommotor ebenso wie der Nebenschlußmotor mittelst der Feldregulierung auf bestimmte Geschwindigkeiten eingestellt werden, was für den Betrieb von Hebezeugen, Schiebebühnen zc. von wesentlicher Bedeutung ist.

Sämtliche Gleichstrommotoren sind endlich reversierbar, d. h. ihre Drehrichtung kann geändert werden (Betrieb von Walzenstraßen, Straßenbahnen zc.). Für den Betrieb in staubiger oder nasser Umgebung werden sie in vollständig geschlossener Ausführung (Kapselmotoren) geliefert. Mit Hilfe des Gleichstrommotors sind wir also imstande, alle Forderungen zu erfüllen, die an den Antrieb mechanischer Vorrichtungen gestellt werden.

Ein Nachteil des Gleichstrommotors ist vielleicht darin zu erblicken, daß er eines Kommutators bedarf. Dieser unterliegt der Abnutzung, er wird bei unsachgemäßer Behandlung leicht defekt und beeinträchtigt deshalb die Sicherheit

des Betriebes; er muß ferner von Zeit zu Zeit abgeschmirgelt, abgedreht und etwas gefettet werden, und die Bürsten sind öfters auf richtige Stellung hin zu kontrollieren. Der Gleichstrommotor bedarf daher inbezug auf Kommutator und Bürsten einer zeitweiligen Überwachung und Bedienung. Ferner kann er als Nebenschluß- und Compoundmotor wegen der Schwierigkeit einer genügenden Isolation der Nebenschlußwindungen und aus anderen Gründen nur bis zu einer Höchstspannung von etwa 700 Volt betriebsfäher gebaut werden. Als Hauptstrommotor unterliegt er dieser Einschränkung in weit geringerem Maße und ist als solcher für Spannungen bis zu 3000 Volt ausführbar; sein Verwendungsbereich ist dafür aber ein beschränkter. Der Hauptstrommotor eignet sich bekanntlich nicht für diejenigen Antriebe, bei denen eine völlige Entlastung — etwa infolge Zerreißen des Treibriemens — eintreten kann, während er unter Strom steht, da er in einem solchen Falle eine unzulässig hohe Tourenzahl annehmen, „durchgehen“ würde. Die Verwendung des Gleichstromsystems ist daher wegen der relativ niedrigen Spannung, für welche die Elektromotoren gebaut werden können, auf verhältnismäßig kleine Entfernungen des Konsumgebietes von der Stromerzeugeranlage beschränkt.

Von den Wechselstrommotoren betrachten wir zuerst die wichtigeren dreiphasigen oder Drehstrommotoren und von diesen wiederum die asynchronen, die bezüglich ihrer betriebstechnischen Eigenschaften mit den Gleichstrommotoren direkt in Parallele gestellt werden können.

Die asynchronen Drehstrommotoren vereinigen die Vorzüge der Gleichstrom-, Serien- und Nebenschlußmotoren insofern, als sie wie erstere beim Anlauf ein wesentlich höheres Drehmoment zu entwickeln vermögen als das normale und wie die letzteren im normalen Gange bei Belastungsänderungen nahezu konstante Tourenzahl halten. Sie bedürfen ferner keines Kommutators, sind daher weniger empfindlich, brauchen weniger Überwachung und Bedienung und können für wesentlich höhere Spannungen — bis 10000 Volt und darüber — gebaut werden wie die Gleichstrommotoren. Allerdings erhalten größere Drehstrommotoren zweckmäßig drei Schleifringe und Bürsten, um die Anlaufstromstärke zu reduzieren, die den im Nichtvorhandensein des empfindlichen Kommutators liegenden Vorteil teilweise wieder aufheben. Der Drehstrommotor ist hiernach dem Gleichstrommotor in allen Fällen mindestens gleichwertig, in denen eine Regulierung der Tourenzahl nicht verlangt wird; er ist ihm überlegen, wenn es sich um Aufstellung des Motors in größerer Entfernung von den Stromerzeugern handelt. Dagegen ist der Drehstrommotor gegenüber dem Gleichstrommotor vorläufig minderwertig, wenn Tourenregulierung in Frage kommt. (Vorstehendes gilt sinngemäß auch für Zweiphasenmotoren.)

Die synchronen Drehstrommotoren kommen für den Antrieb von Transmissionen oder Arbeitsmaschinen, von Spezialfällen abgesehen, im allgemeinen nicht in Frage, da sie inbezug auf ihre Anordnung und ihren Betrieb zu kompliziert sind, insbesondere nicht von selbst anlaufen und Überlastungen nicht vertragen; das gleiche gilt von den synchronen Einphasenmotoren. Die asynchronen Einphasenmotoren verhalten sich im normalen Betriebe ähnlich wie

die entsprechenden Drehstrommotoren, sind ihnen aber bezüglich des Anzugmoments und der Überlastungsfähigkeit — trotz der in dieser Hinsicht neuerdings gemachten Verbesserungen — nicht gleichwertig.

Aus den vorstehenden Betrachtungen ergeben sich folgende, für die Wahl des Stromsystems wertvollen Gesichtspunkte:

1. Überwiegt der Stromverbrauch für Beleuchtungszwecke, und zwar
 - a) durch Glühlampen, so sind alle drei Stromsysteme gleichwertig;
 - b) durch Bogenlampen für Bodenbeleuchtung, so empfiehlt sich der Gleichstrom.
2. Überwiegt der Stromverbrauch für motorische Zwecke, so sind — abgesehen von Spezialanlagen — im allgemeinen
 - a) Gleichstrom und Drehstrom gleichwertig, wenn der Tourenregulierung keine ausschlaggebende Bedeutung beigelegt wird. Falls die Umgebung mit Staub, Feuchtigkeit oder Säuredämpfen u. dergl. erfüllt ist, sind Drehstrommotoren mit Kurzschlußankern vorzuziehen;
 - b) Gleichstrom ist vorzuziehen, wenn die Regulierung der Tourenzahl in größerem Umfange erforderlich;
 - c) Einphasenstrom einstweilen minderwertig.

Weitere Anhaltspunkte für die Entscheidung der gestellten Frage gibt uns die Entfernung des Konsumgebietes von der Zentralstation und die Ausdehnung des ersteren.

Die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine, und damit natürlich auch die Verbundmaschine, lassen sich, wie bereits angedeutet, betriebsficher nur für eine Höchstspannung von etwa 700 Volt bauen; als Stromerzeuger für eine Anzahl zentralisierter Betriebe kommen aber nur diese beiden Gleichstrommaschinen in Betracht, so daß 700 Volt als die maximale Spannung einer Gleichstromzentrale gelten kann. Wenn von der Zentralstation nicht nur Elektromotoren betrieben, sondern auch Glühlampen gespeist werden, so ist selbst diese Spannung noch zu hoch, da Glühlampen heute für eine maximale Spannung von nur 250 Volt hergestellt werden. Nimmt man daher Dreileiterschaltung dieser Lampen an, so kann man unter Berücksichtigung des Spannungsverlustes in den Speiseleitungen mit einer Höchstspannung der Gleichstromerzeuger von 550—600 Volt rechnen. Die maximal zulässige Entfernung der Konsumstellen von der Zentralstation ist daher beim Gleichstromsystem sehr beschränkt und dürfte im allgemeinen 2—3 km nicht überschreiten, da sonst entweder der Spannungsabfall zu groß und die Regulierung der Konsumspannung mit sehr erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist, oder der Kupferaufwand für die Leitungen den für die Rentabilität der Anlage zulässigen Betrag überschreitet. Dagegen gestattet der Wechselstrom mit Hilfe der Transformatoren die Überwindung fast jeder beliebigen Entfernung bei geringen Leitungsquerschnitten und unbedeutenden Energieverlusten.

Handelt es sich daher um große Entfernungen der Konsumstellen von der Zentralstation, so ist sie nach dem einphasigen Wechselstromsystem zu projektieren, wenn die Anschlüsse für motorische Zwecke gegenüber denjenigen für Beleuchtungs-

zwecke von untergeordneter Bedeutung sind, weil die Anordnung der Anlage wesentlich einfacher wird, wie beim Drehstromsystem. Ist dagegen ein erheblicher Stromkonsum für Kraftzwecke vorhanden oder zu erwarten, so empfiehlt es sich unter allen Umständen, die Anlage nach dem Drehstromsystem auszuführen.

Ferner kann die Rücksicht auf eine etwa vorhandene Betriebskraft für die Wahl des Stromsystems von wesentlichem Einflusse sein. Handelt es sich z. B. um die Ausnutzung einer Wasserkraft, die zur Deckung des Maximalkonsums nicht ganz ausreicht, oder um die Verwertung einer vielleicht nur zeitweise zur Verfügung stehenden Maschinenkraft oder dergl., so bietet die Aufspeicherung des Stromes in Akkumulatoren unter Umständen Vorteile. Für den Betrieb einer solchen Batterie kommt natürlich nur der Gleichstrom in Frage, da der Wechselstrom sich bekanntlich nicht aufspeichern läßt. Sollte die Entfernung zwischen der Kraftstation und dem Konsumgebiete für die Verwendung von Gleichstrom zu groß sein, so wird man in einem solchen Falle in der Zentrale hochgespannten, am besten einphasigen Wechselstrom erzeugen und diesen nach einer oder mehreren Unterstationen leiten, die im Konsumgebiete zweckentsprechend verteilt sind. In den Unterstationen wird der primäre Wechselstrom mittelst Umformer in Gleichstrom verwandelt und der letztere zur Ladung von Akkumulatorenbatterien und zur Stromversorgung des Konsumgebietes in Parallelschaltung mit den Akkumulatoren benutzt.

In manchen Spezialfällen ist das anzuwendende Stromsystem durch den Zweck, dem die Anlage dienen soll, ohne weiteres vorgeschrieben. So wird man beispielsweise bei elektrischen Straßenbahnen nur unter ganz besonderen Umständen von dem Gleichstromsystem abgehen, da sich dieses schon wegen der Einfachheit der Leitungsanlage für solche Betriebe am besten eignet. Ist die Ausdehnung der Bahn zu groß, als daß sie mit einer Gleichstromspannung von etwa 600 Volt überwunden werden könnte, so kommen entweder mehrere Zentralen in Frage, oder ähnlich wie in dem oben erwähnten Falle die Erzeugung von hochgespanntem Wechselstrom in der Zentrale und seine Umwandlung in Gleichstrom in Unterstationen, die auf die Bahnstrecken zweckmäßig verteilt werden. An dieser Stelle sei bemerkt, daß sich die Vereinigung der Stromerzeugung für den Straßenbahnbetrieb und den Lichtbetrieb in gemeinschaftlichen Kraft- und Stromerzeugern im allgemeinen nicht empfiehlt, weil die großen, durch den Straßenbahnbetrieb hervorgerufenen, stoßweise wirkenden Belastungsänderungen auch bei Anwendung von Pufferbatterien leicht auf die Maschinen zurückwirken und den Lichtbetrieb ungünstig beeinflussen. Es empfiehlt sich daher meistens, für die Bahnanlage und den Lichtbetrieb getrennte Kraft- und Stromerzeuger aufzustellen, wobei man, im Interesse der Ersparnis an Anlagekosten, für beide Betriebe vielleicht eine gemeinschaftliche Reserve vorsehen kann.

Auch bei Bergwerksanlagen ist im allgemeinen die Wahl des Stromsystems von vornherein nicht zweifelhaft, weil hier der Drehstrom wegen der meist großen Entfernungen der Konsumstellen von der Zentrale, sowie wegen der

Vorzüge der Drehstrommotoren für Betriebe in feuchten Räumen, vor den anderen Systemen wesentliche Vorteile bietet. Der Drehstrom empfiehlt sich bei solchen Anlagen auch aus folgenden Gründen: Für den Antrieb der unterirdischen Wasserhaltungsmaschinen sind häufig Elektromotoren von so großen Dimensionen erforderlich, daß sie nicht durch die Schacht- und Stollenquerschnitte transportiert werden können. In solchen Fällen müssen die Elektromotoren in einzelne Teile zerlegt und am Orte ihrer Aufstellung zusammengebaut werden. Bei Drehstrommotoren ist dieses ohne weiteres ausführbar, während Gleichstrommotoren diesem Verfahren große Schwierigkeiten entgegenstellen. Ferner kommt für Bergwerksanlagen die Anpassungsfähigkeit des Drehstromes an die Forderungen des elektrischen Förderbetriebes in Betracht; mit Hilfe des sogen. *Algner-Umformers* ist man nämlich in der Lage, den sehr schweren Bedingungen der Schachtförderung in vollem Maße gerecht zu werden. Dieser Umformer besteht aus einem asynchronen Drehstrommotor und einer Gleichstrommaschine mit gemeinsamer Achse, auf der ein Schwungrad zum Ausgleich der Belastungsschwankungen montiert ist; die Gleichstrommaschine liefert den Strom für die Elektromotoren der Fördermaschine, deren Tourenzahl durch Veränderung der Spannung des zugeführten Gleichstromes in den erforderlichen Grenzen variiert wird.

Steht die Wahl des Stromsystems durch die Umstände des gegebenen Falles nicht von vornherein fest, so muß das zweckmäßigste System durch Aufstellung von Kostenanschlägen und Betriebskostenberechnungen für sämtliche eventuell in Betracht kommenden Fälle ermittelt werden, wobei die für jedes System in Frage kommenden technischen und kommerziellen Vorzüge und Nachteile zu berücksichtigen sind. Bemerkt sei an dieser Stelle, daß die subjektive Vorliebe für das eine oder andere Stromsystem für die Wahl desselben niemals ausschlaggebend sein, sondern das für die gegebenen Verhältnisse passende Stromsystem stets auf objektiver Grundlage festgestellt werden sollte.

Nachdem die Wahl des Stromsystems getroffen, stehen die Fragen zur Entscheidung: Nach welchem System sind die Krafterzeuger zu wählen, wie viele Betriebsmaschinenätze, bestehend aus je einem Kraft- und Stromerzeuger, sind aufzustellen und welche Leistung müssen dieselben erhalten? Hierbei sind zwei Hauptfälle zu unterscheiden:

1. Die Anlage erhält reinen Maschinenbetrieb.
2. Die Anlage erhält gemischten Betrieb von Maschinen und Akkumulatoren.

In beiden Fällen ergibt sich die maximale Gesamtleistung der Zentrale aus dem Stromverbrauchsdiagramm, nachdem dasselbe durch Berücksichtigung der Wirkungsgrade der außerhalb der Zentralstation befindlichen Teile der Anlage, der Leitungen, Transformatoren, Umformer und Akkumulatoren ergänzt worden ist.

Bei reinem Maschinenbetriebe stellt die so berechnete Leistung die Maximalleistung der gesamten Betriebsmaschinen dar. Sind die Kraftmaschinen durch die Verhältnisse des konkreten Falles nicht von vornherein gegeben, so ist das zweckmäßigste System durch eine vergleichende Betriebskostenberechnung

zu bestimmen, in der die örtlichen Verhältnisse sowie alle nach den vorstehenden Erörterungen (Kap. 5) eventuell in Betracht kommenden Kraftmaschinen zu berücksichtigen sind. Die Entscheidung der weiteren Frage, wie die Gesamtleistung auf die einzelnen Maschinensätze zu verteilen ist, richtet sich in erster Linie nach der Konsumkurve sowie danach, ob Wasserkraftmaschinen oder Wärmemaschinen verwandt werden. Ferner ist hierbei das Anlagekapital, besonders hinsichtlich der Beschaffung einer ausreichenden Reserve mit möglichst geringen Mitteln, zu berücksichtigen, und endlich ist im Interesse der Übersichtlichkeit der Anlage, ihres guten Aussehens und der Vereinfachung ihres Betriebes darauf Bedacht zu nehmen, daß sowohl im ersten Ausbau als auch bei künftigen Erweiterungen tunlichst gleichartige Maschinensätze zur Verwendung gelangen.

Über die Berechnung der Leistung der Kraftmaschinen auf Grund der Angaben des Stromverbrauchdiagramms haben wir bezüglich der Dampfmaschinen und Wasserkraftmaschinen in Kap. 5 das Notwendige bereits mitgeteilt; das an jener Stelle über die Pendeldampfmaschinen Gesagte gilt sinngemäß auch für die Dampfturbinen und rotierenden Dampfmaschinen. Bei Gaskraftmaschinen ändern sich die betreffenden Verhältnisse insofern, als die zulässige Steigerung ihrer Leistung über die normale hinaus nur etwa 10% der letzteren beträgt.

Was die Stromerzeuger anbelangt, so ist die maximal zulässige Dauerleistung derselben bekanntlich begrenzt durch die Höhe der Temperatur, die sie dabei annehmen (Kap. 6, S. 171). Als höchst zulässige Erwärmung der Dynamomaschinen hat man durch Erfahrungen 50° C. über die Außentemperatur, d. h. die Temperatur des Maschinenhauses, festgestellt; Belastungen der Maschine, die eine höhere Temperatur als diese verursachen, sind daher unzulässig. Selbstredend können die Dynamomaschinen im intermittierenden Betriebe wesentlich höher belastet werden, wenn nur die durchschnittliche Belastung keine unzulässig hohe Temperaturzunahme bewirkt, oder wenn die Dynamomaschine außer Betrieb gesetzt wird, nachdem sie infolge einer stattgehabten Überlastung die höchst zulässige Temperatur angenommen hat, um ihr Zeit zur Abkühlung zu lassen. Man kann daher bei Dynamomaschinen von einer Überlastungsfähigkeit in dem Sinne, wie sie z. B. bei Dampfmaschinen vorhanden ist, nicht sprechen. Da nun der Stromverbrauch einer Zentrale mit überwiegendem Lichtkonsum, wie aus dem Diagramm ersichtlich, im allgemeinen außerordentlich variiert, so kann bei der Bestimmung der Leistung der Dynamomaschinen bis zu einem gewissen Grade intermittierender Betrieb angenommen werden. Infolgedessen brauchen die Spitzen des Diagramms bei der Bestimmung der Dauerleistung nicht berücksichtigt zu werden; die letztere ist in jedem einzelnen Falle unter Berücksichtigung der zu verwendenden Maschinentypen festzustellen. Bei Zentralen mit anderen Konsumverhältnissen, wie sie das in Fig. 47, Kap. 5 beispielsweise angeführte Diagramm aufweist, müssen selbstredend diese der Berechnung der Dauerleistung der Stromerzeuger zugrunde gelegt werden.

Ist der Nachtverbrauch im Verhältnisse zum Tagesverbrauch unbedeutend, was bei Zentralen zur Stromversorgung von Gemeinwesen meistens zutrifft, so empfiehlt sich häufig die Aufstellung eines besonderen Maschinensatzes von entsprechend kleinerer Leistung für den Nachtbetrieb. Bei Wechselstromanlagen mit Zentralerregung der Generatoren, die gewöhnlich von einem Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer bewirkt wird, dem als Reserve und für die Anfangserregung ein Maschinensatz bestehend aus einer Kraftmaschine und einer von dieser angetriebenen Gleichstrommaschine zur Seite steht, kann zur Stromlieferung für den Nachtverbrauch häufig die Erregeranlage herangezogen werden, indem man von der erwähnten Kraftmaschine gleichzeitig einen Wechselstrom-generator antreiben läßt, oder, wenn der Umformer einen synchronen Antriebsmotor oder nur einen Anker hat, indem man diesen umgekehrt als Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer arbeiten läßt und ihn von dem Reserve-Erregermaschinensatz aus mit Gleichstrom speist. Die Leistungsfähigkeit der Erregeranlage ist natürlich den Anforderungen des Nachtverbrauchs entsprechend zu bestimmen, wenn nicht die erforderliche Erregungsenergie an sich größer ist, als jener. Bei geschlossenem sekundären Verteilungsleitungsnetz kann übrigens der nächtliche Strombedarf durch Ausschaltung einer Anzahl von Transformatoren und entsprechende Reduktion der Leerlaufarbeit nicht unwesentlich vermindert werden. Ferner kann die Zentralerregeranlage bei Wechselstromzentralen für Kraftverteilung oder für solche Lichtzentralen, die vom Hauptverbrauchsgebiete entfernt liegen, zur Beleuchtung der Zentralstation und zur Stromabgabe an etwa in der Nähe liegende Konsumstellen manchmal vorteilhaft ausgenutzt werden, wobei die sonst dafür in Betracht kommenden Transformatoren und deren Leerlaufarbeit erspart werden.

Was die Stromversorgung des Leitungsnetzes durch gemischten Betrieb von Maschinen und Akkumulatoren betrifft, so ist der Fall, in dem eine vorhandene Kraftanlage, z. B. eine Wasserkraft, von beschränkter Leistung durch Hinzufügung von Akkumulatoren zur Deckung des erhöhten Strombedarfes in gewissen Stunden ausreichend gemacht wird, bereits früher behandelt worden (Kap. 5). Bei solchen Anlagen tritt die Rücksicht auf eine rationelle Verteilung des Verbrauchs auf die Dynamomaschinen und Akkumulatoren in den Hintergrund, und die Leistung der Akkumulatoren ist in erster Linie mit Rücksicht auf die erforderliche Ergänzung der unzulänglichen Kraftanlage zu berechnen.

Wenn dagegen bezüglich der Kraftanlage keine die Wahl bestimmenden Momente vorhanden sind, ist die Leistung der Dynamomaschinen und der Akkumulatoren nach folgenden Gesichtspunkten festzustellen:

1. Die Belastung der Dynamomaschinen soll möglichst konstant sein.
2. Die Dauer des Maschinenbetriebes in der Zentrale soll möglichst auf eine einzige Arbeitsschicht beschränkt werden.

In der Unmöglichkeit, diese beiden Bedingungen zu erfüllen, liegen bekanntlich die Schwächen der reinen Maschinenzentralen. Die steten Änderungen der Belastung einer Lichtzentrale mit einem nach unserem Stromverbrauchs-

diagramm verlaufenden Konsum lassen es nicht zu, daß die Antriebsmaschinen längere Zeit mit ihrer normalen, d. h. der ökonomisch günstigsten Leistung im Betriebe sind; ferner nimmt der Wirkungsgrad der Dynamomaschinen mit sinkender Belastung ab, so daß besonders in den konsumschwachen Zeiten, also in der Nacht und am Tage vor Sonnenuntergang, die Maschinen unökonomisch arbeiten. Es kommt hinzu, daß die Abnutzung der Maschinenanlage und die für ihre Bedienung aufzuwendenden Kosten während der konsumschwachen Betriebszeit in den reduzierten Einnahmen aus dem Stromverbrauche kein Äquivalent haben. Aus diesen Gründen ist bei einer Zentrale mit vorwiegendem Lichtkonsum und reinem Maschinenbetriebe die Stromlieferung während eines großen Teiles der Tageszeit unrationell. Da indessen stets ein, wenn auch kleiner Strombedarf für Beleuchtungszwecke vorhanden ist, so muß der Betrieb zu diesen Zeiten aufrechterhalten und der Strompreis mit den dadurch entstehenden Unkosten belastet werden. Daher gewähren die meisten Elektrizitätswerke auf den Preis des Stromes für motorische Zwecke einen bedeutenden Rabatt, um möglichst viele Anschlüsse von Elektromotoren zu bekommen und dadurch sowohl die Tagesbelastung zu vergrößern, als auch durch die hieraus entstehenden Einnahmen die Unkosten in höherem Maße zu decken.

Die Akkumulatoren gewähren nun die Möglichkeit, die genannten Bedingungen zu erfüllen, und bieten gleichzeitig eine sehr wertvolle Momentreserve; diesen Vorteilen gegenüber fallen die für Verzinsung, Amortisation und Unterhaltung der Akkumulatoren aufzuwendenden Ausgaben, sowie die mit der Aufspeicherung des Stromes verbundenen Verluste meist nicht ausschlaggebend ins Gewicht.

Für eine Zentrale mit überwiegendem Stromverbrauche für Beleuchtungszwecke läßt sich die Leistung der Stromerzeuger und der Akkumulatoren auf Grund des Stromverbrauchsdiagramms in exakter Weise rechnerisch ermitteln, nachdem die maximale Dauer des Maschinenbetriebes für den kürzesten Wintertag festgestellt worden ist; die letztere kann zu 15—16 Stunden angenommen werden, da der Betrieb an die Kräfte des Personals gewöhnlich keine hohen Ansprüche stellt und diese lange Betriebszeit mit der wachsenden Tageslänge auch sehr bald abnimmt. Die rechnerische Durchführung des Problems würde hier zu weit führen; wir verzichten deshalb darauf, zumal in der Praxis gewöhnlich das Verhältnis der beiden Leistungen auf Grund des vorliegenden statistischen Materials von vornherein bestimmt wird. In den meisten Fällen genügt es hiernach, die maximale Netzbelastung so auf die Dynamomaschinen und die Batterie zu verteilen, daß die ersteren $\frac{2}{3}$ der erforderlichen Amperes und die letztere $\frac{1}{3}$ derselben übernehmen. Die zur Verwendung gelangende Akkumulatorentype muß die so berechnete Stromstärke 3 Stunden lang abgeben können. Die aus diesem Verhältnisse resultierende maximale Betriebszeit bleibt gewöhnlich unter den oben angegebenen Zahlen; sie ergibt sich aus dem Diagramm, wenn man konstante Belastung der Stromerzeuger annimmt und die Ladearbeit als Differenz der Dynamoleistung und Netzbelastung planimetrisch bestimmt, wobei darauf zu achten ist, daß die in Kilowattstunden ausgedrückte

Ladearbeit um 20—25 % größer ist als die ebenfalls planimetrisch zu bestimmende Entladearbeit.

Auch hier empfiehlt sich meistens eine Teilung der Maschinenanlage in mehrere Sätze, wenn auch nicht in demselben Umfange, wie bei einer reinen Maschinenzentrale; die Zahl der Sätze richtet sich nach dem Verhältnisse des geringsten zum größten Konsum, wobei gleichzeitig die Beschaffung einer Reserve zu berücksichtigen ist. Im allgemeinen wird man bei einer Lichtzentrale über die Aufstellung von zwei Betriebsmaschinenätzen und einem Reservemaschinen-*satz* im ersten Ausbau nicht hinausgehen.

Die Anzahl der Akkumulatorenzellen richtet sich nach der Spannung, die an den Sammelschienen der Zentrale herrscht, wenn das Leitungsnetz voll belastet ist; die hierfür in Rechnung zu setzende Spannung einer Akkumulatorenzelle beträgt bei voller Stromabgabe 1,83 Volt. Diese Spannung steigt jedoch im Verlaufe des Ladeprozesses stark an und beträgt gegen Ende der Ladung zirka 2,7 Volt; es muß deshalb dafür Sorge getragen werden, daß auch die Spannung des Ladestromes in entsprechendem Maße gesteigert werden kann. Nun kann die normale Spannung einer Nebenschlußmaschine bei gleichbleibender Tourenzahl durch Verstärkung des Magnetfeldes mittels des Nebenschlußregulators in gewissem Umfange erhöht werden, der abhängig ist von dem Sättigungsgrade, den das Magnetssystem bei der Normalspannung hat. Diese Vergrößerung der Spannung genügt indessen gewöhnlich nicht, um den der höchsten Ladepannung der Batterie entsprechenden Betrag zu erreichen; es werden deshalb weitere Maßnahmen zur Erlangung dieses Zieles erforderlich. Aus den früheren Erörterungen (vergl. Kap. 6 S. 166) ist uns bekannt, daß infolge der Ankerreaktion, deren Größe von der Ankerstromstärke abhängt, das magnetische Feld geschwächt wird. Vermindert man daher die Ankerreaktion durch Verringerung des Ankerstromes, so ist dieses gleichbedeutend mit einer Verstärkung des Feldes und dadurch mit einer Vergrößerung der Spannung. Dabei wird man häufig vor die Notwendigkeit gestellt, ein größeres Dynamo-*modell*, als für den normalen Betrieb erforderlich sein würde, zu wählen, und zwar dann, wenn die während des Ladeprozesses benötigte Stromstärke, die von der Ladezeit und der gleichzeitigen Netzbelastung abhängt, den Quotienten

$$\frac{\text{Normale Leistung der Dynamo in Kilowatt}}{\text{Ladepannung}}$$

übersteigt. Bei den Maschinen der Siemens-Schuckertwerke kann beispielsweise die Normalspannung von 110 Volt bis auf 150 Volt vergrößert werden, wenn die Ladestromstärke dem obigen Quotienten entsprechend reguliert wird; eine weitere Erhöhung bis auf 160 Volt ist dadurch möglich, daß der Ladestrom auf $\frac{1}{3}$ desjenigen Stromes reduziert wird, den die Maschine bei 110 Volt abzugeben vermag. (Diese Forderung entspricht übrigens durchaus den Bedürfnissen der Akkumulatoren-*batterie*, die eine beträchtliche Reduktion der Ladestromstärke gegen das Ende der Ladung hin verlangt.) Bei den vorstehenden Ausführungen ist scheinbar der Umstand nicht berücksichtigt, daß der Ladeprozess nicht

bei allen Akkumulatorenzellen gleichzeitig beendet ist, sondern daß die ersten Elemente (Regulierzellen) früher geladen sind als die übrigen. Die vorzeitig geladenen Zellen werden mittels des Ladezellenschalters abgeschaltet, so daß die totale Ladepannung der Batterie eine entsprechende Verminderung erfährt. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes könnte daher die Leistung der Dynamo etwas kleiner gewählt werden; da indessen die Batterie sowohl bei der erstmaligen Ladung als auch später zeitweise stark überladen werden muß, so empfiehlt es sich, bei der Bestimmung der Leistung der Dynamomaschine die Abschaltung der Regulierzellen unberücksichtigt zu lassen.

Ein anderes Mittel, die Ladepannung der Maschine zu erhöhen, besteht darin, daß man die Tourenzahl der Dynamo während des Ladeprozesses steigert; der Anwendung dieser Methode treten indessen vielfach Schwierigkeiten entgegen, die in den Antriebsverhältnissen und in der Möglichkeit einer mechanischen und elektrischen Überanstrengung der Dynamomaschine begründet sind, infolgedessen dieselbe, bei Zentralanlagen wenigstens, nicht mehr benutzt wird.

Die Verwendung von Stromerzeugern variabler Spannung in Parallelschaltung mit den Akkumulatoren hat, abgesehen von den bereits hervorgehobenen Momenten, noch weitere Nachteile zur Folge. Diese Methode bedingt nämlich bei der in Zentralanlagen während des Ladeprozesses stets erforderlichen Stromabgabe in das Leitungsnetz die Anwendung von Doppelschaltern, welche die frühzeitig geladenen Elemente von dem Ladestromkreise abzuschalten und gleichzeitig die Spannung der mit der Batterie parallel geschalteten Sammelschienen zu regulieren gestatten. Durch diese Apparate wird die Anlage verteuert. Es kommt hinzu, daß ein Teil der Regulierzellen während des Ladeprozesses einen die höchst zulässige Ladestromstärke eventuell beträchtlich übersteigenden Strom aufnehmen und deshalb einer unzulässigen Überlastung ausgesetzt sind; infolgedessen muß man die Regulierzellen größer wählen als die übrigen Elemente, wodurch wiederum eine Vertenerung der Anlage herbeigeführt wird. Aus diesen Gründen verzichtet man neuerdings bei Zentralanlagen mit Parallelbetrieb von Dynamomaschinen und Akkumulatoren gewöhnlich auf die Verwendung von Stromerzeugern variabler Spannung und gebraucht an deren Stelle solche, die für die normale Sammelschienspannung gebaut sind, also bei Zweileiteranlagen Dynamos von 110 Volt oder 220 Volt *z.*, und für Dreileiteranlagen solche von 220 Volt oder 440 Volt *usw.* Die Erhöhung der Spannung des Ladestromes wird in diesem Falle durch Zusatzmaschinen bewirkt, die für eine der maximalen Differenz zwischen Lade- und Entladepannung entsprechende Spannung gebaut und mit dem Ladestromkreise der Hauptdynamo in Serie geschaltet werden. Bei Zweileiteranlagen ist nur eine Zusatzmaschine erforderlich, ebenso bei Dreileiteranlagen, wenn sie zwischen die beiden Batteriehälften geschaltet wird; in letzterem Falle liegen die Entladezellenschalter am neutralen Pole. Werden dagegen die Zellschalter an den Außenpolen der Dreileiterbatterie angeordnet, so sind für die Ladung zwei Zusatzmaschinen erforderlich, da sonst die beiden Batteriehälften nicht gleichmäßig geladen werden können; bei dieser Schaltung ist eine Regulierung einzelner Speisepunkte des Netzes

mittels der Zellschalter möglich. Die beiden Zusatzmaschinen können auch zum Ausgleich benutzt werden, wenn die beiden Seiten des Dreileiternetzes nicht gleichmäßig belastet sind. Die Zusatzmaschinen werden besonders angetrieben, entweder vermittelt eines auf das Schwungrad der Kraftmaschine gelegten zweiten Riemens oder von einer vorhandenen Transmiffion zc. Am einfachsten benutzt man für den Antrieb Elektromotoren, die von der Hauptdynamo gespeist werden; die letztere braucht deshalb im allgemeinen nicht größer gewählt zu werden, weil die Ladung der Batterie gewöhnlich in die Zeit schwacher Netzbelastung gelegt wird. Die Spannung der Zusatzmaschinen wird ebenso reguliert wie in dem vorher besprochenen Falle diejenige der variablen Lademaschine, nämlich durch Veränderung der Feldstärke.

Die vorstehenden, das Verhältnis der Akkumulatoren zu den Betriebsdynamos betreffenden Ausführungen gelten in vollem Umfange auch für den Fall, daß bei einer Lichtzentrale Akkumulatoren in Verbindung mit Wechselstrom-Gleichstrom-Umformern im Anschlusse an eine Wechselstrombetriebsanlage zur Anwendung gelangen. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um Akkumulatoren-Unterstationen innerhalb des Konsumgebietes, die von einer außerhalb desselben liegenden Hochspannungswechselstromzentrale aus betrieben werden. Die Umformer können, wie schon früher ausgeführt (vergl. Kap. 8), sowohl als Doppelmaschinen, bestehend aus einem synchronen oder einem asynchronen Motor, der mit einer Gleichstrommaschine direkt gekuppelt ist, ausgeführt werden, wie auch als Ginankermaschinen (vergl. S. 241). Die Motorgeneratoren bedingen größere Herstellungskosten und haben einen geringeren Wirkungsgrad, wie die Ginankerumformer samt ihren Transformatoren; die Doppelmaschinen mit asynchronen Motoren haben außerdem den Nachteil einer Phasenverschiebung, während die Ginankerumformer ebenso wie die Synchronmotoren durch geeignete Erregung sogar eine im Netze vorhandene Phasenverschiebung teilweise auszugleichen gestatten. Die Erhöhung der Ladepannung wird man zweckmäßig auch hier durch Zusatzmaschinen bewirken, obwohl die Umformer direkt für variable Spannung eingerichtet werden können.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß sich Ginanker-Umformer zum Parallelbetrieb mit Pufferbatterien bei rasch wechselnden Belastungen des Leitungsnetzes, wie sie beispielsweise der elektrische Straßenbahnbetrieb aufweist, weniger eignen, weil ihre Klemmspannung bei Belastungsänderungen nahezu konstant ist und die Belastungswechsel sich infolgedessen direkt auf die Antriebsmaschinen der Generatoren übertragen, so daß die Pufferwirkung der Batterie zu spät eintritt. Für solche Fälle empfiehlt sich daher die Aufstellung von Doppelanker-Umformern mit stark abfallender Charakteristik der Nebenschlußmaschine.

Als Verbindungsleitungen der Generatoren, Zusatz- und Ausgleichmaschinen mit der Schalttafel werden am besten unterirdisch zu verlegende Kabel verwandt. Bei großen Anlagen sollte der Kabelkanal stets so geräumig angelegt werden, daß er begangen werden kann. Die mit einem Bleimantel armierten Verbindungskabel werden vermittelt eiserner Schellen an den

Kanalwänden befestigt. Bei kleineren Anlagen können diese Kabel direkt auf dem Boden eines kleinen, im Maschinenhausflur anzuordnenden Kabelkanals verlegt oder in dem Kanal als blanke Kupferleiter auf Porzellanisolatoren montiert werden; in diesem Falle ist dafür Sorge zu tragen, daß das zur Reinigung des Fußbodens verwandte Wasser nicht in den Kanal eindringt, was z. B. durch Anordnung seitlicher, mit dem Kanal parallel laufender Abflußrillen erreicht werden kann. In selteneren Fällen und wohl nur bei kleinen Anlagen werden die Verbindungsleitungen noch als isolierte Luftleitungen ausgeführt. Bei Wechselstromanlagen ist darauf zu achten, daß Kabel mit einem Bleimantel nur in konzentrischer oder verseilter Form zur Verlegung gelangen, weil andernfalls der Bleimantel infolge der Induktion leicht übermäßiger Erhitzung ausgesetzt wird.

Die für den Betrieb erforderlichen Sicherungen, Schalter, Meß- und Regulierapparate werden auf einer Schalttafel vereinigt, die so aufgestellt werden muß, daß man von ihr aus sämtliche Maschinen überblicken kann; bei größeren Anlagen wird deshalb die Schalttafel auf einem gegen Maschinenhausflur erhöhten Podium aufgestellt. Der Bedienungsgang vor der Tafel soll reichlich breit sein, mindestens 1 m, damit der Wärter die Apparate möglichst von jeder Stelle aus vollständig überblicken, leicht und sicher bedienen kann. Ebenso ist hinter der Schalttafel genügend Raum vorzusehen, um dort ohne Gefahr arbeiten zu können; dieser Raum muß um so größer sein, je komplizierter die Schaltanlage und die Anordnung von Instrumenten und Apparaten hinter der Tafel und je höher die Spannung ist, mit der man arbeitet. Bei großen Anlagen wird der Raum hinter der Schalttafel zweckmäßig als Laboratorium für Meß- und Versuchszwecke ausgebildet. Bei solchen Anlagen empfiehlt es sich ferner, die für die Stromverteilung erforderlichen Apparate von den zu den Stromerzeugern gehörigen zu trennen und auf einer zweiten Schalttafel, der Verteilungstafel, unterzubringen. Neuerdings werden auch manchmal die Apparate für die Stromerzeuger auf einem pultartigen Tische untergebracht; diese Anordnung hat vor der Wandschalttafel den Vorzug, daß der Apparatenwärter stets mit dem Gesichte dem Maschinenhause zugewendet ist, die Folgen seines Manövrierens also selbst direkt beobachten kann. Der Raum hinter der Schalttafel ist durch seitlich angeordnete Türen abzuschließen, um Unberufenen den Zutritt zu verwehren; die Bedienungsgänge sind bei höheren Spannungen mit Gummiläufern zu versehen, um die mit der Berührung einzelner Leitungen verbundene Gefahr zu verringern.

Die Schalttafel selbst wird am besten aus weißen, polierten Marmorplatten hergestellt, die auf einem Eisengerüste befestigt werden. Die Verwendung von Schieferplatten ist weniger zweckmäßig, weil der Isolationswert dieses Materials meist viel kleiner ist als derjenige des Marmors. Holzschalttafeln sind wegen ihrer Feuergefährlichkeit nur unter ganz bestimmten, vom Verbands Deutscher Elektrotechniker aufgestellten Vorsichtsmaßregeln zulässig, die den Zweck haben, eine Berührung des Holzes mit etwa auftretenden Lichtbögen, oder mit vom Strome durchflossenen, erhitzten Leitungen zu verhindern.

Nach diesen Vorschriften darf das Holz niemals als Isoliermaterial, sondern nur als Befestigungsmaterial für die Apparate benutzt werden; ferner sind sämtliche stromführenden Apparate auf feuer sichereren Unterlagen zu montieren, die Öffnungen für die Leitungsdurchführungen mit feuer sichereren Büchsen auszufüttern, kurz alle Maßnahmen zu treffen, welche die unbedingte Feuer sicherheit der Schalttafel gewährleisten. Die Schalttafeln werden meist mit verzierten Holzrahmen oder Metallrahmen umgeben und mit einem Aufsatze versehen, in dem gewöhnlich eine Uhr angebracht wird.

Die Apparate sollen auf der Schalttafel so angeordnet werden, daß sie übersichtlich, sowie leicht und bequem zu bedienen sind. Um dieses zu erreichen, empfiehlt es sich, die Zahl der Apparate auf die zum Betriebe unbedingt erforderlichen zu beschränken und diejenigen, welche keiner ständigen Bedienung und Beobachtung bedürfen, auf der Rückseite der Schalttafel unterzubringen. Die Übersichtlichkeit wird besonders leicht durch allzugroße Anhäufung von Meßinstrumenten gestört; diese kann dadurch vermieden werden, daß man beispielsweise für verschiedene Stromkreise einen gemeinsamen Spannungsmesser mit Umschalter verwendet, ferner Apparate, die nicht immer beobachtet werden müssen, wie Elektrizitätszähler, hinter der Schalttafel unterbringt usw. Strommesser, Leistungszeiger und Stromrichtungszeiger sind aus dem gleichen Grunde nur in denjenigen Stromkreisen anzuordnen, deren Beobachtung für den Betrieb der Anlage von wesentlichem Interesse ist. Hinter die Schalttafel gehören ferner nach vorstehenden Grundsätzen die Widerstände von Regulatoren und die Kontaktvorrichtungen von Hochspannungsausaltern, während die Regulierkörper und Hebel zur Bedienung dieser Apparate auf der Vorderseite angebracht werden. Das gleiche gilt für die Bleisicherungen, Blitzschutzvorrichtungen, Trennstücke einzelner Stromkreise und dergleichen Apparate, die keiner ständigen Wartung bedürfen; endlich sind sämtliche Verbindungsleitungen der einzelnen Apparate untereinander mit den Sammelschienen und den Abzweigklemmen für die ankommenden und abgehenden Ströme auf der Rückseite der Schalttafel anzuordnen. Im übrigen ist bezüglich der Anordnung der Apparate und Leitungen gerade hinter der Schalttafel der größte Wert darauf zu legen, daß dieser Teil der Anlage in sauberer und übersichtlicher Weise montiert wird, und daß nicht etwa die Drähte dort wirr durcheinander verlegt werden, wie man dieses bei älteren Anlagen leider allzuhäufig antrifft; denn nicht allein die Sicherheit des Betriebes leidet durch eine leichtfertige Installation auf der oft schwer zugänglichen Rückseite der Schalttafel, sondern es kann dadurch direkt Feuergefahr herbeigeführt werden, abgesehen davon, daß das Auffuchen von Fehlern und die Vornahme von Reparaturen außerordentlich erschwert werden.

Über die Leitungsanlage, insbesondere die verschiedenen Leitungssysteme, ferner die Isolation der Leitungen und die Berechnung der Querschnitte ist an anderer Stelle (vergl. Kap. 10) das Wesentliche bereits gesagt worden; wir können uns deshalb hier kurz fassen und beschränken uns auf die für die Projektierung wichtigsten Momente, indem wir die leitenden Gedanken hervorheben.

Wenn man die einzelnen Konsumstellen direkt mit den Sammelschienen der Apparatenwand in der Zentrale durch Kupferleitungen von mäßigen Querschnitten verbinden würde, so würden infolge des mit der Belastung der Leitungen sich ändernden Spannungsabfalles an den Konsumstellen verschiedene Stromspannungen herrschen, vorausgesetzt, daß die Spannung an den Sammelschienen konstant gehalten wird. Nach unseren früheren Auseinandersetzungen ist es aber ein Haupterfordernis für das gute Funktionieren aller Stromverbraucher, daß die Spannung an ihren Klemmen stets möglichst konstant ist. Um dieses zu erreichen, gibt es mehrere Mittel:

1. Man vergrößert den Querschnitt der Zuleitungen so weit, daß der Spannungsabfall bei maximaler Belastung keine nennenswerte Höhe erreicht.

2. Man legt in die einzelnen Zuleitungen von geringeren Querschnitten Regulierwiderstände oder Akkumulatorenzellenschalter, vermitteltst deren man die infolge der Belastungsschwankungen auftretenden Spannungsänderungen an den Konsumstellen auszugleichen vermag.

3. Man verbindet die einzelnen Konsumstellen untereinander durch Leitungen so, daß ein geschlossenes, mit der Zentrale vorläufig nicht in Verbindung stehendes Leitungsnetz — die Verteilungs- und Ausgleichleitungen — entsteht. Alsdann konstruiert man Punkte konstanter Spannung, sogen. Speisepunkte, in diesem Verteilungsnetze, indem man nahezu gleichwertige Konsumstellengruppen mit ihren Verteilungsleitungen aus dem Netze herausschneidet und an die Belastungsschwerpunkte der so entstehenden Rayons von der Zentrale aus Leitungen zieht, die sogen. Speiseleitungen. In den letzteren wird nach Methode 2 der Spannungsabfall konstant gehalten, so daß bei allen vorkommenden Belastungsänderungen an den Speisepunkten stets eine nahezu konstante Spannung herrscht.

Die erste Methode leidet an dem Übelstande, daß bei ihr der Kupferaufwand die durch die Rentabilitätsrückichten gezogenen Grenzen bei weitem überschreitet; dieselbe kommt infolgedessen im allgemeinen nicht in Betracht. Die zweite Methode bedingt wegen der großen Zahl der von der Schalttafel abzweigenden Leitungen und der Regulierung ihrer Spannung eine außerordentliche Komplikation der Anlage und des Betriebes, infolgedessen dieselbe nur für gewisse, dem geschlossenen Konsumgebiete nicht angehörige Konsumstellen Verwendung findet. Es bleibt daher für die praktische Ausführung nur die dritte Methode übrig, bei der wir nach vorstehendem die Leitungsanlage in 3 Hauptteile zerlegen: die Inneninstallation der Konsumstellen, das Verteilungsleitungsnetz mit seinen Ausgleichleitungen und die Speiseleitungen; hierzu treten noch die Prüfleitungen, die von den Speisepunkten zur Zentrale gehen und dort die in den Speisepunkten herrschende Spannung jederzeit abzulesen gestatten. Die Leitungsquerschnitte werden so berechnet, daß in den Installationsleitungen der Konsumstellen ein Spannungsverlust von etwa 1%, in den Verteilungsleitungen ein solcher von etwa 1,5% und in den Speiseleitungen ein wesentlich höherer Spannungsverlust, der je nach den Ver-

hältnissen 10—15% der Sammelschienspannung bei maximaler Belastung der betreffenden Leitungen betragen darf, zugelassen wird.

Die Regulierung der Spannung der einzelnen Speisepunkte stößt indessen auch bei dieser Methode auf Schwierigkeiten, da sie bei reinen Maschinenzentralen nur vermittelt Energie verzehrender, in die Speiseleitungen zu schaltender Regulierwiderstände geschehen kann. Bei Verwendung von Akkumulatoren kann man die Widerstände zwar vermeiden, indem man die einzeln zu regulierenden Speisepunkte mit je einem Zellschalter verbindet; aber auch diese Methode führt zu verhältnismäßig teuren und komplizierten Anlagen, weshalb man neuerdings wenn irgend möglich die Regulierung der Spannung der einzelnen Speisepunkte ganz vermeidet und das gesamte Leitungsnetz auf eine konstante Mittelspannung durch Veränderung der Spannung an den Sammelschienen der Zentrale je nach dem Belastungszustande des Leitungsnetzes reguliert. Dieses ist bei in sich geschlossenen Netzen durch Verminderung der in den Speiseleitungen zuzulassenden Spannungsverluste und durch reichliche Anordnung von Ausgleichsleitungen im Verteilungsleitungsnetze stets möglich, allerdings bei entsprechend erhöhtem Kupferaufwande. Berücksichtigt man jedoch, daß insbesondere bei oberirdischen Leitungsanlagen das Leitungsmaterial keiner wesentlichen Abnutzung unterliegt und deshalb nicht hoch amortisiert zu werden braucht, berücksichtigt man ferner die Vereinfachung und Verbilligung der Anlage und des Betriebes durch Wegfall der komplizierten und teuren Regulierapparate und Energie verzehrenden Widerstände, so wird man gewöhnlich der Regulierung auf eine konstante Mittelspannung den Vorzug geben. Hierbei kann man, wie bereits bemerkt, einzelne, dem geschlossenen Verteilungsnetze nicht angehörigen Speisepunkte sehr wohl durch Widerstände oder Zellschalter für sich regulieren; die Betätigung dieser Einzelregulatoren kann selbstverständlich auch automatisch erfolgen, indem man mittels der Prüfleitung das Relais unter den Einfluß der betreffenden Speisepunktspannung stellt.

Die Montage oberirdischer Leitungen geschieht am besten auf eisernen Leitungsmasten, die auf geraden Strecken aus einfachen I-Trägern, schwächeren Gitter- oder Rohrmasten bestehen können, während man bei Beanspruchung durch seitlichen Zug verstärkte schmiedeeiserne Gitterträger verwendet (Fig. 265). Diese Träger werden am Fußende mit Querleisten oder Kreuzen aus Winkel-eisen oder C-Eisen versehen und in Erdlöchern aufgestellt, die mit Beton ausgefüllt werden; ganz große Leitungsträger erhalten am besten ein gemauertes Fundament, in dem sie mittels Anker befestigt werden. Am Kopfende erhalten die Träger wiederum Querleisten aus C-Eisen, an denen die Isolatoren zur Aufnahme der Leitungen befestigt werden. In bewohnten Straßen soll der unterste Isolatorenträger sich wenigstens 8 m über Boden befinden; die Länge des in der Erde steckenden Trägerendes richtet sich nach der dem Träger zugemuteten Beanspruchung und der Festigkeit des Erdreiches und beträgt in nicht felsigem Terrain 1,5—2,5 m.

An Stelle der eisernen Leitungsträger werden häufig auch Holzmaße verwendet, da diese sich bezüglich der Anlagelkosten wesentlich billiger stellen, als

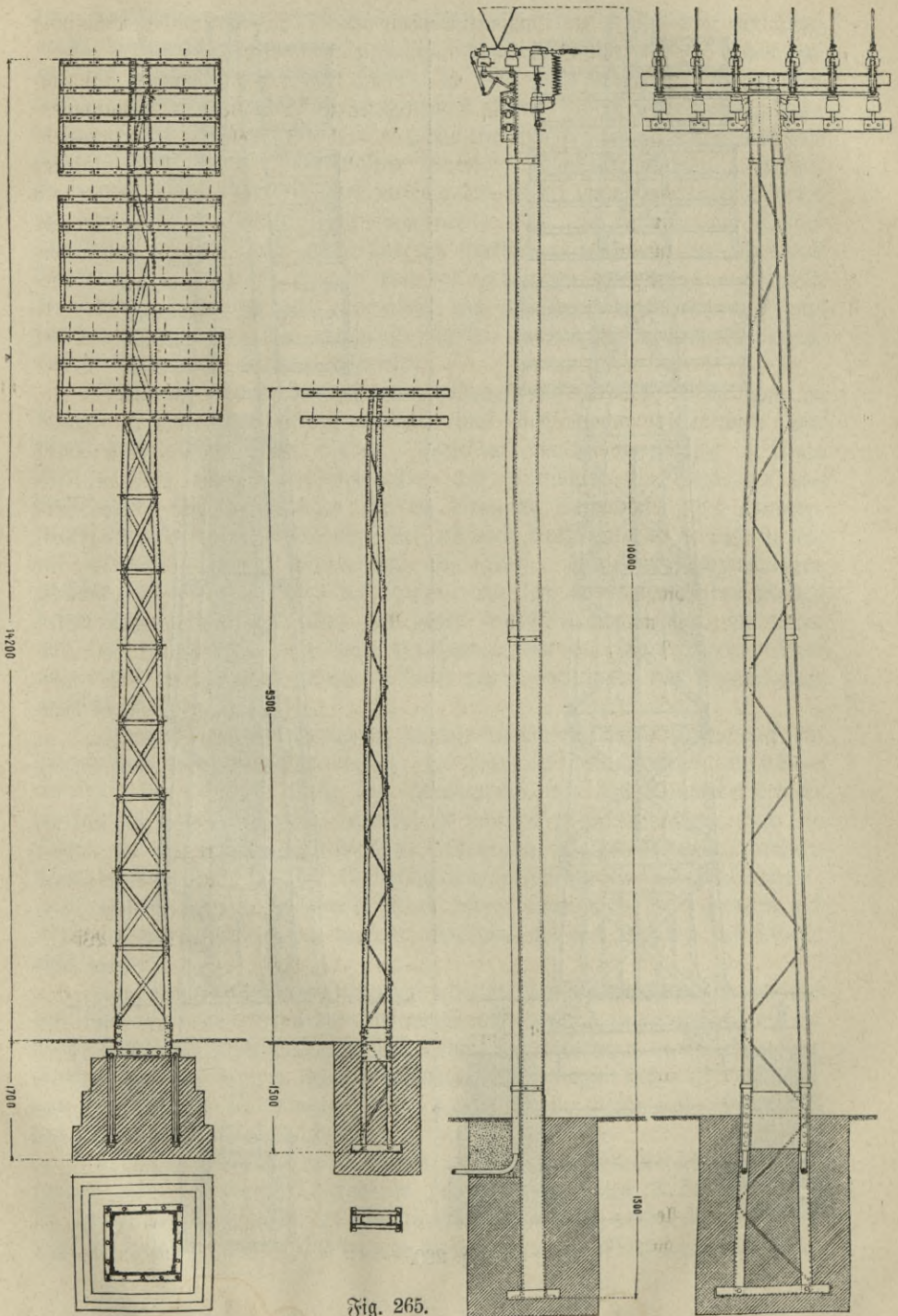


Fig. 265.

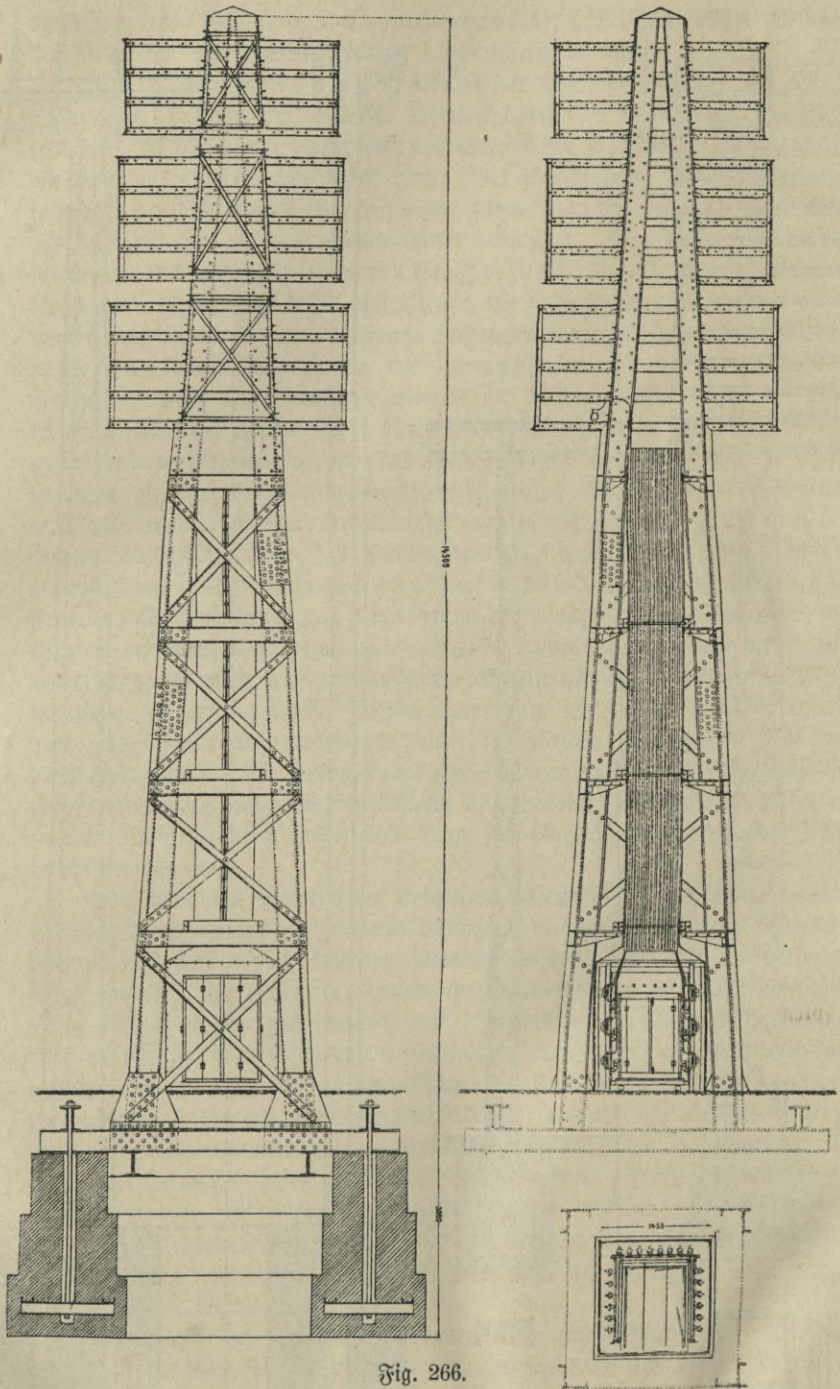


Fig. 266.

jene; berücksichtigt man jedoch die verhältnismäßig kurze Lebensdauer der Holzmasse, die im allgemeinen 8—10 Jahre nicht überschreitet, sowie die Schwierigkeit der Auswechslung solcher Masse, so wird man zweckmäßig den eisernen Trägern — wenn irgend die vorhandenen Mittel zu ihrer Beschaffung ausreichen — den Vorzug geben. Die Holzmasse sind vor ihrer Verwendung mit Fäulnis verhindernden Chemikalien (Kreosot, Quecksilbersublimat u. dergl.) zu imprägnieren, außerdem wird vielfach das in der Erde steckende Schaftende zu dem gleichen Zwecke leicht angebrannt. Da die Fäulnis des Holzes gewöhnlich an der Stelle zuerst und am stärksten auftritt, wo der Mast aus der Erde herausragt, so umgibt man das Schaftende bis etwa 1 m oberhalb des Bodens manchmal auch mit einem eng anschließenden Mantel aus verzinktem Eisenbleche. Die Holzmasse werden in möglichst engen Erdlöchern aufgestellt und mit Steinen festgekeilt.

Maste für Speise- und Hauptverteilungspunkte sollten, wenn auch im übrigen Holzmasse verwendet werden, stets als eiserne Gitterträger oder Eisenrohrmasse ausgeführt werden. Dieselben erhalten zweckmäßig an ihrem unteren Ende einen Verteilungskasten aus Eisenblech zur Aufnahme von Ausschaltern und Sicherungen für die einzelnen Stromkreise, der entweder außen am Maste angebracht oder bei größeren Ausführungen in das Innere des Trägers eingebaut wird (vergl. Fig. 266). Die Verbindungsleitungen zwischen den Sammelschienen des Kastens und den am Kopfende des Mastes befindlichen Isolatoren werden am besten in Gasröhren verlegt, die unten mit dem Kastendeckel wasserdicht verschraubt und mit ihren oberen Enden umgebogen oder in sonst geeigneter Weise gegen Eindringen des Regenwassers geschützt werden.

In geschlossenen Gemeinwesen werden die Oberleitungen häufig auch auf Eisenträgern oder -Gerüsten verlegt, die man auf den Dächern der Häuser anbringt, da auf diese Weise das Straßenprofil von den Leitungen weniger in Anspruch genommen wird. Hierbei ist indessen zu berücksichtigen, daß die Dächer nur mit Schwierigkeit dicht zu halten sind, insolgedessen sehr erhebliche dauernde Ausgaben aus der Instandhaltung derselben für das Elektrizitätswerk entstehen können. Einfacher ist es daher, wenn man die Leitungen auf Konsolen verlegt und diese, wo es angängig, an den Wänden der Häuser anbringt. —

Die Verbindung der Freileitungen mit einer Konsumstelle hat stets von dem der letzteren zunächst befindlichen Leitungsunterstützer aus zu erfolgen. Über die Verwendung von Bleisicherungen und Blitzschutzvorrichtungen zum Schutze der Freileitungen und der von ihnen abgehenden Zweigleitungen gegen Überlastungen und atmosphärische Entladungen ist an anderer Stelle (vergl. Kap. 10) bereits das Notwendige gesagt worden.

Die Transformatoren werden zweckmäßig in Eisenblechhäuschen von rundem oder viereckigem Querschnitte untergebracht, deren Außenseiten, wie die bekannten Vitrassäulen, zu Plakatanschlägen benutzt werden können. Die Fig. 267 zeigt die innere Ausstattung einer solchen Transformatorstation für

2 Transformatoren, von denen der eine auf dem Boden, der andere im oberen Teile des Häuschens aufgestellt ist.

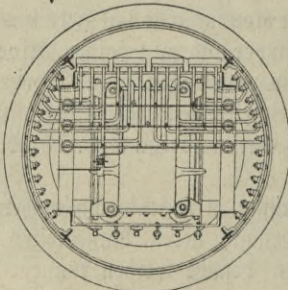
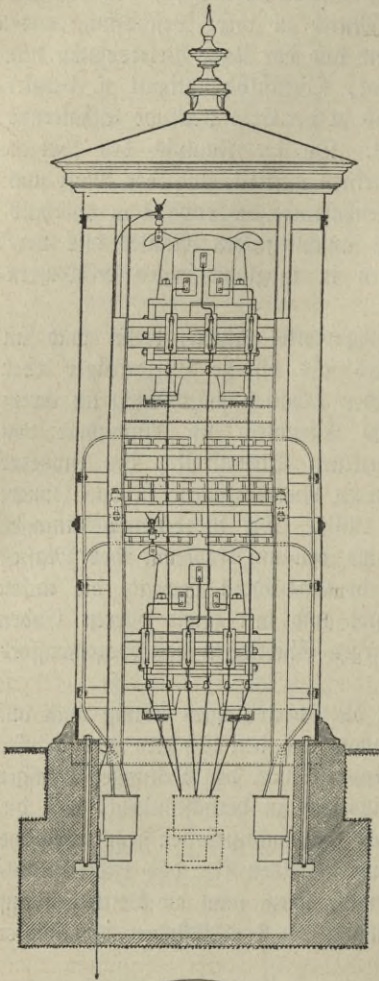


Fig. 267.

Zur Verbindung der Freileitungen mit der Transformatorstation wird entweder ein Leitungsträger direkt neben dem Transformatorhäuschen angeordnet und diese Verbindung durch Kabel hergestellt, die am Mast in Rohren zu verlegen und unterirdisch in das Innere des Transformatorhäuschens zu führen sind (Fig. 265 rechts), oder es wird der obere Teil des Transformatorhäuschens direkt als Gitterträger ausgebildet, in welchem Falle die Herstellung dieser Verbindung sehr vereinfacht wird.

Werden die Leitungen unterirdisch in Gestalt von eisenbandarmierten Bleikabeln (vergl. Kap. 10) verlegt, so ist ihre Montage eine wesentlich einfachere, als in dem vorstehend erörterten Falle der Freileitungsanlage. Die Gräben zur Aufnahme der Kabel erhalten eine Tiefe von etwa 1 m, damit die Kabel in frostfreiem Erdreiche liegen; die Breite der Gräben richtet sich nach der Zahl der hineinzulegenden Kabel. Nach ihrer Verlegung in den Gräben werden die Kabel zweckmäßig mit einer Lage von Ziegelsteinen überdeckt, um sie vor zufälligen Verletzungen durch Arbeitsgeräte bei der Vornahme von Erdarbeiten zu schützen. An den Speisepunkten werden eiserne Verteilungskästen mit Sicherungen für die abgezweigten Stromkreise, an den Kreuzungsstellen jenen ähnliche Kreuzungskästen in die Leitungen eingeschaltet; diese Kästen werden zweckmäßig in ausgemauerten Schächten montiert und erhalten einen wasserdichten Verschlussdeckel, so daß sie jederzeit bequem zugänglich sind. Die Abzweigungen von den Straßenleitungen zu den Konsumstellen werden durch Kabelmuffen hergestellt; bei der Anbringung dieser Anschlußstellen muß man mit größter Vorsicht verfahren, um

zu verhindern, daß Feuchtigkeit in die Abzweigstelle bzw. das Kabel bei dessen Zerschneidung eindringt, die zu einer raschen Zerstörung des Kabels infolge Stromüberganges führen würde. Die früher mehrfach angewandte Verlegung von blanken Kupferleitungen auf Isolatoren in Kanälen, z. B. nach dem System Monier, hat sich nicht bewährt und kommt deshalb heute kaum mehr in Frage.

Über die Installation der Leitungsanlage, der zugehörigen Schalt- und Sicherungsapparate sowie der Beleuchtungskörper zc. geben die vom Verbands Deutscher Elektrotechniker herausgegebenen Sicherheitsvorschriften erschöpfende Anweisungen, weshalb wir hier auf dieselben verweisen¹⁾.

Was die elektromotorischen Antriebe betrifft, so ist darüber im Anschlusse an die diesbezüglichen Ausführungen auf S. 438 dieses Kapitels noch folgendes zu erwähnen:

Wir unterscheiden zwischen Gruppenantrieb und Einzelantrieb der Arbeitsmaschinen. Der Gruppenantrieb kommt in Frage für eine Reihe möglichst gleichzeitig und unter tunlichst gleichartigen Betriebsverhältnissen arbeitender Maschinen von meist kleinerem Kraftbedarf, die an einem kurzen, in wenigen Lagern laufenden Transmissionsstrange angeschlossen sind, der von einem Elektromotor angetrieben wird. Auf tunlichste Verminderung der Transmissionsverluste ist hierbei das Hauptaugenmerk zu richten, zu welchem Zwecke nur eine beschränkte Zahl der in Betracht kommenden Arbeitsmaschinen räumlich vereinigt an eine gemeinsame Transmissionswelle anzuhängen ist, derart, daß längere, kraftverzehrende Antriebswellen jedenfalls vermieden werden. Ferner sind nur solche Arbeitsmaschinen für den Gruppenantrieb geeignet, für deren Regulierung die üblichen mechanischen Hilfsmittel, wie Stufenscheiben, konische Trommeln u. dergl. genügen bzw. verwendet werden sollen. In allen übrigen Fällen kommt der Einzelantrieb in Frage; erwähnt seien hierbei:

1. Arbeitsmaschinen von größerem Kraftbedarf und solche, die nur zeitweilig im Betriebe sind.
2. Arbeitsmaschinen, an deren Tourenregulierung und Präzision weitgehende Anforderungen gestellt werden.
3. Alle übrigen räumlich voneinander entfernt aufgestellten Arbeitsmaschinen.

Der Einzelantrieb ist entweder direkt, indem die Achsen des Elektromotors und der Arbeitsmaschine unmittelbar miteinander verbunden werden, oder indirekt, indem zwischen den beiden Achsen ein Vorgelege eingeschaltet wird. Als Beispiele für den ersten Fall führen wir an: Antrieb von Ventilatoren, Zentrifugen, Zentrifugalpumpen, Kreis sägen und anderen schnell laufenden Arbeitsmaschinen, die sich den Geschwindigkeiten normaler Elektromotoren gut anpassen. Ferner elektrische Wasserhaltungsmaschinen für Bergwerke, bei denen der Rotationskörper des Elektromotors gewöhnlich direkt auf die Achse der Pumpmaschine gesetzt wird. Ferner elektrisch betriebene Walzen-

¹⁾ Vergl. auch Frhr. v. Gaisberg, Taschenbuch für Monteur elektrische Beleuchtungsanlagen.

straßen, Schleiftische für Glasplatten großer Dimensionen, Schachtfördermaschinen mit elektrischem Antriebe usw. Hierbei gelangen unter Umständen Elektromotoren sehr großer Leistung von 1000 PS und darüber zur Verwendung.

Für den indirekten elektromotorischen Einzelantrieb bieten alle Arbeitsmaschinen der Schlosserei, der mechanischen Werkstatt usw. genügend Beispiele. Die erforderlichen Übersetzungen können durch Riemenscheibenvorgelege (Hobelmaschinen, Bohrmaschinen zc.) oder durch Zahnrad- oder Schneckenradvorgelege (Hebezeuge, Kranen, Kotsausdruckmaschinen, Zeugdruckmaschinen, Straßenbahnwagen und elektrische Lokomotiven zc.) oder durch Friktionscheiben (Pressen u. dergl.) hergestellt werden.

Die Vorteile des elektrischen Antriebes der Arbeitsmaschinen gegenüber dem mechanischen sind sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Art. In technischer Beziehung sind die Unabhängigkeit der einzelnen elektrisch angetriebenen Arbeitsmaschinen voneinander, ferner die Möglichkeit einer weitgehenden Tourenregulierung mit allmählichem Übergange von einer Geschwindigkeit zur anderen und die präzise Wirkungsweise der Elektromotoren, die nach erfolgtem Einschalten binnen kürzester Frist ihre volle Tourenzahl erreichen, diese auch bei Belastungsänderungen konstant halten und durch geeignete elektrische und mechanische Bremsvorrichtungen fast momentan stillgesetzt werden können, bereits hervorgehoben worden. Gerade die präzise Wirkungsweise ist beispielsweise für die Textilindustrie von der größten Bedeutung, insbesondere für den Betrieb von Seidenwebstühlen; denn die Gleichmäßigkeit und damit der Wert des Gewebes hängt in erster Linie ab von der präzisen Ein- und Ausschaltung und einer durchaus konstanten Tourenzahl der Webstuhlachse. Diesen Anforderungen vermag natürlich der Transmissionsantrieb der Webstühle wegen der gleitenden Riemen in weit geringerem Maße nachzukommen, als der mit Zahnradübertragung arbeitende Elektromotor; infolgedessen geht der genannte Industriezweig in immer größer werdendem Umfange zum elektrischen Einzelantriebe der Webstühle über, obwohl derselbe — besonders wenn es sich um den Umbau vorhandener Anlagen handelt — mit beträchtlichen Anlagekosten verknüpft ist. — Ein weiteres Beispiel für die technischen Vorzüge des elektrischen Antriebes bietet der Dreimotorenlaufkran. Ein solcher Laufkran erhält einen Motor zum Kranfahren, einen zweiten zum Heben und Senken der Last und einen dritten zum Ragenfahren. Der Strom wird dem Krane selbst durch zwei an der einen Seite gespannte Kontaktleitungen zugeführt und von der im Führerstande auf dem Krane befindlichen Stromverteilungsstelle aus zu den sämtlichen Motoren geleitet. Die drei Regulieranlasser (Kontroller) befinden sich ebenfalls im Führerstande und werden von dem Kranführer bedient. Da die Kabe auf dem Krane hin und her läuft, so muß für ihren Motor längs des Kranes eine der Zahl der Kontakte des zugehörigen Kontrollers entsprechende Anzahl von Kontaktleitungen gespannt werden, von denen der Motor mittels eines an der Kabe befestigten Kontaktapparates den Strom empfängt. Da der Führer alle Motoren gleichzeitig arbeiten lassen kann, so können sämtliche Kranbewegungen, also

Kranfahrten, Lastheben oder Senken und Wagenfahrten zu gleicher Zeit vorgenommen und damit natürlich eine wesentliche Zeitersparnis herbeigeführt werden. — Als weiteres Beispiel erwähnen wir die elektrische Wasserhaltung in Bergwerken, die im Vergleiche zu den früher üblichen Dampfwasserhaltungsanlagen, abgesehen von den bereits erwähnten Vorzügen des elektrischen Einzelantriebes, den wesentlichen Vorteil bietet, daß bei ihr die Dampfrohrleitungen wegfallen, die den gerade in Bergwerken sehr beschränkten Raum in störender Weise in Anspruch nehmen und mit der Dampfmaschine der Pumpe zusammen eine erhebliche Steigerung der Temperatur bewirken. —

Was die wirtschaftlichen Vorteile des elektromotorischen Betriebes anbelangt, so beruhen dieselben in der Ersparnis an Anlagekosten und an Betriebsausgaben.

Als Beispiel für die Ersparnis an Anlagekapital führen wir den bereits erwähnten Wegfall ausgedehnter Transmissionsanlagen in der Textilindustrie (Spinnereien, Webereien), bei Brauereien u. dergl. an; bei solchen Anlagen stellen sich die Kosten für den elektrischen Antrieb meist billiger, besonders wenn man bei Neuanlagen auch die durch den Transmissionsbetrieb entstehenden Mehrkosten für die Hochbauten in Rechnung zieht.

Im übrigen sind auch in den Fällen, in welchen die erste Anlage bei elektromotorischer Einrichtung etwas teurer zu stehen kommt, als die mechanische, mit der ersteren gewöhnlich so erhebliche Betriebsvorteile und Ersparnisse an Betriebsausgaben verknüpft, daß dadurch eine etwaige Differenz in den Anlagekosten sehr bald ausgeglichen wird. Diese Vorteile beruhen in den in seiner Eigenart begründeten Vorzügen des Elektromotors gegenüber den meisten anderen Antriebsmaschinen, die wir nachstehend kurz zusammenfassen wollen:

Der geringe Raumbedarf des Elektromotors, seine Unabhängigkeit von der Betriebsanlage bezüglich der räumlichen Entfernung von dieser und ihrer Wirkungsweise, seine Unempfindlichkeit gegen stauberfüllte oder feuchte Umgebung machen ihn als Antriebsmaschine für nahezu jeden Fall geeignet. Der verhältnismäßig hohe Wirkungsgrad auch der kleineren Typen gewährleistet einen außerordentlich sparsamen Betrieb; es kommt der bereits erwähnte Wegfall ausgedehnter Transmissionsstränge hinzu, die ganz bedeutende Verluste verursachen könnten, besonders wenn sie durch mehrere Stagen hindurchgehen, was bei Brauereien, Webereien, Spinnereien und dergleichen Anlagen meistens zutrifft. Es sind Fälle bekannt geworden, in denen der Transmissionsverlust 50% der von der Dampfmaschine abgegebenen Gesamtleistung und darüber beträgt. Der Wegfall des Transmissionsverlustes macht sich besonders auch in solchen Fällen geltend, in denen die Arbeitsmaschine nur zeitweilig in Gebrauch ist, was z. B. bei manchen Aufzügen zc. der Fall ist. Ferner ist zu berücksichtigen, daß der Elektromotor einer dauernden Wartung nicht bedarf und daß infolgedessen gegenüber Antriebsmaschinen anderer Art wesentliche Ersparnisse an Bedienungskosten erzielt werden. Der Überverbrauch des Elektromotors ist minimal, da bei ihm nur zwei — seltener drei — Achsenlager geschmiert werden müssen und hin und her gehende Teile, die einer

reichlicheren Düng bedürfen, nicht vorhanden sind. Die Abnutzung, die der Elektromotor bei sachgemäßer Behandlung durch den Betrieb erfährt, ist wegen seiner einfachen Bauart sehr gering; dieselbe beschränkt sich auf die Lagergehäusen und den Kommutator bei Gleichstrommotoren, bezw. die Schleifringe bei Drehstrommotoren, welche Teile leicht und mit verhältnismäßig geringen Kosten erneuert werden können, wenn sie im Laufe der Zeit ersatzbedürftig geworden sein sollten. Von wesentlicher Bedeutung ist ferner der Umstand, daß der Wirkungsgrad des Elektromotors durch die Abnutzung im Betriebe keine nennenswerte Verminderung erfährt, wodurch er sich vorteilhaft von Betriebsmaschinen anderer Art unterscheidet. Die Summe dieser Vorzüge verleiht dem Elektromotor auch in wirtschaftlicher Beziehung ein beträchtliches Übergewicht über alle anderen Antriebsmaschinen, dem er seine rapide Verbreitung im Laufe weniger Jahre verdankt.

Am Schlusse dieser Ausführungen halten wir die Erörterung einiger Hauptgesichtspunkte, die die Aufstellung des Projektes betreffen, für zweckmäßig.

Zu einem Projekt gehört ein Erläuterungsbericht, ferner die zum Verständnis desselben und des Kostenanschlages erforderlichen Situationspläne und sonstigen Zeichnungen, sowie der Kostenanschlag selbst, dem manchmal noch eine Betriebskosten-, bezw. Rentabilitätsberechnung beizufügen ist.

Der Erläuterungsbericht ist für die Beurteilung des Projektes von besonderer Wichtigkeit; denn durch ihn wird dem Laien der Kostenanschlag erst verständlich. Auf die klare Abfassung eines ausführlichen Erläuterungsberichtes ist deswegen ein großer Wert zu legen. Der Bericht soll im wesentlichen enthalten: Den rechnerischen Nachweis der Übereinstimmung der Leistung der im Kostenanschlage angebotenen Kraft- und Stromerzeuger mit der in dem Programm verlangten, eine ausführliche Begründung der Wahl der vorgeschlagenen Systeme der Kraftanlage und der elektrischen Anlage, ferner eine Beschreibung der Leitungsanlage und ihrer Montage, die Angabe der maximal zulässigen Belastung des Leitungsnetzes und seiner einzelnen Teile sowie der Spannungsverluste, die der Berechnung der Leitungsquerschnitte zugrunde gelegt sind; endlich eine kurze Beschreibung aller derjenigen Teile der Anlage, zu deren Verständnis der Text des Kostenanschlages nicht ausreicht.

Bezüglich der Zeichnungen, die als Beilagen zu der Offerte zu liefern sind, sollten seitens der Reflektanten, besonders wenn sie, wie es meistens zutrifft, kostenlose Anfertigung des Projektes beanspruchen, billigerweise nur Situationspläne und skizzenhafte Konstruktionszeichnungen, die zum Verständnis des Angebotes vollständig genügen, verlangt werden. Denn die Geschäftsmkosten der Elektrizitätsgesellschaften werden hauptsächlich durch die umfangreichen Projektierungsarbeiten zu ganz enormer Höhe getrieben; jede Beschränkung der diesbezüglichen Ansprüche der Reflektanten auf das unbedingt erforderliche Maß wird daher zu einer Verbilligung der Fabrikate beitragen und deshalb zuletzt den Empfängern der Anlage selbst zugute kommen.

Der Kostenanschlag soll im Texte eine reihenmäßige Aufzählung sämtlicher Einzelteile der Anlage mit kurzen Angaben über die Typen, Größen,

Leistungen 2c. enthalten. Diese Angaben müssen indessen so abgefaßt sein, daß ein Zweifel über die maßgebenden Eigenschaften der angebotenen Gegenstände nicht entstehen kann. In den Preisrubriken sollen sowohl die Einheitspreise aller Teile als auch ihre Summe auftreten. Die Übersichtlichkeit und das Verständnis des Angebotes werden wesentlich erleichtert, wenn dasselbe in einzelne Abschnitte zerlegt wird, z. B. in baulichen Teil, motorischen Teil und elektrischen Teil; der letztere ferner in Stromerzeuger, Apparatenanlage, Leitungsnetz, Konsumstellen usw. Am Schlusse des Kostenanschlages sind diejenigen zur Herstellung der Anlage erforderlichen Arbeiten aufzuführen, die von dem Angebote ausgeschlossen sind; hierher gehören gewöhnlich die Maurer-, Zimmerer-, Schlosser- und Schreinerarbeiten, Stellung der Hilfsarbeiter, der Müst- und Hebezeuge usw. Ferner empfiehlt sich an dieser Stelle eine kurze Zusammenstellung der einzelnen Hauptteile des Angebotes nebst zugehörigen Gesamtpreisen.

Für ganz verfehlt halten wir die von manchen Reflektanten auf eine elektrische Anlage beliebte Methode, von einer bestimmten Firma ein Projekt ausarbeiten zu lassen, dann eine Abschrift des Kostenanschlagtextes an Konkurrenzfirmen zu senden und diese um Eintragung ihrer Preise in das Formular zu ersuchen. Denn abgesehen davon, daß das Projekt, wenn nichts Gegenteiliges vereinbart und insbesondere keine Bezahlung für dasselbe geleistet wird, gewöhnlich Eigentum des Verfassers bleibt, gibt dieser Weg dem Reflektanten auf die Anlage keine Sicherheit dafür, daß er in dem Musterprojekt das für seinen Fall wirklich geeignete erhält, weil er in jenem lediglich eine einseitige Bearbeitung der gestellten Aufgabe unter Berücksichtigung und auf Grund ganz bestimmter Fabrikate besitzt. Aber auch seitens der Elektrizitätsgesellschaften sollte unseres Erachtens die Zumutung zurückgewiesen werden, ein Preisangebot für ein Projekt abzugeben, dessen Wichtigkeit in technischer Beziehung sich mangels Kenntnis der näheren Verhältnisse ihrer Beurteilung entzieht, mit dem der Reflektant also lediglich eine Preiskontrolle bezweckt. Bei freier Konkurrenz, d. h. Bearbeitung des Projekts durch verschiedene Firmen, entsteht allerdings dem Reflektanten wegen des Einganges mehrerer, zum Teile von verschiedenem Standpunkte aus bearbeiteter Projekte die Aufgabe, sich in das unter Umständen sehr umfangreiche Material einzuarbeiten, es zu sichten und sich auf Grund desselben ein Urteil über das für ihn zweckmäßigste Projekt zu bilden. Diese Arbeit leistet der Reflektant aber lediglich in seinem eigenen Interesse, und ihn zur Ausführung derselben zu befähigen, ist ein Hauptzweck dieses Buches.

Was endlich die Betriebskosten- und Rentabilitätsberechnung anbelangt, so hat dieselbe in den meisten Fällen nur einen problematischen Wert, da ihr natürlich nur normale Verhältnisse zugrunde gelegt werden können; die hierauf gegründeten Resultate können sich aber später im praktischen Betriebe durch irgendwelche nicht vorherzusehenden Ereignisse vollständig ändern. Deshalb sollten solche Berechnungen stets mit dem ausdrücklichen Hinweise abgegeben werden, daß es sich dabei um durchaus unverbindliche, im besten Falle angenäherte Aufstellungen handelt.

Die Betriebsausgaben, über deren Höhe man im voraus bestimmte Angaben machen kann, setzen sich zusammen aus den Kosten für die Verwaltung und die Bedienung, sowie den Verbrauch an Betriebsmaterialien (Brennmaterial, Öl, Chemikalien, Wasser, Puzwolle etc.), ferner aus den Beträgen, die für Unterhaltung und laufende Reparaturen der Betriebsmittel aufzuwenden sind, endlich aus den Ausgaben für Bekleidung des Personals, für Haftpflichtversicherung, Steuern und Bureaubedarf. Zu diesen Ausgaben kommen noch die für Verzinsung des Anlagekapitals, für Amortisation (Rücklagen), Abschreibungen (Wertverminderung) und etwaige Dotierung eines Reservefonds zurückzustellenden Beträge. Endlich sind in manchen Fällen noch Abgaben für Konzessionen und Gerechtsame, sowie für Betriebschäden zu berücksichtigen. Die Höhe der für die einzelnen Ausgabenposten in Frage kommenden Beträge richtet sich ganz nach den Verhältnissen des einzelnen Falles, weshalb allgemein gültige Angaben darüber nicht gemacht werden können; das gleiche gilt bezüglich der Einnahmen.



Sachregister.

(Das Adjektivum steht vor dem Substantivum. „Asynchroner Motor“ z. B. findet man unter A.)

A.

Abbrand 340.
 Abbremsung 381.
 Abschmelzstromstärke 298.
 Äußerer Widerstand 16.
 Akkumulatoren 197, 283, 447.
 — Behandlung 222.
 — Ladung 203, 448.
 — Verwendung 83.
 Aktionsturbine 87.
 Altersbeschlag 324.
 Aluminiumleitungen 268.
 Ampere 9.
 Amperemeter 248.
 Amperestundenzähler 422.
 Amperewindungen 37.
 Amylazetat 319.
 Anker 151.
 Ankerkern 158.
 Ankerreaktion s. Ankerrückwirkung.
 Ankerrückwirkung 166, 184, 371.
 Ankerspule 152.
 Ankerwicklung 152, 157.
 Anlasser für Elektromotoren 389, 418.
 Anlaufwiderstand 375.
 Aperiodische Instrumente 247.
 Arbeit 1.
 Arbeit des Wechselstromes 53.

Armatur (Dynamomaschinen) 151.
 — (Dampfessel) 109.
 Aron-Zähler 425.
 Asynchrone Generatoren 399.
 — Motoren 385.
 Atmosphärische Entladungen 303.
 Aufgedruck (Bürsten) 162.
 Ausgleichsmaschine 283.
 Ausgleichsleitungen 296, 453.
 Auspuffmaschine 99.
 Ausschalter 406.
 Außenpolmaschine 161.
 Außenleiter 281.
 Außenschlächtige Turbine 89.
 Automatische Regulatoren 417.
 Axialturbine 88.

B.

Belastung 27.
 Beruhigungswiderstand 362.
 Betriebsausgaben 451.
 Blasmagnet 337.
 Bläth-Zähler 434.
 Bleiakкумулятор 198.
 Bleikabel (Verlegung) 458.
 Bleimantel 271.
 Bleisicherung 299.
 Blitz 304.

Blitzschlag 303.
 Blitzschutz 303.
 Blitzschutzvorrichtungen 303.
 Bogenlampen 349.
 — =Transformatoren 363.
 — =Widerstände 361.
 Bogenlicht 335.
 Boudreaubürsten 161.
 Bremsdynamometer 381.
 Bremer-Lampe 345, 360.
 Brennwert 92.
 Bürsten 153, 161.
 Bürstenapparat 162.

C.

(siehe auch K.)

Centralisation der Sicherungen 301.
 Centralcondensation 114.
 Charakteristik 169.
 Compounddynamo 165.
 Compounderregung 242.
 Compoundierung bei Wechselstrommaschinen 402.
 Compoundmaschine (Dampf-) 108.
 Compoundmotoren 380.
 Converter s. Umformer.
 Corlißsteuerung 110.
 Cornwallkessel 100.
 Coulombzähler 422.

- Cosinus φ (s. auch Leistungs-
 faktor) 64, 66, 256.
 — — bei Drehstrommoto-
 ren 394.
 — — bei Synchronmoto-
 ren 385.
- D.**
- Dämpfung 247, 428.
 Dampfdruck 95.
 Dampferzeuger 100.
 Dampfdruckdiagramm 115.
 Dampfkraftanlage 81, 98.
 Dampflokobile 119.
 Dampfmaschine 107.
 Dampfpfeisepumpe 104.
 Dampfstrahlpumpe 105.
 Dampfmaschinen 79.
 Dampfreaktionsturbine 128.
 Dampfturbine 125.
 Dampfverbrauch 119.
 Dauerbrandlampen 358.
 Deprez d'Arsonval = Instru-
 mente 249.
 Dichte 5.
 Dielektrikum 67.
 Dielektrizitätskonstante 68.
 Dielektrische Hysteresis 70.
 Dieselmotor 144.
 Differentiallampen 350, 356.
 Diffuse Reflexion 316.
 Dissoziation 220, 340.
 Divisor 332.
 Docht 336, 339.
 Doppelglocke 269.
 Doppeltarifzähler 438.
 Doppeltwirkender Viertakt-
 motor 138.
 Doppelzellenschalter 231.
 Drahtanker 159.
 Drehfeld 385.
 Drehstrom 72, 73, 245.
 Drehstrom = Gleichstrom = Um-
 former 241.
 Drehstrom = Transformator
 239.
 Drehstromanlasser 389.
 Drehstromanlagen 295.
- Drehstrommaschinen 73, 181.
 Drehstrommotoren 385, 439.
 Drehstrombremsmagnet 424.
 Drehstromzähler 436.
 Drehstromleitungen (Vered-
 lung) 291.
 Drehungsmoment 251, 371.
 Drehungssinn der Gleich-
 strommotoren 370.
 Dreieckschaltung 73, 76, 243.
 Dreifach-Expansions-
 maschine 108.
 Dreiphasensystem (Leistung)
 259.
 Dreiphasenstrom 72.
 Dreileitersystem 280.
 Dreischaltung bei Bogen-
 lampen 366.
 Drosselpule 364.
 Druckgasanlage 147.
 Druckturbine 87.
 Dulong'sche Formel 94.
 Durchlässigkeit (magnetische)
 37.
 Durchschlagsfestigkeit (Iso-
 lator) 269.
 Durchschlagsprobe 175.
 Dynamo 151.
 Dynamomaschinen 151.
- E.**
- Edison-Akkumulator 223.
 Effekt 2, 172.
 Effektive Stromstärke 51, 61.
 — Spannung 51.
 Effektiveleistung 118.
 Einfach-Expansionsmaschine
 107.
 Einheitspol 34.
 Einfachzellenschalter 229.
 Einfachkabel 271.
 Einflammrohrkessel 100.
 Einphasenstrom 46.
 Einphasenstrom = Gleichstrom =
 Umformer 241.
 Einphasenstrommaschine 70.
 Einphasenmotoren (asyn-
 chron) 396.
- Einpolige Sicherung 300.
 Einseitig belastetes Drei-
 phasensystem 296.
 Einspritzkondensation 99.
 Einzelantrieb 459.
 Einzelkondensation 113.
 Eisenbandarmiertes Kabel
 271.
 Eisenverluste 40.
 Eisen-Nickel-Akkumulator
 225.
 Elektrizitätszähler 422.
 Elektrischer Funke 304.
 Elektrodynamometer 256.
 Elektrodynamische Kraft
 257.
 Elektromotorische Kraft 8, 16,
 41, 152, 154.
 Elektromagnet 37.
 Elektrostatische Einheit der
 Elektrizitätsmenge 6.
 Elektrolyte 13.
 Elektrolytischer Umformer
 244.
 Elektrolyt-Glühkörper 327.
 Elektromotoren 369, 440.
 Elektromotorischer Antrieb
 459.
 Elektrostatische Voltmeter
 255.
 Elektrostatische Verluste in
 Fernleitungen 297.
 Economiser 99.
 Energieverluste in Leitungen
 276, 287.
 Energie 1, 17.
 Entladung des Akkumulators
 206, 223.
 Erdplatte 305.
 Erdschluß 309.
 Erdschlußanzeiger 310.
 Erholung 207.
 Erläuterungsbericht 462.
 Erregung 162.
 Ertragwiderstand für Bogen-
 lampen 364.
 Explosionsmotoren 136.
 — (Betriebsmittel) 146.

F.

Farad 68.
 Fallschiebersicherung 302.
 Farbige Lichtbogen 345, 348.
 Faure-Platten 217.
 Fehlerbestimmung in Lei-
 tungen 313.
 Feldstärke 34.
 Feldmagnet 152, 160.
 Fernschalter 234, 411.
 Ferraris-Zähler 433.
 Fettflecksphotometer 315.
 Fettkohlen 92.
 Feuerficherer Querschnitt 277.
 Fixpunktbogenlampen 353.
 Flachschieber 109.
 Flammenbogen 345.
 Flammenbogenlampen 360.
 Flammrohrkessel 100.
 Flügelwattstundenzähler 432.
 Fluidum 3.
 Flüssigkeitswiderstände 14,
 421.
 Formation 219.
 Formfaktor 78.
 Foucaultsche Ströme 43.
 Francis-Turbine 88.
 Freileitung 268.
 Fremderregung 162.
 Frequenz 49.
 Frequenzmesser 267.
 Frequenzwandler 244, 399.
 Fuchs'sche Methode 212.
 Füllungsgrad 117.
 Fünfleitersystem 284.
 Funkenbildung (Bürsten) 167.

G.

Gasmotoren 136, 196.
 Gegenstromheizfläche 93.
 Gegenseitige Induktion 286.
 Gegenelektromot. Kraft 370.
 Generator (Gas) 148.
 — (siehe Dynamo).
 Generatorgas 147.
 Gemischte Schaltung
 (Dynamo) 165.
 Gesättigter Dampf 96.

Geschlossen verkettete Span-
 nung 73.
 Geschlossener Transformator
 239.
 Gestell (Akкумуляtor) 222.
 Girard-Turbine 87.
 Gitterplatte 217.
 Glanz 320.
 Glatter Anker 158.
 Gleichstrommaschinen 151.
 Gleichstromlichtbogen 338.
 Gleichstrommotoren 369, 439.
 Gleichheitsphotometer 315.
 Glocken für Bogenlampen 365.
 Glühfaden 321.
 Glühlampe 320.
 Gummiabern 270.
 Güteverhältnis 213.
 Grabierwerke 114.
 Grammescher Ring 152.
 Grenzturbine 88.
 Groboberflächenplatte 217.
 Gruppenantrieb 459.

H.

Hahnsteuerung 109.
 Haltebremse 423.
 Hauptstrombogenlampen 349.
 Hauptschlussmaschinen 162.
 Hauptstrommaschinen 162.
 Hauptleitung 275.
 Hauptmaschine 283.
 Hauptstrommotoren 371.
 Hauptstromkraftübertragung
 374.
 Hebelauschalter 407.
 Hebelumschalter 407.
 Hefnerferze 314.
 Hefnerlampe 314.
 Heißdampfmaschine (Schmidt)
 121.
 Heizkraft 92.
 Heizspiralen 328.
 Heizwertbestimmungen 94.
 Heizwert 94.
 Hemisphärische Lichtstärke 328.
 Henry 45, 286.
 Hilfsselektrode 212.

Hilfsapparate 406.
 Hilfswicklung 396.
 Hintereinanderschaltung 30.
 Hintereinanderschaltung von
 Stromquellen 33.
 Hydrazininstrument 251.
 Heyland-Diagramm 393.
 Hochofengase 149.
 Hochspannungskabel (Ar-
 beitsverluste) 273.
 Hochspannungssicherung 302.
 Hochspannungsröhrenaus-
 schalter 409.
 Holophanglocke 368.
 Hörnersicherung 303.
 Hörnerbleitabelle 306.
 Hörnerauschalter 409.
 Hult-Maschine 131.
 Hummel-Zähler 436.
 Hysteresis 39, 172.

I.

Iandus-Lampe 359.
 Indikatormethode 175.
 Indirekte Bremsmethode 174.
 — elektrische Methode 174.
 — Beleuchtung 367.
 Indizierte Arbeit 115.
 — Leistung 117.
 — Helligkeit 319.
 Ignor-Uniformer 444.
 Impedanz 60.
 Induktanz 46, 60.
 Induktion 40, 286.
 Induktionsfreie Belastung 50,
 287.
 Induktive Belastung 56, 288.
 Induktionspule 61.
 Induktionsmotoren 385.
 Induktor 151.
 Innerer Widerstand 16.
 Innenschlächtige Turbine 89.
 Injektor 105.
 Innenpolmaschine 161.
 Intensivbogenlampen 347,
 361.
 Invertierte Bogenlampen
 367.

Joch 160.
 Ionen 340.
 Joulesche Wärme 23.
 Jouval-Turbine 88.
 Jungner-Akkumulator 225.
 Isolation 307.
 Isolationswiderstand 274,
 307.
 Isolationsprüfung 307.
 Isolationsmessung 310.
 Isolierglocken 269.

N.

Kabel 270.
 Kabelverluste 273.
 Kabelkanal 450.
 Käfiganker 388.
 Kalorie 3, 23.
 Kaminfühler 114.
 Kapazität (Kondensator) 67,
 69.
 — (Akkumulator) 210.
 — (Kabel) 273.
 Kapazitätsbatterie 225.
 Kapazitätsprobe 212.
 Kapazitätsstrom 291.
 Kapselformschalter 408.
 Kastadenschaltung 395.
 Kerntransformator 239.
 Kerze 319.
 Kilogrammometer 2.
 Klemmspannung 21, 62.
 — (Dynamo) 168.
 Koerzitivkraft 39.
 Kohlenbürsten 161.
 Kohlenverbrauch 81.
 Kohlen für Bogenlampen 347.
 Koksofengase 150.
 Kollektor (Pflüge) 176.
 Kommutator 152, 159.
 Kompensationsmagnet 167.
 Kompensierter Motor 401.
 Kondensator 67.
 — (Dampfmaschinen) 99.
 Kondensationsanlage 112.
 Kontaktvoltmeter 233.
 Kontrastphotometer 317.
 Kontrollröhre 417.

Konzentrationsänderungen
 200, 227.
 Konzentrisches Kabel 271.
 Körtling (Zweitaktmotor)
 141.
 Kraftlinien 34.
 Kraftliniendichte 35.
 Kraftübertragung durch
 Gleichstrom (Grenze) 285.
 — durch Wechselstrom
 (Grenze) 296.
 Krater 336, 339.
 Kreuzung 270.
 Kritische Spannung bei Glei-
 chstromglühkörpern 329.
 Kühlturm 114.
 Kurbelwiderstand 13.
 Kugelfotometer 318.
 Kupferbürsten 161.
 Kuppelung, direkte 112, 118.
 Kurzschluß 171.
 — (Nebenschlußmaschine)
 171.
 Kurzschlußanker 388.
 Kurvenform 77.
 Kurbelregulatoren 417.

O.

Ladung 203, 223.
 Ladestrom 68.
 Lagerschmierung 176.
 Lamelle 152.
 Lancashire-Kessel 100.
 Läufer 386.
 Laufabzellen 87.
 Laufkran 460.
 Lebendige Kraft 1, 78.
 Lebensdauer (Akkumulator)
 220.
 — der Glühlampen 326.
 Leerlaufarbeit 115.
 — (Transformator) 235,
 294.
 Leerlaufmethode 173.
 Leistung 2.
 — eines Wechselstromes 64,
 256.
 — eines Drehstromes 76.

Leistung (Gleichstrom-
 maschine) 171.
 — eines Dreiphasensystems
 259.
 Leistungsfaktor 66, 78.
 Leiter zweiter Klasse 327.
 Leitrad (Turbine) 87.
 Leitungen 268, 293.
 Leitungsanlage 452.
 Leitungsfähigkeit 10.
 Leitungsmaße 455.
 Leitungsnetz 268.
 Leitungsträger 455.
 Leitungsverluste 297.
 Leitungsvermögen 9.
 Leitungswiderstand 9, 39.
 Lichtbogen 335, 341.
 Lichtbogenlänge 342.
 Lichtstrom 318.
 Lichtverteilung bei Gleich-
 strombogenlampen 337.
 — bei Wechselstrombogen-
 lampen 343.
 Ziliputbogenlampe 360.
 Eigenleiter 269.
 Lochanker 159.
 Lokalelement 219.
 Lösbarkeit 277.
 Luftzug (Schornstein) 93.
 Lumen 319.
 Lux 319.

M.

Magerkohlen 92.
 Magnetische Disposition 161.
 Magnetische Induktion 37.
 — Kraft 37.
 Magnetischer Widerstand 38.
 — Kreis 160.
 Magnetisches Feld 34, 39.
 — Gebläse 337.
 Magnetisierende Kraft 37.
 Magnetisierungsstrom 67,
 393.
 Magnetismus 34.
 Magnetomotorische Kraft 38.
 Magnetystem 160.
 Manteltransformator 239.

Masseplatte 217.
 Maximalauschalter 413.
 Maximale Spannung 48, 52.
 — Stromstärke 48.
 Maximaler Entladestrom 207.
 — Ladestrom 204.
 Maximalleistung (Dampfmaschine) 117.
 Mechanische Arbeit 1.
 Mechanisches Äquivalent der Wärme 3.
 Megohm 274.
 Mehrfachkabel 271.
 Mehrleitersysteme 280.
 Mehrpolige Maschinen 156.
 Mehrfach-Expansionsmaschine 108.
 Meßbereich (Erweiterung) 252.
 Meßinstrumente 246.
 Meßtransformator 255.
 Metallwiderstände 416.
 Meterkerze 319.
 Meterkilogramm 2.
 Mignonlampe 360.
 Mikrofarad 68.
 Millihenry 46.
 Minimalauschalter 412.
 Mittelleiter 281.
 Mittelschlächlige Wasserräder 85.
 Mittlere hemisphärische Lichtstärke 338.
 — räumliche Lichtstärke 338.
 Momentauschalter 408.
 Monozyklisches System 246.
 Montage (Akkumulator) 222.
 — Schalttafel 451.
 Mordey-Schaltung 156.
 Motorgenerator 240.
 Motorischer Teil 78.
 Motorzähler 426, 429.
 Multizellularinstrument 255.

N.

Nacheilung 59, 61.
 Nachverdampfer 121.
 Nassere Dampf 97.

Nebenschlußlampen 349.
 Nebenschlußmaschinen 164.
 Nebenschlußmotoren 374.
 Nebenschlußregulator 164, 377, 420.
 Negative Selbstinduktion 68.
 Nernst-Lampe 327.
 Neutrale Leitung 296.
 — Zone 153, 166.
 Nickel-Strontium-Akkumulator 225.
 Niveaufläche 6.
 Normale Leistung der Dampfmaschine 117.
 Nullleiter 260, 281, 296.
 Nullpunkt 260.
 Nullpunktswiderstand 260.
 Nutenanker 159.
 Nutzeffekt (Akkumulator) 213.
 Nutzleistung 118.

O.

Oberflächenisolation 269.
 Oberflächenkondensation 99.
 Oberlichtreflektor 368.
 Oberflächliche Räder 84.
 Öchelhäuser (Zweitaktmotor) 139.
 Öffnungs-Extrastrom 44.
 Öffnungsfunken 406.
 Ökonomie der Glühlampen 325.
 — der Quecksilberlampen 334.
 — der Nernstlampen 330.
 — der Osmiumlampen 332.
 — der Gleichstromlampen 338.
 — der Flammenbogenlampen 346.
 — der Wechselstromlampen 344.
 Ölauschalter 409.
 Ölisolator 269.
 Ölregulatoren 420.
 Ölverbrauch bei Maschinen 135.
 Offene Ankerwicklung 157.

Offene Wicklung (Drehstrommotoren) 389.
 Offenes Dreiphasensystem 72.
 Offener Transformator 239.
 Offener Viertaktmotor 136.
 Offen verkettete Schaltung (siehe Sternschaltung).
 Ohm 10.
 Ohmsches Gesetz 15.
 — Gesetz für Magnetismus 37.
 — Gesetz für Wechselstrom 70.
 Ohmscher Spannungsverlust 62.
 Osmiumlampe 331.

P.

Parallelbetrieb (Dynamo und Akkumulator) 225.
 Parallelschaltung im Anker 156.
 — der Dynamomaschinen 186.
 — der Stromverbraucher 31.
 — der Stromquellen 33.
 Parallelstromheizfläche 93.
 Parsons-Turbine (Dampf) 128.
 Partialturbine 89.
 Patronensicherung 302.
 Patzschke (Dampfmaschine) 132.
 Peltonrad 90.
 Pendeldampfmaschine 107.
 Pendeln bei Wechselstrommaschinen 192.
 Pendelregulator 110.
 Periode 47.
 Periodenzahl 49, 71, 244.
 Permeabilität 36.
 Pferdekraft 2.
 Pferdekraftstunde 2.
 Phase 48.
 Phasenanker 388.
 Phasenbelastung 259.
 Phasengleichheit 50, 190.
 Phasenindikator 190.

- Phasennacheilung 385.
 Phasenregler 385.
 Phasenspannung 74.
 Phasenverschiebung 53, 59, 257.
 — im Lichtbogen 345.
 — bei Drehstrommotoren 392.
 Phasenverschiebungswinkel 59.
 Phasenzeiger 190.
 Pilzbildung 340.
 Platte-Platten 216.
 Platten (Akkumulatort) 216.
 Polarität 34.
 Polreagenpapier 371.
 Polschuhe 160.
 Polsucher 371.
 Poncelotrad 84.
 Porzellanglecken 267.
 Potential 6.
 Potentialdifferenz 7.
 Potentialgefälle 19.
 — im Lichtbogen 341.
 Primäre Spannung 235.
 — Wicklung 234.
 Primäres Netz 294.
 Präparatur 322.
 Projektierung 438.
 Prüfbrähte 272, 278.
 Pufferbatterien 225.
- Q.**
- Qualitätsregulierung 139.
 Quantitätsregulierung 139.
 Quecksilberdampfampfen 334.
- R.**
- Raab-Zähler 435.
 Radialturbine 89.
 Reaktanz 58, 60, 286.
 Reaktion 88.
 Reaktionsturbine 88.
 Reaktionszellen 88.
 Reaktive gegenelektromoto-
 rische Kraft 288.
 Reaktiver Spannungsabfall
 286.
- Receiver 109.
 Reflektoren 368.
 Regina-Lampen 359.
 Registrierapparate 268.
 Regulatoren 416.
 Reguliermechanismus der
 Bogenlampen 351.
 Regulierung der Dampf-
 maschine 110.
 — der Tourenzahl bei Mo-
 toren 373, 379, 391.
 Reihemaschine 162.
 Reihenschaltung 30.
 Reinigungsanlage 149.
 Remanenter Magnetismus
 39.
 Rentabilitätsberechnung 463.
 Repulsionsmotor 403.
 Resonanz 194, 267.
 Resultierende Stromstärke 56.
 Rheostate 13, 416.
 Riemenantrieb 112, 118.
 Ringanker 151.
 Ringleitung 278.
 Rohrleitungen 106.
 Rostfläche 93.
 Rotierende Dampfmaschine
 131.
 — Umformer 241.
 Rotationsdampfmaschine
 131.
 Rotor 386.
 Rundschieber 109.
- S.**
- Sägemehltreiniger 149, 150.
 Sauggasanlage 147.
 Schalttafel 451.
 Schaltungen bei Bogenlam-
 pen 366.
 — bei Dynamomaschinen
 162.
 Schaltzellen 229.
 Scheinbare Leistung 57, 288.
 Scheinbarer Widerstand 60.
 Scheitelspannung 48.
 Schenkel 160.
 Schenkelfästen 161.
- Schiebersteuerung 109.
 Schleifenmethode 313.
 Schleifringe 390.
 Schlüpfung (Schlupf) 390.
 Schmelzsicherungen 297.
 Schrumpfen 217, 220.
 Schwankungen im Netz 22.
 Schwarzer Körper 321.
 Schwund 220.
 Schwunmmassen 112.
 Schwungrad 2, 111.
 Scotts Transformations-
 methode 245.
 Sekundärelement 197.
 Sekundäre Spannung 235.
 Sekundäre Wicklung 234.
 Sekundäres Netz 294.
 Selbstentladung 207.
 Selbsterregung 162.
 Selbstinduktion 43, 56, 61, 62.
 Selbstinduktions-Koeffizient
 45.
 Selbsttätige Ausschalter 412.
 — Minimalausschalter 412.
 — Zellenhalter 232.
 Senkbremstellung 423.
 Serienmaschine 162.
 Serienmotor 371.
 Serienschaltung 30.
 Sicherungen 297.
 Siedepunkt 95.
 Siedetemperatur 95.
 Sintern 220.
 Skrubber 149, 150.
 Solenoid 36.
 Spannung 4, 7, 20.
 Spannungsabfall 22.
 Spannung und Entfernung
 277.
 Spannungserhöhung (Kabel)
 273.
 Spannungsmesser 253.
 Spannungsregulierung 453.
 Spannungsteiler 284.
 Spannungstransformatoren
 436.
 Spannungsverlust 19.
 Spannschützenräder 84.

Sparer 337, 347.
 Sparmagnet 423.
 Speisefleitungen 275, 453.
 Speisepumpe 98.
 Speisepunkte 275, 453.
 Speisevorrichtung 104.
 Speisewasservorwärmer 105.
 Spezifisches Leitungsvermögen 10.
 Spezifischer Widerstand 10.
 Spez. Verbrauch 338.
 Spulenblitzableiter 306.
 Spulenschaltung 371.
 Stabanker 159.
 Ständer 386.
 Starkstromregulatoren 420.
 Stationärer Zustand 24.
 Stator 386.
 Steinkohle 91.
 Sternschaltung 73, 74.
 Steuerung 109.
 — bei Gasmotoren 139.
 Stöpselsicherung 301.
 Streuung (magnetische) 161.
 Streukoeffizient 393.
 Stromarbeit 16.
 Stromdichte 26.
 Strommesser 248.
 Stromstärke 8.
 Stromsysteme (Wahl) 439.
 Stromtransformatoren 438.
 Stromverbrauch 80, 438.
 Stromverbrauchsdiagramm 80, 437.
 Stromverzweigung 27.
 Stromwärme 22, 23.
 Sulfatierung 208.
 Sulfattheorie 199.
 Synchrone Umlaufzahl 387.
 Synchronismus 188.
 Synchronmotoren 383.

S.

Tandemmaschine 108.
 Temperaturen im Lichtbogen 338.
 Temperaturkoeffizient 13.
 Thomson-Zähler 427.

Totale Leistung 117.
 — Reflektion 316.
 Tourenänderung bei Motoren 371, 379, 391.
 Transformationsverhältnis 236.
 Transformatoren 233, 294.
 Transformatoren-Fernschalter 411.
 Transformatorenhäuschen 458.
 Transformatorenstationen 458.
 Transmissionen 459.
 Tripleymaschine 108.
 Trommelanker 155.
 Turbine (Wasser) 86.

T.

Übercompoundierung 166, 242.
 Überdruck 96.
 Überdruckturbine 87, 88.
 Übergangswiderstand 15.
 — am Kommutator 162.
 Überfallräder 84.
 Überhitzung 121.
 Überhitzter Dampf 97.
 Übersetzung 235.
 Übersetzungsverhältnis 235.
 Uhrenzähler 424.
 Umformer 241, 450.
 Umformung 240.
 Umkehranlasser 380.
 Umschalter 406.
 Umsteuerung 380.
 Ungleichförmigkeitsgrad 111.
 Universalgalvanometer 262.
 Universalinjektor 105.
 Unterstation 285.
 Unterschlächtige Räder 84.
 Unterteilung der Leitung 291.
 Unverwechselbarkeit der Sicherungen 299, 302.

U.

Ventilsteuerung 109.
 Verbindungsleitungen 450.

Verbrennung 92.
 Verbundmaschine (Dampf) 108.
 — (elektrische) 165.
 Verbleiung 220.
 Verdampfer 149.
 Verdampfungszahl 96.
 Verdampfungsprobe 94.
 Vergleichslichtquelle 314.
 Verkett. Dreiphasensystem 72.
 Verkettete Spannung 74.
 Verseiltes Kabel 271.
 Verteilungsleitungen 275.
 Verteilungssysteme 268.
 Verteilungstafel 451.
 Viertaktmotoren 136.
 Volutturbine 89.
 Volt 16, 41.
 Voltmeter 253.
 Voltmeterumschalter 279.
 Voreilung 68.
 Vorschaltwiderstand (Bogenlampen) 362.
 Vorüberhitzung 121.

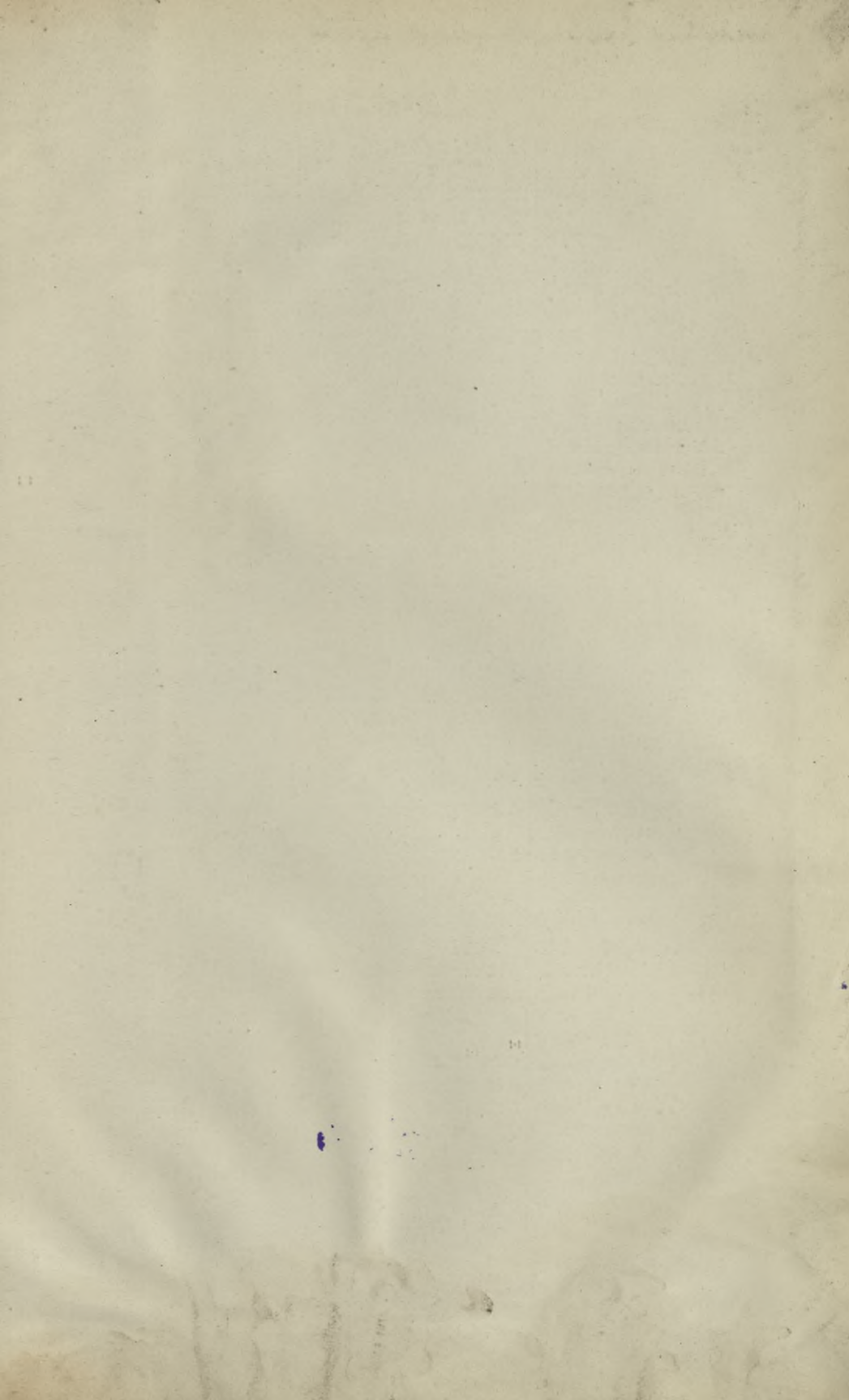
V.

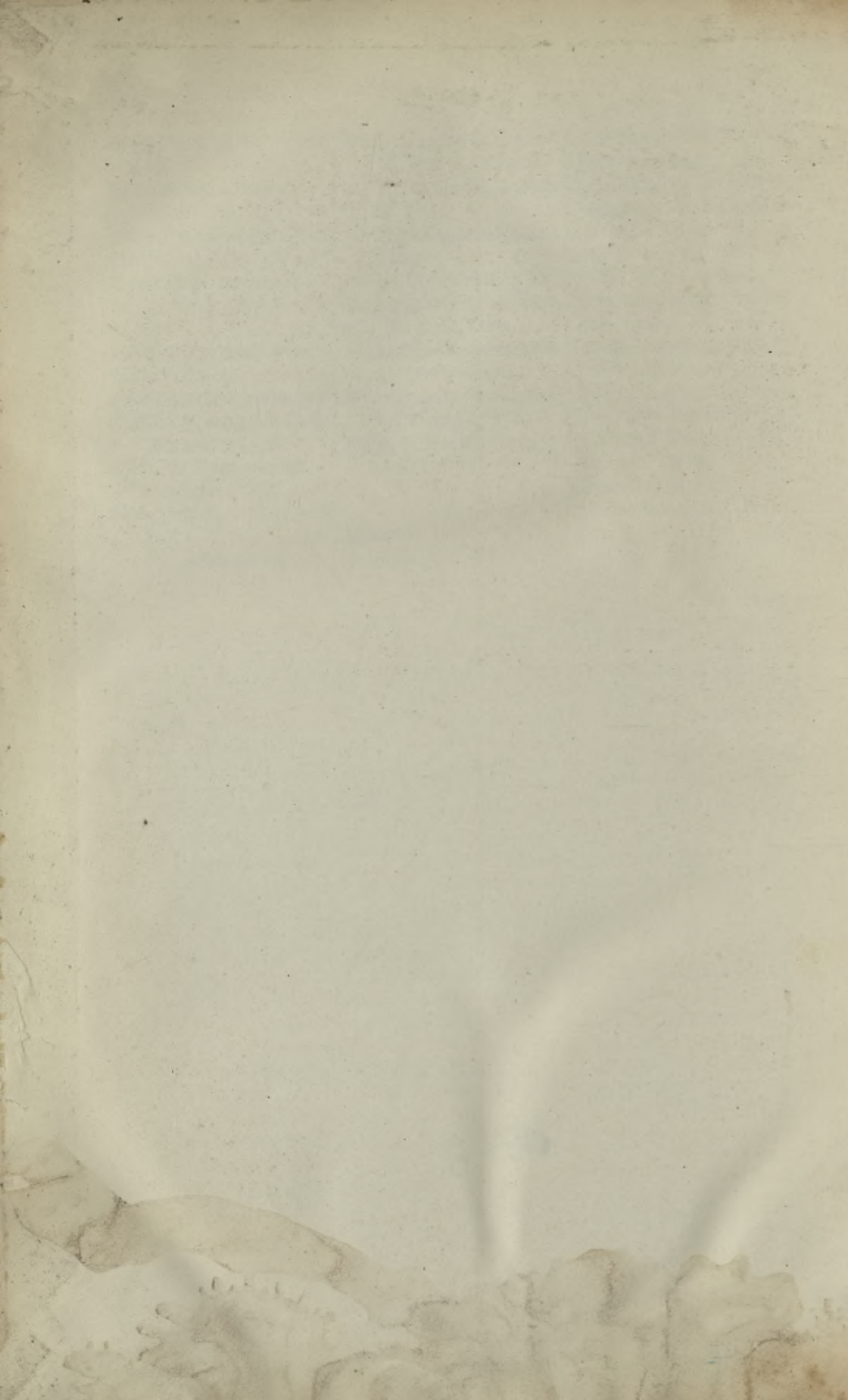
Walzenregulatoren 417.
 Wärmeäquivalent 3.
 Wärmeeinheit 3.
 Wärmekompensator 356.
 Wärmemaschine 91.
 Wasserkraft 79, 296.
 — (Ausnutzung) 79.
 Wasserkraftmaschine 84.
 Wasserräder 84.
 Wasserreiniger 99, 105.
 Wasserröhrenkessel 101.
 Watt 16.
 Wattkomponente 65.
 Wattloser Strom 65, 237.
 Wattmeter 256.
 Wattstrom 65.
 Wattstunde 18.
 Wattstundenzähler 425.
 Wechselströme 46.
 Wechselstromlampen 357.
 Wechselstromleitungen (Berechnung) 285.

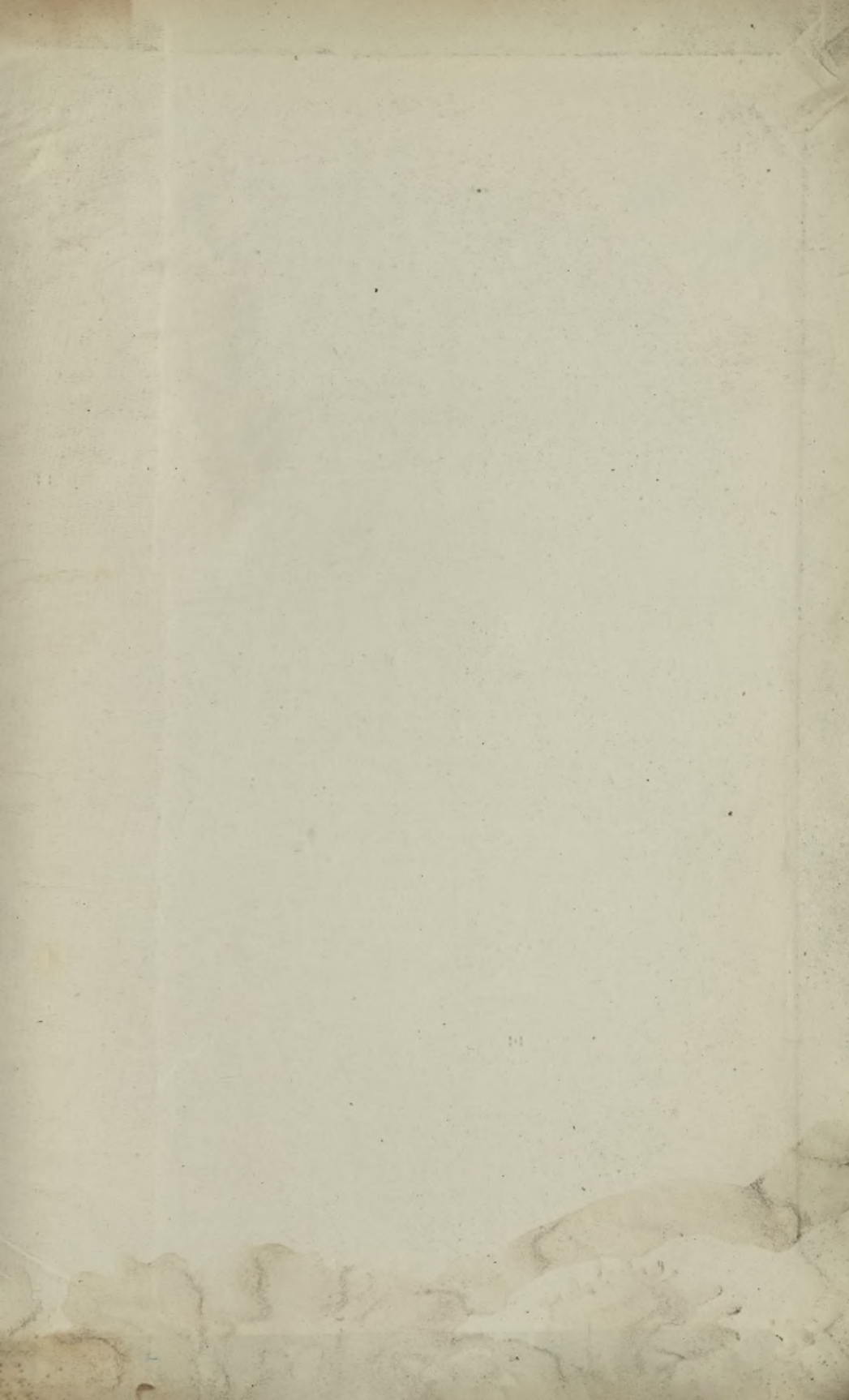
- | | | |
|---|--|---|
| Wechselstrommotoren 383,
439. | Wirkungsgrad der Dampf-
maschine 96, 115. | Zellenhalter 228. |
| Wechselstromverteilungs-
systeme 285. | — der Dampfkesselanlage
96. | Zentralkondensation 114. |
| Wechselstromlichtbogen 343. | — der Gleichstrom-Dynamo
172. | Zentrifugalreiniger 150. |
| Wechselstromzähler 433. | — der Elektromotoren 381. | Zerlegung eines Wechselstro-
mes 65. |
| Weston-Instrumente 251. | — der Glühlampen 320, 326. | Zerstreutes Licht 367. |
| Wheatstone'sche Brücke 29,
264. | — (thermischer) 96. | Zischender Lichtbogen 345. |
| Widerstandsmessung 266. | — des Transformators 238. | Zusatzmaschine 206, 284, 449. |
| Wirbelströme 43. | — der Turbinen 90. | Zuppigerad 84. |
| Wirbelstrombremsen 196, 382. | Wirkungsgradbestimmungen
bei Dynamos 173. | Zweifelamprohrkessel 100. |
| Wirkliche Leistung des Wech-
selstromes 64, 288. | Wirtschaftlicher Spannungs-
verlust 275. | Zweileiterssystem 275. |
| Wirksame Spannung 53. | | Zweiphasenstrom 71, 245. |
| — Stromstärke 53. | | Zweiphasenstrommaschine 70. |
| Wirkungsgrad (Umformer)
244. | 3. | Zweipolige Sicherung 300. |
| — des Akkumulators 213. | Zahnanker 159. | Zweiter Hauptsatz 3. |
| | Zeitähler 422, 424. | Zweitaktmotor 139. |
| | | Zwischenlichtquelle 318. |

5. 01

S-90







WYDZIAŁY POLITECHNI

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-5341

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294805