

# Elektrotechnik. I.

Von Ingenieur M. Prüssing, Königsberg i. Pr.

## A. Einleitung.

Unter Elektrotechnik versteht man die technische Erzeugung und Verwertung *elektrischer Energie*. Diese wurde früher ausschließlich durch galvanische Elemente hervorgebracht, konnte indes für die Technik erst Bedeutung erlangen, nachdem es gelungen war, sie in größtem Maßstabe mit Maschinen zu erzeugen. Anfänge der Erzeugung elektrischer Energie mit Maschinen reichen bis 1832 zurück, doch datiert der Aufschwung der Elektrotechnik erst von der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips durch Werner Siemens und Wheatstone im Jahre 1867. Danach begann die fabrikmäßige Herstellung elektrischer Maschinen, deren Bau inzwischen außerordentlich vervollkommnet worden ist.

Man unterscheidet *Schwachstromtechnik*, die hauptsächlich Telegraphen-, Fernsprech- und Signalwesen sowie den Sicherungsdienst umfaßt, und *Starkstromtechnik*, bei der die elektrischen Maschinen zur Anwendung kommen. Während diese Maschinen mechanische Energie in elektrische umwandeln, ergeben sich durch geeignete Umgestaltung derselben die Elektromotoren, die umgekehrt elektrische Energie in mechanische umsetzen.

Hierauf beruht die Bedeutung der elektrischen Arbeitsübertragung. Diese besitzt gegenüber jeder anderen ganz erhebliche Vorteile, und da auch die Elektromotoren den anderen Motoren vielfach überlegen sind, so haben die Anwendungen der Elektrotechnik immer größere Verbreitung gefunden. Die elektrischen Bahnen haben die Pferdebahnen fast ganz verdrängt; Kleinbahnen werden längst elektrisch betrieben, und die Ausdehnung dieses Betriebes auf Vollbahnen hat das Anfangsstadium schon überschritten. Im Bergbau und Hüttenbetrieb, in der Landwirtschaft, auf Kriegs- und Handelsschiffen, bei Hafenanlagen gewinnt die Elektrotechnik immer mehr an Bedeutung. Nicht wenige dieser Fortschritte sind der Vervollkommnung der Akkumulatoren zu verdanken, die jetzt weitgehenden Ansprüchen genügen. Die elektrische Beleuchtung hat zwar die Gasbeleuchtung nicht verdrängen können, doch steht sie hinter dieser an Ausbreitung kaum zurück und erobert sich täglich neue Gebiete.

Ebenso ist die Bedeutung der Elektrotechnik für die Galvanoplastik, Galvanostegie und Metallurgie stetig gewachsen. Speziell ist die Elektrometallurgie für die Gewinnung und Raffination vieler Metalle von Wichtigkeit geworden. Schwer reduzierbare Metalle, wie Chrom, Wolfram, Molybdän, Uran, Titan und andere, werden in elektrischen Öfen mit Hilfe des Lichtbogens gewonnen. Für die chemische Industrie kommt die Darstellung der Metallkarbide, insbesondere des Kalziumkarbids, des Phosphors, Wasserstoffes, Sauerstoffes und Ozons, des Natriums, Ätzkalis und Ätznatrons, der Soda, des Chlors, des Chlorkalks, der chloresäuren Salze usw. in Betracht; in der organisch-chemischen Technik ist die Reduktion von Nitroverbindungen für Anilinfabrikation und die Darstellung einiger Teerfarbstoffe gelungen. Auch bei der Zuckerfabrikation, in der Gerberei und zur Herstellung des Weines bedient man sich der Elektrolyse.

## B. Elektrotechnische Grundbegriffe.

Elektrische Erscheinungen bieten oft große Ähnlichkeit mit dem Verhalten des Wassers, ein Umstand, der das Verständnis elektrischer Vorgänge wesentlich erleichtert.

Zwischen den Ventilen 1 und 2 eines mit Wasser gefüllten Röhrensystems (Fig. 291) befindet sich eine Wasserpumpe 3. Treibt man diese in der Pfeilrichtung an, so wird bei 1 eine Druckwirkung, bei 2 eine Saugwirkung nach der Pumpe zu auftreten. Je nach der Konstruktion der Pumpe erfolgt diese Wirkung gleichmäßig oder stoßweise. Dem ersten Falle würde die Arbeitsweise einer Kreiselpumpe, dem zweiten die einer Kolbenpumpe entsprechen; wir wollen eine Kreiselpumpe annehmen. — Solange die Ventile 1 und 2 geschlossen sind, ist zwar ein Druckunterschied in den Rohrenden links und rechts der Pumpe vorhanden; eine fließende Bewegung des Wassers kommt indes nicht zustande. Bei Öffnung des Ventils 1 pflanzt sich der Wasserdruck fort bis zum Ventil 2, doch ist ein Strömen des Wassers auch jetzt noch nicht möglich. Erst wenn auch 2 geöffnet wird, kann das Wasser das ganze Röhrensystem durchfließen. Das Wasser geht also von der Pumpe 3 aus, fließt durch Ventil 1 zum Wasserrad 4, treibt dieses an und kehrt durch Ventil 2 zur Pumpe zurück. Wir haben hier eine hydraulische Kraftübertragungsanlage, worin die an der Pumpe 3 aufgewendete mechanische, in Strömungsenergie verwandelte Arbeit fortgeleitet und im Wasserrad 4, das irgendeine Arbeitsmaschine antreiben möge, wieder nutzbar gemacht wird.

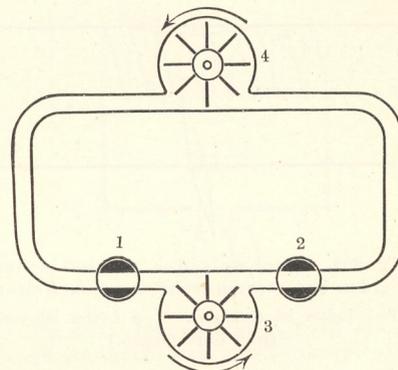


Fig. 291. Hydraulische Kraftübertragungsanlage.

Vergleicht man diesen hydraulischen Vorgang mit einem elektrischen (Fig. 292), so tritt an Stelle der Pumpe der Stromerzeuger, etwa ein galvanisches Element 3, das an seinen Polen eine stets gleichbleibende Druckdifferenz zu erzeugen vermag. Die Rohrleitung ersetzt eine Drahtleitung, und zwei in diese eingebaute Schalter 1 und 2 gestatten, den Stromkreis nach Belieben zu öffnen und zu schließen. Je nach Lage der Schalter wird die in der Figur als Stromverbraucher angenommene Glühlampe 4 aufleuchten oder erlöschen.

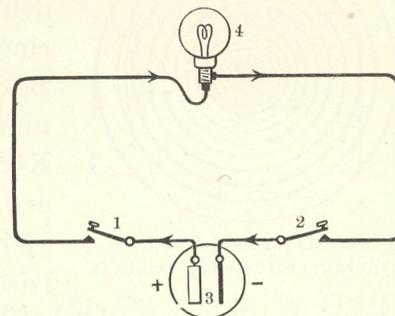


Fig. 292. Elektrische Lichtanlage.

Die einfachste Form eines derartigen *galvanischen Elementes* (Fig. 293) bilden ein Kupferstab 1 und ein Zinkstab 2, die in ein Glas mit angesäuertem Wasser tauchen. An den aus dem Gefäß herausragenden Stabenden, den *Polen* des Elementes, herrscht eine Druckdifferenz, die sich (in Fig. 292 durch die Leitung über die Glühlampe hinweg) auszugleichen sucht. Man nennt diese Druckdifferenz die *elektrische Spannung* und nimmt an, daß der Ausgleich vom positiven (+) Pol zum negativen (—) Pol erfolgt. Die elektrische Spannung des Elementes besteht auch dann, wenn die Schalter 1 und 2 (Fig. 292) geöffnet sind, nur kann ein Ausgleich dann nicht erfolgen. Erst beim Schließen beider Schalter kann man von einem elektrischen *Strom* sprechen, der, vom +-Pol ausgehend und zum —-Pol zurückkehrend, immer wieder mit erneutem Druck in gleicher Richtung durch Leitung und Glühlampe fließt.

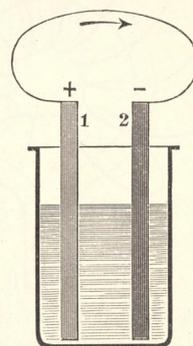


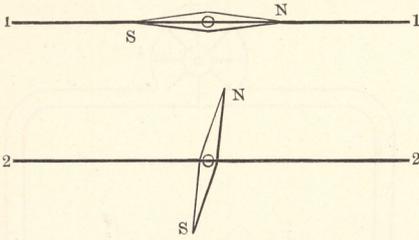
Fig. 293. Galvanisches Element.

Genau so, wie die sekundlich durch ein Rohr fließende Wassermenge abhängt von dem Rohrquerschnitt und dem an der Durchflußstelle herrschenden Druck, ebenso ist die sekundlich durch einen Draht fließende Elektrizitätsmenge abhängig vom Drahtquerschnitt und dem elektrischen Druck (Spannung), der zwischen Anfang und Ende der Drahtleitung herrscht. Je größer der Rohrdurchmesser ist, desto größer kann die durchtretende Wassermenge sein; je stärker die Rohrwandung gewählt wird, desto höheren Druck darf das Wasser annehmen. Ist das Rohr dem Wasserdruck nicht gewachsen, platzt es und gewährt dem Wasser einen Weg ins Freie. Und

andererseits: Je stärker der elektrische Strom ist, desto größer muß der Leitungsquerschnitt sein; je höher die Spannung gewählt wird, desto stärker ist die den Leiter umgebende Isolation zu bemessen. Würde man die Leitungsdrähte nicht isolieren, so würde der elektrische Strom den ihm bequemsten Weg, nämlich den zur Erde, einschlagen, also verloren gehen.

Als Isolationsstoffe verwendet man Materialien, die die Elektrizität nicht leiten, den Strom also zwingen, die durch den Leiter bezeichnete Bahn zu durchmessen. Während zu den *Leitern* alle Metalle, ferner Kohle, Salz- und Säurelösungen und die Körper der Lebewesen gehören, zählen Baumwolle, Seide, Jute, Gummi, Glimmer, trockenes Papier, Porzellan, Glas und Öl zu den *Nichtleitern* oder *Isolatoren*. Das Leitvermögen der Leiter ist sehr verschieden. Am besten leiten die Metalle. Von den Metallen hat wieder das Silber die höchste Leitfähigkeit, doch kommt es seines hohen Preises wegen als Leitungsmaterial nicht in Frage; statt dessen verwendet man Kupfer, dessen Leitfähigkeit fast die des Silbers erreicht.

Fig. 294. Nachweis des magnetischen Feldes bei stromdurchflossenem Leiter.  
(1-1 Leiter ist stromlos. 2-2 Leiter ist vom Strom durchflossen.)



Will man den elektrischen Strom zu einer Arbeitsleistung zwingen, so muß man ihm einen Widerstand in den Weg legen, bei dessen Überwindung er seine Energie abgibt. Dem Wasserstrom

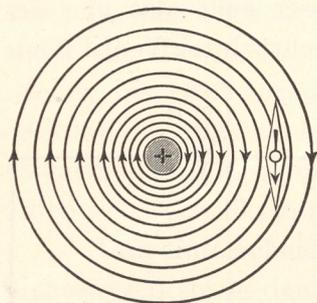


Fig. 295. Magnetisches Feld eines stromdurchflossenen Drahtes.

waren in Fig. 291, um seine Energie in mechanische Arbeit umzuwandeln, die Schaufeln des Wasserrades in den Weg gelegt. Analog kann man den elektrischen Strom veranlassen, seinen Weg durch den Kohlenfaden einer Glühlampe oder die Drahtwicklung eines Elektromotors zu nehmen. Bekanntlich wird durch Reibung zweier Körper Wärme erzeugt, die zunimmt, je größer der Druck und je rauher die Oberfläche der beiden Körper ist. Auch der Wasserstrom wird das durchfließende Rohr etwas erwärmen, und zwar um so mehr, je stärker der Wasserstrom und je kleiner und unebener das Rohrrinnere ist. Ähnlich tritt in einem elektrischen Stromkreis eine Erwärmung der Leiter auf, die dort am größten ist, wo der Strom den höchsten Widerstand findet. Ist die Elektrizitätsquelle stark genug, so kann die Erwärmung des Leiters unter Umständen so weit gehen, daß sich dieser bis zur Weißglut erhitzt, eine Eigenschaft, die man z. B. im Faden der Glühlampe nutzbringend verwertet. Bei einem Elektromotor, der zur Umwandlung elektrischer Energie in mechanische dient, ist die Drahtwicklung so dimensioniert, daß der elektrische Strom in der Hauptsache nicht Wärme, sondern Magnetismus und damit mechanische Arbeit erzeugt.

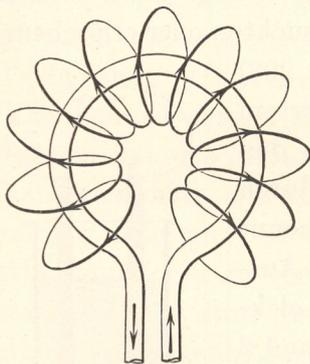


Fig. 296. Magnetisches Feld einer stromdurchflossenen Drahtwindung.

Nähert man einem stromführenden Leiter eine Magnetnadel, so wird diese aus ihrer früheren Richtung abgelenkt. Unterbricht man den Strom, so stellt sich die Nadel wieder in die Nord-Südrichtung ein. Dieses in Fig. 294 veranschaulichte Experiment lehrt, daß der stromführende Leiter auf die Magnetnadel eine magnetische Kraft ausübt. Die Umgebung des Leiters, in der eine magnetische Wirkung noch nachweisbar ist, heißt sein *magnetisches Feld*. Des besseren Verständnisses wegen denkt man sich das magnetische Feld aus unendlich vielen *Kraftlinien* bestehend, deren Richtung und Polarität durch die Lage des Leiters und durch die Stromrichtung bestimmt ist. Da eine Magnetnadel die Richtung der magnetischen Kraftlinien angibt, wie sie vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol der Erde verlaufen, so besitzt man in ihr ein Hilfsmittel, um auch die Richtung und Polarität der vom elektrischen Strom erzeugten Kraftlinien und damit die Richtung des Stromes festzustellen.

Blickt man in Richtung des Stromes an einem elektrischen Leiter entlang, so nimmt man wahr, daß eine in der Nähe befindliche, horizontal schwebende Magnetnadel sich in die in Fig. 295 gezeichnete Pfeilrichtung einstellt. Führt man die Magnetnadel im Kreise um den Leiter herum,

so behält sie in bezug auf den Leiter stets die gleiche Richtung bei, bildet also immer eine Tangente des um den Leiter beschriebenen Kreises. Dieses Verhalten der Nadel läßt auf ein magnetisches Feld schließen, dessen Kraftlinien konzentrische Ringe um den Leiter als Achse bilden. Die Kraftlinien verlaufen im Sinne des Uhrzeigers, wenn man in Richtung des Stromes an dem Leiter entlang sieht, und nehmen mit der Entfernung vom Leiter an Dichte ab.

Biegt man den Leiter zu einem Ringe (Fig. 296), so entstehen um ihn herum kreisförmige Kraftlinien, die mit Bezug auf die durch den Leiter begrenzte Ebene ein resultierendes Feld bilden und dieselbe senkrecht durchschneiden. Eine stromdurchflossene, sich aus mehreren ringförmigen Leitern zusammensetzende Drahtspirale wird also im Innern ein Magnetfeld besitzen, das hauptsächlich aus parallel zur Achse verlaufenden Kraftlinien gebildet wird (Fig. 297). Man nennt ein solches aus geradlinigen Kraftlinien bestehendes Feld ein *homogenes Magnetfeld*. Die magnetische Kraft oder *Feldstärke* im Innern einer solchen, auch *Solenoid* genannten Drahtspule wächst mit der Anzahl der Windungen und der Stärke des durchfließenden Stromes. Die Stelle, an der die Kraftlinien aus der Spule austreten, nennt man den Nordpol; die Stelle, an der sie eintreten, den Südpol der Spule.

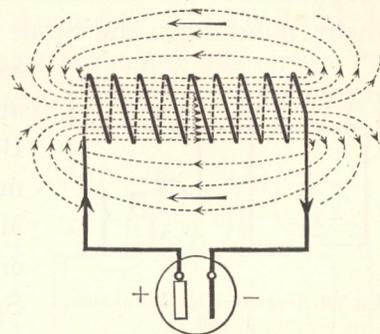


Fig. 297. Magnetisches Feld einer stromdurchflossenen Drahtspirale.

Bringt man in das Solenoid einen Eisenstab (Fig. 298), so wird dieser magnetisch. Und zwar wird das Stabende, das dem Beschauer im Sinne der Uhrzeigerbewegung vom Strom umkreist erscheint, zum Südpol, das andere zum Nordpol des *Elektromagnets*. Gleichzeitig erhält man ein wesentlich verstärktes magnetisches Feld. Unterbricht man den Stromkreis der Spule, so geht der Magnetismus des Eisens auf ein verschwindend kleines, *Remanenz* genanntes Maß zurück. Der *remanente Magnetismus* ist um so größer, je härter das Eisen ist. Bringt man in die Drahtspule einen Stahlstab, so wird dieser zwar nicht so rasch magnetisch wie ein Stab aus weichem Eisen, doch behält er seinen Magnetismus auch nach Unterbrechung des Stromes zum größten Teile bei, ist also zu einem dauernden Magnet geworden. Derartigen Magnetismus nennt man *permanenten*, im Gegensatz zu dem *temporären*, d. h. mit dem Strom wieder verschwindenden, Magnetismus des weichen Eisens.

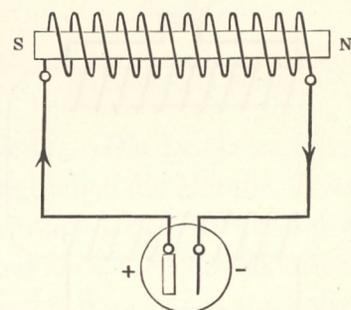


Fig. 298. Prinzip des Elektromagnets.

Nimmt man zwei kernlose Spulen, legt jede für sich an eine Stromquelle und nähert sie einander, wie Fig. 299 zeigt, so bemerkt man auch hier eine magnetische Wirkung: die Spulen ziehen sich, beweglich aufgehängt, an, wenn die Stromrichtung in beiden die gleiche ist, und stoßen sich ab, wenn die Stromrichtung verschieden ist. Hieraus ergibt sich das Gesetz: Gleichgerichtete Ströme ziehen sich an, ungleichgerichtete stoßen sich ab. Man besitzt also im elektrischen Strom ein Mittel, künstlichen Magnetismus herzustellen.

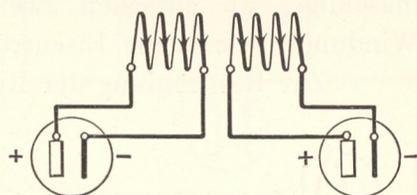


Fig. 299. Anziehung gleichgerichteter Ströme.

Umgekehrt ist es möglich, mittels eines Magnets in einem Leiter eine elektrische Druckdifferenz zu erzeugen. Diese Erscheinung bezeichnet man mit *Induktion*. Bringt man, wie in Fig. 300 dargestellt ist, in eine Spule einen Magnetstab, so wird in den Windungen ein elektrischer Strom induziert, der so lange dauert, wie der Stab in Bewegung ist.

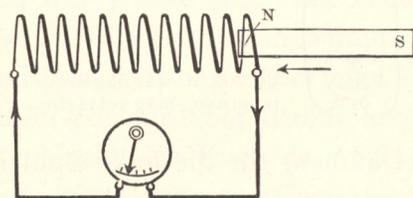


Fig. 300. Prinzip der Induktion.

Dabei ist vorausgesetzt, daß Anfang und Ende der Wicklung miteinander in Verbindung stehen, die Grundbedingung für das Fließen eines Stromes also erfüllt ist. Bei geöffnetem Stromkreis entsteht in der Spule kein Strom, sondern nur eine *elektromotorische Kraft*. Elektromotorische Kraft nennt man bei allen Stromerzeugern den im Innern derselben hervorgerufenen

elektrischen Druck. Die an den Polen des Stromerzeugers gemessene *Klemmenspannung* ist stets etwas kleiner als die elektromotorische Kraft, da bei Überwindung der sogenannten „inneren Widerstände“ in den Stromerzeugern schon ein kleiner Teil des ursprünglichen Druckes verbraucht wird.

Die in der Spule erzeugte elektromotorische Kraft (EMK) ist um so größer, je stärker der Magnetismus des Eisenstabes ist, ferner je schneller die Bewegung des Magnets erfolgt und je mehr Windungen die Spule besitzt. Legt man an die Enden der Wicklung ein Meßinstrument,

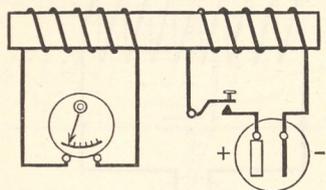


Fig. 301. Gegenseitige Induktion, 1. Fall.

so nimmt man beim Hineinbewegen des Magnetstabes einen Zeigerausschlag wahr, der jedoch sofort wieder Null wird, wenn man mit der Bewegung innehält, und nach der entgegengesetzten Seite erfolgt, wenn man den Magnetstab aus der Spule herauszieht. Der Ausschlag des Meßinstrumentes wird um so größer, je rascher die Bewegung des Stabes erfolgt. Dieselbe Wirkung läßt sich erreichen, wenn man eine zweite Spule, ähnlich dem in Fig. 301 dargestellten Vorgang, mit einer Stromquelle verbindet und so in die Nähe der ersten bringt, daß die bei Stromschluß erzeugten Kraftlinien die Fläche dieser Spule durchdringen. Enthalten die Spulen Eisen, so wird die Wirkung sehr verstärkt. Diese Eigenschaft eines periodisch vom Strom durchflossenen Leiters, in einem benachbarten Leiter einen elektrischen Druck zu erzeugen, nennt man

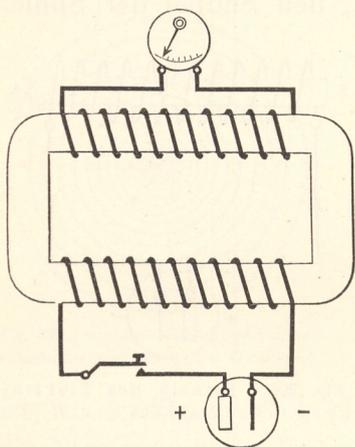


Fig. 302. Gegenseitige Induktion, 2. Fall.

*gegenseitige Induktion*, den induzierenden den *primären*, den induzierten den *sekundären* Strom. Die gegenseitige Induktion wird am größten, wenn das die Spulen ausfüllende Eisen einen in sich geschlossenen Kreis bildet und so den Kraftlinien einen Verlauf ohne Unterbrechung ermöglicht (Fig. 302). Bei Vergleich des induzierenden mit dem induzierten Strom ergibt sich, daß der letztere die entgegengesetzte Richtung beim Schließen, die gleiche Richtung beim Öffnen des induzierenden Stromes hat, den Wirkungen desselben also entgegenarbeitet. Er sucht demnach bei Stromschluß das entstehende Kraftlinienfeld zu schwächen und es bei Öffnung des Stromkreises aufrechtzuerhalten. Eine induzierende Wirkung entsteht auch, wenn eine Spule so vor den Polen eines Magnets vorbeibewegt oder gedreht wird, daß ihre Windungen die Kraftlinien schneiden (Fig. 303). Diese Erscheinung umfaßt das Prinzip der Dynamomaschine, wo zwischen zwei starken Magnetpolen der sogenannte *Anker*, eine mit vielen Windungen versehene Eisentrommel, gedreht wird.

Zur Bestimmung der Richtung des induzierten Stromes bedient man sich mit Vorteil der

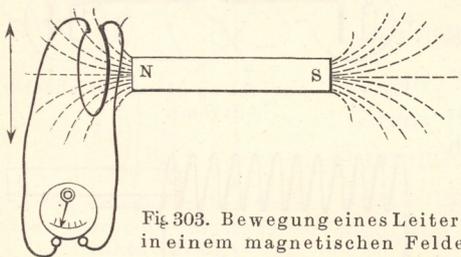


Fig. 303. Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde.

Flemingschen *Drei-Finger-Regel* (Fig. 304). Sie lautet: Man bringe den Zeigefinger der rechten Hand in Richtung der Kraftlinien und den Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters, dann gibt der auf beiden senkrecht stehende Mittelfinger die Richtung des induzierten Stromes an.

Wendet man diese Regel auf die in Fig. 305 dargestellten Verhältnisse an, so ergibt sich: Die Kraftlinienrichtung (Zeigefinger) ist nach links, die Bewegungsrichtung (Daumen) für die linke Spulenseite 1 nach oben, der Strom fließt also in dieser Spulenseite von hinten nach vorn; in der anderen Spulenseite 2 natürlich umgekehrt, da auch die Bewegung hier umgekehrt, d. h. von oben nach unten, erfolgt. Der bei diesem Versuch erzeugte Strom stellt natürlich auch einen gewissen Energiewert dar. Da der Magnet durch seine induzierende Tätigkeit in seiner magnetischen Stärke nicht verändert wird, kann die erzeugte elektrische Energie nur in der bei der Bewegung des Leiters aufgewendeten mechanischen Arbeit ihren Ursprung haben.

Der in Fig. 301 veranschaulichte Versuch zeigte den Einfluß der Induktion auf eine der primären geäiherte sekundäre Spule. Diesem Einfluß unterliegt aber auch die primäre Spule selbst,

denn auch in ihr werden Induktionsströme erzeugt. Da die induzierte elektromotorische Kraft stets einen Strom erzeugt, der dem primären entgegenwirkt, so wird im Moment des Schließens der Strom nicht gleich auf seinen vollen Wert steigen, sondern durch die Wirkung der induzierten gegenelektromotorischen Kraft relativ langsam. Beim Öffnen des Stromkreises sucht umgekehrt die sekundäre elektromotorische Kraft das Sinken der Stromstärke zu verzögern, was die Versuchsanordnung der Fig. 306 bestätigt. Eine Stromquelle 3 speist über den nach unten gedrückten Schalter 1 die Wicklung eines Elektromagnets. Das Meßinstrument 4 steht nur mit einem Pol mit dem Element 3 in Verbindung, ein Ausschlag ist also nicht vorhanden. Läßt man Schalter 1 los, so zieht die Feder 2 ihn nach oben und verbindet dadurch die beiden Enden der Spule 5 mit dem Meßinstrument 4. In diesem Augenblick bemerkt man einen Ausschlag des Zeigers, der langsam, der Abnahme der Kraftlinienzahl entsprechend, auf Null zurückgeht. Das Element ist hierbei, da es nur einpolig angeschlossen ist, vollständig wirkungslos. Diese, *Selbstinduktion* genannte, Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß zur Erzeugung des die Spule umgebenden magnetischen Feldes eine gewisse Energiemenge verbraucht wird, die im Augenblick der Unterbrechung des Stromes wieder frei wird.



Fig. 304. Fleming'sche Drei-Finger-Regel. (1 Stromrichtung, 2 Kraftlinienrichtung, 3 Bewegungsrichtung.)

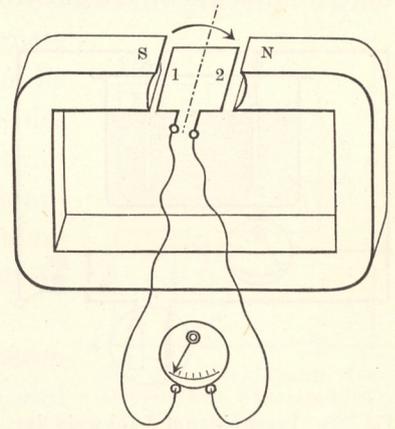


Fig. 305. Bewegung einer Spule im magnetischen Felde.

Es sei daran erinnert, daß alle Körper hinsichtlich ihres Leitvermögens eingeteilt werden in Leiter und Nichtleiter. Die Leiter zerfallen wieder in solche erster und zweiter Klasse. *Leiter erster Klasse* sind vornehmlich die Metalle, *Leiter zweiter Klasse* alle Flüssigkeiten, soweit sie den elektrischen Strom überhaupt leiten. Während in den Metallen bei Stromdurchgang nur Wärmeerscheinungen wahrnehmbar sind, hat der elektrische Strom bei den Flüssigkeiten außer der Erwärmung noch gewisse chemische Wirkungen zur Folge.

In einem Gefäß mit angesäuertem Wasser seien sich zwei Metallplatten, die sogenannten *Elektroden*, so gegenübergestellt, daß sie sich nicht berühren. Verbindet man sie, wie in Fig. 307, mit den Polen eines Elementes, so nimmt man nach kurzer Zeit an den beiden Elektroden kleine Glasbläschen wahr: das Wasser wird zersetzt. Dabei entsteht an der Elektrode, wo der Strom in die Flüssigkeit eintritt, der *Anode* (1), Sauerstoff; an der Austrittselektrode, der *Kathode* (2), Wasserstoff. Da das Wasser aus zwei Teilen Wasserstoff und einem Teil Sauerstoff besteht, so ist auch die erzeugte Wasserstoffmenge doppelt so groß wie die entstehende Sauerstoffmenge. Dieses Zerlegen der Flüssigkeit bezeichnet man als *elektrolytische Wirkung* des elektrischen Stromes. Aus Metallsalzlösungen wird bei Stromdurchgang das in dem Salz chemisch gebundene Metall abgeschieden und nach der Kathode geführt, wo es sich als feiner, gleichmäßiger Niederschlag ansetzt. Will man einen leitenden Gegenstand vernickeln, so hängt man ihn als Kathode in eine Nickelsalzlösung, benutzt irgendein Metallstück als Anode und schickt einen verhältnismäßig schwachen Strom hindurch; bald überzieht sich der Gegenstand mit einer festhaftenden Nickelschicht.

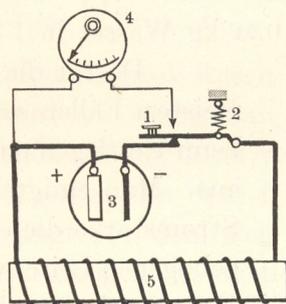


Fig. 306. Versuch zum Nachweis der Selbstinduktion.

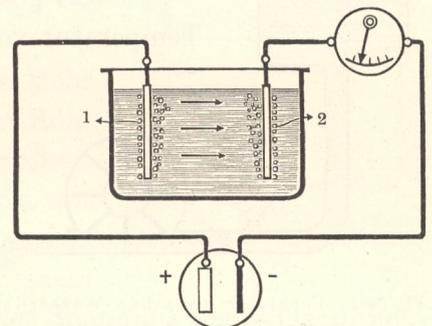


Fig. 307. Elektrische Wasserzersetzung.

Beobachtet man bei dem Versuch der Wasserzersetzung (Fig. 307) ein in den Stromkreis geschaltetes Meßinstrument, so nimmt man wahr, daß nach einiger Zeit der Zeiger des Instrumentes langsam zurückgeht. Auch die erzeugte Gasmenge nimmt nicht mehr im gleichen Maße zu wie

früher. Da an der Stromquelle nichts geändert ist, muß sich also im Stromkreis eine Änderung vollziehen: An der Oberfläche der Elektroden setzen sich die Gasbläschen fest und hindern so den Strom, in früherer Stärke in die Flüssigkeit überzutreten bzw. diese nach der Kathode zu verlassen. Gleichzeitig entsteht ein elektrischer Gegendruck, der den früheren Strom zu schwächen sucht. Diesen Vorgang, der gewisse Ähnlichkeit mit der Selbstinduktion hat, nennt man die *Polarisation*. In Fig. 308 geht der Strom vom Element über den nach unten gedrückten Schalter 1 nach der + -Elektrode und weiter durch die Flüssigkeit über die — -Elektrode zum Element zurück. Läßt man den Schalter nach einiger Zeit los, so legt er sich unter dem Zuge der Feder 2 nach oben und schließt einen Stromkreis über das Meßinstrument zur — -Elektrode, durch die Flüssigkeit zur + -Elektrode und von hier zum Schalter. Das Meßinstrument, das nunmehr mit den beiden Elektroden der *Zersetzungs-*

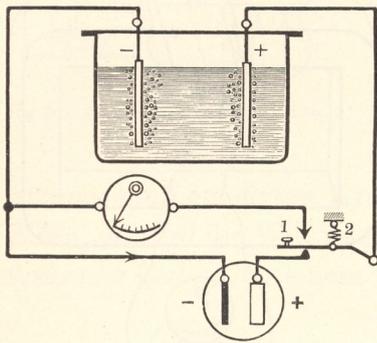


Fig. 308. Versuch zum Nachweis der Polarisation.

zelle verbunden ist, zeigt jetzt einen Ausschlag. Dabei ist die Stromrichtung in der Zelle umgekehrt: der Strom fließt aus der + -Elektrode heraus und zur — -Elektrode wieder herein. In der Zersetzungs-zelle hat man also ein Mittel, mit Hilfe einer Stromquelle elektrische Energie aufzuspeichern, die zu beliebiger Zeit wieder hergegeben werden kann. Eine praktische Anwendung findet diese Tatsache bei den Akkumulatoren, deren Wirkungsweise und Bau ein späterer Abschnitt behandelt.

**Elektrische Größen.** In der Elektrotechnik bezeichnet man die Gebrauchseinheit für die Leistung zu Ehren des Erfinders der Dampfmaschine mit 1 Watt. Für größere Leistungen nimmt man als Maß das 1000fache dieser Gebrauchseinheit und benennt es 1 Kilowatt (KW). Um 1 kg in 1 Sekunde 1 m hoch zu heben, ist eine Leistung von 9,81 Watt aufzuwenden. 1 mkg/sek entspricht demnach 9,81 Watt. Zur Erzeugung einer Pferdestärke (75 mkg/sek) sind mithin  $75 \times 9,81 = 736$  Watt erforderlich. Um die Temperatur eines Gramm Wassers in 1 Sekunde um 1 Grad C zu erhöhen, sind 4,17 Watt nötig. Diese Wärmeleistung heißt 1 Grammkalorie (gcal). Demnach ist 1 Watt  $= \frac{1}{4,17} = 0,24$  gcal und 1 KW  $= \frac{1}{4,17} \times 1000 = 240$  gcal, d. h. man kann mit 1 KW die Temperatur von 0,24 kg Wasser in 1 Sekunde um 1° C erhöhen.

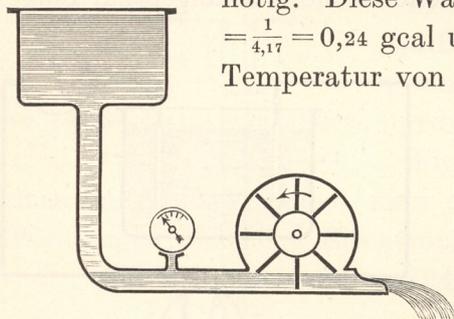


Fig. 309. Vergleich zwischen Wasserdruck und elektrischer Spannung.

Da für die Wirkungen des elektrischen Stromes in den meisten Fällen seine Stärke maßgebend ist, ging man auch beim Festlegen einer elektrischen Einheit von der Stromstärke aus. Man einigte sich dahin, als praktische Einheit für die Stromstärke diejenige anzunehmen, die, in einem kreisförmig gebogenen Leiter von 1 cm Radius fließend, auf einen Einheits-Magnetpol eine bestimmte, vom absoluten Maßsystem abgeleitete Kraft ausübt. Man nannte diese praktische Einheit

der Stromstärke nach dem verdienstvollen französischen Forscher Ampère: 1 Ampere. Gibt eine Stromquelle die Stromstärke von 1 Ampere während 1 Sekunde her, so ist die abgegebene Elektrizitätsmenge 1 Coulomb.

Vor der Besprechung der weiteren elektrischen Maßeinheiten sei wieder ein hydraulischer Vergleich herangezogen. Ein quadratisches Rohr von 1 cm lichter Weite steht mit einem Hochbehälter in Verbindung (Fig. 309). Der durch das Rohr fließende Wasserstrom hat also einen Querschnitt oder eine Stärke von 1 qcm. Das Wasser im Rohr sei einem solchen Druck ausgesetzt, daß es auf einen das Rohr verschließenden Gegenstand mit 1 kg drückt. Der Wasserdruck beträgt dann 1 kg pro Quadratcentimeter oder 1 Atmosphäre (at). Läßt man das Wasser gegen die Schaufel eines dicht vor der Öffnung angebrachten Wasserrades strömen, so beträgt auch der auf die Schaufel ausgeübte Druck, wenn man von den Verlusten im Rohre absieht, 1 kg. Diese auf die Schaufel des Wasserrades drückende Kraft ist maßgebend für die Leistung des Rades.

Verwendet man statt des Rohres von 1 cm ein solches von 2 cm lichter Weite und stellt

den gleichen Wasserdruck von 1 at = 1 kg pro Quadratcentimeter her, der sich leicht an einem angeschlossenen Druckmesser (Manometer) ablesen läßt, so beträgt der Querschnitt des Rohres wie des Wasserstromes jetzt  $2 \times 2 = 4$  qcm. Da der Wasserdruck nach wie vor 1 kg pro Quadratcentimeter beträgt, so wird auf die Schaufeln ein Druck von  $4 \times 1 = 4$  kg ausgeübt. Erhöht man den Druck auf 2 at = 2 kg pro Quadratcentimeter, so wird sich auch der an den Schaufeln des Wasserrades wirksame Druck auf  $4 \times 2 = 8$  kg erhöhen. Naturgemäß kann das Wasserrad jetzt auch das Achtfache leisten gegenüber dem im ersten Falle. Hieraus ist zu entnehmen, daß die Leistung des Wasserrades gleich ist dem Produkt aus der Stärke (Querschnitt) des Wasserstromes und dem Druck, mit dem das Wasser gegen die Schaufeln gepreßt wird.

Bei Einwirkung des elektrischen Stromes auf irgendeine geeignete Arbeitsvorrichtung ergeben sich dieselben Beziehungen. Auch hier kann die erzeugte Leistung ausgedrückt werden durch das Produkt aus der Stärke des Stromes und dem elektrischen Druck, d. h. der Spannung, womit der Strom den Widerstand durchfließt. Es ist also Leistung = Stromstärke  $\times$  Spannung. Setzt man in dieser Formel die Werte für Stromstärke und Spannung als praktische Einheiten ein, so ergibt sich auch die Leistung in praktischen Einheiten, d. h. in Watt.

Bisher waren uns nur die vom absoluten Maßsystem abgeleiteten praktischen Einheiten der Stromstärke und der Leistung, das Ampere und das Watt, bekannt. Wir wissen jetzt, daß Spannung, Strom und Leistung in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander stehen, können also die praktische Einheit der Spannung ableiten:

„Die praktische Einheit der elektromotorischen Kraft oder Spannung ist diejenige, die mit der praktischen Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, die praktische Einheit der Leistung, 1 Watt, hervorbringt.“ Nach Volta nennt man diese Einheit 1 Volt.

Bezeichnet man die Leistung mit  $\mathcal{E}$  (Effekt), die Spannung mit E und die Stromstärke mit J, dann ist:

$$E_{\text{Volt}} = \frac{\mathcal{E} \text{ Watt}}{J \text{ Amp.}}; \quad J_{\text{Amp.}} = \frac{\mathcal{E} \text{ Watt}}{E \text{ Volt}} \quad \text{und} \quad \mathcal{E}_{\text{Watt}} = E_{\text{Volt}} \cdot J_{\text{Amp.}}$$

Ein Wasserstrom, der unter gleichmäßigem Druck durch ein Rohr fließt, hat stets die gleiche Stärke. Diese nimmt ab, wenn man das Rohr verengt, d. h. den vom Wasser zu überwindenden Widerstand vergrößert. Man erkennt also, daß die Stärke des Stromes außer von dem Druck, mit dem er durch das Rohr getrieben wird, abhängt von dem sich ihm entgegenstellenden Widerstand. Die gleichen Beziehungen bestehen in einem elektrischen Stromkreise. Auch hier ist für die Stromstärke außer der Spannung der Widerstand des Stromkreises maßgebend. Folgender Versuch bestätigt dies (Fig. 310):

Ein dünner Eisendraht 1 ist durch ein kleines Gefäß mit reinem Wasser geführt und unter Zwischenschaltung eines Stromzeigers mit den Polen eines Elementes verbunden. Zur Messung der Temperaturerhöhung ist ein Thermometer 2 in das Wasser eingebracht. Schließt man den Schalter 3, so zeigt der Stromzeiger einen konstant bleibenden Wert von beispielsweise 4 Ampere an. Nach 5 Minuten ist die Wassertemperatur um  $10^\circ$  gestiegen. Jetzt unterbrechen wir den Strom, lassen das Wasser sich wieder bis auf die Anfangstemperatur abkühlen und verbinden inzwischen den Eisendraht mit einem zweiten Draht gleicher Länge und Stärke, und zwar so, daß bei geschlossenem Stromkreis der Strom nacheinander beide Drahtenden durchfließen muß (Fig. 311). Damit erhöhen wir den Widerstand des Drahtes auf das Doppelte. Legen wir jetzt die Drähte wie früher in das Wassergefäß und schließen Schalter 3, so zeigt der Stromzeiger nur die Hälfte des früheren Stromes, 2 Ampere, an. Auch die Zunahme der Wassertemperatur beträgt nach 5 Minuten nur etwa die Hälfte der früheren, ungefähr  $5^\circ$ . Dieser Versuch beweist, daß durch Verdoppelung des Widerstandes die Stromstärke auf die Hälfte sinkt. Hätten wir den

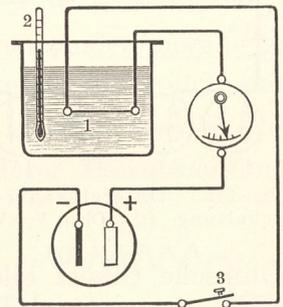


Fig. 310. Erklärung des elektrischen Widerstandes, 1. Fall.

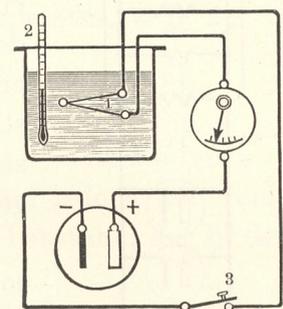


Fig. 311. Erklärung des elektrischen Widerstandes, 2. Fall.

Widerstand verdreifacht, so wäre die Stromstärke auf ein Drittel gesunken. Die Spannung ist dabei als konstant vorausgesetzt, so daß man aus gegebener Spannung und bekanntem Widerstand den Strom bestimmen kann. Es ist somit die Stromstärke in Ampere gleich dem Quotienten aus Spannung in Volt und Widerstand in Widerstandseinheiten, also  $J = \frac{E}{W}$ . Die praktischen Einheiten des Stromes und der Spannung sind bereits festgelegt. Nunmehr läßt sich auch die Einheit des Widerstandes bestimmen:

„Fließt bei der praktischen Einheit der Spannung durch einen Leiter die praktische Einheit der Stromstärke, dann stellt der Leiter den praktischen Einheitswert des Widerstandes dar.“

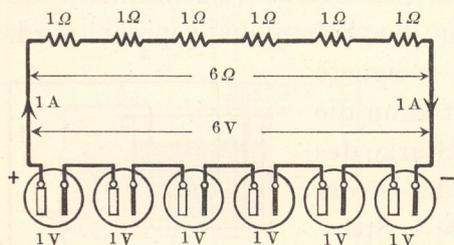


Fig. 312. Hintereinander- oder Reihenschaltung. ( $\Omega$  = Ohm; V = Volt; A = Ampere.)

Nach dem Physiker Ohm bezeichnet man diesen Einheitswert mit 1 Ohm ( $\Omega$ ). Durch die Formel  $J_{\text{Amp.}} = \frac{E \text{ Volt}}{W \text{ Ohm}}$  ist auch das von Ohm aufgestellte sogenannte *Ohmsche Gesetz* ausgedrückt. Sind zwei der hierin enthaltenen Größen bekannt, so läßt sich die dritte leicht durch Rechnung finden, denn  $J_{\text{Amp.}} = \frac{E \text{ Volt}}{W \text{ Ohm}}$ ;  $E_{\text{Volt}} = J_{\text{Amp.}} \times W_{\text{Ohm}}$ ;  $W_{\text{Ohm}} = \frac{E \text{ Volt}}{J_{\text{Amp.}}}$ . Dieses

Ohmsche Gesetz bildet das Fundament der gesamten Elektrotechnik. Der Normalwiderstand 1 Ohm wird dargestellt durch den Widerstand eines Quecksilberfadens von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei einer Temperatur von 0°. Fließt durch solchen Quecksilberfaden ein Strom von 1 Ampere, so ist die Spannung, an den beiden Enden des Fadens gemessen, 1 Volt.

Die Größe einer Leistung ist, wie besprochen, gegeben durch die Beziehung  $\mathcal{C} = E \times J$ . Ist die Spannung unbekannt, jedoch Widerstand und Stromstärke bekannt, so läßt sich aus dem Ohmschen Gesetz die Spannung bestimmen. Sie ist:  $E = J \times W$ . Setzt man diesen Wert für E in obige Gleichung ein, so ergibt sich:  $\mathcal{C} = J \times W \times J$ , also  $\mathcal{C} = J^2 \times W$ . Diese Formel besagt, daß der elektrische Effekt ( $\mathcal{C}$ ), also auch die in der Zeiteinheit in einem Leiter entwickelte Wärmemenge (*Joulesche Wärme*), dem Produkte aus dem Widerstand des Leiters und dem Quadrat der Stromstärke (Stromstärke mal Stromstärke) entspricht. Dieses Gesetz wurde zuerst von dem Engländer Joule aufgestellt und heißt nach ihm das *Joulesche Gesetz*.

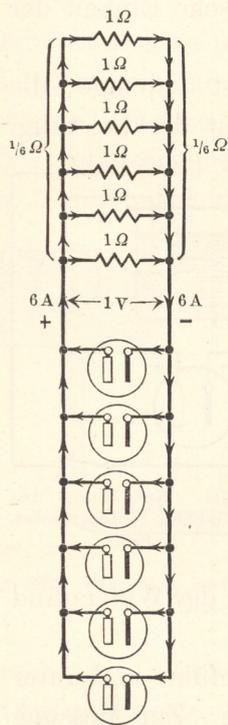


Fig. 313. Nebeneinander- oder Parallelschaltung. ( $\Omega$  = Ohm; V = Volt; A = Ampere.)

In dem letzten Versuch (Fig. 311) waren die beiden dünnen Eisendrähte so verbunden, daß der Strom in voller Stärke beide Drähte nacheinander durchfließt. Die Drähte waren also „hintereinander“ geschaltet. Durch *Hintereinander-* oder *Reihenschaltung* mehrerer Widerstände wird der Gesamtwiderstand gleich der Summe der einzelnen Widerstände (Fig. 312). Ebenso wie man Stromverbraucher hintereinander schalten kann, lassen sich auch Stromquellen hintereinander verbinden. Dann wird, wenn man von dem „inneren Widerstand“ absieht, die Gesamtspannung gleich der Summe der Einzelspannungen. Schalten wir also z. B. 6 Elemente von je 1 Volt Klemmenspannung hintereinander, so beträgt die Gesamtspannung  $6 \times 1 = 6$  Volt. Bedingung hierfür ist jedoch, daß alle ungleichnamigen Pole der Elemente miteinander verbunden sind, mit andern Worten, daß die Stromrichtung in den Elementen überall die gleiche ist.

Die maximale Stromabgabe einer Stromquelle ist bestimmt durch den Querschnitt der Strombahn im Stromerzeuger. Da man nun bei der Reihenschaltung den Querschnitt der Strombahn nicht verändert — der Strom durchfließt ja alle Elemente der Reihe nach —, darf man der Batterie auch keinen stärkeren Strom entnehmen als einem einzelnen Element; wohl aber kann der Strom jetzt vermöge der erhöhten Spannung einen viel größeren Widerstand überwinden.

Will man bei geringer Spannung eine hohe Stromstärke erzeugen, so verbindet man die Stromquellen nach Fig. 313 so, daß der Querschnitt der Strombahn künstlich vergrößert wird,

d. h. man schaltet die Elemente parallel oder nebeneinander. Es sind nun alle gleichnamigen Pole miteinander verbunden. Bei der *Nebeneinander-* oder *Parallelschaltung* ist die Gesamtspannung gleich der Spannung des einzelnen Elementes, während der aus der „Batterie“ zu entnehmende Höchststrom gleich der Summe der Einzelströme wird. Auch Widerstände lassen sich parallel schalten. Sind sie gleichgroß, so ist der Gesamtwiderstand gleich dem Wert eines Widerstandes, dividiert durch die Anzahl der Widerstände. In Fig. 313 beträgt der Gesamtwiderstand demnach  $\frac{1}{6}$  Ohm und die Gesamtstromstärke  $1 : \frac{1}{6} = 6$  Ampere. Sind zwei parallel geschaltete Widerstände nicht gleichgroß (Fig. 314), so ist der Gesamtwiderstand gleich dem Produkt derselben, dividiert durch die Summe, also:  $W_{\text{Gesamt}} = \frac{W_1 \times W_2}{W_1 + W_2}$ . Beträgt  $W_1$  3 und  $W_2$  7 Ohm, so ist der Gesamtwiderstand  $\frac{3 \cdot 7}{10} = 2,1$  Ohm.

Den Widerstand eines Leiters kann man, wie bereits erörtert, bestimmen, indem man beim Durchfließen eines bestimmten Stromes die an den Enden des Leiters auftretende Spannung mißt und aus  $W_{\text{Ohm}} = \frac{E \text{ Volt}}{J \text{ Amp.}}$  den Widerstand berechnet. Auch kann man einen unbekanntem Widerstand dadurch messen, daß man ihn mit einem bekannten mittels besonderer Meßeinrichtung vergleicht. So, wie der einem Wasserstrom sich entgegenstellende Widerstand größer wird mit der Länge der Leitung und kleiner bei Vergrößerung des inneren Durchmessers, nimmt auch der elektrische Widerstand zu mit der Länge des Leiters und ab bei Zunahme des Querschnittes. Dabei ist die Form des Querschnittes gleichgültig. Natürlich ist auch das Material des Leiters für die Größe seines Widerstandes bedeutsam. Ein Kupferdraht von 1 m Länge und 1 qmm Stärke hat einen kleineren Widerstand als ein gleichstarker Eisendraht. Diejenige Zahl, die angibt, wie groß der Widerstand (in Ohm) eines beliebigen Leiters von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt ist, nennt man den *spezifischen Widerstand c* des Leiters. Der auf eine mittlere Temperatur, z. B. 20° C, bezogene spezifische Widerstand  $c$  beträgt für

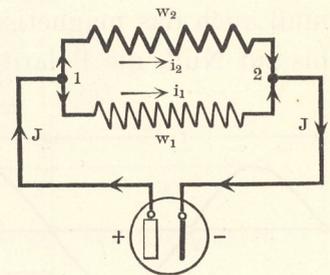


Fig. 314. Schaltung von Widerständen.

Kohle . . . . .	100—1000	Aluminium . . . . .	0,03 — 0,05
Manganin . . . . .	0,42	Kupfer . . . . .	0,017—0,018
Eisen . . . . .	0,10—0,12	Silber . . . . .	0,016—0,018

Diese Werte lassen erkennen, daß Silber zwar am besten leitet, Kupfer ihm jedoch nur wenig nachsteht. Andererseits ist der hohe Widerstand von Kohle augenfällig, ein Umstand, der in den Dynamomaschinen einen nicht unerheblichen Ausfall an Energie bedingt.

Das bisher über den Widerstand eines Leiters Gesagte läßt sich dahin zusammenfassen, daß die Größe des Widerstandes  $W$  (in  $\Omega$ ) eines Leiters von der Länge  $l$  (in m) und dem Querschnitt  $q$  (in qmm) beträgt:  $W = c \times \frac{l}{q}$ . Hierin ist der spezifische Leitungswiderstand  $c$  abhängig von dem Stoff und der Temperatur des Leiters.

In einem unverzweigten Stromkreise ist die Stromstärke überall die gleiche, wovon man sich überzeugen kann, wenn man analog die durch eine Rohrleitung fließende Wassermenge an verschieden starken Stellen der Rohrleitung mißt; es wird überall die gleiche Wassermenge pro Sekunde hindurchgehen. Ebenso ist auch in einem unverzweigten elektrischen Stromkreise die Stromstärke überall gleich. Verzweigt sich der Stromkreis, so teilt sich der Strom am Verzweigungspunkt in zwei gleiche Teile, wenn der Widerstand der beiden Zweige gleichgroß ist; in ungleiche Teile, wenn der Widerstand der beiden Zweige zwischen den Verbindungspunkten 1 und 2 (Fig. 314) ungleich ist. Hierbei wird der stärkere Strom durch den kleineren Widerstand, der schwächere Strom durch den stärkeren Widerstand fließen. Das Produkt aus den beiden Größen  $J$  und  $W$  ist aber in beiden Zweigen stets gleich. Daraus folgt, daß auch die Spannung, gemessen an den Punkten 1 und 2, oder der *Spannungsabfall* von 1 nach 2, in beiden Zweigen gleichgroß ist. Bezeichnet man die Widerstände der beiden Zweige mit  $w_1$  und  $w_2$ , die Spannungsabfälle mit  $e_1$  und  $e_2$ , die Ströme mit  $i_1$  und  $i_2$ , dann ist  $e_1 = i_1 \cdot w_1 = e_2 = i_2 \cdot w_2$ . Der Gesamtstrom ist gleich der Summe der Einzelströme, also  $J = i_1 + i_2$  und bei mehreren Abzweigungen  $J = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$  usw.

Bisher wurden nur die Verhältnisse und Beziehungen für solche Stromkreise besprochen, in denen ein stets gleichgerichteter Strom, ein *Gleichstrom*, fließt. Es sei daran erinnert, daß in einer stromdurchflossenen Spule beim Schließen und Öffnen des Stromes eine elektromotorische Gegenkraft, die Selbstinduktion, auftritt. Auch ist schon bekannt, daß im allgemeinen eine Induktionswirkung zunimmt mit der Anzahl der erzeugten Kraftlinien und der Schnelligkeit, mit der die Kraftlinien in der Spule entstehen und verschwinden. Anstatt den Stromkreis zu schließen und wieder zu unterbrechen, soll nun ein Strom durch die Spule geschickt werden, der seine Stärke und Richtung stets ändert, ein *Wechselstrom*. Der Verlauf eines Wechselstromes ist so zu verstehen, daß bei Beginn der Strom auf einen bestimmten positiven Wert ansteigt, bis auf Null fällt, dann seine Richtung wechselt, bis zum negativen Maximalwert ansteigt, wieder fällt, Null wird, positiv ansteigt usw. Die Strecke I von 1 bis 3 in Fig. 315, also von dem Nullpunkt, an dem der Strom positiv ansteigt, bis zu dem Punkt, an dem der Strom wieder positiv ansteigt, nennt man eine *Periode* (ebenso die Strecke von 3 bis 5). Die Strecken II von 1 bis 2, von 2 bis 3, von 3 bis 4 und von 4 bis 5 nennt man je einen Wechsel. Erfolgen während einer Sekunde 50 solcher Perioden, so sagt man, der Strom hat 50 Perioden. In gleicher Weise, wie der Strom sich ändert, muß auch das magnetische Feld sich ändern, also positiv ansteigen bis zum Maximalwert, fallen bis auf Null, die Polarität ändern, wieder stärker werden usw. Es handelt sich hierbei also um

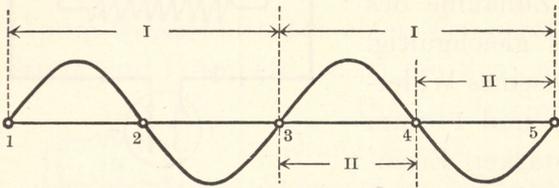


Fig. 315. Wechselstromkurve.

eine stetige Änderung des Kraftlinienfeldes, wodurch auch eine dauernde Selbstinduktion auftritt. Diese stellt eine elektromotorische Gegenkraft dar, die von der hineingeschickten Spannung überwunden werden muß. Will man also durch eine Spule einen Wechselstrom schicken, so muß man eine höhere Spannung aufwenden, als wenn ein gleichstarker Gleichstrom

die Spule durchfließen soll, und zwar muß die Wechselstromspannung eben um die wirksame Spannung der Selbstinduktion größer sein als die Gleichstromspannung. Es scheint also das Ohmsche Gesetz, das doch sagt:  $\text{Strom} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$ , hier nicht mehr zuzutreffen. Dies ist auch der Fall: Durch die Wirkung der Selbstinduktion wird der Widerstand der Spule scheinbar vergrößert. Will man daher das Ohmsche Gesetz bei Wechselstrom anwenden, so muß man als Widerstand den insgesamt wirksamen sogenannten *scheinbaren Widerstand* einsetzen. Da dieser zum Teil durch die Selbstinduktion hervorgerufen wird, nimmt er wie diese zu mit Erhöhung der Stromstärke und der Periodenzahl. Das Ohmsche Gesetz für Wechselstrom lautet somit:

$$J_{\text{Amp.}} = \frac{E \text{ Volt}}{W \text{ (scheinbar) Ohm}}$$

Fließt ein Wechselstrom durch eine Zersetzungszelle, so tritt auch hier eine Zersetzung des Wassers ein, doch wird an den Elektroden kein reines Gas, sondern ein Gemisch von Sauerstoff und Wasserstoff (Knallgas) erzeugt. Es ist also durch den fortwährenden Wechsel der Stromrichtung auch ein fortwährender Wechsel in der Art des erzeugten Gases bedingt. Gleichzeitig nimmt man bei diesem elektrolytischen Vorgang wahr, daß sich mit einer bestimmten Wechselstromspannung nicht dieselbe Stromstärke erzeugen läßt wie mit einer gleichgroßen Gleichstromspannung. Es stimmt das allgemeine Ohmsche Gesetz also auch in diesem Falle nicht.

Was hier in die Erscheinung tritt, ist die Wirkung der Polarisierung, die, wie die Selbstinduktion, auch eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt oder, anders ausgedrückt, den wirksamen Gesamtwiderstand vergrößert. Auch hier ist ein scheinbarer Widerstand in Rechnung zu setzen, so daß sich wieder ergibt:  $J = \frac{E}{W \text{ (scheinbar)}}$

Im Gegensatz zu den oben besprochenen Wirkungen erzeugt ein Wechselstrom in einem Leiter genau die gleiche Wärmemenge wie ein Gleichstrom derselben Spannung und Stärke.

## C. Anwendungen der Elektrizität.

### I. Maschinen.

#### 1. Generatoren.

a) **Gleichstromgeneratoren.** Bedingung für die Entstehung eines elektrischen Stromes ist das Vorhandensein einer Elektrizitätsquelle. Handelt es sich um die Erzeugung schwacher Ströme, so benutzt man Elemente. Für starke und hochgespannte Ströme, wie sie die Starkstromtechnik benötigt, ist diese Art der Stromerzeugung nicht geeignet. Hier finden Maschinen Verwendung, worin die (beispielsweise durch eine Dampfmaschine) zugeführte mechanische Energie in elektrische umgesetzt wird.

Die Wirkung dieser *Dynamomaschinen* oder *Generatoren* beruht auf dem im vorigen Abschnitt behandelten Prinzip der Magnetinduktion: Mehrere auf einer Eisentrommel, dem sogenannten *Anker*, zu Spulen vereinigte Leiter werden so durch ein Magnetfeld bewegt, daß sie die magnetischen Kraftlinien schneiden. Je nach der Bewegungsrichtung der Leiter und der Richtung der magnetischen Kraftlinien kann der induzierte Strom im einen oder im entgegengesetzten Sinne verlaufen. Man unterscheidet *magnet-elektrische* und *dynamo-elektrische* Maschinen. Bei ersteren wird das Magnetfeld durch einen permanenten Stahlmagnet, bei letzteren durch einen Elektromagnet gebildet.

Fig. 316 veranschaulicht schematisch den 1857 von W. v. Siemens erfundenen *Zylinderinduktor*, der sich als erste brauchbare Maschine erwies. Sein aus einem Eisenzyylinder bestehender Anker besitzt zwei Nuten zur Aufnahme der parallel zur Zylinderachse gewickelten Drähte und wird zwischen den Polen eines permanenten Magnets gedreht. Dabei durchschneidet die Ankerwicklung das zwischen Nord- und Südpol befindliche Kraftlinienfeld. Infolgedessen wird in den Windungen eine elektromotorische Kraft induziert, deren Größe sich mit der jeweiligen Lage der Spule ändert: Befindet sich der Anker in der aus Fig. 316 ersichtlichen Stellung, so ist die Zahl der von der Wicklung geschnittenen Kraftlinien und damit die elektromotorische Kraft gleich Null. Sie nimmt zu, wenn der in das Ankereisen eingezeichnete Pfeil die Richtung 3—4 kennzeichnet, und erreicht ihren Höchstwert in 5—6, da hier die von der Spule geschnittene Kraftlinienzahl am größten ist. In 7—8 nimmt die Induktionswirkung wieder ab, um in 2—1, wo die Ankerdrähte sich parallel zu den Kraftlinien bewegen (diese also nicht schneiden), wieder gleich Null zu werden. Bei weiterer Drehung nimmt die elektromotorische Kraft wieder zu, jedoch in entgegengesetzter (negativer) Richtung; in Stellung 6—5 erreicht sie ihr negatives Maximum, in 1—2 wird sie wieder Null, wie zu Beginn der Drehung. Man beobachtet demnach, daß die vom Nordpol ausgehenden Kraftlinien einmal bei II und einmal bei I in den Anker treten, die Richtung der Kraftlinien im Anker sich also nach jeder halben Umdrehung ändert. Daher muß auch der erzeugte Strom nach jeder halben Ankerdrehung seine Richtung wechseln. Würde man die Enden der Spule zu zwei isoliert auf der Achse befestigten Metallringen führen, so könnte man der Maschine mittels zweier auf den Ringen schleifender Metallfedern oder *Bürsten* Wechselstrom entnehmen. Zur Umwandlung desselben in Gleichstrom bedient man sich eines besonderen Hilfsapparates, des *Kommutators* oder *Kollektors*. Dieser besteht (Fig. 317) aus einem Metallring, der in zwei voneinander isolierte Hälften 1 geteilt ist. An jeden Halbring ist ein Ende der Wicklung 2 geführt. (In die das Prinzip des Kollektors veranschaulichende Fig. 317 ist statt der aus mehreren Windungen bestehenden Ankerspule der Einfachheit halber nur eine einzige Windung eingezeichnet.) Auf dem Kommutator schleifen an

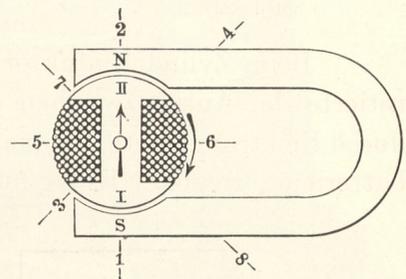


Fig. 316. Zylinderinduktor.

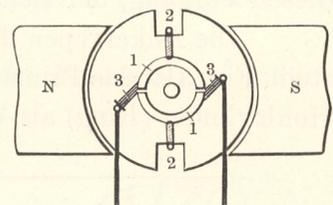


Fig. 317. Prinzip des Kommutators.

zwei sich diametral gegenüberliegenden Stellen zwei isoliert angebrachte Metallfedern oder Kohlenkörper, die Bürsten 3, die immer dann, wenn der Strom seine Richtung ändert, auf die andere Ringhälfte übertreten. Die Bürsten behalten also stets die gleiche Polarität.

Die elektromotorische Kraft war am größten, wenn sich die Leiter (Spulenseiten) vor der Polmitte befanden, und nahm ab bis auf Null, wenn die Leiter mitten zwischen den Polen standen. Der Zylinderinduktor kann also nur „pulsierenden Gleichstrom“ erzeugen. Zwecks Erzielung einer gleichmäßigen Spannung versieht man den Anker in gleichen Abständen mit mehreren Spulen und benutzt statt des zweiteiligen Ringes einen Kranz mit so vielen voneinander isolierten Ringsegmenten, wie Spulen vorhanden sind. Die in den einzelnen Spulen erzeugten Stromimpulse setzen sich jetzt zu einem fast gleichmäßigen Strom zusammen. In Fig. 318 ist ein *Achtnuten-Anker* schematisch dargestellt. Dabei ist der Einfachheit halber wieder angenommen, daß jede Spule aus nur einer Windung besteht, also auch in jeder Nute nur ein Leiter liegt.

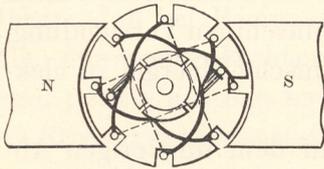


Fig. 318. Trommelanker (Acht-nuten-Anker).

Beim Zylinderinduktor und den der gleichen Epoche angehörenden elektrischen Maschinen rotierte der Anker zwischen den Polen permanenter Stahlmagnete. Später ersetzte man diese durch Elektromagnete, die man mit Strom aus magnetoelektrischen Maschinen oder Akkumulatoren-batterien „erregte“. Es lag nun nahe zu versuchen, den Strom, den eine solche mit einem Elektro-

magnet versehene Maschine erzeugt, auch zu ihrer Erregung zu benutzen. Diese Aufgabe löste 1867 W. v. Siemens durch Entdeckung des sogenannten *Dynamoprinzips*: Bei der Ankerdrehung erzeugt der remanente Magnetismus in den Ankerdrähten einen schwachen Strom, der nun die Wicklung des Magnetgestelles, des sogenannten *Feldmagnets*, durchfließt und sein Magnetfeld verstärkt. Dadurch wird wieder in der Ankerwicklung ein stärkerer Strom erzeugt. Dies geht fort, bis das Magneteisen mit Kraftlinien gesättigt ist, d. h. bis zur vollen Spannung der Maschine. Man nennt

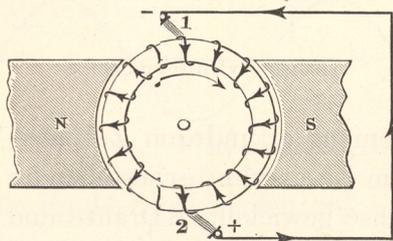


Fig. 319. Prinzip des Ringankers.

diesen Vorgang, der sich innerhalb weniger Sekunden abspielt, *Selbsterregung* des Generators.

Die Ankertypen der Fig. 317 und 318 gehören den sogenannten *Trommelankern* an; dagegen stellt Fig. 319 das Prinzip eines *Ringankers* dar. Statt des Vollzylinders (Trommel) dient hier ein Hohlzylinder (Ring) als Wicklungsträger. Die den Ring in spiralförmigen Windungen umgebende Wicklung dreht sich zwischen den Polen N und S. Dabei werden die vom Nord- zum Südpol verlaufenden Kraftlinien von den äußeren Leitern der Wicklung geschnitten. Es treten also in den Leitern Ströme auf, die jedoch unter dem Nordpol in entgegengesetzter Richtung verlaufen wie unter dem Südpol. Nur an den Punkten 1 und 2 sind die Spulen stromlos, so daß die in beiden Ringhälften induzierten Ströme dorthin zusammenfließen. Würde

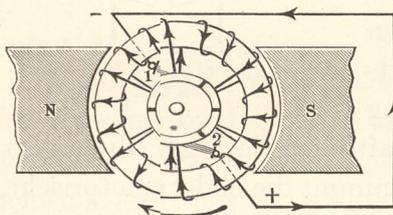


Fig. 320 Ringanker.

man an diesen Stellen, die dann natürlich blank sein müßten, Metallfedern schleifen lassen, so könnte man von ihnen den in den Spulen gewonnenen Strom abnehmen und durch einen äußeren Stromkreis leiten. Zweckmäßiger wird jedoch (Fig. 320) die Wicklung in verschiedene Spulen unterteilt und jede Spule so an einen isoliert auf der Welle befestigten Kollektor angeschlossen, daß ein Kollektorsegment immer zwei benachbarte Spulen hintereinander verbindet. Der Strom fließt dann wieder aus beiden Wicklungshälften der Bürste 1 zu und gelangt durch den äußeren Stromkreis über Bürste 2 in die Maschine zurück. — Während also beim Trommelanker die beiden Spulenseiten von ungleichnamigen Polen induziert werden, liegt beim Ringanker die ganze Spule unter demselben Pol.

Eine Gleichstromdynamo älterer Bauart zeigt Fig. 321. Die Feldmagnete sind mit der Grundplatte aus einem Stück gegossen. Ihr oberer, *Polschuh* genannter Teil umschließt den Anker in einer Breite, daß die auf den Seitenflächen des Ankers liegenden Wicklungsteile bedeckt

werden. Um den Kraftlinienfluß möglichst wenig zu hindern, bleibt zwischen Anker und Polschuhen nur ein schmaler Luftspalt. Energieverlusten, wie sie durch das Austreten („Streuen“) magnetischer Kraftlinien bedingt sind, wird dadurch vorgebeugt, daß die Polschuhe unter Vermeidung scharfer Ecken abgeschrägt sind. Der Anker ist mit Ringwicklung versehen und auf eine Welle aufgebracht, die beiderseits in Stehlagern ruht. Die auf dem rechten Lager beweglich angeordnete *Bürstenbrille* besitzt zwei *Bürstenstifte*, auf denen je drei *Bürstenhalter* zur Aufnahme der Kohle- oder Kupferbürsten befestigt sind.

Die Kommutatorsegmente oder *Lamellen* bestehen aus Kupfer und sind unter sich und gegen die Ankerwelle durch Zwischenlagen aus Preßspan oder Glimmer isoliert. Die Verbindungsdrähte mit der Ankerwicklung sind mit den Kollektorlamellen verschraubt (heutzutage verlötet). Von den auf dem Kollektor schleifenden Bürsten führen Kupferseile zu einem auf den Polschuhen befestigten *Klemmbrett*, das zugleich zum Anschluß der äußeren Leitungen dient. Der Antrieb der Maschine erfolgt durch einen Riemen, der nach Bedarf durch die in der Figur sichtbare Spannvorrichtung angezogen werden kann. Unter Vorwegnahme eines späteren Abschnittes sei hier bemerkt, daß diese Maschine eine sogenannte *Nebenschlußdynamo* darstellt. Während Siemens den ganzen Ankerstrom oder *Hauptstrom* durch die Magnetwicklung und dann erst in den äußeren Stromkreis fließen ließ (Fig. 325), sind bei der Nebenschlußmaschine Magnetwicklung und äußerer Stromkreis parallel geschaltet, so daß nur ein Teil des Hauptstromes zur Erregung der Magnete dient (Fig. 326): der Erregerstromkreis liegt im „Nebenschluß“ zum äußeren Stromkreis.

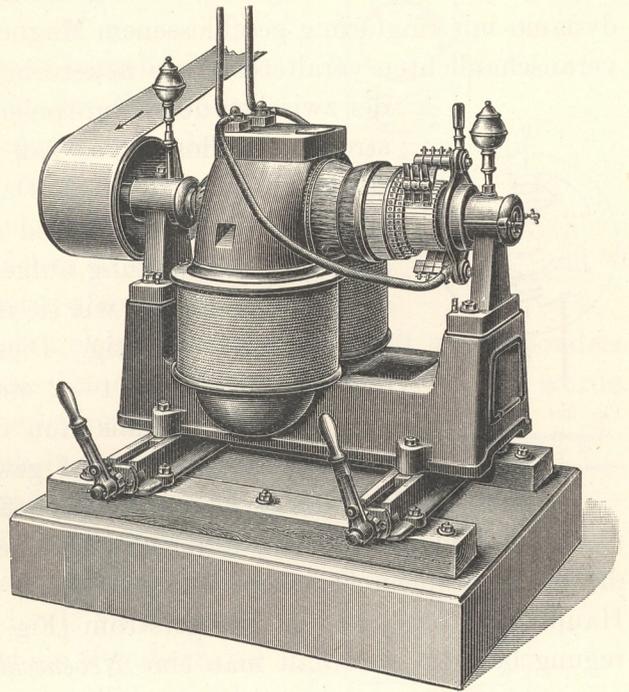


Fig. 321. Gleichstromdynamo älterer Bauart (Siemens & Halske).

Fig. 322 zeigt den Kraftlinienverlauf der vorstehend beschriebenen Maschine bei stromlosem Anker, d. h. den Zustand, wo an den Klemmen der Maschine infolge des Vorhandenseins eines Kraftlinienfeldes zwar Spannung herrscht, jedoch im äußeren Stromkreis noch kein Verbrauch an elektrischer Energie stattfindet. Wir bemerken, daß die Kraftlinien aus dem Nordpol heraustreten, Luftraum und Anker eisen durchsetzen und auf der anderen Seite durch den Luftraum in den Südpol eintreten. In der Stellung 1—2 werden von den (nicht eingezeichneten) Ankerdrähten keine Kraftlinien geschnitten; die in ihnen induzierte elektromotorische Kraft ist also Null. Man bezeichnet die Linie 1—2 daher als neutrale Linie oder *neutrale Zone*. Die Bürsten müssen stets so eingestellt werden, daß sie sich in der neutralen Zone befinden.

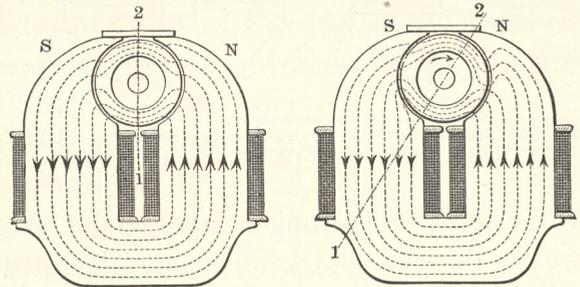


Fig. 322.

Fig. 323.

Fig. 322. Kraftlinienbild der Maschine Fig. 321 bei stromlosem Anker. Fig. 323. Kraftlinienbild der Maschine Fig. 321 bei Belastung.

Ist die Maschine *belastet*, d. h. wird der Anker infolge von Energieabgabe im äußeren Stromkreis vom Strom durchflossen, so entsteht auch im Anker ein magnetisches Feld, das den Kraftlinien des Feldmagnets zum Teil entgegenwirkt, zum Teil sie aus ihrer früheren Richtung ablenkt. Diese Erscheinung (*Ankerrückwirkung*) bewirkt, daß sich auch die neutrale Zone um einen gewissen Winkel in der Drehrichtung verschiebt (Fig. 323): Die neutrale Zone wird durch den rotierenden, stromdurchflossenen Anker gewissermaßen herumgezogen. Dabei wird die

Kraftliniendichte in der ablaufenden Ecke des Magnetpoles verstärkt, in der auflaufenden geschwächt. Zur Erzielung eines funkenfreien Ganges der Maschine müssen die Bürsten der verschiedenen Belastung und der dadurch bedingten veränderten Lage der neutralen Zone entsprechend eingestellt werden. Eine derartige Maschine erfordert daher aufmerksame Bedienung.

Um die Ankerrückwirkung und das damit verbundene Feuern der Bürsten zu unterdrücken, versieht man die modernen Dynamomaschinen vielfach mit *Hilfspolen*, den sogenannten *Wendepolen*, deren Lage aus Fig. 324 hervorgeht: Es handelt sich hier um eine zweipolige Nebenschlußdynamo mit ringförmig geschlossenem Magnetgestell, deren Verwendung sich statt der in Fig. 321 veranschaulichten veralteten Type neuerdings mehr und mehr eingebürgert hat. Die Wickelung der zwischen den Hauptpolen eingebauten Wendepole I, I wird vom vollen Ankerstrom durchflossen, so daß die Stärke ihres Magnetfeldes mit der Ankerstromstärke steigt und fällt. Das durch den Anker erzeugte „Querfeld“ trifft also stets auf ein entsprechend starkes, entgegengerichtetes „Wendefeld“, wodurch die Ankerrückwirkung aufgehoben bzw. kompensiert wird. Damit verschwindet die Feldverzerrung, wie sie in Fig. 323 angedeutet ist, und eine Verschiebung der Bürsten wird unnötig. Diese bleiben vielmehr bis zur höchsten Belastung in der neutralen Zone 1—2 stehen.

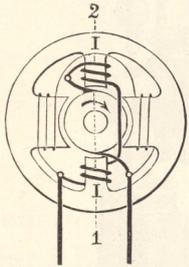


Fig. 324. Prinzip der Wendepole.

Bevor wir uns nun der Konstruktion moderner Dynamomaschinen zuwenden, müssen wir auf gewisse allgemeine Verhältnisse eingehen.

Bei Erfindung des Dynamoprinzips ließ Siemens (vgl. S. 158) den gesamten Ankerstrom erst um die Feldmagnete, dann durch den äußeren Stromkreis fließen. Eine derartige, mit wenigen dicken Windungen versehene Maschine heißt *Hauptstrommaschine*; bei ihr bildet der Anker- oder Hauptstrom zugleich den Erregerstrom (Fig. 325). Wird nur ein Teil des Hauptstromes zur Erregung benutzt, so erhält man eine *Nebenschlußmaschine* (Fig. 326). Wie ersichtlich, spaltet sich

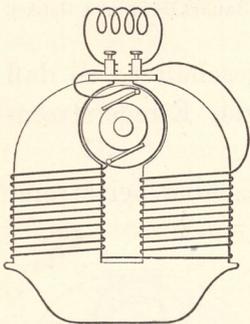


Fig. 325.

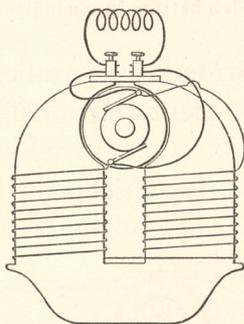


Fig. 326.

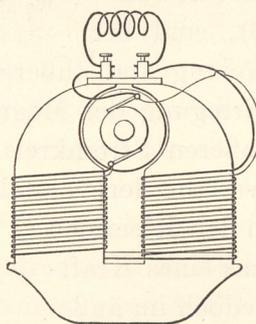


Fig. 327.

Fig. 325. Schaltung der Hauptstrommaschine. Fig. 326. Schaltung der Nebenschlußmaschine. Fig. 327. Schaltung der Compoundmaschine.

der die untere Bürste verlassende Ankerstrom in zwei Teile. Der eine (kleinere) bildet den „Erregerstrom“ der aus vielen, dünnen Drähten bestehenden Magnetwicklung; der andere (stärkere) fließt zum Klemmbrett und von dort über den (hier durch einige spiralförmige Windungen gekennzeichneten) äußeren Widerstand zur Maschine zurück. Endlich lassen sich (Fig. 327) auch beide

vorgenannte Schaltungen miteinander vereinigen. Die Magnete erhalten dann zwei Wickelungen, wovon die eine (stärkere) für den Hauptstrom, die andere (schwächere) für den Erregerstrom bestimmt ist. Dies ergibt eine *Verbund-* oder *Compoundmaschine*. Die einzelnen Maschinen zeigen ein sehr verschiedenes Verhalten. Eine Hauptstrommaschine, deren äußerer Stromkreis unterbrochen ist, gibt keine Spannung, denn ihr fehlt mit dem Arbeitsstrom auch der Strom zur Erregung. Eine Nebenschlußmaschine wird auch unbelastet „ansprechen“, da der Erregerstromkreis stets durch die Bürsten geschlossen bleibt und damit die Vorbedingung für das Entstehen einer elektromotorischen Kraft gegeben ist. Ist eine Hauptstrommaschine im Betriebe, so nimmt ihre Magnetisierung mit der Belastung zu. Das hat natürlich auch ein Anwachsen der elektromotorischen Kraft zur Folge. Bei der Nebenschlußdynamo hingegen nimmt die Spannung mit zunehmender Beanspruchung ab, denn infolge der größeren Belastung, d. h. zunehmenden Stromstärke, läßt die Spannung im Anker nach; es sinkt also auch die von ihr abhängige Erregerspannung, der Erregerstrom wird schwächer und die Feldmagnete werden schwächer magnetisiert. Resultat: Verminderung der elektromotorischen Kraft und damit

weiteres Sinken der Klemmenspannung. Die Compoundmaschine gibt auch bei stark schwankender Belastung stets die gleiche Spannung, da die beiden Wicklungen sich in ihren Wirkungen gegenseitig unterstützen. Die Hauptstrommaschine wird nur noch selten gebaut, um so mehr die Nebenschlußmaschine. Sie gestattet, wie wir sehen werden, eine weitgehende Regulierung ihrer Spannung und muß nur in den Fällen der Compoundmaschine weichen, wo — wie bei Bahnzentralen — momentane Belastungsschwankungen sofort ausgeglichen werden sollen.

In den Dynamomaschinen hängt die elektromotorische Kraft von bestimmten Größen ab, und zwar besonders von der Feldstärke, der Drehzahl (Tourenzahl) und der Anzahl der Ankerwindungen, derart daß die elektromotorische Kraft mit diesen drei Größen zunimmt: je stärker das magnetische Feld, je größer die Drehungsgeschwindigkeit des Ankers, je größer die Anzahl der Windungen auf dem Anker, desto größer die elektromotorische Kraft. Die von den Bürsten abgenommene *Klemmenspannung* der Maschine ist nicht der erzeugten elektromotorischen Kraft gleich, sondern etwas niedriger, da ein Teil davon zur Überwindung des „inneren Widerstandes“ verbraucht wurde.

Um die Klemmenspannung einer im Betriebe befindlichen Maschine zu erhöhen, kann man sich ihrer Abhängigkeit von den vorgenannten Größen bedienen. Die Zahl der Ankerwindungen läßt sich zwar nicht verändern, wohl aber Drehzahl und Feldstärke. Zur Regulierung der Spannung durch die Drehzahl greift man nur in ganz bestimmten Fällen, um so häufiger zur Regulierung durch Veränderung der Feldstärke. Hierzu wird in den Erregerstrom ein regulierbarer Widerstand gelegt, der durch Zu- bzw. Abschalten von Widerstandsmaterial eine beliebige Änderung des Erregerstromes und weiter der Feldstärke und Klemmenspannung gestattet. So kann die Spannung einer Nebenschlußmaschine, die sonst ja mit zunehmender Belastung sinken würde, dauernd auf gleicher Höhe gehalten werden, ein Vorzug, der die vielseitige Verwendbarkeit dieser Maschinenart erklärt.

Fig. 328 zeigt das Schaltungsschema einer Nebenschlußmaschine. Das Schema entspricht dem in Fig. 326 gebrachten Bilde, nur sind in Fig. 328 einige Apparate eingezeichnet, ohne die ein geregelter Betrieb undenkbar wäre. Der Stromverlauf in der Maschine und im äußeren Stromkreis ist durch Pfeile gekennzeichnet. Der im Anker 1 erzeugte Strom verzweigt sich an der rechten Bürste 2: der größere Teil fließt in den äußeren Stromkreis, der kleinere über den *Nebenschlußregler* 3 durch die Nebenschlußwicklung 4 zur linken Bürste 2. Dort vereinigt er sich mit dem aus dem äußeren Stromkreis zurückkehrenden Hauptstrom, um nun als Ankerstrom den eben beschriebenen Weg erneut zu durchmessen. Befindet sich der Kontakt hebel des Nebenschlußreglers in der Stellung am weitesten rechts, so ist er „kurzgeschlossen“; sein Widerstand ist Null. In der gegenüberliegenden Stellung befindet sich der sogenannte *Kurzschlußkontakt* 5; er ist durch eine besondere Leitung mit der Nebenschlußwicklung 4 verbunden und bezweckt, daß der beim Abschalten der Wicklung entstehende Induktionsstrom in sich verlaufen kann, d. h. er schließt die Nebenschlußwicklung kurz. Der Hauptstrom der Maschine ist zu *Sammelschienen* 8 geführt, von denen sich die einzelnen Leitungen zu den Stromverbrauchern (hier Glühlampen 9) abzweigen. Um den äußeren Stromkreis jederzeit von der Maschine abschalten zu können, ist in die zu den Sammelschienen führenden Leitungen ein zweipoliger *Ausschalter* 7 eingebaut. Zwei *Sicherungen* 6

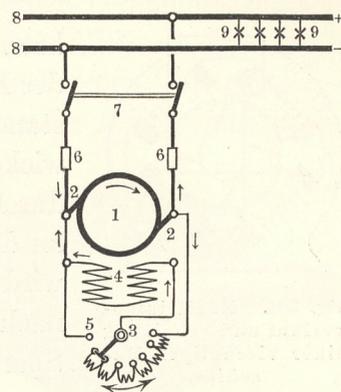


Fig. 328. Schaltungsschema der Nebenschlußmaschine.

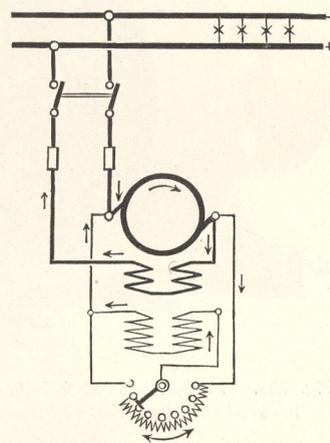


Fig. 329. Schaltungsschema der Compoundmaschine.

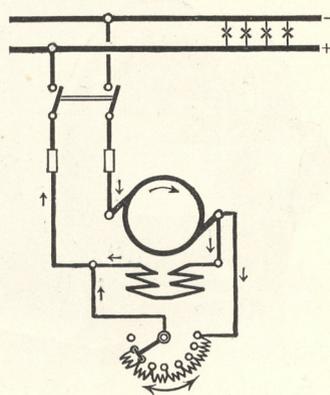


Fig. 330. Schaltungsschema der Hauptstrommaschine.

verhüten ein zu hohes Anwachsen des der Maschine entnommenen Stromes. — Auf die Konstruktion der Nebenschlußregler, Schalter und Sicherungen kommen wir später zurück.

In Fig. 329 und 330 sind die gleichen Verhältnisse für eine Compound- bzw. Hauptstrommaschine angedeutet. Bei letzterer erfolgt die Regulierung der Erregung durch einen *parallel* zur Magnetwicklung geschalteten Widerstand. Es fließt dann nur ein Teil des Hauptstromes durch die Schenkelwicklung, der andere Teil geht durch den Widerstand. Schließt man diesen durch Drehung der Schaltkurbel nach rechts kurz, so fließt der ganze Strom an den Schenkeln vorbei durch die Reglerleitung; die Spannung der Maschine wird also sehr klein. Schaltet man den Widerstand durch Drehung der Kurbel nach links aus, so geht der ganze Strom durch die Erregerwicklung; die Spannung erreicht also ihr Maximum. — Die Regulierung der Compoundmaschine unterscheidet sich nicht von derjenigen der Nebenschlußmaschine.

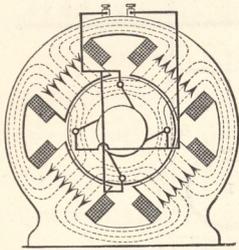


Fig. 331. Kraftlinienverlauf und Schaltung einer vierpoligen Maschine.

Die einer Dynamomaschine entnommene elektrische Leistung ergibt sich als das Produkt aus Klemmenspannung (Volt) und Stromstärke (Ampere) in Watt bzw. Kilowatt. Sie wird erhalten auf Kosten der beim Antrieb der Dynamo aufgewendeten mechanischen Arbeit. Wird eine Dynamo z. B. von einer zehnpferdigen Dampfmaschine angetrieben, so lassen sich die 10 PS der Dampfmaschine theoretisch in eine elektrische Leistung von 7,36 KW (1 PS = 736 Watt = 0,736 KW) umsetzen. Praktisch wird dieser Wert allerdings nicht erreicht, denn bei der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie geht stets ein gewisser Prozentsatz verloren. Die Verluste, teils mechanischer (Lager-, Luft- und Bürstenreibung), teils elektrischer Natur (Magnetisierungsverluste, Verluste durch Joulesche Wärme u. a.), bewirken, daß in obigem Beispiel statt 7,36 KW nur etwa 6,1 KW im äußeren Stromkreis verwertet werden können. Das Verhältnis der von der Dynamo abgegebenen elektrischen Leistung zu der für ihren Betrieb aufgewendeten mechanischen Energie heißt *Wirkungsgrad* der Dynamomaschine; er wird in Prozenten der zugeführten mechanischen Leistung ausgedrückt. Im genannten Beispiel würde also der Wirkungsgrad  $\frac{6,1}{7,36} = \text{ca. } 83\%$  betragen. Bei großen, mit voller Belastung arbeitenden Maschinen beträgt er bis zu 95 Proz. Dieser Wert geht jedoch mit abnehmender Belastung wesentlich zurück.

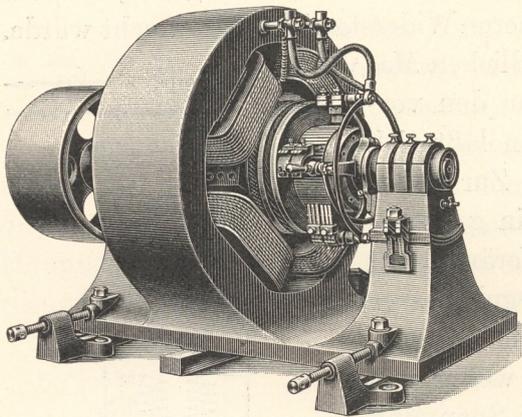


Fig. 332. Vierpolige Gleichstrom-Nebenschlußmaschine (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

Die *zweipoligen* Maschinen sind in neuerer Zeit fast ganz von den *mehrpolygonen* verdrängt worden. Bei ihnen ist das Gehäuse ringförmig geschlossen; statt zweier Pole sind deren vier, sechs, acht usw. vorhanden. Diese sind so angeordnet, daß in gleichmäßigen Abständen immer ein Nordpol auf einen Südpol folgt. Dabei nehmen die Kraftlinien den in Fig. 331 dargestellten Verlauf. Anker und Kommutator zeigen dieselbe Konstruktion wie bei der zweipoligen Maschine. Die Bürsten stehen auch hier in der neutralen Zone. Da zwei neutrale Zonen vorhanden sind, lassen sich vier Bürsten anbringen, wobei immer die eine negativ und die nächste positiv ist. (Die Bürsten gleicher Polarität sind durch Kupferbügel miteinander verbunden, von denen Drähte zum Klemmbrett der Maschine führen. Den mechanischen Aufbau einer vierpoligen Gleichstromnebenschlußdynamo zeigt Fig. 332. Mehrpolige Maschinen haben vor zweipoligen den

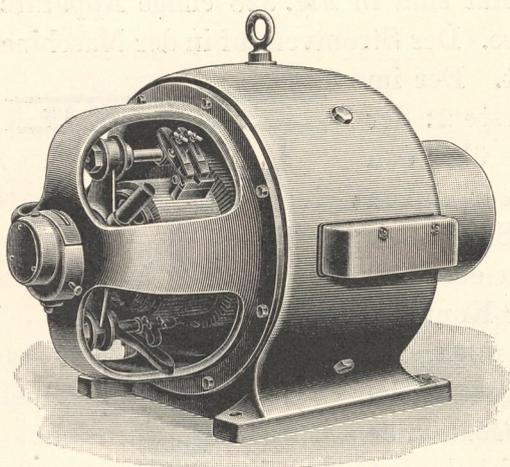


Fig. 333. Gleichstrommaschine für Riemenantrieb in offener Ausführung (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

vorhanden sind, lassen sich vier Bürsten anbringen, wobei immer die eine negativ und die nächste positiv ist. (Die Bürsten gleicher Polarität sind durch Kupferbügel miteinander verbunden, von denen Drähte zum Klemmbrett der Maschine führen. Den mechanischen Aufbau einer vierpoligen Gleichstromnebenschlußdynamo zeigt Fig. 332. Mehrpolige Maschinen haben vor zweipoligen den

Vorteil, daß sie bei gleicher Leistung einer viel geringeren Umdrehungsgeschwindigkeit bedürfen. Sie eignen sich also zur direkten Kuppelung mit Dampfmaschinen, Gaskraftmaschinen und Turbinen.

Nach diesen Ausführungen wird die Beschreibung einiger moderner Dynamomaschinen verschiedener Bauart ohne weiteres verständlich sein.

Fig. 333 veranschaulicht eine mehrpolige Gleichstrommaschine der Allgemeinen Elek-

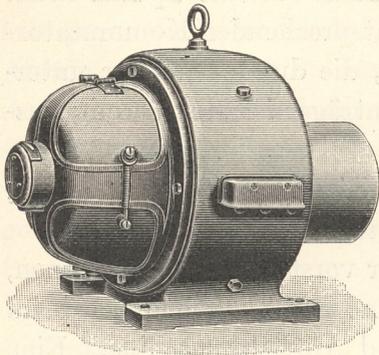


Fig. 334.

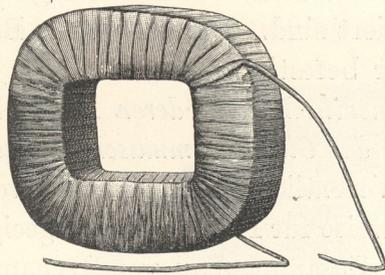


Fig. 335.

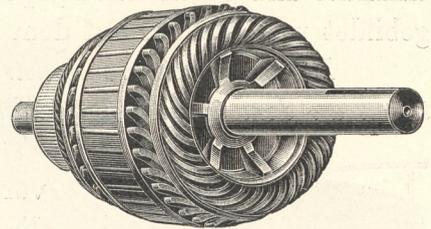


Fig. 336.

Fig. 334. Gleichstrommaschine in geschlossener Ausführung (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft). Fig. 335. Magnetspule der Maschine Fig. 333. Fig. 336. Anker der Maschine Fig. 333.

trizitäts-Gesellschaft, Berlin, für kleinere und mittlere Leistungen. Das runde gußeiserne Gehäuse oder Joch überragt seitlich die Magnetwicklung und bildet so einen Schutz für diese, ebenso wie die als Armsystem ausgebildeten Lager den Kommutator und die Ankerwicklung gegen

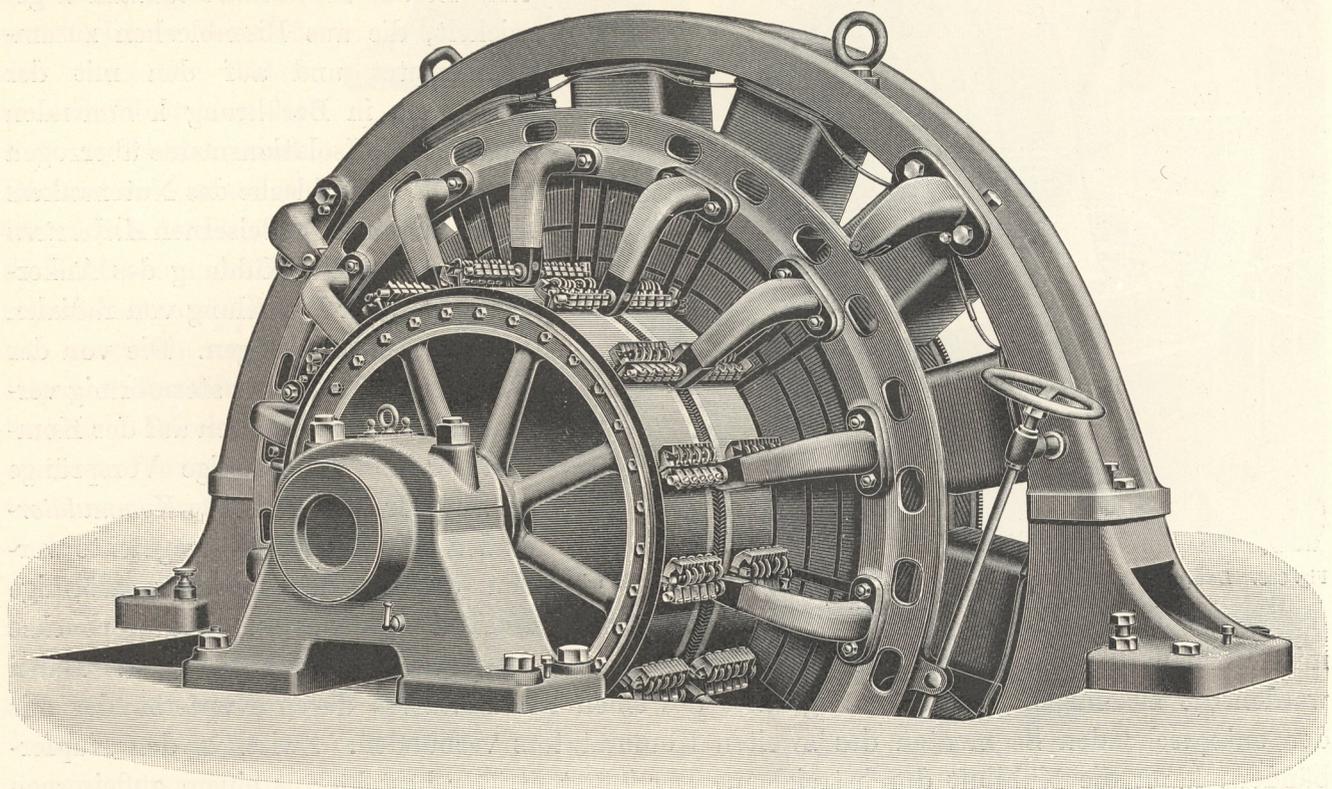


Fig. 337. Langsamlaufender Gleichstromgenerator für Zusammenbau mit der Antriebsmaschine (Siemens-Schuckert-Werke).

Beschädigungen schützen. Die in Fig. 333 sichtbaren Öffnungen können durch besondere Deckel verschlossen werden, wodurch die Maschine vollständig gekapselt wird (Fig. 334); infolge der leichten Handhabung der Deckel bleiben die wichtigsten Teile trotzdem leicht zugänglich. Eine derartige Kapselung ist am Platze, wenn das Innere gegen das Eindringen von Fremdkörpern, Schmutz, Spritzwasser u. dgl. geschützt werden soll. Die Magnetspulen (Fig. 335) sind vollkommen mit Isolationsmaterial bekleidet. Beim Zusammenbau der Maschine werden die einzelnen Spulen auf die aus Schmiedeeisenblechen zusammengesetzten Pole aufgeschoben und hiernach letztere mit dem Gehäuse verschraubt. Der Anker (Fig. 336) ist als *Nutenanker* ausgebildet.

Er besteht aus dünnen Eisenblechen und wird von mehreren parallel zur Welle verlaufenden Luftkanälen durchzogen, die eine kräftige Kühlung von Ankereisen und -wicklung bezwecken. Die Wickelung ist als *Schablonenwicklung* ausgeführt, d. h. die einzelne Spule erhält vor dem Einlegen in die Ankernuten auf Schablonen ihre Form. Dadurch können einzelne Spulen leicht ausgewechselt werden. Die freien Enden der Spule werden mit den entsprechenden Kommutatorsegmenten verlötet. Der Kommutator besteht aus Kupfersegmenten, die durch Glimmer untereinander und gegen den Körper isoliert sind. Der gußeiserne Bürstenträger ist sternförmig ausgebildet und drehbar auf dem Lager befestigt.

*Diese und andere Konstruktionseinzelheiten, deren Beschreibung hier zu weit führen würde, treten an dem aufklappbaren Modell der Gleichstrommaschine klar hervor.*

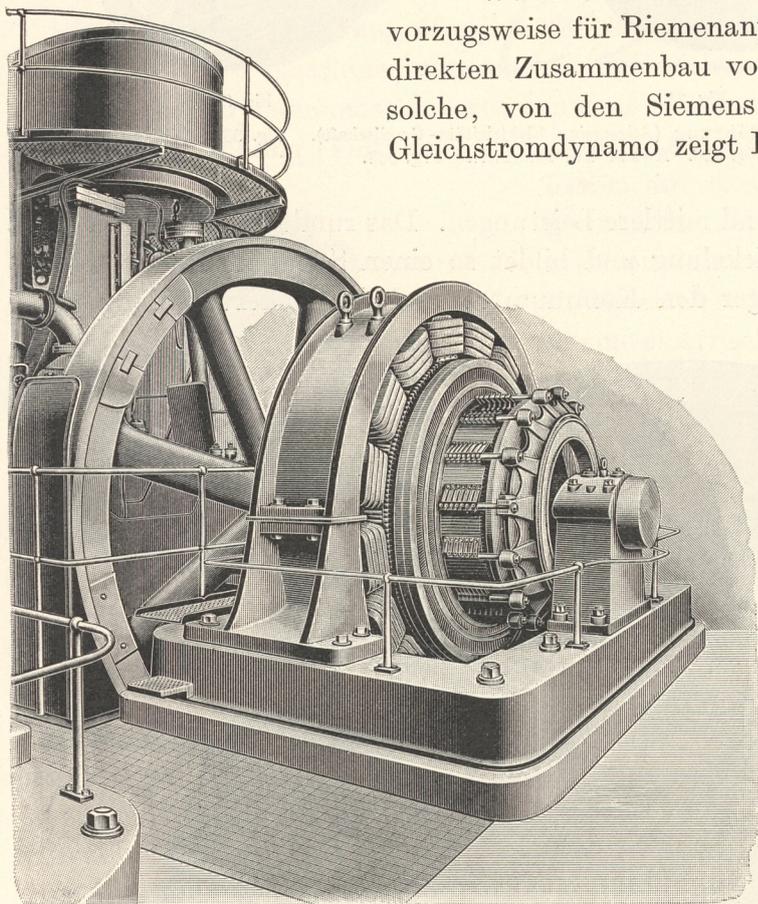


Fig. 338. Langsamlaufender Gleichstromgenerator, direkt gekuppelt mit Dampfmaschine (Bergmann-Elektrizitätswerke).

Wesentliche Abweichungen von der vorstehend beschriebenen, vorzugsweise für Riemenantrieb geeigneten Bauart ergeben sich beim direkten Zusammenbau von Dynamo und Antriebsmaschine. Eine solche, von den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin, hergestellte Gleichstromdynamo zeigt Fig. 337. Das Joch aus Stahlguß ist horizontal geteilt. Die gußeisernen Füße ruhen auf besonderen Fundamenten. Die Schenkel sind aus Eisenblechen zusammengenietet. Die Schenkelwicklung ist auf besondere *Drahtkasten* gewickelt, die aus Eisenblechen zusammengenietet und auf den mit der Wickelung in Berührung kommenden Flächen mit Isolationsmasse überzogen sind. Die Ankerbleche des Nutenankers sitzen auf einem gußeisernen *Ankerstern* und sind zwecks Kühlung des Ankereisens und der Wickelung von radialen Luftkanälen durchzogen. Die von der Nabe des Ankersternes sternförmig verlaufenden Arme erhalten auf der Kommutatorseite konsolartige Vorsprünge als Sitz für die gußeiserne *Kommutatorbuchse*. Die Kommutatorsegmente werden durch schwalbenschwanzförmige Ansätze auf der Kommutatorbuchse

mittels Spannrings befestigt. Der Kommutator ist als *Doppelkommutator* ausgebildet. Dabei werden die zusammengehörenden Segmente des einen Kommutators durch Kupferbänder mit den entsprechenden Segmenten des zweiten Kommutators verbunden. Zwischen den Kupferbändern kann die Kühlluft durchstreichen. Der Bürstenträger besteht aus einem gußeisernen Ring; die an ihm isoliert befestigten, über beide Kommutatorhälften hinwegragenden Bürstachsen sind mit Kohlebürsten besetzt. Auf der Rückseite des gußeisernen Ringes liegen die *Sammelleitungen*; sie sind durch Kupferstäbe mit den Bürstachsen verbunden. Um den Bürstenträger verdrehen und die Bürsten in die beste funkenfreie Stellung bringen zu können, ist eine Schraubenspindel mit Handrad vorgesehen. Diese Maschinen werden für Leistungen bis zu mehreren tausend Kilowatt hergestellt und sind in erster Linie für direkte Kuppelung mit langsamlaufenden Dampfmaschinen bestimmt. Aus Fig. 338 ist die Anordnung eines derartigen Aggregats (Maschinenpaares) ersichtlich. Die in diesem Falle von den Bergmann-Elektrizitätswerken, Berlin, erbaute Dynamo leistet bei 110 minutlichen Umdrehungen 800 KW.

In neuerer Zeit werden die langsamlaufenden Dynamomaschinen größerer Leistung mehr

und mehr durch die raschlaufenden *Turbogeneratoren* verdrängt. Es sind dies mit Dampfturbinen gekuppelte Generatoren, deren konstruktive Durchbildung eine vollständige Umwälzung im Bau elektrischer Maschinen mit sich brachte.

Ein Gleichstrom-Turbogenerator muß folgenden Bedingungen entsprechen: größte Sicherheit gegenüber den durch Zentrifugalkräfte hervorgerufenen Materialbeanspruchungen, geregelte Abführung der durch die unvermeidlichen Energieverluste verursachten Wärme, leichte Bedienung des Kommutators und der Bürsten, tunlichste Dämpfung des Maschinengeräusches. Der nachstehend beschriebene Gleichstrom - Turbogenerator wird von den Siemens - Schuckert-Werken gebaut:

Das feststehende Magnetjoch aus Stahlguß, mit dem die Haupt- und Wendepole verschraubt sind, sitzt (Fig. 339) in einem gußeisernen, durch seitliche Schilde abgeschlossenen Gehäuse, so daß der rotierende Anker und die Wickelung der Pole geschützt sind. Das Gehäuse ist so geformt, daß der Luft für die Ventilation der Maschine bestimmte Bahnen gewiesen werden.

Die in einem Filter gereinigte Frischluft strömt durch ein Rohr aus einem in der Regel im Keller liegenden Frischluftkanal zu. Nach Passieren der Maschine kann die erwärmte Luft wahlweise von der Oberseite des Gehäuses frei in das Maschinenhaus strömen, oder von der Unterseite des Gehäuses durch einen Abluftkanal entfernt werden. Die Einkapselung der Maschine bewirkt eine vollkommene Dämpfung des Maschinengeräusches und bietet den Vorteil, daß, abgesehen vom Stromwender und den Bürsten, alle unter Spannung stehenden Teile abgedeckt sind, so daß ihre Berührung ausgeschlossen ist.

Die Bleche des Ankers (Fig. 340) werden entweder unmittelbar auf die Welle oder auf eine kräftige Stahlgußnabe gepreßt und in axialer Richtung durch starke Druckplatten gesichert. Die Schablonenwicklung des Ankers ist in Nuten gebettet, die durch seitlich eingetriebene Keile verschlossen werden. Gegen die Zentrifugalkräfte außerhalb des Blechpakets ist die Ankerwicklung durch aufgezogene Bronzekappen geschützt. Das wichtigste Organ der Maschine ist der *Kommutator*, da von ihm die Betriebssicherheit, die Lebensdauer und die überhaupt mögliche Leistung einer Type abhängt. Zur Sicherung gegen die Einflüsse der Fliehkraft dienen stählerne Schrumpfringe, welche die Kommutatorsegmente zusammenspannen. Zwischen den Schrumpfringen und den Segmenten liegt eine Glimmerisolierung. Zur Sicherung der für die Wärmeausdehnung erforderlichen axialen Bewegungsfreiheit ist der

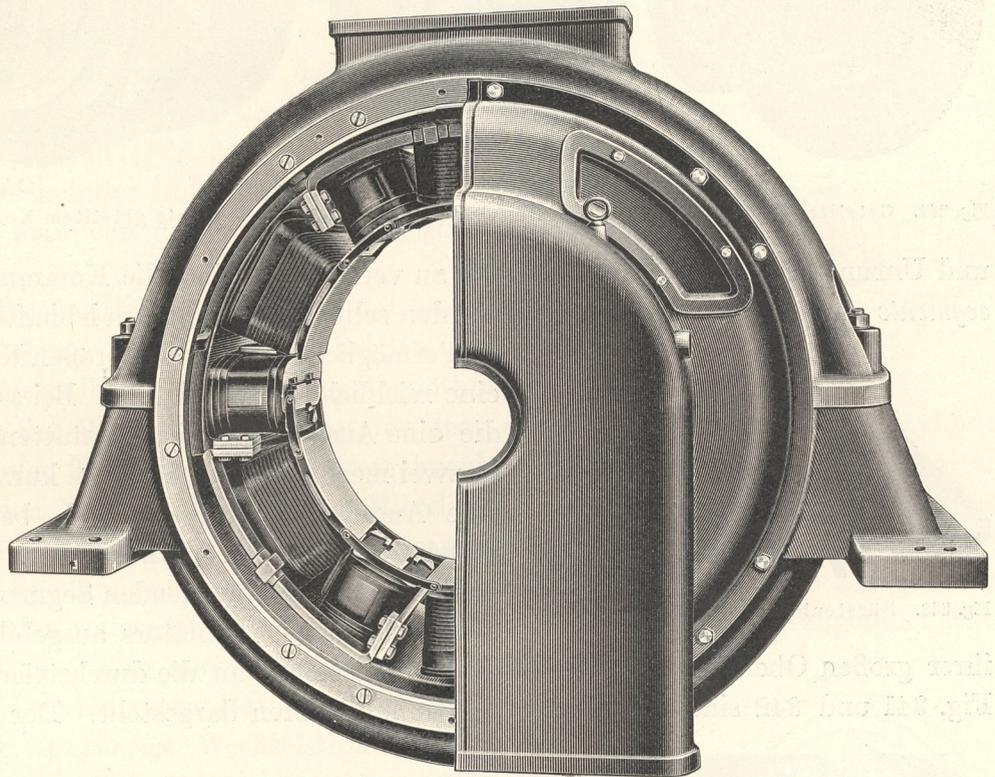


Fig. 339. Magnetgestell und Gehäuse eines Gleichstrom-Turbogenerators mit Wendepolen.

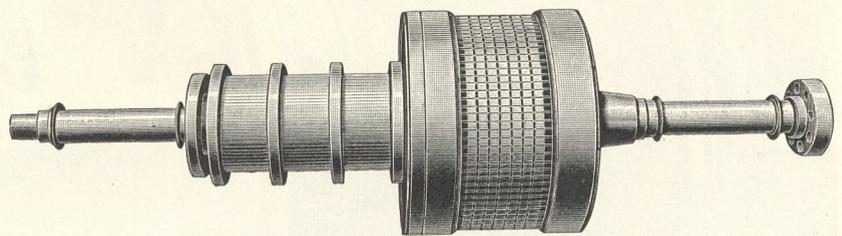


Fig. 340. Anker für 1200 KW.

Kommutator nur da, wo er an den Anker angeschlossen ist, mit der Welle fest verbunden, während er am anderen Ende durch ein federndes Plattenpaar axial gehalten wird. Um ein Krummziehen

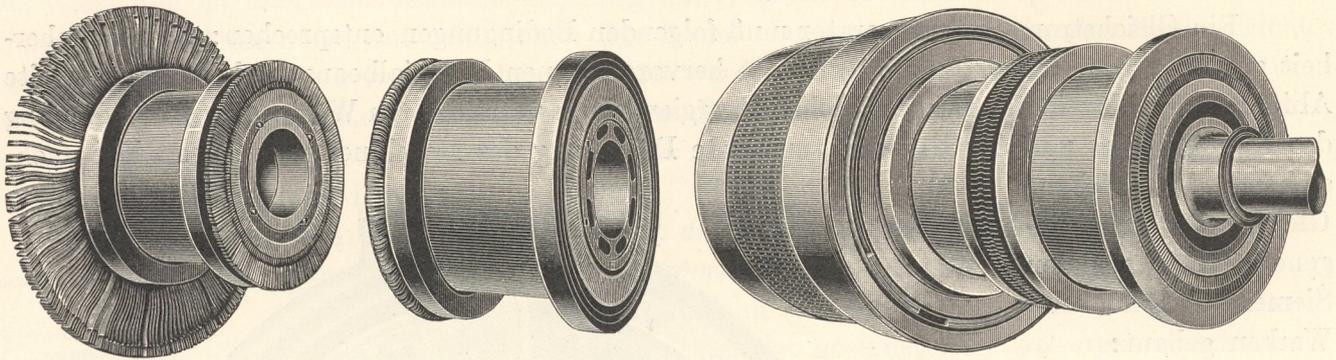


Fig. 341.

Fig. 342.

Fig. 341. Geteilter Kommutator vor dem Zusammenbau. Fig. 342. Anker mit geteiltem Kommutator und Hohlsegmenten.

und Unrundwerden des Kommutators zu verhindern, sind die Kommutatorsegmente als *Hohlsegmente* ausgebildet (Fig. 342). Sie werden selbsttätig von einem lebhaften Luftstrom durchzogen und ermöglichen infolge der großen Kühlfläche jedes Segments eine reichliche Wärmeabgabe. Bei sehr schmalen Segmenten, die eine Aushöhlung nicht gestatten, wird der Kommutator in zwei mechanisch selbständige kurze Kommutatoren geteilt, eine Anordnung, wie sie auch bei der langsamlaufenden Dynamo Fig. 337 vorhanden war. Die Verbindungsstücke zwischen den entsprechenden Segmenten beider Teile sind als Schaufeln eines Ventilators ausgebildet und können infolge

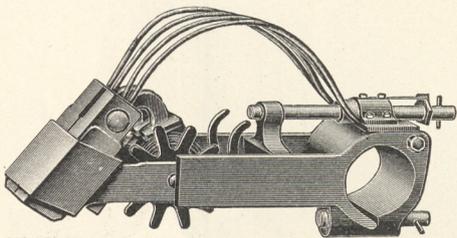


Fig. 343. Bürstenhalter mit Kohlebürsten.

ihrer großen Oberfläche eine reichliche Wärmemenge an die durchströmende Luft abgeben. In Fig. 341 und 342 sind solche geteilte Kommutatoren dargestellt. Der in Fig. 342 veranschaulichte Kommutator ist insofern eine Sonderausführung, als hier zur Erzielung einer ganz besonders guten Wärmeabführung beide Mittel, Hohlsegmente und Teilung des Kommutators, vereinigt wurden. Als Bürsten dienen durchweg Kohlebürsten. Die Bürstenhalter (Fig. 343) gestatten eine äußerst feine Einstellung der Bürsten auch während des Betriebes. Der besonders stabil ausgeführte Bürstenträger ist beiderseits sicher gelagert (Fig. 344). Die Kabelanschlüsse der Bürstenachsen sind zugänglich in dem gußeisernen Tragring angeordnet, dabei aber gegen zufällige Berührung geschützt. Der Bürstenträger ist mittels Schnecke und Rad zentrisch um den Kommutator drehbar (Fig. 344). Die zweiteiligen Lager können sich auf kugelförmigem Sitz nach der

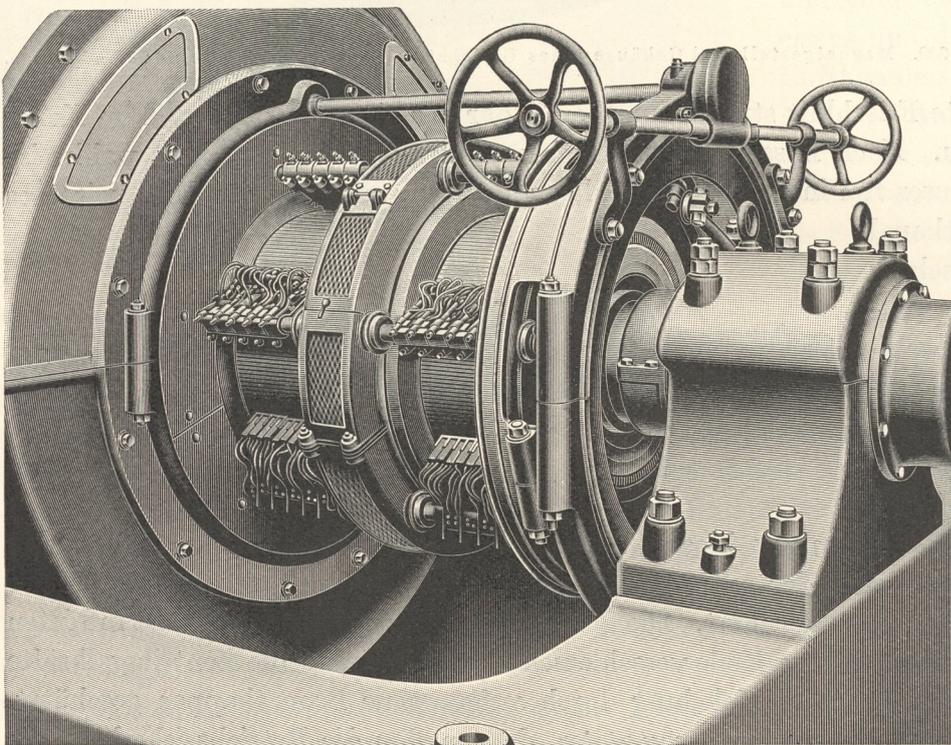


Fig. 344. Geteilter Kommutator mit Kohlebürstenbesetzung.

Fig. 344. Geteilter Kommutator mit Kohlebürstenbesetzung. Die zweiteiligen Lager können sich auf kugelförmigem Sitz nach der

Wellenlage einstellen. Die Schmierung der Lager geschieht durch Preßöl, das durch eine besondere Rohrleitung von einer durch die Turbine angetriebenen Pumpe zugeführt wird.

Die besprochenen Maschinenmodelle stellen Grundtypen dar, auf die sich fast alle modernen Maschinen zurückführen lassen.

Die üblichen Klemmenspannungen der Gleichstromgeneratoren betragen für Licht- und (damit vereinigte) Kraftanlagen 110, 220 ( $2 \times 110$ ) und 440 ( $2 \times 220$ ) Volt, für reine Kraftübertragung (Bahnen) 500 bis 650, auch 750, bisweilen sogar 1000 Volt. Wesentlich höhere Spannungen als 1000 Volt lassen sich mit Gleichstrom nicht erzielen, da dann die Gefahr besteht, daß im Kommutator Kurzschlüsse von Lamelle zu Lamelle stattfinden.

**b) Wechselstromgeneratoren.** Es sei daran erinnert, daß jede Gleichstrommaschine zunächst Wechselstrom erzeugt, der erst durch den Stromwender (Kommutator) in Gleichstrom verwandelt wird. Führt man (Fig. 345) die Enden der Ankerwicklung zu zwei, voneinander isoliert auf der Welle befestigten Metallringen, so kann man von diesen den Wechselstrom mittels Bürsten abnehmen.

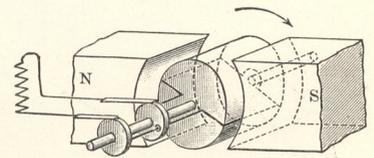


Fig. 345. Prinzip der Wechselstrommaschine.

Auch bei den Wechselstromgeneratoren unterscheidet man Anker- und Magnetwicklung. Während jedoch bei den Gleichstrommaschinen der Anker innerhalb der feststehenden Magnetpole rotiert, ist die Ankerwicklung der Wechselstromgeneratoren fast durchweg in einem als Hohlzylinder ausgebildeten feststehenden Teil, dem *Stator*, untergebracht; in diesem dreht sich der *Rotor*, ein Polrad mit abwechselnden Nord- und Südpolen. Hierdurch kann der Wechselstrom unter Fortfall von Schleifringen und Bürsten von ruhenden Klemmen abgenommen werden, was besonders bei Maschinen für hohe Spannungen wesentlich zur Betriebssicherheit beiträgt. Als Erregerstrom dient Gleichstrom, der den rotierenden Polen mittels Bürsten und Schleifringen zugeführt wird. Den Erregerstrom entnimmt man meist kleineren Gleichstrommaschinen, die häufig auf der verlängerten Hauptwelle angebracht sind.

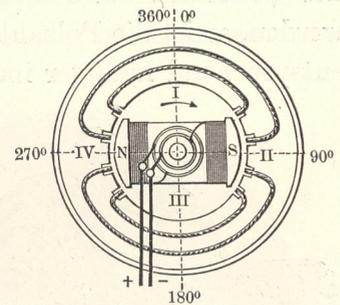


Fig. 346. Einphasengenerator.

Der gewöhnliche, *einphasige* Wechselstrom wird in den *Einphasengeneratoren* erzeugt. Fig. 346 zeigt schematisch eine dafür übliche Bauart: Der drehbar gelagerte Rotor und die Statorwicklung sind zweipolig ausgeführt. Letztere ist hier in mehrere offene Nuten eingelegt, die sich am inneren Umfang des Stators befinden und diesen senkrecht zur Papierebene durchdringen. Die oben und unten gleichmäßig verlaufenden Windungen stellen die *Spulenköpfe* der Statorwicklung dar. Der besseren Übersicht halber wurden die die Verbindung der Spulen vermittelnden *Schaltdrähte* fortgelassen. Um den Verlauf der erzeugten elektromotorischen Kraft leichter zu verfolgen, denke man sich den inneren Statorumfang in  $360^\circ$  geteilt und seine Abwicklung in eine Ebene ausgebreitet. Wie bekannt, ist die erzeugte Spannung Null, wenn der Erregerpol sich vor der Spulnmitte (bei I bzw. III) befindet, und ein Maximum, wenn der Pol an den Spulenseiten (bei II bzw. IV) vorbeigeht. Steht der Nordpol bei I, so steigt, bei Drehung des Magnets in Pfeilrichtung, die erzeugte Spannung von Null am Punkte I bis zu einem Maximum bei II, d. h. nach  $90^\circ$  Drehung, und fällt dann wieder auf Null. Der Nordpol ist jetzt bei III angelangt, hat sich also um  $180^\circ$  gedreht. Bei Weiterbewegung des Magnetpoles steigt die Spannung wieder, und zwar in umgekehrter Richtung, da jetzt die anderen Spulenseiten der Wicklung vom Nordpol induziert werden. In IV, d. h. nach  $270^\circ$  Drehung, erreicht die Spannung ihr negatives Maximum, um nach weiteren  $90^\circ$ , bei I, wieder Null zu werden.

Trägt man die Momentanwerte der Spannung — die positiven nach oben, die negativen nach unten — an der Abwicklung auf, so ergibt sich die in Fig. 347 veranschaulichte Kurve, woraus der Verlauf der induzierten elektromotorischen Kraft deutlich hervorgeht.

Selbstverständlich ruft auch der Südpol in der Statorwicklung eine elektromotorische Kraft hervor, deren Richtung allerdings im entgegengesetzten Sinne verläuft wie unter dem

Nordpol. Durch entsprechende Schaltung der Wickelung erreicht man jedoch, daß die elektromotorischen Kräfte aller Drähte sich addieren.

Die Kurve der Fig. 347 entspricht einer *Periode*. Die Maschine hat also während einer Umdrehung eine Periode erzeugt. Da man in der Praxis fast allgemein mit 50 Perioden pro Sekunde rechnet, so müßte die Maschine zu deren Erzeugung mit 50 Umdrehungen in der Sekunde, also mit  $50 \cdot 60 = 3000$  Umdrehungen in der Minute, laufen. In Verbindung mit den schnelllaufenden

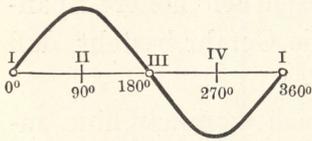


Fig. 347. Verlauf des Wechselstroms.

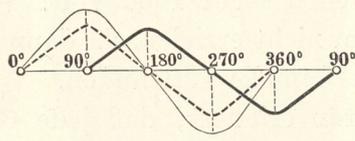


Fig. 348. Prinzip der Phasengleichheit und Phasenverschiebung.

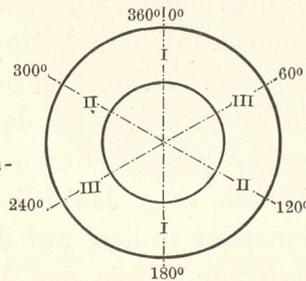


Fig. 349. Wickelungsschema eines Drehstromgenerators.

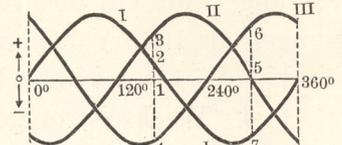


Fig. 350. Verlauf des Drehstroms.

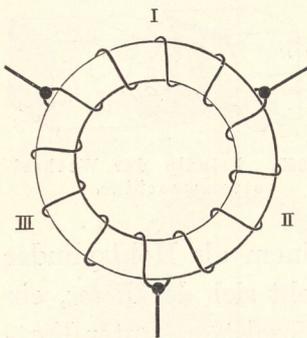


Fig. 351. Dreieckschaltung.

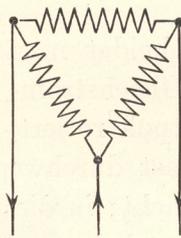


Fig. 352. Dreieckschaltung (schematische Darstellung).

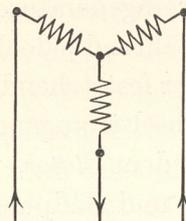


Fig. 354. Sternschaltung (schematische Darstellung).

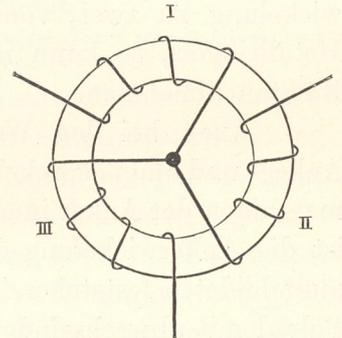


Fig. 353. Sternschaltung.

Dampfturbinen werden solche Maschinen auch tatsächlich als Turbogeneratoren ausgeführt. Soll der Generator bei derselben Periodenzahl von einer langsamer laufenden Maschine angetrieben werden, so ist die Polzahl des Erregermagnets zu erhöhen, wodurch die Wickelung pro Umdrehung entsprechend häufiger induziert wird. Bei 1500 Umdrehungen muß der Magnetkörper demnach vierpolig, bei 750 Umdrehungen achtpolig sein usw.

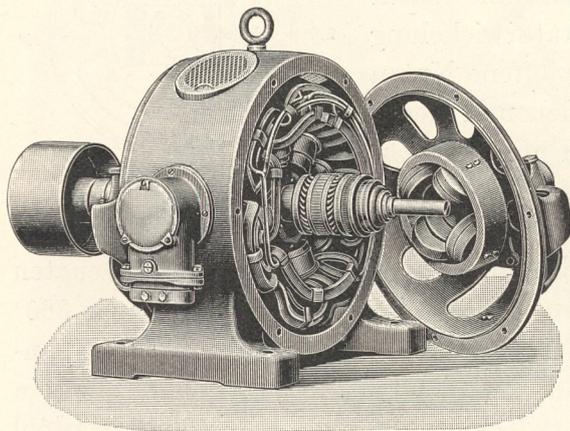


Fig. 355. Drehstromgenerator mit eingebauter Erregermaschine (Lagerschild abgenommen).

Während sich die Leistung eines Gleichstromgenerators als das Produkt aus Spannung und Stromstärke bestimmt, trifft dies beim Wechselstromgenerator nur dann zu, wenn der äußere Stromkreis „induktionsfrei“ ist, z. B. bei reiner Glühlampenbeleuchtung. In diesem Falle besitzen Spannung und Strom *Phasengleichheit*, d. h. die einzelnen Phasen ihrer Veränderung vollziehen sich durchaus gleichmäßig. In Fig. 348 bedeutet die dünn ausgezogene Kurve die Spannung, die punktiert gezeichnete die Stromstärke. Beide beginnen bei Null, erreichen zu derselben Zeit ihren höchsten positiven Wert, fallen ab, gehen gleichzeitig durch Null hindurch, erreichen

ihr negatives Maximum und werden nach Verlauf von  $360^\circ$  wieder Null. Ganz andere Verhältnisse ergeben sich, wenn im äußeren Stromkreis „induktive“ Stromverbraucher liegen, z. B. Motoren. In diesem Falle tritt zwischen Spannung und Stromstärke eine *Phasenverschiebung* auf (Stromstärke = stark ausgezogene Kurve in Fig. 348). Die Spannung erreicht, von Null ansteigend, nach  $90^\circ$  ihr positives Maximum. An diesem Punkte ist die Stromstärke Null; mithin ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke ebenfalls Null. Nach  $180^\circ$  ist die Spannung Null, während die Stromstärke ihr positives Maximum innehat; das Produkt ist also wieder Null. Auch nach  $270^\circ$  und  $360^\circ$  ist es Null, da sich beim negativen Verlauf der Spannungs- und Stromkurve dieselben Verhältnisse ergeben. Die gesamte Leistung des Wechselstromes ist demnach gleich Null,

ein Fall, der immer eintritt, wenn die Stromstärke, wie hier, um  $90^\circ$  oder  $\frac{1}{4}$  Periode gegen die sie erzeugende Spannung verschoben ist. Ein Wechselstromgenerator kann also sehr starke Ströme führen und doch mit einer Leistung Null arbeiten. Man spricht in diesem Falle von *wattlosen Strömen*. Man kann also die Leistung eines Wechselstromgenerators nicht durch Messung von Spannung und Stromstärke feststellen, würde vielmehr aus dem Produkt beider Werte nur die „scheinbare Leistung“ ermitteln. Um die *wirkliche Leistung* zu erhalten, hat man das Produkt

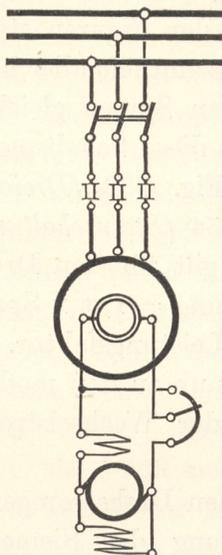


Fig. 356. Schaltschema eines Drehstromgenerators.

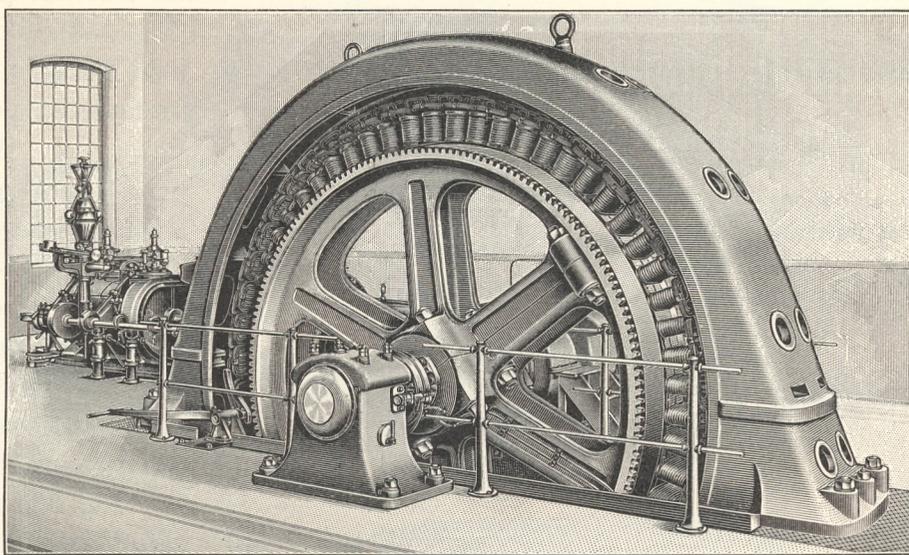


Fig. 357. Langsamlaufender Drehstrom-Schwungradgenerator für direkte Kuppelung mit der Antriebsmaschine.

noch mit dem *Leistungsfaktor* zu multiplizieren, dessen Wert (zwischen 1 und 0) von der Phasenverschiebung abhängig ist. Der Leistungsfaktor ist 1, wenn der Stromkreis induktionsfrei, die Phasenverschiebung also Null ist; er wird Null, wenn die Selbstinduktion des Stromkreises eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  zur Folge hat. Gewöhnlich rechnet man in Wechselstromnetzen mit einem Leistungsfaktor von 0,8—0,9.

Außer dem *einphasigen* Wechselstrom gibt es *mehrphasige* Wechselströme, von denen der *dreiphasige* oder *Drehstrom* besondere Bedeutung erlangt hat:

Der Stator des in Fig. 346 dargestellten Einphasengenerators sei anstatt mit einigen gegenüberliegenden, mit vielen, am inneren Umfang gleichmäßig verteilten Nuten versehen, und in diese seien drei Wicklungen eingebracht, deren Achsen um  $120^\circ$  voneinander entfernt sind. Die Wicklung I (Fig. 349) habe ihre Achse bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , die Achse der Wicklung II liege bei  $120^\circ$  und  $300^\circ$  und die der Wicklung III bei  $240^\circ$  und  $60^\circ$ . Ein im Stator rotierendes Magnetfeld induziert in diesen drei voneinander unabhängigen Wicklungen drei voneinander unabhängige Spannungen, deren Maximalwerte, ebenso wie die Nullwerte, auch immer nach  $120^\circ$  Drehung auftreten. Trägt man die Momentanwerte der drei Einzelspannungen, wie beim Einphasengenerator, auf, so erhält man Fig. 350; die drei Phasen des Drehstromes sind um  $120^\circ$  ( $\frac{1}{3}$  Periode) gegeneinander versetzt. Ferner ist die Summe der Momentanströme zweier Phasen gleich dem Momentanstrom der dritten Phase, bildet also jeweils den Rückstrom dieser Phase. Es ist z. B. Strecke 1—2 (Phase I) plus Strecke 1—3 (Phase II) gleich Strecke 1—4 (Phase III), bzw. Strecke 5—6 (Phase III) gleich Strecke 5—7 (Phase I), wobei der Momentanstrom von Phase II Null beträgt. Hieraus folgt, daß für die

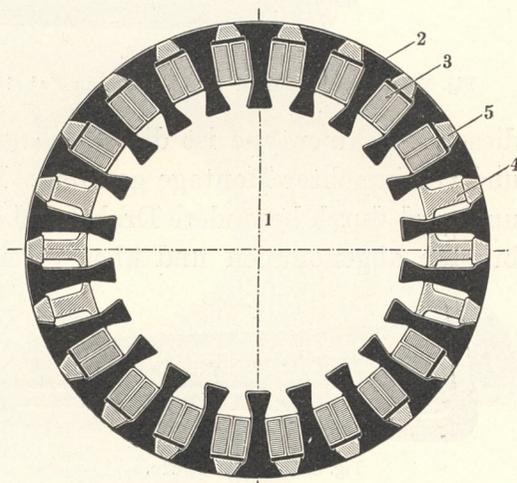


Fig. 358. Zweipoliger Rotor eines Drehstrom-Turbogenerators im Querschnitt.

Blücher, Technisches Modellwerk.

Hin- und Rückleitung eines dreiphasigen Wechselstromes drei Leitungen ausreichend sind, da der Strom jeder Phase durch die beiden anderen Phasen oder auch nur durch eine von beiden zurückfließen kann, und umgekehrt. Aus diesem Grunde *verkettet* man die sechs Enden der drei voneinander unabhängigen Phasenwickelungen eines *Drehstromgenerators*, d. h. man faßt sie derart zusammen, daß statt sechs nur drei Klemmen erforderlich sind, von denen dann die Leitungen zu den Stromverbrauchern führen. Dabei kann die Schaltung so erfolgen, daß die drei Wickelungen

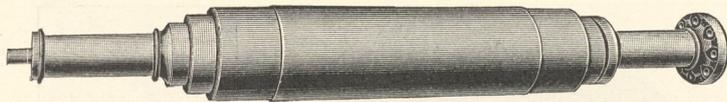


Fig. 359.

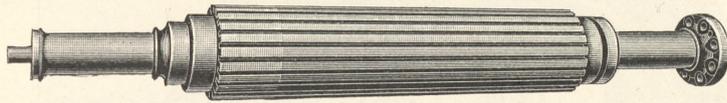


Fig. 360.

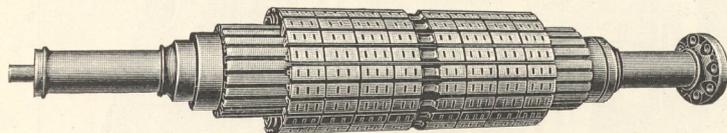


Fig. 361.

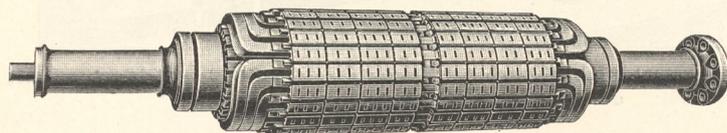


Fig. 362.

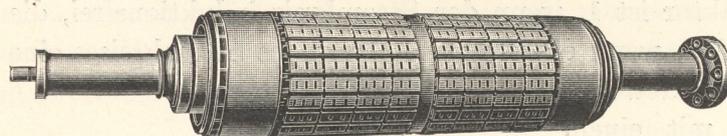


Fig. 363.

Fig. 359—363. Rotor in verschiedenen Fabrikationsstadien.

dieser Maschinentype ist die *eingebaute Erregermaschine*, die den Vorteil geringeren Platzbedarfs und vereinfachter Montage gewährt. Die Rotorwicklung ist als Schablonenwicklung ausgeführt und wird durch besondere Drahtbandagen zusammengehalten. Der Erregerstrom wird von Kohlebürsten abgenommen und über einen *Magnetregulator* zu den in den Lagerkorb des Antriebs-

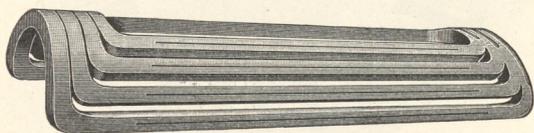


Fig. 364. Rotorspule.

seitenlagers eingebauten Bronze-Schleifringen des Generators geleitet. Ein Nebenschlußregulator erübrigt sich, da die Erregermaschine als Compoundgenerator ausgeführt ist. — Fig. 356 veranschaulicht das Schalt-schema eines Drehstromgenerators, und zwar in der für Maschinen und Apparate üblichen Darstellung. Das

Schema dürfte ohne weiteres verständlich sein.

Einen Drehstromgenerator größerer Leistung zeigt Fig. 357. Diese Maschine ist für direkte Kuppelung mit einer 100tourigen Dampfmaschine bestimmt. Das 60polige Magnetrad erfüllt gleichzeitig die Aufgabe eines Schwungrades. Die zur Erregung der Magnete nötige Energie wird von einer besonderen Gleichstromanlage geliefert. Bei derartigen Maschinen (für Leistungen bis 10 000 KW und Spannungen bis 20 000 Volt) richtet sich die Drehzahl nach der Art der Antriebsmaschine und beträgt für langsamlaufende Typen bis herunter zu 83 Umdrehungen und für schnelllaufende bis hinauf zu 1000 Umdrehungen in der Minute. Für Turbinenantrieb werden häufig Generatoren mit vertikaler Welle verwendet.

Auch Wechselstrommaschinen werden oft als *Turbogeneratoren* ausgeführt. Die Figuren

ein Dreieck (Fig. 351) oder einen Stern (Fig. 353) bilden. In den Figuren stellt jede Wellenlinie die Gesamtheit aller hintereinander geschalteten Spulen gleicher Phase dar. Man gibt diese Schaltungen schematisch gemäß Fig. 352 (*Dreieckschaltung*) und Fig. 354 (*Sternschaltung*) wieder. — Allgemein gilt für den Drehstromgenerator: Leistung =  $1,73 \times$  Spannung  $\times$  Stromstärke  $\times$  Leistungsfaktor.

Wir wenden uns nun zu den modernen Konstruktionen der Wechselstromgeneratoren.

Fig. 355 zeigt einen Drehstromgenerator mittlerer Leistung der Siemens-Schuckert-Werke. Stator und Rotor sind aus dünnen, durch Papier voneinander isolierten, als geschlossene Ringe gestanzten Blechen zusammengesetzt („lamelliert“). Ventilationskanäle sorgen für gute Abkühlung der Maschine. Die Pole und Polschuhe sind ebenfalls lamelliert und in die aus Einzelblechen zusammengesetzte Nabe eingefalzt. Ein besonderes Merkmal

358—367 zeigen Teile eines solchen, wie er von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A. E. G.) hergestellt wird. Auch hier ist an der Type mit feststehender induzierter Wickelung und rotierendem Magnetfeld festgehalten. Fig. 358 zeigt den Querschnitt eines zweipoligen Rotors. 1 ist die am Umfange mit schwalbenschwanzförmigen Nuten versehene Welle, 2 sind die in die Nuten eingesetzten, mit entsprechend geformten Füßen versehenen Spulenhalter, 3 die dazwischen liegenden Doppelspulen aus Flachkupfer, 4 die Füllstücke, die an den die beiden Hauptpole bildenden Partien an Stelle der Spulen eingelegt werden, und 5 die über die Spulen eingetriebenen, das Ganze verspannenden Keile. Die Fig. 359—363 zeigen den Rotor in verschiedenen Fabrikationsstadien: Fig. 359 die gedrehte, Fig. 360 die mit Nuten versehene Welle. Bei Fig. 361 sind in die Nuten die aus Blechpaketen bestehenden Spulenhalter eingesetzt. Fig. 362 zeigt den Rotor mit eingesetzten Spulen und darüber eingezogenen Keilen, Fig. 363 den fertigen Rotor, bei dem auch die Bandagen über die Wickelungsköpfe gelegt und beiderseits Ventilatoren zur Beförderung der Kühlluft aufgesetzt sind. Die in die Nuten der stählernen Welle eingeschobenen Spulenhalter bestehen aus gestanzten Stahlblechen, die unter hohem Druck zu kurzen Paketen zusammengenietet werden; das Innere läßt einen Kanal für den Luftdurchgang frei. Die Magnetspulen (Fig. 364) sind aus blankem Flachkupfer mit der Maschine gewickelt und sorgfältig isoliert. Das magnetisch wirksame Eisen des Stators besteht aus aufeinander geschichteten dünnen Blechen oder Blechsegmenten, die durch Seidenpapier und Preßspanzwischenlagen voneinander isoliert und durch zahlreiche Luftschlitze in einzelne Pakete unterteilt sind. Diesen Blechkörper umschließt das Gehäuse aus Gußeisen. Die Maschine ist also vollkommen geschlossen (Fig. 365). Die Luftzuführung geschieht wegen der hohen Temperaturen und eventueller Verunreinigung durch Staub, Öl und Dampf nicht direkt aus dem Maschinenraum, sondern durch Kanäle aus dem Freien. Häufig wird die Kühlluft vor ihrem Eintritt in die Maschine noch durch Luftfilter geführt. Das Gehäuse ist so eingerichtet, daß die warme Luft nach oben durch den Kamin unmittelbar ausgeblasen oder auch durch die Gehäusefüße und die Grundplatte geschlossen nach unten abgeführt

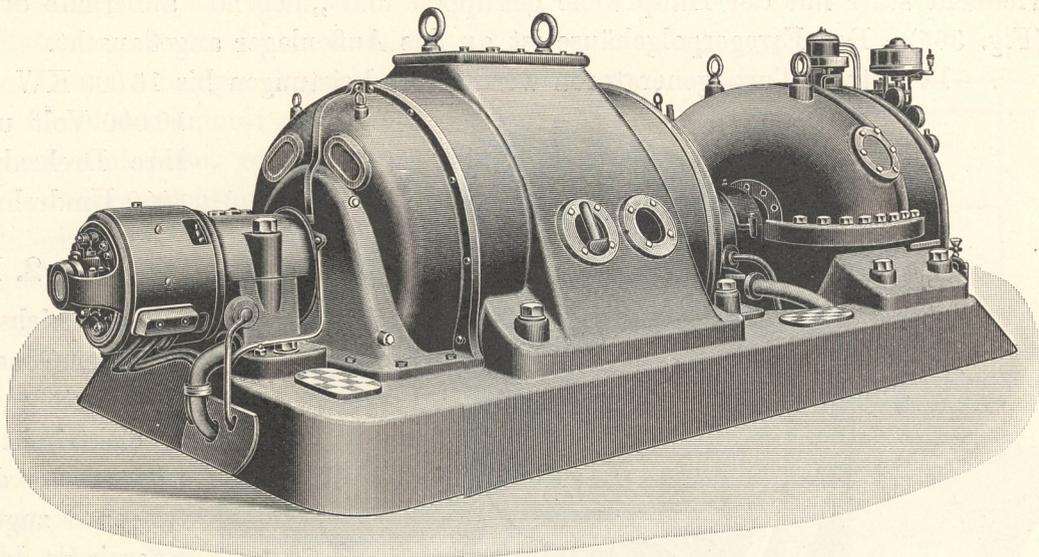


Fig. 365. Drehstrom-Turbo-generator mit A. E. G.-Dampfturbine.

Fig. 362 zeigt den Rotor mit eingesetzten Spulen und darüber eingezogenen Keilen, Fig. 363 den fertigen Rotor, bei dem auch die Bandagen über die Wickelungsköpfe gelegt und beiderseits Ventilatoren zur Beförderung der Kühlluft aufgesetzt sind. Die in die Nuten der stählernen Welle eingeschobenen Spulenhalter bestehen aus gestanzten Stahlblechen, die unter hohem Druck zu kurzen Paketen zusammengenietet werden; das Innere läßt einen Kanal für den Luftdurchgang frei. Die Magnetspulen (Fig. 364) sind aus blankem Flachkupfer mit der Maschine gewickelt und sorgfältig isoliert. Das magnetisch wirksame Eisen des Stators besteht aus aufeinander geschichteten dünnen Blechen oder Blechsegmenten, die durch Seidenpapier und Preßspanzwischenlagen voneinander isoliert und durch zahlreiche Luftschlitze in einzelne Pakete unterteilt sind. Diesen Blechkörper umschließt das Gehäuse aus Gußeisen. Die Maschine ist also vollkommen geschlossen (Fig. 365). Die Luftzuführung geschieht wegen der hohen Temperaturen und eventueller Verunreinigung durch Staub, Öl und Dampf nicht direkt aus dem Maschinenraum, sondern durch Kanäle aus dem Freien. Häufig wird die Kühlluft vor ihrem Eintritt in die Maschine noch durch Luftfilter geführt. Das Gehäuse ist so eingerichtet, daß die warme Luft nach oben durch den Kamin unmittelbar ausgeblasen oder auch durch die Gehäusefüße und die Grundplatte geschlossen nach unten abgeführt

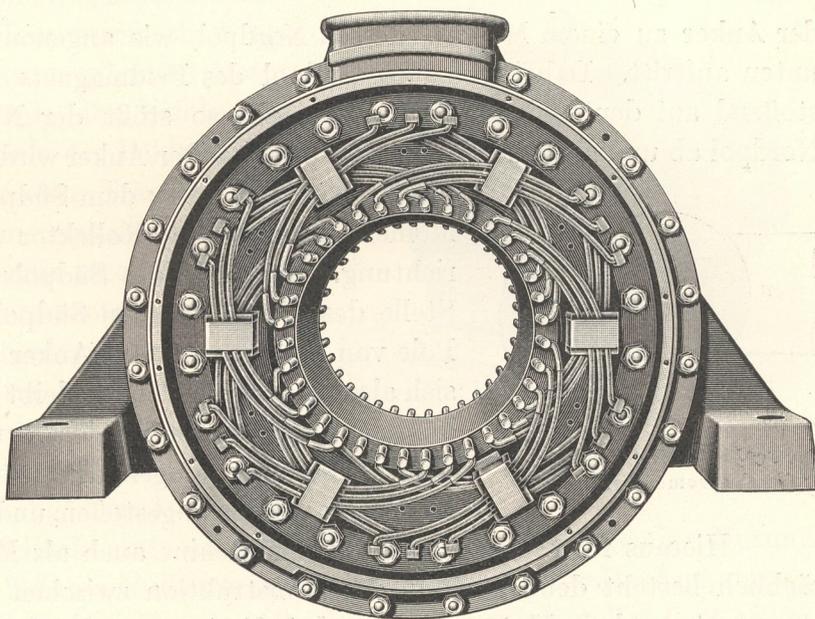


Fig. 366. Statorwicklung (Stabwicklung).

werden kann. Die Statorwicklung ist entweder eine *Stabwicklung* mit einem Stab pro Nut (Fig. 366) oder eine *genähte Wickelung*, die aus mehreren Windungen pro Nut besteht (Fig. 367). Die Stäbe der Stabwicklung sind mit Preßspan umpreßt, die sie verbindenden „Gabeln“ werden mit Band und Lack isoliert. Die genähte Wickelung liegt in vorher hergestellten, ganz geschlossenen Mikanitrohren. Die Erregermaschine erhält keine besondere Lagerung. Ihr Anker ist vielmehr starr mit der Hauptwelle gekuppelt und „fliegend“ außerhalb des Lagers angeordnet (Fig. 365). Das Erregerpolgehäuse ist an das Außenlager angeflanscht.

Drehstrom-Turbogeneratoren werden für Leistungen bis 15 000 KW und Spannungen bis 10 000 Volt und darüber gebaut. Ihre Drehzahl beträgt maximal 3000 Umdrehungen pro Minute.

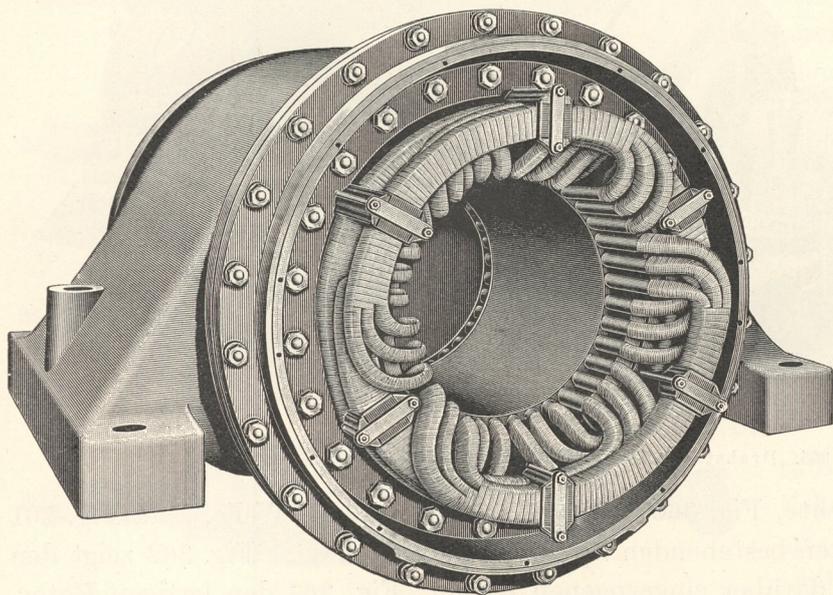


Fig. 367. Statorwicklung (genähte Wickelung).

der Anker zu einem Magnet, dessen Nordpol, wie angenommen werde, oben und dessen Südpol unten auftritt. Dabei wirkt der Südpol des Feldmagnets anziehend auf den Nordpol und abstoßend auf den Südpol des Ankers; ebenso stößt der Nordpol des Feldmagnets den Anker-Nordpol ab und zieht den Anker-Südpol an. Der Anker wird sich also in der Pfeilrichtung drehen,

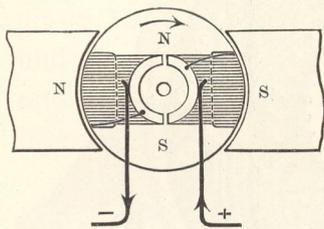


Fig. 368. Prinzip des Gleichstrommotors.

bis der Nordpol unter dem Südpol steht und umgekehrt. In diesem Moment bewirkt der Kollektor im Anker einen Wechsel der Stromrichtung. An Stelle des Südpols erhält der Anker einen Nordpol, an Stelle des Nordpols einen Südpol. Die einander gegenüberstehenden Pole von Feldmagnet und Anker haben jetzt gleiche Polarität, stoßen sich also ab. Infolgedessen bleibt der Anker in Drehung, die Ankerpole kommen wieder in den Bereich der ungleichnamigen Magnetpole und werden von diesen angezogen, die Stromrichtung im Anker kehrt sich um, die Ankerpole werden abgestoßen, und das Spiel wiederholt sich von neuem.

Hieraus folgt, daß eine Dynamomaschine auch als Motor verwendet werden kann. Tatsächlich besteht denn auch in der Konstruktion zwischen Gleichstromgeneratoren und Gleichstrommotoren kein Unterschied, so daß die im vorstehenden Abschnitt enthaltenen Abbildungen auch als Darstellungen von Motoren anzusehen sind.

Ebenso wie die Generatoren lassen sich auch die Motoren in verschiedenen Schaltungen ausführen, und zwar unterscheidet man wieder Hauptstrom-, Nebenschluß- und Compound-schaltung. Beim *Hauptstrommotor* sind Anker und Magnetwicklung hintereinander geschaltet. Die Stärke des Magnetfeldes schwankt daher mit der Belastung, was wiederum eine Veränderung der Drehzahl zur Folge hat. Bei starker Belastung und entsprechend starkem Ankerstrom bzw. Magnetfeld ist die Umlaufzahl klein, bei schwacher Belastung groß. Läuft der Hauptstrommotor „leer“, so „geht er durch“, d. h. seine Drehzahl nimmt unzulässig hohe Werte an. Dies kann sogar zur Zertrümmerung von Anker und Maschine führen. Ein Hauptstrommotor ist daher für

## 2. Motoren.

a) **Gleichstrommotoren.** Während der Generator die von außen zugeführte mechanische Leistung in elektrische umsetzt, gibt der *Elektromotor* die ihm mittels Leitungen zugeführte elektrische Energie an der Welle als mechanische Arbeit ab. Dabei vollzieht sich folgender Vorgang:

Beim Durchgang des Stromes durch Bürsten, Kollektor und Ankerwicklung (Fig. 368) wird

zeitweise unbelasteten Betrieb nicht geeignet, äußerst brauchbar dagegen an Straßenbahnwagen, Kranen, Ventilatoren usw., zumal da er über ein sehr kräftiges Anzugsmoment verfügt. Beim *Nebenschlußmotor* bleibt die Drehzahl bei konstanter Spannung trotz wechselnder Belastung fast unverändert; deshalb eignet er sich vorzüglich zum Antriebe von Werkzeugmaschinen aller Art. *Compoundmotoren* werden nur wenig benutzt. Zum Anlassen der Motoren bedient man sich sogenannter *Anlaßwiderstände*, die später besprochen werden. Fig. 369 und 370 zeigen das Schalt-schema eines Hauptstrom- sowie Nebenschluß-motors nebst den zum Betriebe nötigen Apparaten.

Will man einen Gleichstrommotor *umsteuern*, d. h. seine Drehrichtung umkehren, so kann man dies durch Wechseln der Stromrichtung im Anker oder in den Schenkeln erreichen. Man braucht also nur die beiden bezüglichlichen Verbindungsdrähte umzulegen, eine Schaltung, die bei häufigem Umsteuern zweckmäßig einem zwangsläufig arbeitenden *Wendelanlasser* übertragen wird. Durch Umkehren der Stromrichtung im Anker und zugleich in den Schenkeln, d. h. durch einfaches Vertauschen der Zuleitungen zum Motor, wird ein Wechsel der Drehrichtung nicht erreicht. Der in Fig. 370 schematisch wiedergegebene Nebenschlußmotor würde also durch Umlegen der Drähte 1—1 (Anker) oder von 2—2 (Schenkel), nicht aber von 3—3 (Zuleitungen) umgesteuert werden.

b) **Wechselstrommotoren.** Da, wie eben erwähnt ist, bei Nichtveränderung der inneren Schaltung die Stromrichtung den Drehsinn eines Gleichstrommotors nicht beeinflusst, ist ein Gleichstrommotor im Prinzip auch für Wechselstrom verwendbar. Besonders geeignet ist die Hauptstromschaltung. Wollte man freilich einen für Gleichstrom gebauten Motor mit Wechselstrom betreiben, so würde der Erfolg nur gering sein, weil die massiven Eisenteile der Feldmagnete und des Ankers (infolge der magnetischen Trägheit oder *Hysteresis*) nicht rasch genug ummagnetisiert werden. Sollen sie dem Wechsel des Magnetismus rasch folgen so muß man sie aus Eisenblechen zusammensetzen. Werden diese noch durch dünne Papierzwischenlagen voneinander isoliert, so erreicht man gleichzeitig einen wirksamen Schutz gegen Wirbelströme. Meist trägt der Motor außer der Erregerwicklung noch eine Hilfswickelung, die das Auftreten schädlicher Induktionswirkungen im Anker verhindert. Das Statoreisen besitzt vielfach statt ausgeprägter Pole eine gleichförmige Nutung.

Diese sogenannten *Einphasen-Reihenschlußmotoren* werden neuerdings für Hochspannungsbahnbetriebe vielfach verwendet. Sie laufen wie jeder Gleichstrommotor mit voller Last an, erfordern jedoch für größere Leistungen besondere *Anlaßtransformatoren*, die eine allmähliche Erhöhung der an den Motorklemmen wirksamen Spannung und demzufolge ein allmähliches Anlaufen des Motors bezwecken.

Auch der *Repulsionsmotor* gehört zur Klasse dieser *Kommutatormotoren*. Aber man führt hier nur der Feldwicklung den Wechselstrom vom Netz zu; der drehbare Teil ist genau wie ein Gleichstromanker ausgeführt. Die beiden Bürsten sind, wie Fig. 371 zeigt, leitend miteinander verbunden, d. h. „kurzgeschlossen“. Bei Stillstand stehen die Bürsten in der neutralen Zone 1—2. In dieser Stellung fließt im Anker auch bei eingeschaltetem Stator kein Strom. Das Anlassen erfolgt dann einfach dadurch, daß die Bürsten aus der neutralen Zone verschoben werden. Dabei

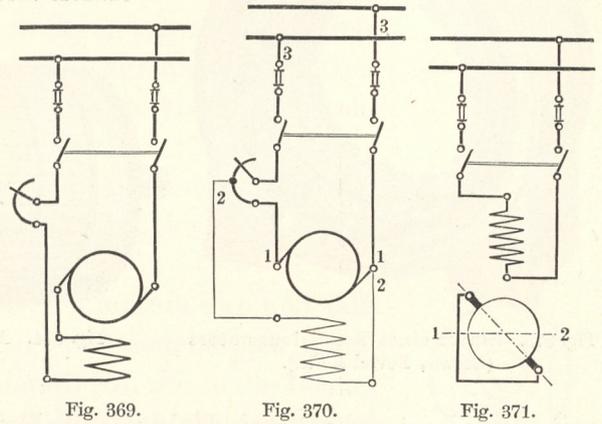


Fig. 369. Schalt-schema eines Hauptstrommotors.  
Fig. 370. Schalt-schema des Nebenschlußmotors.  
Fig. 371. Schalt-schema des Repulsionsmotors.

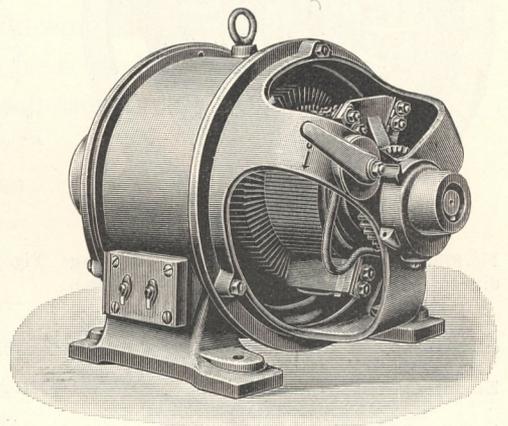


Fig. 372. Einphasen-Repulsionsmotor (Brown, Boveri & Cie.).

entstehen durch Induktionswirkung des Statorfeldes in der Rotorwicklung Ströme, die durch die Kollektorlamellen über die Bürsten zur Wickelung zurückfließen. Dadurch erzeugt auch der Rotor ein Magnetfeld, dessen Pole je nach der Bürstenstellung mehr oder weniger von den Polen des Feldmagnets angezogen werden und so eine Drehung des Ankers herbeiführen. Die Drehrichtung ist von der Richtung abhängig, in der die Bürsten aus der neutralen Zone verschoben werden, und zwar dreht sich der Rotor entgegen dem Sinne der Bürstenverschiebung.

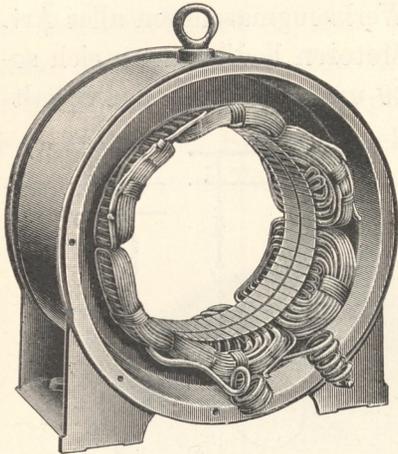


Fig. 373. Stator eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

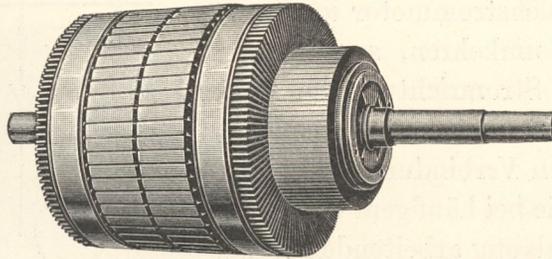


Fig. 374. Anker eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

entgegen dem Sinne der Bürstenverschiebung. Durch einfaches Zurückstellen der Bürsten in die neutrale Zone und Verschiebung in entgegengesetztem Sinne, läßt sich also der Motor umsteuern. Auch die Repulsionsmotoren laufen

mit voller Last an, gehen jedoch, wie die Reihenschlußmotoren, bei vollständiger Entlastung durch.

Fig. 372 zeigt einen Repulsionsmotor der Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Mannheim, dessen Schaltung insofern von der vorstehend beschriebenen abweicht, als der Motor zwei Bürstensysteme besitzt:

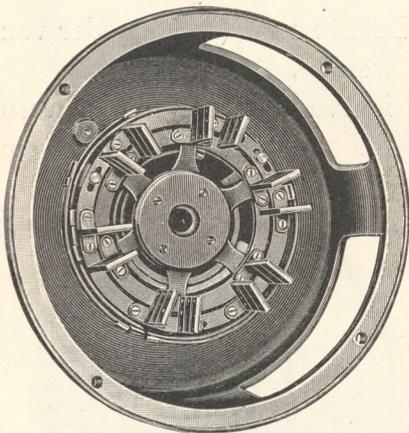


Fig. 375. Lagerschild und Bürstenbesetzung eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

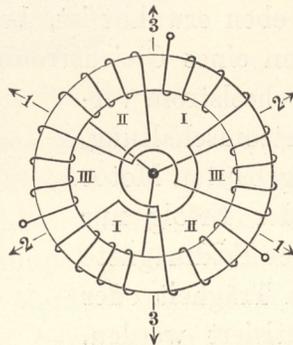


Fig. 376. Drehfeld-Prinzip.

ein feststehendes und ein bewegliches. Beide sind widerstandslos miteinander verbunden. In Fig. 373—375 sind Teile dieses Motors wiedergegeben.

Das Verständnis der nun folgenden *Einphasen-Induktionsmotoren* wird erleichtert, wenn wir zuvor an Hand des *Drehstrommotors* die Bedeutung des *Drehfeldes* erkannt haben.

Von sechs um einen feststehenden Eisenring geführten Spulen seien je zwei einander gegenüberliegende Spulen hinter-

einander geschaltet, wie Fig. 376 zeigt (Sternschaltung). Schickt man durch eine Spulengruppe, z. B. durch Gruppe I, Gleichstrom, so entsteht ein magnetisches Feld, dessen Richtung durch 1—1 gekennzeichnet ist. Ebenso entsteht durch Erregen der Gruppe II ein Feld von der Richtung 2—2 und durch Erregen der Gruppe III ein solches von der Richtung 3—3. Verbindet man die drei Phasen I, II und III mit den Klemmen eines Drehstromgenerators, so wird in dem Eisenringe ein Magnetfeld auftreten, dessen Achse sich dauernd kreisförmig innerhalb des Ringes bewegt: man erhält ein sogenanntes *Drehfeld*.

Bringt man in das Innere eines solchen Ringes einen eisernen Anker, der mit in sich geschlossenen Windungen aus Kupferdraht bewickelt ist, so entstehen in den Drahtwindungen durch die Rotation des Feldes bzw. durch das Vorbeiwandern seiner Pole

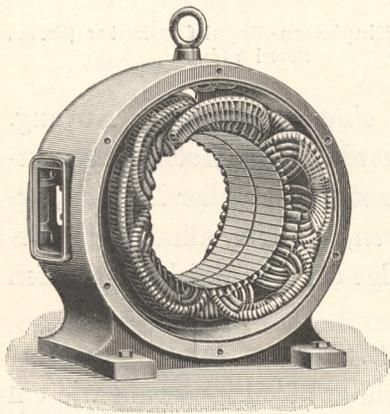


Fig. 377. Stator eines Drehstrommotors (A. E. G.).

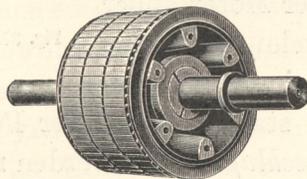


Fig. 378. Kurzschlußanker (A. E. G.).

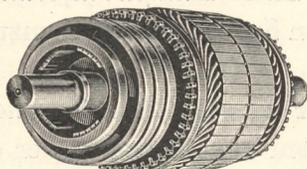


Fig. 379. Schleifringanker (A. E. G.).

Induktionsströme. Zugleich beginnt der Anker infolge der Wechselwirkung zwischen Polen und Strömen sich zu drehen. Er kommt dabei nahezu auf die Geschwindigkeit, mit der die Pole rotieren. Würde der Anker sie ganz erreichen, so würden Pole und Drahtwindungen nebeneinander herlaufen. Es würden dann keine Ströme mehr erzeugt werden, und die Zugkraft würde Null. Sobald der Rotor jedoch etwas langsamer läuft, überholen die Pole die Drahtwindungen und lassen in ihnen Ströme entstehen. Jetzt kann der Motor Arbeit verrichten, und zwar um so mehr, je mehr die Geschwindigkeit nachläßt; denn je schneller die Pole an den Rotorwindungen vorbeigehen, desto stärker werden die in ihnen erzeugten Ströme. Läuft der Motor mit geringer Last, so bleibt seine Drehzahl nur um wenige Umdrehungen hinter der der Pole zurück. Steigt die Belastung, so sinkt die Drehzahl so weit, bis der Motor die erforderliche Zugkraft erreicht hat. Die Änderung der Geschwindigkeit zwischen Leerlauf und Vollast beträgt je nach der Größe des Motors 2—10 Proz. Den Unterschied zwischen der Geschwindigkeit des Feldes und der des Rotors nennt man *Schlüpfung*.

Fig. 377 stellt den Stator eines derartigen Drehstrommotors dar und läßt die einzelnen Spulengruppen gut erkennen. Fig. 378 zeigt den zugehörigen *Kurzschlußanker*; seine Wickelung besteht aus blanken Kupferstäben, die in die Löcher des Ankereisens eingebettet und an den Stirnflächen durch Kurzschlußringe leitend miteinander verbunden sind. Ein Drehstrommotor mit Kurzschlußanker hat weder Kollektor, noch Bürsten oder Schleifringe, und stellt so den einfachsten Motor dar, den die Elektrotechnik kennt. Leider haftet ihm ein Nachteil an: er nimmt beim Anlassen, das bei kleineren Motoren direkt, bei größeren durch Zwischenschaltung eines *Anlaßtransformators* erfolgt, das Sechs- bis Achtfache seines normalen Stromes auf. Der hierdurch bedingte Stromstoß verursacht im Leitungsnetz unwillkommene Spannungsschwankungen. Um diesem Übelstande abzuwehren, schaltet man beim Anlassen in die Ankerwicklung Widerstand ein. Zu dem Zwecke führt man die Wickelung zu drei Schleifringen, auf denen drei Bürstenpaare schleifen. Verbindet man einen derartigen *Schleifringanker* (Fig. 379), wie in Fig. 380 schematisch angedeutet, mit einem Anlasser, so werden Stromstöße während der Anlaufperiode nahezu vermieden. Hat der Motor seine normale Umlaufzahl erreicht, so schließt man die Schleifringe durch eine *Kurzschlußvorrichtung* kurz, worauf der Anker als Kurzschlußanker weiter arbeitet. Die Kurzschlußvorrichtung ist mit einer *Bürstenabhebevorrichtung* so verbunden, daß die Bürsten zwangsläufig von den Schleifringen abgehoben werden, sobald die Wickelung kurzgeschlossen ist. Fig. 381 veranschaulicht den vorstehend beschriebenen Motor in normaler, d. h. offener Ausführung.

*Weitere Details über Drehstrommotoren zeigt das aufklappbare Modell des Drehstrommotors.*

Einen großen Drehstrommotor für etwa 2000 PS, wie er zum Antriebe von Walzenstraßen verwendet wird stellt Fig. 382 dar. (Der Motor hat im Bilde provisorisch eingebaute Welle und Lager, weshalb deren Abmessungen nicht der Wirklichkeit entsprechen.)

Die bisher besprochenen Drehstrommotoren nennt man auch *Asynchronmotoren*, weil der Rotor etwas langsamer läuft, als der Periodenzahl des Magnetfeldes entsprechen würde. Im Gegensatz hierzu sind die weiter unten beschriebenen *Synchronmotoren* solche, bei denen Rotor und Magnetfeld gleich schnell, d. h. *synchron*, rotieren.

Wir kehren jetzt zu den Einphasenmotoren zurück: Der *Einphasen-Induktionsmotor* zeigt ein dem Drehstrommotor ganz ähnliches Verhalten. Das Statorfeld erzeugt auch hier in der

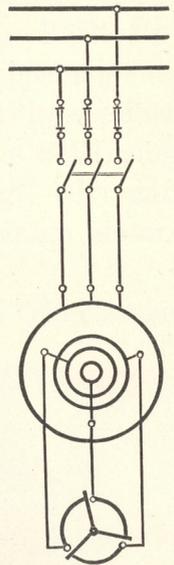


Fig. 380. Schalt-schema eines Drehstrommotors mit Schleifringanker.

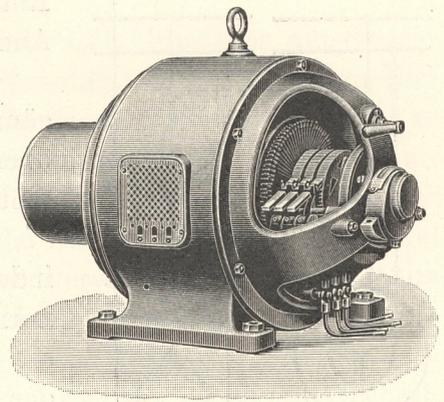


Fig. 381. Drehstrommotor in offener Ausführung (A. E. G.).

Ankerwicklung Ströme, und diese erzeugen wieder im Rotoreisen ein Magnetfeld. Das vorhandene Drehfeld vermag jedoch nicht, den Anker in Rotation zu versetzen. Hierzu bedarf es einer Hilfswicklung, an die man eine *Drosselspule*, d. h. eine Spule mit hoher Selbstinduktion, anschließt. Dadurch wird beim Einschalten des Motors zwischen Hauptwicklung und Hilfs-

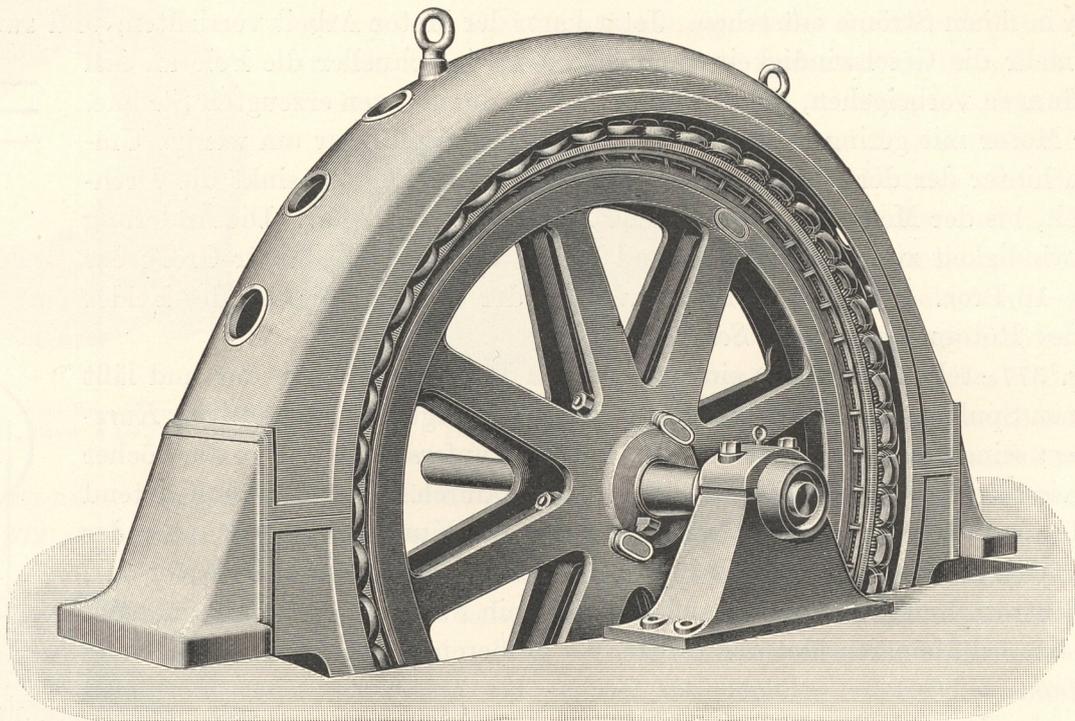


Fig. 382. Drehstrommotor für große Leistungen (Siemens-Schuckert-Werke).

wicklung eine Phasenverschiebung hervorgebracht, die den Motor als Mehrphasenmotor anlaufen läßt. Hat der Motor die normale Drehzahl erreicht, so wird die Hilfswicklung zugleich mit der Drosselspule durch einen einpoligen Schalter abgeschaltet, und der Rotor läuft nun als Einphasenanker weiter. Ein Schema für diese Anordnung gibt Fig. 383.

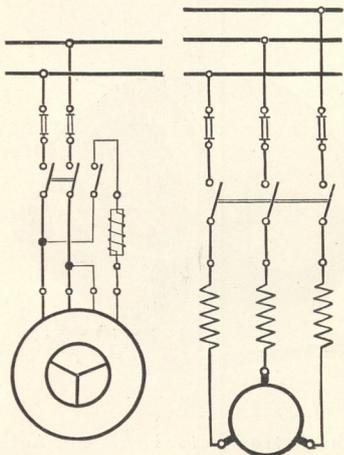


Fig. 383.

Fig. 384.

Fig. 383. Schaltschema des Einphasen-Induktionsmotors. Fig. 384. Schaltschema des Drehstrom-Reihenschlußmotors.

Der Einphasen-Induktionsmotor hat den Nachteil, daß er nur gänzlich unbelastet anlaufen kann. Wird er während des Betriebes überlastet, so „fällt er aus dem Tritt“, d. h. seine Umlaufzahl fällt plötzlich ab: er bleibt stehen.

Oft vereinigt man auch Repulsions- und Induktionsprinzip, indem man den Motor als Repulsionsmotor anlaufen läßt, bis die normale Drehzahl erreicht ist, dann mittels geeigneter Vorrichtungen die Bürsten abhebt und die Kollektorlamellen kurzschließt, so daß der Motor als Induktionsmotor mit Kurzschlußanker weiterläuft.

Analog den Gleichstromgeneratoren kann man auch Wechsel- bzw. Drehstromgeneratoren als Motoren verwenden, wenn man sie vor dem Einschalten auf eine mit der Periodenzahl des Netzes genau übereinstimmende Drehzahl bringt und ihre Rotoren bzw. Magnetkörper mit Gleichstrom erregt. Sie laufen dann mit einer der Umlaufzahl des Generators entsprechenden Drehzahl weiter, dürfen aber nicht überlastet werden, da sie sonst aus dem Tritt fallen. Diese *Synchronmotoren* haben jedoch in der Praxis wenig Eingang gefunden.

Neuerdings baut man auch regulierbare Drehstrommotoren, sogenannte *Drehstrom-Reihenschlußmotoren*. Sie besitzen einen gewöhnlichen Stator, und als Rotor einen Gleichstromanker, auf dessen Kollektor drei um  $120^\circ$  versetzte Bürsten schleifen. Die Anfänge der drei Statorwicklungen liegen am Netz, während die drei Enden mit je einer Bürste verbunden sind (Fig. 384).

Anlassen und Regulieren der Drehzahl erfolgt durch Verschiebung der drei Bürsten auf dem Kollektor. Diese Motoren laufen mit Last an, gehen aber bei Leerlauf durch.

### 3. Umformer.

*Umformer* sind Maschinen, die zur Umwandlung einer Stromart in die andere dienen. Man unterscheidet *Motorgeneratoren* und *Einankerumformer*.

a) **Motorgeneratoren.** Unter Motorgeneratoren versteht man zwei direkt miteinander gekuppelte Maschinen, von denen die eine als Motor, die andere als Dynamo läuft. Beide Maschinen stehen meist auf gemeinsamer Grundplatte und sind durch eine starre Kuppelung verbunden. Man ist auf eine derartige Umformung angewiesen, wenn man Gleichstrom irgendeiner Spannung in Gleichstrom anderer Spannung umformen will. Häufig wird auch die Forderung erhoben, daß im Anschluß an Wechsel- oder Drehstromanlagen Gleichstrom erzeugt, oder daß Einphasenstrom in Drehstrom umgewandelt werden soll. In allen diesen Fällen werden Motorgeneratoren verwendet.

Fig. 385 veranschaulicht einen Motorgenerator, wobei die zur Erzeugung von Gleichstrom dienende Dynamo durch einen Drehstrom-Asynchronmotor angetrieben wird.

b) **Einankerumformer.** Der Einankerumformer ist eine Maschine, bei der die Umformung von Ein- und Mehrphasenstrom in Gleichstrom in einem gemeinsamen Anker stattfindet. Verbindet man die unaufgeschnittene Wicklung des Ankers einer normalen Gleichstrommaschine an z. B. drei um  $120^\circ$  versetzten Punkten mit je einem Schleifring, so kann man, beim Betrieb der Maschine als Stromerzeuger, am Kommutator wie gewöhnlich Gleichstrom und gleichzeitig an den Schleifringen Wechselstrom abnehmen. Man

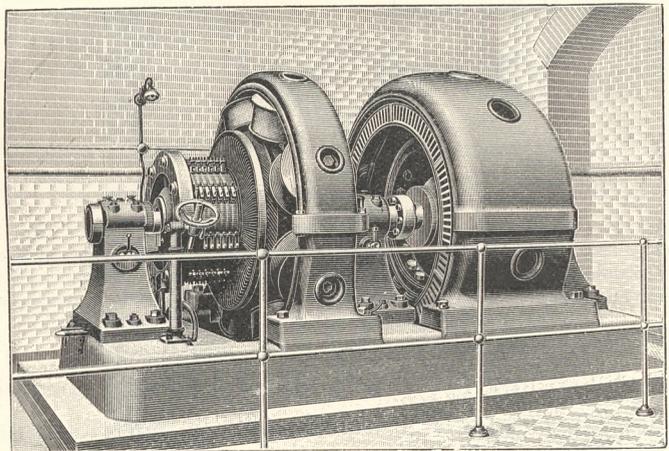


Fig. 385. Motorgenerator.

kann die Maschine aber auch als Motor betreiben, und zwar entweder durch Speisung mit Gleichstrom über den Kommutator als Gleichstrommotor oder durch Speisung mit Wechselstrom über die Schleifringe als Wechselstrom-Synchronmotor. Betreibt man sie als Gleichstrommotor, so kann man an den Schleifringen Wechselstrom entnehmen; betreibt man sie als Wechselstrommotor, so liefert der Kommutator Gleichstrom. Ein solcher Einankerumformer arbeitet sehr wirtschaftlich. Während bei den Motorgeneratoren erst elektrische Energie in mechanische und diese dann wieder in elektrische Energie der gewollten Stromart verwandelt wird, fällt beim Einankerumformer das mechanische Zwischenglied heraus, und die eine Stromart wird unmittelbar in die andere umgeformt.

Die Spannung des Gleichstromes steht dabei in einem bestimmten Verhältnis zur Wechselstromspannung, und zwar fällt die Wechselstromspannung kleiner aus als die zugehörige Gleichstromspannung; sie beträgt bei Drehstrom etwa das 0,6fache der letzteren. Meist ist das nicht erwünscht; im Gegenteil: der Wechselstrom wird in der Regel gerade deshalb benutzt, um mit hohen Spannungen im Fernleitungsnetz arbeiten zu können. An Ort und Stelle will man aber niedriggespannten Gleichstrom verwenden. In solchen Fällen muß man also dem Einankerumformer einen Transformator vorschalten, der den in der Zuleitung hochgespannten Wechselstrom erst auf die Spannung heruntertransformiert, die der gewünschten Gleichstromspannung entspricht. Trotz dieses Zusatzapparates, d. h. obwohl bei Verwendung von Einankerumformern in der Regel noch ein Transformator nötig wird, stellt sich die Anlage in Herstellung und Betrieb billiger als die Verwendung von Motorgeneratoren. Der Gesamtwirkungsgrad eines Transformators in Zusammenarbeit mit einem Einankerumformer (bei größeren Typen ca. 91 Proz.) ist wesentlich

höher als der Wirkungsgrad eines Hochspannungs-Wechselstrommotors in Zusammenarbeit mit einer Gleichstromdynamo (ca. 85 Proz.).

Das Verhältnis der Wechselstromspannung zur Gleichstromspannung ist, wie betont, eindeutig bestimmt. Eine Regulierung der Gleichstromspannung bei konstanter Wechselstromspannung ist daher am Umformer allein nicht möglich. Schaltet man jedoch zwischen Transformator und Schleifringen des Umformerankers *Drosselspulen* ein (vgl.

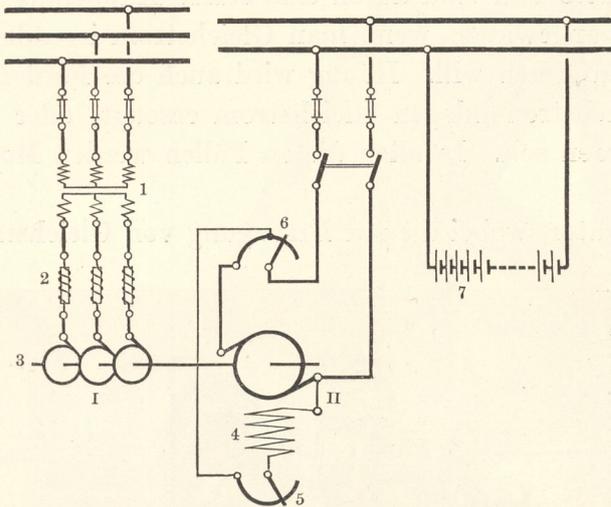


Fig. 386. Schaltplan einer Umformeranlage. Anlassen von der Gleichstromseite. (I Drehstromseite, II Gleichstromseite des Umformers; 1 Drehstromtransformator, 2 Drosselspulen, 3 Schleifringe, 4 Nebenschlußwicklung, 5 Nebenschlußregler, 6 Anlasser, 7 Akkumulatorenbatterie.)

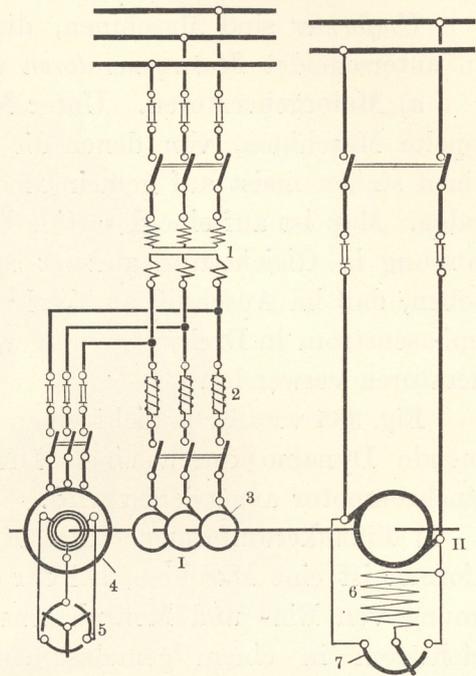


Fig. 387. Schaltplan einer Umformeranlage. Anlassen von der Drehstromseite. (I Drehstromseite, II Gleichstromseite des Umformers; 1 Drehstromtransformator, 2 Drosselspulen, 3 Schleifringe, 4 Anwurfmotor, 5 Anlasser, 6 Nebenschlußwicklung, 7 Nebenschlußregler.)

Fig. 386 und 387), so ist die Anordnung bedeutend regulierfähiger. In neuerer Zeit ersetzt man die Drosselspulen durch für diesen Zweck besonders hergestellte Transformatoren und vereinigt dadurch gewissermaßen Transformator und Drosselspule in einem Apparat.

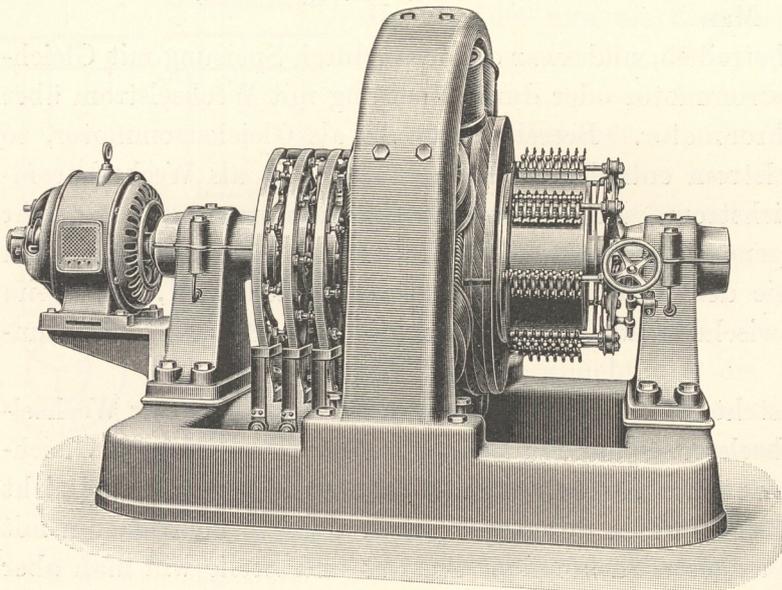


Fig. 388. Einankerumformer mit Anwurfmotor (A. E. G.).

mit Schleifringanker, der durch Widerstand im Rotorkreis auf die vom Einankerumformer verlangte Drehzahl gebracht wird.

Einankerumformer können sehr stark überlastet werden, ohne aus dem Tritt zu fallen. Sie werden meistens zur Umwandlung von Drehstrom in Gleichstrom benutzt. Was ihren mechanischen Aufbau betrifft, so werden sie mit Grundplatte und zwei Lagern ausgerüstet und weichen

dadurch gewissermaßen Transformator und Drosselspule in einem Apparat. Das Anlassen des Einankerumformers erfolgt bei Vorhandensein eines spannungführenden Gleichstromnetzes am besten von der Gleichstromseite aus in der üblichen Art des Anlassens eines Gleichstrommotors (Fig. 386). Ist ein spannungführendes Gleichstromnetz nicht vorhanden, so muß der Umformer von der Drehstromseite angelassen werden. Man kann hierzu entweder den Umformer als Synchronmotor anlaufen lassen, oder einen besonderen, mit dem Umformer gekoppelten Asynchronmotor als *Anwurfmotor* benutzen (Fig. 387). Dies ist meist ein Drehstrommotor

im übrigen nicht von der Bauart normaler Maschinen ab. Fig. 388 zeigt einen Einankerumformer der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der durch einen besonderen, auf einem Sockel der Umformergrundplatte befestigten Asynchronmotor angeworfen wird. Charakteristisch ist die Anordnung der drei Schleifringe.

## II. Transformatoren.

Im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen rotierenden Umformern sind *Transformatoren* ruhende Umformer, die ohne mechanische Bewegung eines ihrer Teile Wechsel- oder Drehstrom einer bestimmten Spannung in Wechsel- bzw. Drehstrom einer anderen Spannung umzuformen gestatten. Ihre Wirkungsweise beruht auf dem Prinzip der gegenseitigen Induktion.

Auf einem in sich geschlossenen Eisenkern seien zwei getrennte Wickelungen angebracht (Fig. 389). Davon habe die eine wenige Windungen starken, die andere viele Windungen schwachen Drahtes. Schickt man durch die erste Wickelung einen Wechselstrom bestimmter Spannung, so induziert das im Eisen entstehende Wechselfeld in der schwachen Wickelung eine bedeutend höhere, ebenfalls wechselnde elektromotorische Kraft, die bei geschlossenem Stromkreise auch einen Strom entstehen läßt. Den hineingeschickten Strom nennt man den *primären*, den aus dem Transformator entnommenen den *sekundären Strom*. Ebenso unterscheidet man primäre und sekundäre Spannung. Die primäre und sekundäre Leistung ist, wenn man von den Energieverlusten absieht, gleichgroß. Da die Leistung das Produkt aus Strom und Spannung darstellt, muß, wenn die Sekundärspannung höher ist als die primäre, der sekundäre Strom kleiner werden als der primäre, denn es ist:  $E \cdot J_{\text{primär}} = E \cdot J_{\text{sekundär}}$ .

Die primäre Spannung verhält sich zur sekundären genau, wie sich die Windungszahlen der primären zu denen der sekundären Wickelung verhalten. Will man z. B. einen Wechselstrom von 100 Volt Spannung in einen solchen von 1000 Volt verwandeln, so muß die Sekundärwicklung zehnmal so viel Windungen haben wie die primäre. Das Verhältnis der primären zur sekundären Wickelung nennt man das *Übersetzungsverhältnis* des Transformators. Wird einem Transformator, obwohl ihm Primärspannung zugeführt ist, kein Strom entnommen, so spricht man von *Leerlauf* des Transformators.

Je nachdem die Spulen um den Eisenkern gewickelt sind oder das Eisengestell die Spulen umgibt, unterscheidet man *Kern-* und *Manteltransformatoren*. Zur Vermeidung von Wirbelströmen bestehen die Eisenkörper aus durch Papier voneinander isolierten Blechen. Die Wickelungen des Transformators werden gewöhnlich übereinandergeschoben, wobei auf sorgfältige Isolierung der Niederspannungswicklung von der Hochspannungswicklung zu achten ist. Um bei hohen Spannungen die Isolation vor Durchschlagen zu schützen, setzt man die Transformatoren vielfach unter Öl (*Öltransformatoren*).

Für Drehstromtransformatoren gilt das bisher Gesagte in analoger Weise. Sie besitzen drei Paar voneinander unabhängige Wickelungen, die in Stern oder Dreieck geschaltet sein können. Je eine Primär- und Sekundärwicklung umschließen einen Eisenkern. Die drei Eisenkerne können entweder senkrecht nebeneinander (Fig. 390) oder wagerecht übereinander (Fig. 391) oder im gleichseitigen Dreieck (Fig. 392) angeordnet sein. Statt eines Drehstromtransformators lassen sich auch drei Einphasentransformatoren verwenden.

Fig. 393 zeigt einen Drehstromtransformator für 6750 Kilovoltampere der Siemens-Schuckert-Werke. Der Transformator ist von 6600 auf 66000 Volt übersetzt und gehört zur Manteltype. Sein Gesamtgewicht beträgt 38000 kg. Zur Abführung der entwickelten Wärme ist Ölkühlung vorgesehen. Das Öl wird mittels einer elektrisch angetriebenen Pumpe durch Kühlschlangen gedrückt, die von fließendem Wasser umgeben sind.

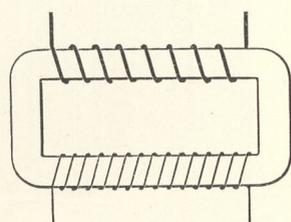


Fig. 389. Prinzip des Transformators.

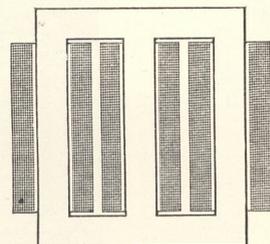


Fig. 390. Drehstromtransformator (Anordnung 1).

Um in Schaltanlagen bei Meßinstrumenten, die der zufälligen Berührung ausgesetzt sind, die gefährliche Hochspannung zu vermeiden, verbindet man die Instrumente mittels kleiner *Meßtransformatoren* mit der Hochspannungsleitung, und zwar kommen für Spannungsmessungen sogenannte *Spannungstransformatoren*, für Strommessungen *Stromtransformatoren* in Betracht. Bei ersteren liegt die viele Windungen dünnen Drahtes enthaltende Hochspannungswicklung an zwei Polen der Hochspannungsleitung, während der niedriggespannte Sekundärstrom den Zeigerausschlag am Instrument bewirkt. Bei den Stromtransformatoren durchfließt der ganze Leitungsstrom die aus wenigen Windungen starken Drahtes bestehende Primärwicklung. Die Sekundärwicklung umfaßt meh-

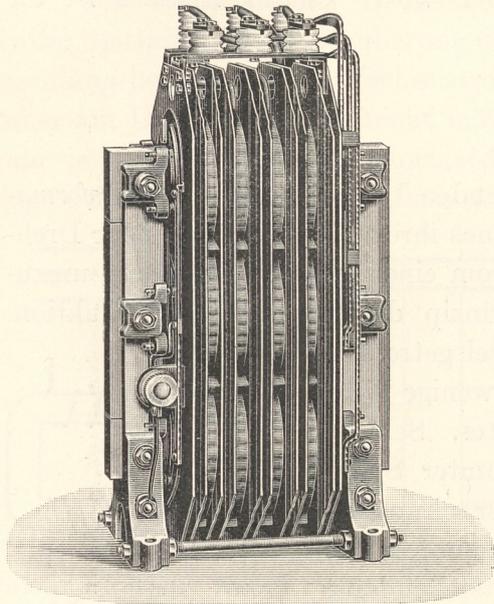


Fig. 391. Drehstromtransformator (Anordnung 2; Siemens-Schuckert-Werke).

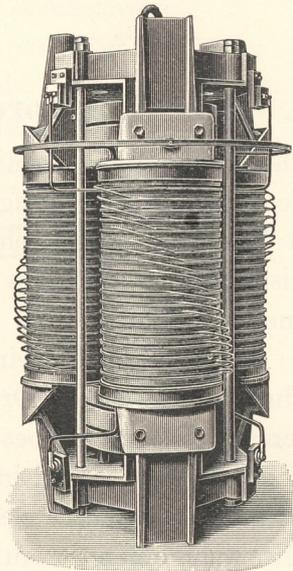


Fig. 392. Drehstromtransformator (Anordnung 3).

rere Windungen schwächeren Drahtes und ist mit dem Instrument direkt verbunden. Eine Änderung des Primärstromes bewirkt natürlich auch eine Änderung des den Stromzeiger beeinflussenden Sekundärstromes.

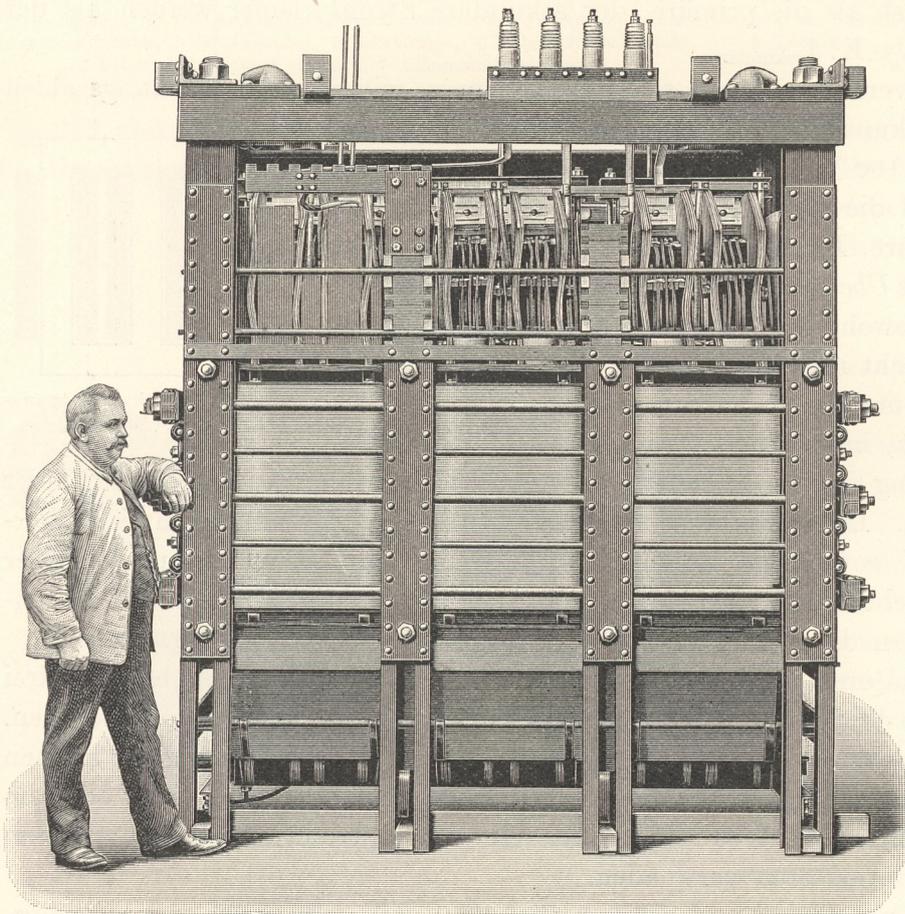


Fig. 393. Drehstromtransformator für 6750 KVA und 66000 Volt (Siemens-Schuckert-Werke).

sich an der negativen Elektrode Wasserstoff und an der positiven Sauerstoff ab. Beide Elektroden erhalten dadurch einen Spannungsunterschied. Unterbricht man den Strom und verbindet die Elektroden durch einen Leiter, so läßt sich mittels eines Meßinstrumentes ein dem ursprünglichen

Um in Schaltanlagen bei Meßinstrumenten, die der zufälligen Berührung ausgesetzt sind, die gefährliche Hochspannung zu vermeiden, verbindet man die Instrumente mittels kleiner *Meßtransformatoren* mit der Hochspannungsleitung, und zwar kommen für Spannungsmessungen sogenannte *Spannungstransformatoren*, für Strommessungen *Stromtransformatoren* in Betracht. Bei ersteren liegt die viele Windungen dünnen Drahtes enthaltende Hochspannungswicklung an zwei Polen der Hochspannungsleitung, während der niedriggespannte Sekundärstrom den Zeigerausschlag am Instrument bewirkt. Bei den Stromtransformatoren durchfließt der ganze Leitungsstrom die aus wenigen Windungen starken Drahtes bestehende Primärwicklung. Die Sekundärwicklung umfaßt meh-

### III. Akkumulatoren.

Elektrische *Akkumulatoren* sind Apparate, die infolge eines chemischen Umwandlungsprozesses elektrische Energie in sich aufnehmen und nach Bedarf wieder abzugeben vermögen. Um das Prinzip eines solchen Akkumulators zu verstehen, greifen wir auf die bereits im Kapitel „Elektrotechnische Grundbegriffe“ (S. 152) behandelte Erscheinung der *Polarisation* zurück:

Leitet man durch eine sogenannte *Zersetzungszelle*, die aus zwei in verdünnter Schwefelsäure befindlichen Platinblechen bestehen möge, einen Gleichstrom, so scheidet

entgegengerichteter Strom nachweisen. Das Element ist jetzt imstande, so lange elektrischen Strom abzugeben, wie Wasserstoff und Sauerstoff an den beiden Elektroden vorhanden sind. Den so gewonnenen Strom nennt man *Polarisationsstrom*, das Element selbst ein *sekundäres Element* oder einen *elektrischen Akkumulator*.

Gaston Planté verwendete zuerst statt der Platinbleche Bleiplatten. Taucht man zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure, so wird letztere bei Stromdurchgang von der positiven zur negativen Platte zersetzt, und zwar verbindet sich der Sauerstoff mit dem an der positiven Platte vorhandenen Blei zu Bleisuperoxyd. Der Wasserstoff hingegen wandert mit dem Strom zur negativen Platte, entzieht ihr den dort (in Form einer Oxydschicht) stets vorhandenen Sauerstoff und bildet reines Blei. In diesem Zustand, den man als *Ladezustand* zu bezeichnen pflegt, kann das Element längere Zeit verharren. Beim Entladen, d. h. beim Entstehen des durch *Schließen* eines solchen Elementes auftretenden Polarisationsstromes, ergeben sich dieselben chemischen Vorgänge in umgekehrter Weise. Die Schwefelsäure wird wiederum zerlegt, und zwar bildet sich an der positiven Platte Wasserstoff und an der negativen Sauerstoff. Dies hat zur Folge, daß beide Bleiplatten sich in Bleioxyd und weiter durch Einfluß der Schwefelsäure in Bleisulfat umwandeln. Sind beide Platten an der Oberfläche in Bleisulfat verwandelt, so hört die Stromlieferung auf: das Element ist entladen. Man kann es jetzt durch Hindurchleiten eines Gleichstromes von neuem aufladen. Dabei bildet sich an der positiven Platte wieder Bleisuperoxyd; an der negativen Platte wird das beim Entladen gewonnene Bleisulfat in schwammiges Blei verwandelt.

Zur Herstellung eines solchen Elementes würde sich die Verwendung von nur zwei Bleiplatten wenig lohnen, denn der so gewonnene Polarisationsstrom ist nur von kurzer Dauer. Um seine Dauer zu erhöhen, verwendete Planté das *Formierungsverfahren*, indem er die Zellen monatelang lud und entlud. Hierdurch bildete sich allmählich eine bis 1 mm tiefe Schicht von Bleischwamm auf der einen und Bleisuperoxyd auf der anderen Plattenoberfläche. Faure verbesserte dieses zeitraubende Verfahren dadurch, daß er feinverteiltes Blei und Bleisuperoxyd (*aktive Masse*) von vornherein auf besonders hergerichtete Platten auftrug. Einen weiteren Fortschritt bedeutete die Verwendung von Mennige statt des teuren Bleisuperoxyds und von Bleioxyd statt feinverteilten Bleies. Beide Substanzen lassen sich durch die erste längere Ladung in Bleisuperoxyd und Bleischwamm verwandeln.

Das moderne Verfahren zur Herstellung von Akkumulatoren hat auch diesen Weg verlassen und verwendet statt der einfachen Platten solche mit Rillen bzw. Gittern. Die Rillenplatten (Fig. 394) sind für den positiven Pol bestimmt und werden nach dem alten Planté-Verfahren formiert; die gitterartig geformten Platten (Fig. 395) bilden den negativen Pol und dienen zur Aufnahme von Bleioxyd. Dieses wird erst nach Aufstellung der *Akkumulatorenbatterie* in metallisches Blei verwandelt, und zwar dadurch, daß der eigentlichen Inbetriebnahme eine zweitägige Ladung vorausgeht. Auf diese Weise stellt z. B. die Akkumulatorenfabrik Hagen ihre Akkumulatoren her.

Um einem Akkumulator größere Elektrizitätsmengen entnehmen zu können, verwendet

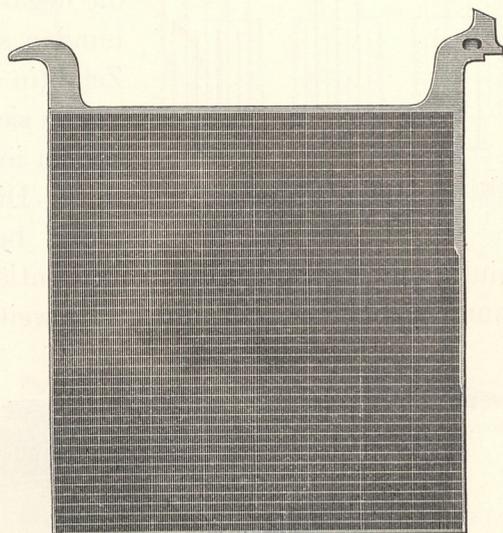


Fig. 394. Positive (Rillen-) Platte eines Bleiakkumulators.

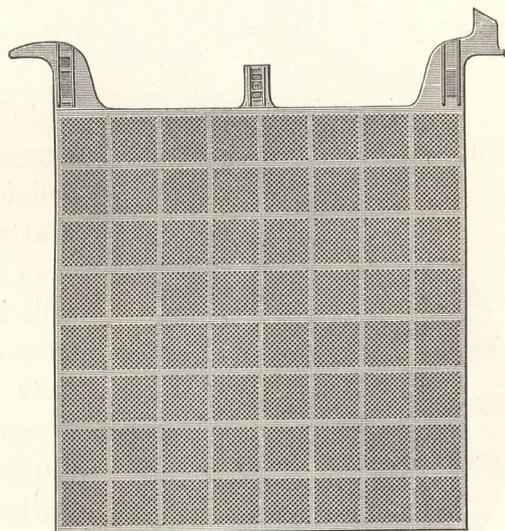


Fig. 395. Negative (Gitter-) Platte eines Bleiakkumulators.

man Zellen mit mehreren positiven und negativen Platten. Man stellt die Platten gewöhnlich so in ein Gefäß aus Glas, Ebonit oder mit Pech ausgegossenem Holz, daß jede positive (+) Platte zwischen zwei negativen (—) Platten steht, also stets eine —-Platte mehr vorhanden ist als +-Platten. Fig. 396 zeigt schematisch von oben drei Akkumulatorenzellen mit je sieben Platten, von denen die drei positiven mit dicken, die vier negativen mit zarten Linien ausgezogen sind.

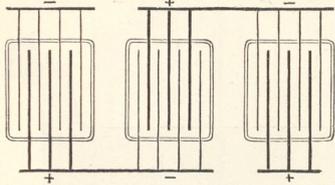


Fig. 396. Schaltschema von drei Akkumulatorenzellen.

Auf der einen Seite der Zellen werden die positiven, auf der anderen die negativen Platten durch angelötete Bleistreifen miteinander verbunden, sodann die +-Platten der einen an die —-Platten der anderen Zelle (in Hintereinanderschaltung) angeschlossen. Fig. 397 zeigt drei aus je sieben Platten bestehende Elemente der Akkumulatorenfabrik Hagen in Ansicht.

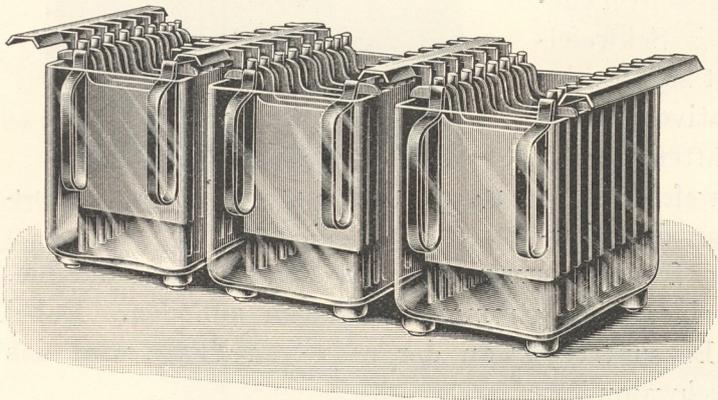


Fig. 397. Akkumulatorenzellen in Hintereinanderschaltung (Akkumulatorenfabrik A.-G.).

Die aus einem Bleiakкумуляtor erhältliche elektromotorische Kraft beträgt nach vollendeter Aufladung anfangs 2,1 Volt und sinkt allmählich auf 1,8 Volt. Entlädt man den Akkumulator noch weiter, so wird die Spannung rasch Null. Eine derartig weitgehende Entladung schädigt jedoch die Platten; man muß daher die Entladung abbrechen, wenn die Spannung auf 1,8 Volt gesunken ist.

Die elektromotorische Gegenkraft des Bleiakкумуляtors beträgt bei Beginn der Ladung etwa 2,1 Volt; sie steigt während der Ladung allmählich bis auf 2,7 Volt. Hiermit ist das Ende der Ladung erreicht. Würde man dem Akkumulator weiter Energie zuführen, so würde nur noch eine Zersetzung der Flüssigkeit stattfinden. Man muß daher die Ladung unterbrechen, sobald ein lebhaftes Emporsteigen von Gasblasen (*Kochen* des Akkumulators) bemerkbar wird.

Ein Akkumulator kann nicht die volle ihm zugeführte Energiemenge zurückerstatten. Man muß auch hier mit einem Wirkungsgrade rechnen, der durch das Verhältnis der bei der Entladung

gelieferten zu der bei der Ladung aufgenommenen Leistung (in Wattstunden) bestimmt ist. Er beträgt bei guten Akkumulatoren etwa 75 Proz. Die *Kapazität*, d. h. die Leistung einer Akkumulatorenzelle in Amperestunden, richtet sich nach ihrer Größe. Die elektromotorische Kraft ist jedoch hiervon unabhängig; sie beträgt stets im Mittel 2 Volt. Will man höhere Spannungen erhalten, so muß man mehrere Elemente zu einer Batterie vereinigen. Für 110 Volt z. B. würde man 55 Zellen benötigen. Da jedoch bei der Entladung die Spannung jeder Zelle allmählich bis auf 1,8 Volt zurückgeht, so würden die 55 Zellen schließlich nur noch eine Spannung von  $1,8 \times 55$ , d. h. 99 Volt, besitzen. Man muß also weitere Zellen hinzuschalten, um wieder die gewünschte Spannung von 110 Volt zu erhalten. Aus diesem Grunde versieht man eine Akkumulatorenbatterie stets mit einer Reihe abschaltbarer Zellen, den *Schaltzellen*. Sie werden, wenn die Spannung der *Stammbatterie* allmählich abnimmt, nach und nach mittels sogenannter Zellschalter zugeschaltet.

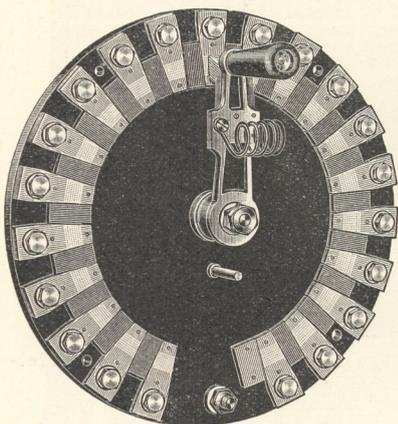


Fig. 398. Runder Einfachzellenschalter.

Ein derartiger *Zellschalter* (Fig. 398) besteht aus einer Reihe kreisförmig auf einer Schieferplatte angeordneter Kontakte; auf denen ein Kontakthebel schleift. Die Kontakte sind mit den Schaltzellen durch die *Zellschalterleitungen* verbunden. Die Wirkungsweise des Zellschalters geht aus Fig. 399 hervor. Da die Bürste des Kontakthebels beim Vorschube gleichzeitig zwei

Ein derartiger *Zellschalter* (Fig. 398) besteht aus einer Reihe kreisförmig auf einer Schieferplatte angeordneter Kontakte; auf denen ein Kontakthebel schleift. Die Kontakte sind mit den Schaltzellen durch die *Zellschalterleitungen* verbunden. Die Wirkungsweise des Zellschalters geht aus Fig. 399 hervor. Da die Bürste des Kontakthebels beim Vorschube gleichzeitig zwei

Kontakte berührt, so wird die zwischen ihnen liegende Zelle kurzgeschlossen; dadurch tritt eine Stromstärke von übernormaler Höhe auf, die der Zelle schadet und an den Kontaktteilen Brandstellen verursacht. Um die Stärke des Kurzschlußstromes in gewissen Grenzen zu halten, teilt man die Schleifbürste, wobei jede Hälfte etwas schmaler als die Hälfte der Kontaktteilung ausgeführt wird. Steht die eine Hälfte der Bürste symmetrisch zu einem Kontakt, so steht die andere symmetrisch zur Kontaktlücke. Zwischen beiden Bürsten ordnet man einen sogenannten *Zwischenwiderstand* an, der gewöhnlich aus einem gewellten oder spiralförmig gebogenen Rheotanstreifen besteht.

Der in Fig. 398 dargestellte Zellschalter läßt sich nur für Ladung oder Entladung verwenden. Will man eine Akkumulatorenbatterie laden und gleichzeitig zur Stromlieferung heranziehen, so benötigt man zwei solcher Zellschalter, eine

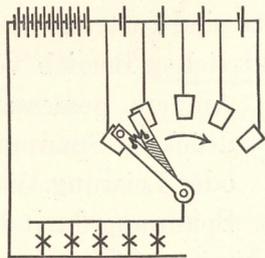


Fig. 399. Schaltschema eines Einfachzellschalters mit Zwischenwiderstand.

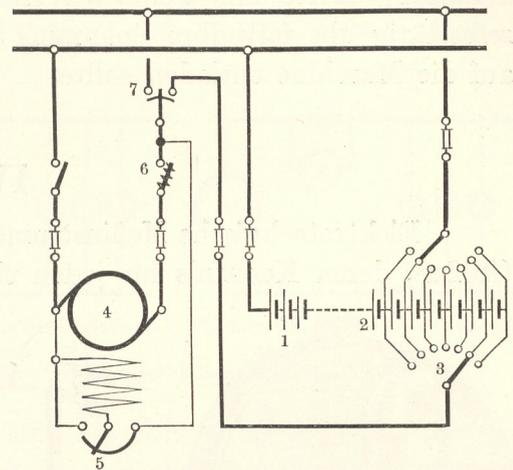


Fig. 400. Schaltschema einer Akkumulatorenanlage. (1 Stammbatterie, 2 Schaltzellen, 3 Doppelzellschalter, 4 Nebenschlußdynamo, 5 Nebenschlußregler, 6 Rückstromschalter, 7 Umschalter.)

Anordnung, die in Fig. 400 schematisch wiedergegeben ist. Gewöhnlich werden beide Apparate zu einem *Doppelzellschalter* vereinigt, der dann mit zwei Kontakthebeln ausgerüstet ist (Fig. 401). Statt der runden Zellschalter werden insbesondere für hohe Stromstärken vielfach geradlinige Zellschalter verwendet, deren Bedienung von Hand (Fig. 402) oder auch durch automatische Antriebsvorrichtung erfolgen kann.

Wie bereits erörtert, erfordert eine Spannung von 110 Volt 60 Elemente. Um diese zu laden, ist also eine maximale Ladespannung von  $60 \times 2,7 = 160$  Volt erforderlich. Diese Spannung läßt sich dadurch erreichen, daß man die Spannung der Dynamo durch Erhöhung der Drehzahl steigert. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, daß man die Dynamo von vornherein für die höchste Ladespannung bemißt und bei normalem Betriebe die Spannung durch einen besonderen Nebenschlußregler erniedrigt. Schließlich kann man auch die Dynamo mit der normalen Spannung betreiben und eine zweite sogenannte *Zusatzdynamo* aufstellen, die in Hintereinanderschaltung mit der Hauptdynamo die Steigerung der Spannung bis zur maximalen Ladespannung ermöglicht.

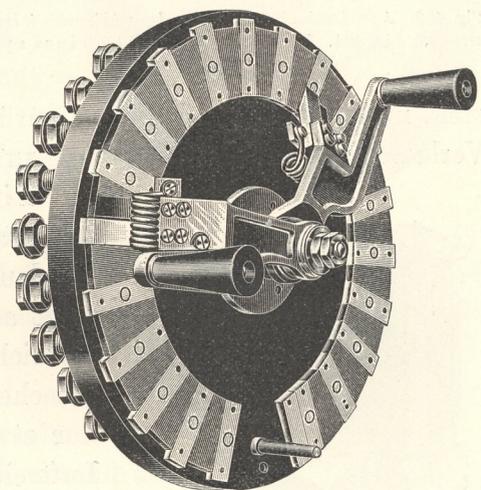


Fig. 401 Runder Doppelzellschalter.

Die Vorteile des Gleichstrombetriebes in Verbindung mit Akkumulatoren machen sich

besonders in kleineren Anlagen geltend, denn selbst bei Aufstellung nur einer einzigen Dynamo läßt sich eine verhältnismäßig große Betriebssicherheit erreichen: Bei plötzlichem Versagen der Maschinenanlage kann die Akkumulatorenbatterie den Lichtbetrieb für einige Zeit allein übernehmen.

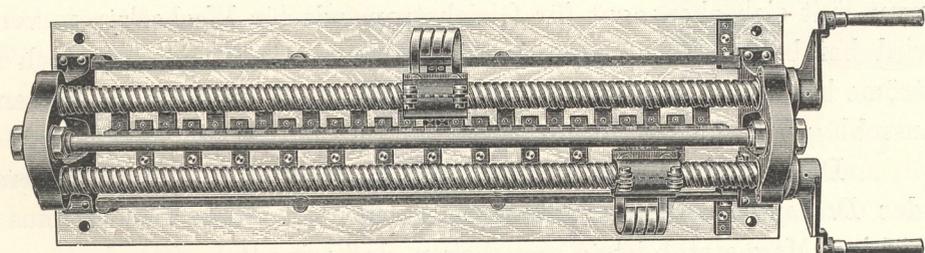


Fig. 402. Geradliniger Doppelzellschalter.

Ferner kann die Maschine zur Nachtzeit stillgesetzt werden, wobei die Batterie allein, ohne daß sie besonderer Wartung bedürfte, den Strom liefert. Endlich läßt sich zu Zeiten gesteigerten Verbrauchs durch

Parallelschalten von Batterie und Dynamo eine über das normale Maß der Dynamo wesentlich hinausgehende Energieabgabe erreichen. Eine Anordnung, wie sie bei Verwendung von Dynamo und Akkumulatoren-batterie besonders in kleineren Anlagen üblich ist, zeigt Fig. 400. Die Schaltung dürfte ohne weiteres verständlich sein. Der *Rückstromschalter* 6 schaltet die Dynamo 4 selbsttätig ab, falls ihre Spannung etwa unter die der Batterie sinken, also die Batterie sich auf die Maschine entladen sollte.

#### IV. Meßinstrumente.

Elektrotechnische Meßinstrumente sind Instrumente zur Bestimmung gewisser elektrischer Größen, deren Kenntnis für jeden elektrischen Betrieb von höchstem Wert ist, nämlich der in Ampere gemessenen Stromstärke, der in Volt ausgedrückten Spannung und der in Watt gemessenen Arbeit oder Leistung, die sich als Produkt aus Stromstärke und Spannung darstellt. Man unterscheidet demnach Stromzeiger (*Amperemeter*), Spannungszeiger (*Voltmeter*) und Leistungszeiger (*Wattmeter*). Hierzu kommen noch die *Zähler*, die den elektrischen Energieverbrauch messen.

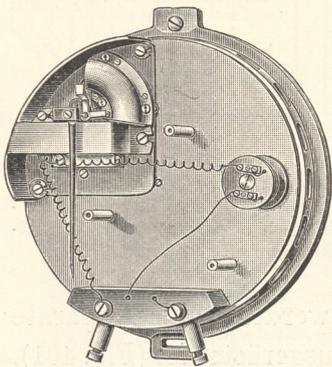


Fig. 403.

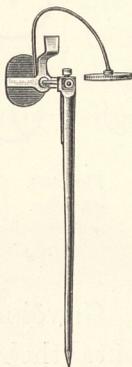


Fig. 404.

Fig. 403. Aperiodischer Stromzeiger (Siemens & Halske), zerlegt. Fig. 404. Bewegliches System eines aperiodischen Stromzeigers.

##### 1. Strom-, Spannungs- und Leistungszeiger.

Die einfachsten *Stromzeiger* bilden Instrumente, bei denen das im Innern einer stromdurchflossenen Spule vorhandene magnetische Feld einen Kern aus weichem Eisen beeinflusst. Durch eine Vorrichtung, die den Eisenkörper stets in die Gleichgewichtslage zurückzuführen sucht, beispielsweise durch ein Gewicht, das beim Verlassen der Gleichgewichtslage zu heben ist, erhält man ein zur Strommessung geeignetes System.

Einen nach diesem Prinzip von Siemens & Halske A.-G., Berlin, hergestellten Stromzeiger zeigt Fig. 403. Ein mit einem Zeiger verbundener und in Saphiren drehbar gelagerter Weicheisenkern (Fig. 404) trägt an einem hakenförmig gebogenen Drahte eine kleine Scheibe, die sich in einem gekrümmten Rohr bewegt. Der Zwischenraum zwischen dem Scheibenrand und der inneren Rohrwandung beträgt nur etwa 0,5 mm, so daß die Scheibe bei ihrer Bewegung durch die Luftreibung eine starke Dämpfung erfährt. Wird die Spule vom Strom durchflossen, so dreht sich das exzentrisch zur Achse befestigte Eisenplättchen so weit, bis sein Gewicht der elektromagnetischen Kraft das Gleichgewicht hält, und der Zeiger gibt auf einer geeichten Skala die entsprechende Stromstärke an. Gegen äußere Beeinflussungen durch Starkströme ist das ganze System mit Eisenblech umgeben. Ein derartiges Instrument läßt sich ebensogut für Gleichstrom wie für Wechselstrom verwenden, denn der Eisenkern wird bei beiden Stromarten in die Spule hineingezogen. Jedoch muß die Skala für Wechselströme besonders geeicht sein, wobei zu beachten ist, daß verschiedene Periodenzahlen den Zeigerausschlag verschieden beeinflussen.

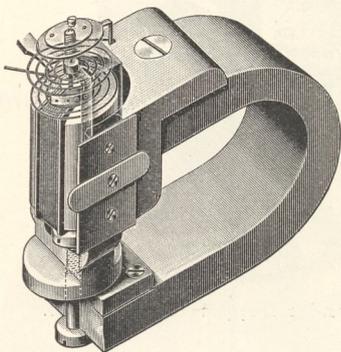


Fig. 405. Präzisionsstromzeiger, zerlegt (Siemens & Halske).

Die Ablenkung einer Spule durch einen Magneten nach dem Prinzip Deprez d'Arsonval oder *Drehspulensystem* benutzen Instrumente, deren Mechanismus Fig. 405 zeigt: Ein flacher kräftiger Magnetstab ist so umgebogen, daß seine Pole einander gegenüberstehen. In der Figur ist nur die eine (rechte) Hälfte des Magnetstabes sichtbar, die andere ist der größeren Anschaulichkeit halber fortgelassen. Die beiden Pole des Magnets besitzen massive Polschuhe (nur der rechte ist sichtbar) mit halbzylindrischem Ausschnitt. Zwischen den Polschuhen bleibt ein zylindrischer Raum frei für einen eisernen Hohlzylinder, der rings von den Wandungen der Polschuhe einen 2 mm

breiten Abstand hat. In dem hierdurch geschaffenen Zwischenraum dreht sich die bewegliche Spule. Sie besteht aus zahlreichen Windungen dünnen Kupferdrahtes, die von einem in Edelsteinen gelagerten Aluminiumrahmen gestützt werden. Die Wickelungsenden sind an zwei Spiralfedern befestigt, die der Stromzuführung dienen und gleichzeitig die Gegenkraft für die magnetischen Wirkungen des Kraftlinienfeldes bilden, indem sie Spule und Zeiger in der Nulllage zurückzuhalten suchen. Die Wirkungsweise des Instrumentes ist folgende: Die im Felde des permanenten Magnets drehbar gelagerte Spule hat bei Stromdurchgang das Bestreben, sich so einzustellen, daß ihre Kraftlinien mit denen des Magnetfeldes parallel und in gleicher Richtung verlaufen. Die Spule wird also eine zu den Kraftlinien des Magnetfeldes senkrechte Lage einzunehmen suchen. Die Spiralfedern wirken dieser Bewegung entgegen. Die Stellung der Spule und des Zeigers kennzeichnet mithin die jeweilige Gleichgewichtslage, wobei der Zeigerausschlag der betreffenden Stromstärke proportional ist. Dieses System hat den Vorzug, daß Spule und Zeiger sich fast aperiodisch (d. h. ohne Hin- und Herschwingen) einstellen und die Skalenteilung über die ganze Skala hinweg gleichmäßig ist. Nach ihm bauen fast alle größeren Fabriken sogenannte *Präzisionsinstrumente*. Durch die Spule darf nur ein sehr schwacher Strom hindurchfließen (höchstens 0,15 Ampere). Die Instrumente können daher niemals direkt in den Stromkreis eingeschaltet, sondern müssen an einen Parallelwiderstand, auch *Shunt* genannt, von geringer Ohmzahl gelegt werden.

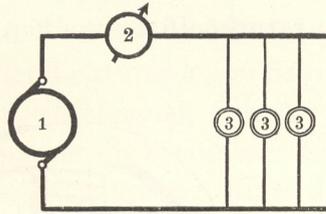


Fig. 406. Schaltung eines Stromzeigers.  
(1 Dynamo, 2 Stromzeiger, 3 Bogenlampen, 4 Shunt.)

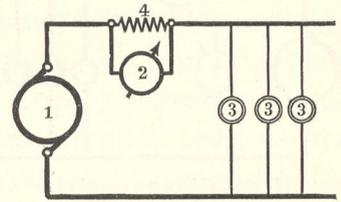


Fig. 407. Schaltung eines Stromzeigers mit Shunt.

Stromzeiger werden mit der Maschine oder den Stromverbrauchern, deren Strom gemessen werden soll, in Reihe geschaltet. Da indessen durch diese Anordnung (Fig. 406) infolge der hohen Ströme häufig sehr starke Zuleitungen zu den Meßinstrumenten erforderlich wären, so werden die meisten Stromzeiger, besonders die für große Stromstärken, in den Nebenschluß zu einem Widerstand (Shunt) von bestimmter Größe gelegt. Die Schaltung ist aus dem in Fig. 407 dargestellten Beispiel ersichtlich: Drei Bogenlampen sollen einen Strom von 15 Ampere verbrauchen. Der Stromzeiger selbst habe einen Widerstand von 1 Ohm, der Widerstand des Shunts betrage  $\frac{1}{99}$  Ohm. Dann fließt nach dem Gesetz von der Stromverzweigung durch den Shunt ein Strom von 14,85 Ampere, während der im Nebenschluß liegende eigentliche Stromzeiger nur  $\frac{1}{99}$  dieses Betrages, d. i. 0,15 Ampere, führt, einen Strom, den z. B. das oben beschriebene Präzisionsinstrument gerade noch vertragen würde. Die Instrumentenskala würde in diesem Falle natürlich für 15 Ampere geeicht werden.

Je kleiner man den Widerstand des Shunts macht, desto größere Ströme kann man mit dem Instrumente messen. Die Präzisionsinstrumente von Siemens & Halske erhalten normal für Ströme bis 50 Ampere eingebaute, darüber hinaus getrennte Shunts. Fig. 408 zeigt einen Stromzeiger genannter Firma für 100 Ampere; Fig. 409 veranschaulicht den zugehörigen Shunt, Fig. 410 einen Shunt für 1500 Ampere. Sein Widerstand beträgt  $\frac{1}{9999}$  Ohm; durch den zugehörigen Stromzeiger würde mithin maximal wiederum ein Strom von nur 0,15 Ampere gehen.

Die besprochenen Stromzeiger lassen sich auch als *Spannungszeiger* verwenden, nur ist die Skala dann in Volt zu eichen. Da der für die Spannungsmessung benutzte Strom, wie aus Schalt-schema Fig. 411 hervorgeht, für den Nutzstrom verloren ist, so muß der Meßstrom so klein wie

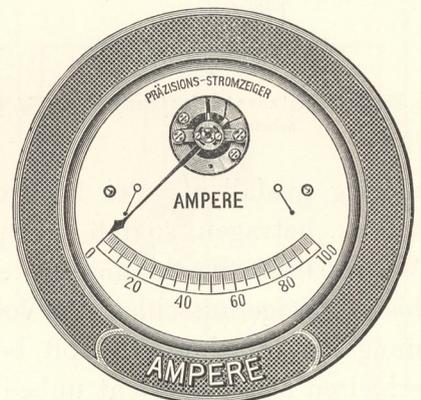


Fig. 408. Präzisionsstromzeiger für 100 Ampere (Siemens & Halske).

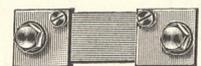


Fig. 409. Shunt des Präzisionsstromzeigers Fig. 408.

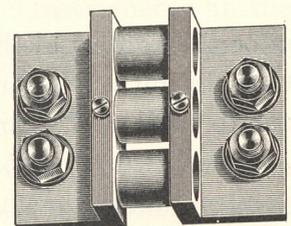


Fig. 410. Shunt für 1500 Ampere.

möglich gehalten werden. Spannungszeiger erhalten daher einen Widerstand aus vielen Windungen dünnen Drahtes, Stromzeiger dagegen nur wenige Windungen dicken Drahtes. Während die Angaben der Stromzeiger durch Temperaturänderungen nicht merkbar beeinflusst werden, müssen bei Spannungszeigern Vorkehrungen getroffen werden, um das System gegen Wärmeschwankungen praktisch unempfindlich zu machen. Zu diesem Zwecke stellt man die Spule aus einem Metall mit möglichst kleinem Temperaturkoeffizienten her. Unter dem Temperaturkoeffizienten versteht man die Widerstandszunahme (in Prozent), die 1 Ohm pro 1 Grad Temperaturerhöhung erfährt. Der Temperaturkoeffizient des Kupfers beträgt nun 0,4, d. h. der Widerstand wächst pro Grad Temperaturerhöhung um 0,4 Proz. Bei 2,5° Temperaturerhöhung ändert sich der Widerstand einer Kupferspule demnach schon um  $2,5 \cdot 0,4$ , d. h. 1 Proz. Die Angaben eines damit ausgerüsteten Spannungszeigers würden also 1 Proz. zu

niedrig ausfallen. Bei 10 Proz. Temperaturerhöhung würde der Fehler im Ausschlag schon 4 Proz. betragen, so daß der Spannungszeiger z. B. statt 110 Volt nur 105,6 Volt angeben würde. Würde man die Spannung der Maschine jetzt so weit hinaufregulieren, bis der Zeigerausschlag 110 Volt beträgt, so würde die tatsächliche Spannung bereits über 115 Volt betragen; etwa angeschlossene Glühlampen erhielten also eine nicht unbedenkliche Überspannung. Daher stellt man nur einen kleinen Teil des Widerstandes, nämlich die das System betätigende Spule, aus Kupferdraht her, den größeren Teil jedoch aus Manganindraht, den man in Form eines Vorschaltwiderstandes anordnet. Durch die Verwendung von *Manganin*, einer Legierung aus Kupfer, Nickel und Mangan mit sehr kleinem Temperaturkoeffizienten, erreicht der Temperaturkoeffizient des Gesamtwiderstandes einen Wert, der praktisch unberücksichtigt bleiben kann. Das vorstehend über den Spannungszeiger Gesagte gilt auch für Stromzeiger mit Shunt, da beide Meßinstrumente auf demselben Prinzip beruhen.

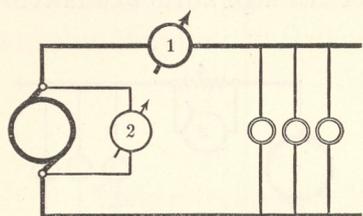


Fig. 411. Schaltung von Strom- und Spannungszeiger. (1 Stromzeiger, 2 Spannungszeiger.)

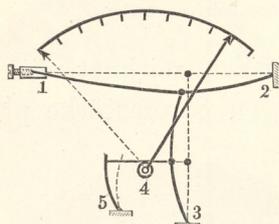


Fig. 412. Hitzdraht-Instrument, schematisch.

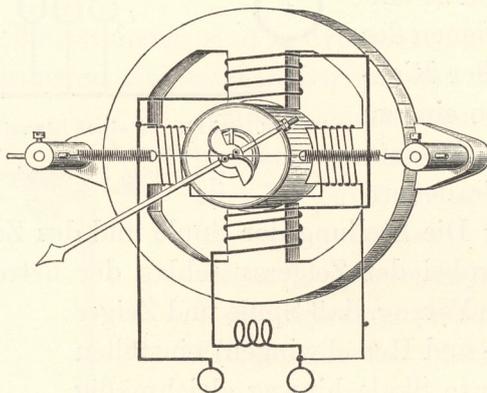


Fig. 413. Ferraris-Instrument, zerlegt (Siemens & Halske).

Bei 10 Proz. Temperaturerhöhung würde der Fehler im Ausschlag schon 4 Proz. betragen, so daß der Spannungszeiger z. B. statt 110 Volt nur 105,6 Volt angeben würde. Würde man die Spannung der Maschine jetzt so weit hinaufregulieren, bis der Zeigerausschlag 110 Volt beträgt, so würde die tatsächliche Spannung bereits über 115 Volt betragen; etwa angeschlossene Glühlampen erhielten also eine nicht unbedenkliche Überspannung. Daher stellt man nur einen kleinen Teil des Widerstandes, nämlich die das System betätigende Spule, aus Kupferdraht her, den größeren Teil jedoch aus Manganindraht, den man in Form eines Vorschaltwiderstandes anordnet. Durch die Verwendung von *Manganin*, einer Legierung aus Kupfer, Nickel und Mangan mit sehr kleinem Temperaturkoeffizienten, erreicht der Temperaturkoeffizient des Gesamtwiderstandes einen Wert, der praktisch unberücksichtigt bleiben kann. Das vorstehend über den Spannungszeiger Gesagte gilt auch für Stromzeiger mit Shunt, da beide Meßinstrumente auf demselben Prinzip beruhen.

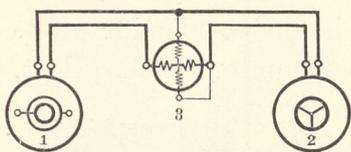


Fig. 414. Schaltung eines Leistungszeigers für Wechselstrom. (1 Generator, 2 Motor, 3 Leistungszeiger.)

Das vorstehend über den Spannungszeiger Gesagte gilt auch für Stromzeiger mit Shunt, da beide Meßinstrumente auf demselben Prinzip beruhen. Eine dritte Art von Instrumenten, die *Hitzdrahtinstrumente*, beruhen auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes. Ihre Einrichtung ist aus Fig. 412 zu erkennen: Ein aus einer Platin-Silberlegierung bestehender, 0,06 mm starker Draht ist an seinen beiden Enden 1 und 2 fest eingeklemmt. Etwa in seiner Mitte ist ein nichtstromführender Messingdraht von 0,05 mm Durchmesser befestigt, dessen anderes Ende bei 3 festgeklemmt ist. Von der Mitte des zweiten Drahtes führt ein Kokonfaden, der um eine kleine Rolle 4 geschlungen ist, zur Feder 5, welche die Drähte stets gespannt hält. Die gestrichelten Linien in Fig. 412 zeigen den stromlosen Zustand. Wird der Platindraht von einem Strom durchflossen, so dehnt er sich infolge der Erwärmung aus (ausgezogene Linien der Fig. 412); der von der Feder ausgeübte Zug bewirkt eine Ausbuchtung beider Drähte. Dabei wird Rolle 4, auf

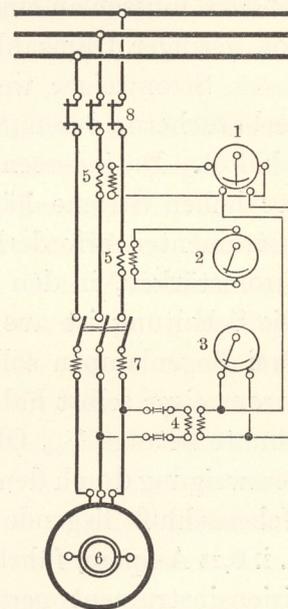


Fig. 415. Schaltung von Meßinstrumenten in Verbindung mit Meßtransformatoren. (1 Leistungszeiger, 2 Stromzeiger, 3 Spannungszeiger, 4 Spannungstransformator, 5 Stromtransformator, 6 Drehstromgenerator, 7 Maximalausschalter [statt Sicherungen], 8 Trennschalter.)

Eine dritte Art von Instrumenten, die *Hitzdrahtinstrumente*, beruhen auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes. Ihre Einrichtung ist aus Fig. 412 zu erkennen: Ein aus einer Platin-Silberlegierung bestehender, 0,06 mm starker Draht ist an seinen beiden Enden 1 und 2 fest eingeklemmt. Etwa in seiner Mitte ist ein nichtstromführender Messingdraht von 0,05 mm Durchmesser befestigt, dessen anderes Ende bei 3 festgeklemmt ist. Von der Mitte des zweiten Drahtes führt ein Kokonfaden, der um eine kleine Rolle 4 geschlungen ist, zur Feder 5, welche die Drähte stets gespannt hält. Die gestrichelten Linien in Fig. 412 zeigen den stromlosen Zustand. Wird der Platindraht von einem Strom durchflossen, so dehnt er sich infolge der Erwärmung aus (ausgezogene Linien der Fig. 412); der von der Feder ausgeübte Zug bewirkt eine Ausbuchtung beider Drähte. Dabei wird Rolle 4, auf

deren Achse ein Zeiger befestigt ist, gedreht. Hat man die Zeigerstellung für verschiedene Stromstärken ermittelt und die Skala entsprechend geeicht, so kann man das Instrument zu Messungen benutzen. Um dasselbe von der Temperatur der umgebenden Luft unabhängig zu machen, ist die Platte, worauf der Hitzdraht ausgespannt ist, nach dem Prinzip der Kompensationspendel aus zwei Metallen (Messing und Eisen) zusammengesetzt, so daß der Ausdehnungskoeffizient der Platte dem des Hitzdrahtes gleich ist.

*Leistungszeiger* gelangen hauptsächlich in Wechsel- und Drehstromnetzen zur Verwendung. In Gleichstromnetzen macht das Bestimmen der Leistung keine Schwierigkeiten; man erhält sie durch Multiplikation der an Meßinstrumenten abgelesenen Strom- und Spannungswerte. Bei Wechselstrom würde eine derartige Messung aber nur die scheinbare Leistung (vgl. S. 169) wiedergeben, den Leistungsfaktor hingegen unberücksichtigt lassen. Eines der gebräuchlichsten Schalttafelinstrumente für Leistungsmessungen in Wechsel- und Drehstromnetzen ist das von Siemens & Halske hergestellte *Ferraris-Instrument*: Strom und Spannung wirken auf ein feststehendes System

von zwei Spulen, deren Achsen senkrecht aufeinander stehen (Fig. 413). In den Stromkreis der Spannungsspule ist eine Selbstinduktion eingeschaltet, die den Strom der Spannungsspule gegen die an den Spannungsklemmen des Instrumentes wirkende Spannung um  $90^\circ$  verzögert. Infolgedessen entsteht, ähnlich wie gelegentlich des Einphaseninduktionsmotors besprochen ist, ein Drehfeld. Dieses lenkt eine innerhalb der Spulen angeordnete, mit Zeiger versehene Aluminiumtrommel so weit aus ihrer Nulllage ab, bis die Zugkraft einer der Ablenkung entgegenwirkenden Spiralfeder der vom Drehfeld ausgeübten gleichkommt. Fig. 414 zeigt das Schaltschema eines Leistungszeigers für Wechselstrom.

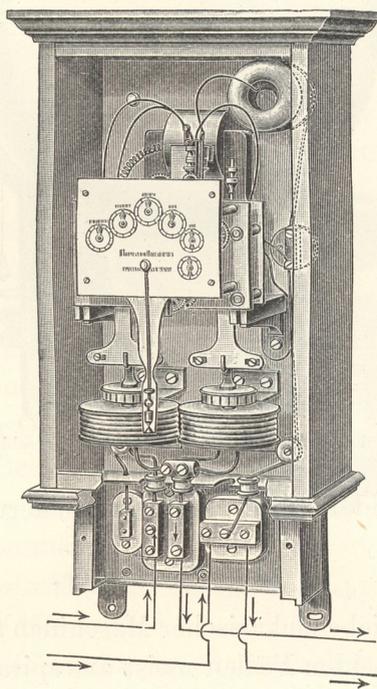


Fig. 416. Uhrzähler von Aron.

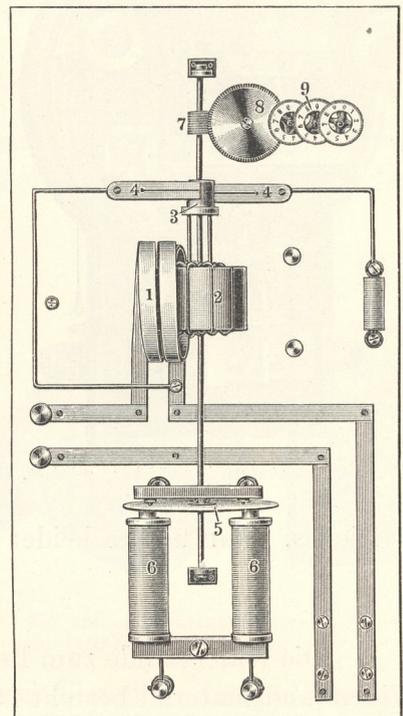


Fig. 417. Prinzip des Motorzählers (A.E.G.).

Sollen hochgespannte Ströme aus Meßinstrumenten ferngehalten oder die Führung von starken Kupferschienen zu den Instrumenten vermieden werden, so legt man die Meßinstrumente an die Sekundärseite kleiner Meßtransformatoren (vgl. S. 180), wobei die Schaltung der Fig. 415 entspricht.

## 2. Zähler.

Die Zähler haben das Produkt aus Spannung und Stromstärke zu ermitteln. Behält die erstere, wie in Beleuchtungsanlagen, stets den gleichen Wert, so genügt es, die Strommenge zu zählen, die in einer gewissen Zeit an die Verbrauchsstelle geliefert wurde; durch Multiplikation mit der bekannten Netzspannung erhält man dann die gelieferte Leistung in Watt. Derartige Zähler nennt man *Amperestundenzähler*.

Der Uhrzähler von Aron (Fig. 416) besteht aus zwei Pendeln gleicher Schwingungsdauer, von denen jedes, wie bei Pendeluhr, ein Uhrwerk betreibt. Während das eine Pendel in normaler Weise schwingt, wird der Gang des anderen von einer stromdurchflossenen Spule beeinflusst. Um nach Verlauf einer bestimmten Zeit den Stromverbrauch zu bestimmen, braucht man nur festzustellen, wieviel die beeinflusste Uhr in bezug auf die normale nachgeht. Diese Differenz wird selbsttätig von einem Differentialgetriebe auf ein Zählwerk übertragen.

Eine zweite Art von Elektrizitätszählern bilden die *Motorzähler*; sie sind wegen ihrer Einfachheit allen anderen Konstruktionen überlegen. Der Aufbau eines solchen, von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft hergestellten Zählers ist aus Fig. 417 ersichtlich. In dem Wirkungsbereich einer festen, vom Verbrauchsstrom durchflossenen Spule 1 rotiert ein Spulensystem 2, das mit einem mehrteiligen Kommutator 3 verbunden ist. Auf diesem schleifen Bürsten 4, die den Spulen einen der jeweiligen Spannung entsprechenden Strom zuführen. Auf der Achse des Systems ist eine Aluminiumscheibe 5 angeordnet, die zwischen den Polen eines Magnets 6 hindurchläuft und auf diese Weise dämpfend auf die Bewegung wirkt. Die Umdrehungen werden mittels Schnecke 7 und Schneckenrad 8 auf ein Zählrad 9 übertragen. Die

Ausführung des Zählers zeigen Fig. 418 und 419. Ein derartiger Zähler arbeitet also in Abhängigkeit von Strom und Spannung und kann demnach die verbrauchten Watt direkt angeben (*Wattstundenzähler*).

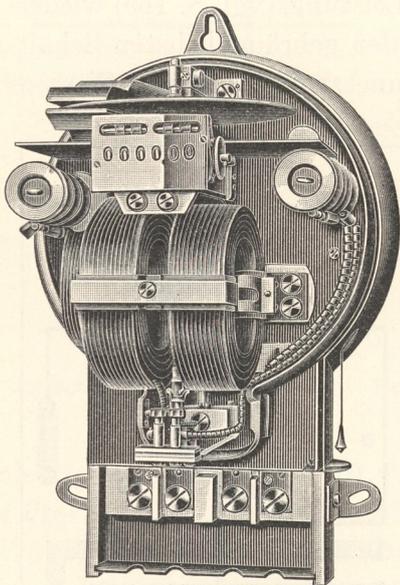


Fig. 418. Wattstundenzähler, geöffnet.

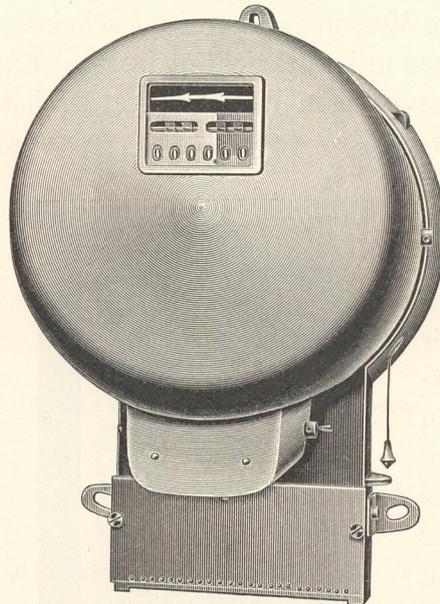


Fig. 419. Wattstundenzähler, geschlossen.

## V. Apparate.

### 1. Hilfsapparate.

Hilfsapparate sind Vorrichtungen zur Durchführung eines technisch einwandfreien

Betriebes. Man unterscheidet Widerstände, Schalter, Sicherungen und Blitzschutzvorrichtungen.

#### a) Widerstände.

Die Widerstände zum Betriebe elektrischer Maschinen zerfallen in *Regler* und *Anlasser*. Das Widerstandsmaterial besteht in beiden Fällen meist aus spiralförmig angeordneten Metalldrähten, die bei kleineren Stromstärken häufig auf Porzellanrollen aufgewickelt sind.

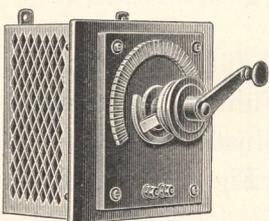


Fig. 420. Erregerstrom-Regler.

a) **Regler.** Regler sind Widerstände, die durch Vorschaltung vor die Magnetwicklung von Maschinen eine Veränderung des magnetischen Feldes und damit der Maschinenspannung (falls Dynamo) bzw. der Drehzahl (falls Motor) gestatten. Gewöhnlich schleift ein drehbarer Kontakt hebel über einer Bahn aus mehreren Kontakten, die mit den einzelnen Widerstandsstufen leitend verbunden sind (vgl. Fig. 328). „Nebenschlußregler“ benötigen einen *Kurzschlußkontakt*, der im Falle eines plötzlichen Abschaltens der Erregung dem in der Erregerwicklung auftretenden Induktionsstrom

einen unschädlichen Verlauf ermöglicht. Derartige Regler finden auch bei Wechselstromgeneratoren Verwendung zur Regulierung des von der Erregermaschine erzeugten Erregerstromes (Fig. 420). Häufig werden die Nebenschlußregler automatisch bedient, wobei ein kleiner Hilfsmotor den Kontakthebel mittels Schneckenradübersetzung betätigt. Die Steuerung dieses Motors erfolgt durch sogenannte *Relais*, das sind kleine, von der geringsten Spannungsschwankung beeinflusste Magnete.

β) **Anlasser.** Um Motoren bei der Inbetriebnahme vor zu starken, durch das Anlaufen hervorgerufenen Stromstößen zu schützen, benutzt man Anlasser, die ein stufenweises Einschalten des Ankerstromkreises gestatten. Ihre Schaltung ist aus Fig. 370 ersichtlich. Der innere Aufbau der Anlasser gleicht dem der Regler, doch werden vielfach, besonders wo auf gute Instandhaltung des Anlassers nicht zu rechnen ist, *Flüssigkeitsanlasser* verwendet (Fig. 421). Es sind dies Widerstände,

bei denen sichelförmige Eisenplatten in mit Sodalösung gefüllte Gefäße tauchen. Fig. 422 zeigt einen *Ölanlasser*, dessen Widerstandsmaterial zwecks besserer Abkühlung in einem mit Öl gefüllten Gefäß untergebracht ist. — Auch die Anlasser lassen sich automatisch betätigen (*Selbstanlasser*).

### b) Schalter.

Schalter dienen zum Öffnen und Schließen von Stromkreisen. Je nachdem die Betätigung von Hand oder automatisch erfolgt, unterscheidet man Handschalter und automatische Schalter. Sie werden *einpolig* oder auch *mehrpilig* ausgeführt.

a) **Handschalter.** Fig. 423 zeigt einen *Drehschalter* für Hausinstallationen.

Sein Prinzip besteht darin, daß eine kleine Metallwalze zwischen federnden Kontakten gedreht wird. Die Leitungen werden durch die vorn sichtbaren Löcher eingeführt und mit den betreffenden Kontakten verschraubt. Der einpolige *Momenthebelauschalter* Fig. 424 ist so eingerichtet, daß ein plötzliches Abreißen des Unterbrechungsfunkens stattfindet; Fig. 425 ist ein *doppelpoliger Umschalter*. Für größere Spannungen verwendet man *Ölschalter*, bei denen alle stromführenden Teile unter Öl liegen.

β) **Automatische Schalter.** Bei diesen erfolgt das Ausschalten selbsttätig. Es kann hervorgerufen werden durch ein übermäßiges Anwachsen der Spannung (*Maximalschalter*), durch Ausbleiben der Spannung (*Minimalschalter*), durch Spannungsrückgang (*Spannungsrückgangsschalter*) und endlich durch Änderung der Spannungsrichtung (*Rückstromschalter*).

In allen diesen Fällen beruht die Wirkung auf der Betätigung eines Magnets, der den Schalter durch eine geeignete mechanische Vorrichtung auslöst. Fig. 426 zeigt einen zweipoligen Maximalauschalter der Siemens-Schuckert-Werke. Auch die Ölschalter können automatisch bedient werden. Fig. 427 bringt das Schaltschema eines dreipoligen Maximalölschalters. Übersteigt in einer Phase der Strom die zulässige Grenze, so wird der Auslöser 1 angezogen; die Sperrklinke 2 löst aus, und der Schalter 3 wird durch die Kraft der Feder 4 betätigt. Fig. 428 gibt den Schalter in Ansicht wieder.

### c) Sicherungen.

Sicherungen sind Vorrichtungen zum Schutze elektrischer Leitungen gegen Überlastung. Sie bestehen aus einem leicht schmelzbaren Metall und werden in die Leitung eingebaut, um, sobald der Strom eine unzulässige Höhe erreicht, infolge der dadurch bedingten Wärmeentwicklung abzuschmelzen und so den Strom selbsttätig zu

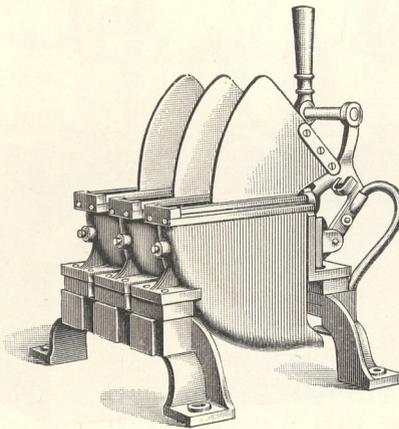


Fig. 421. Flüssigkeitsanlasser, geöffnet.

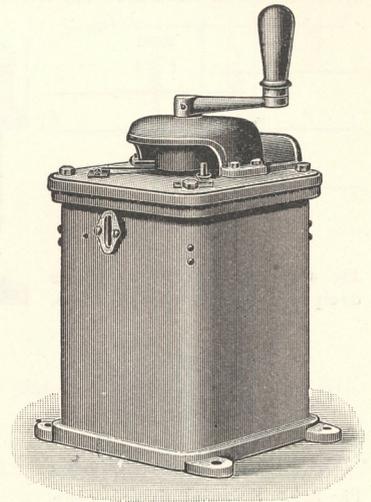


Fig. 422. Ölanlasser.

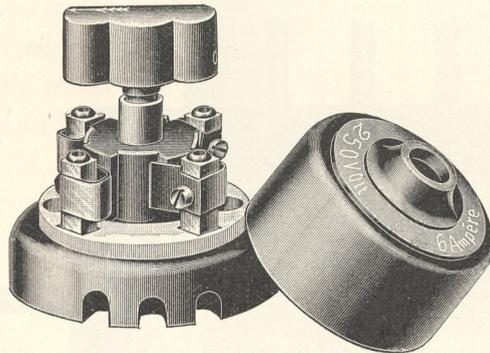


Fig. 423.

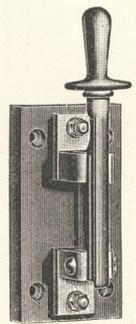


Fig. 424.

Fig. 423. Drehschalter. Fig. 424. Einpoliger Moment-Hebelauschalter.

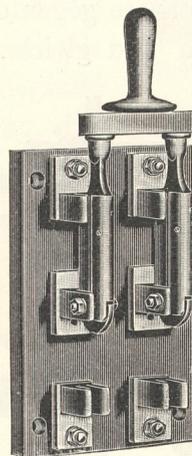


Fig. 425.

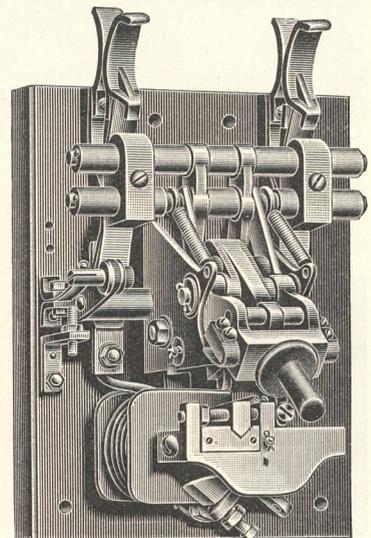


Fig. 426.

Fig. 425. Doppelpoliger Moment-Hebelumschalter. Fig. 426. Zweipoliger Maximalauschalter.

unterbrechen. Die Hauptbestandteile der Sicherungen bilden der *Sockel* mit den Leitungsanschlüssen und der eigentliche *Schmelzeinsatz*. Bei den für Hausinstallationen viel verwendeten *Stöpselsicherungen* ist der Schmelzeinsatz

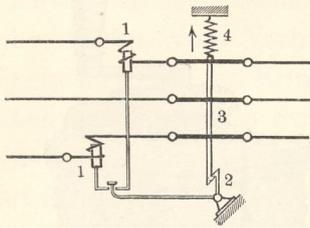


Fig. 427. \* Schaltschema eines dreipoligen Maximalölschalters.

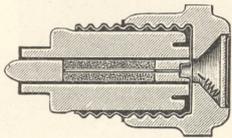


Fig. 429. Schnitt durch eine durchgebrannte Patrone mit Stöpselkopf.

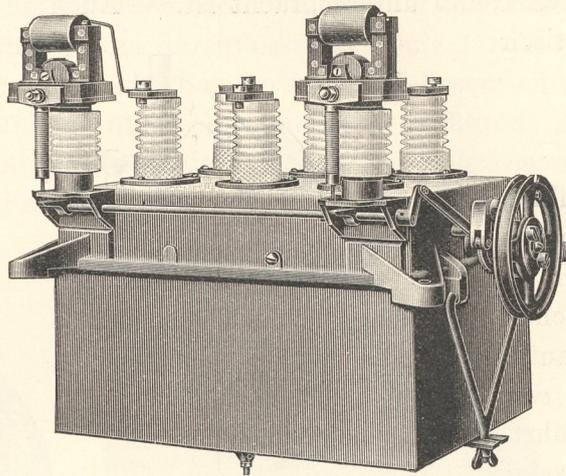


Fig. 428. Dreipoliger Maximalölschalter (Siemens-Schuckert-Werke).

weiter unterteilt in *Stöpsel* und *Stöpselkopf* (Fig. 429). Diese Zweiteiligkeit bietet den Vorteil, daß beim Durchschmelzen nur die Patrone, die den Schmelzdraht in Isoliermaterial eingebettet enthält, ersetzt zu werden braucht. Durch verschiedene Durchmesserabstufungen der Fußkontakte, entsprechend den Stromstärken, und verschiedene Längenabstufungen,

entsprechend den Spannungen, erhält man unverwechselbare Stöpselsicherungen, die jetzt ausschließlich verwendet werden. Die Stöpsel besitzen vielfach farbige Kennvorrichtungen, die beim

Durchschmelzen der Sicherung abspringen. Meist werden die Sicherungen mehrerer Stromkreise auf einer *Verteilungstafel* (Fig. 430) zusammengestellt.

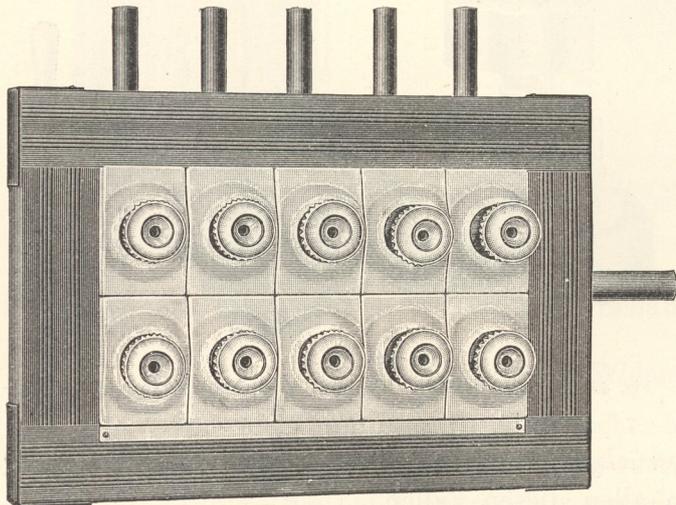


Fig. 430. Verteilungstafel.

Bei *Schalttafelsicherungen* (Fig. 431) ist ein Blei-, Zinn- oder Silberstreifen über einer feuerfesten Unterlage ausgespannt. Für Hochspannungen werden die Schmelzeinsätze meist in Porzellanröhren eingeschlossen und in Kontaktstücke eingeschoben, die an Hochspannungsisolatoren befestigt sind (Fig. 432).

d) Blitzschutzvorrichtungen.

Blitzschutzvorrichtungen haben elektrische Leitungen, um die mit ihnen verbundenen Maschinen und Apparate gegen die Wirkung von Blitzschlägen und sonst auftretenden Überspannungen zu schützen und gleichzeitig einen etwa durch den Blitzschlag eingeleiteten, über die sogenannte *Funkenstrecke* gehenden Maschinenstrom zum Verschwinden zu bringen. Die Funkenstrecke ist eine wenige Millimeter tragende Luftstrecke, wie sie z. B. beim *Hörnerblitzableiter* (Fig. 433) durch die Entfernung der beiden hörnerartig gebogenen Drahtstücke gegeben ist. Der Blitz ist eine sich etwa in dem tausendsten Teil einer Sekunde vollziehende Entladung von schwingendem Charakter. Bei sehr raschen elektrischen Schwingungen erschwert die Selbstinduktion den Stromdurchgang bedeutend. Eine Funkenstrecke wird daher der atmosphärischen Entladung trotz des überaus großen Luftwiderstandes einen besseren Weg bieten als einige Meter spiralförmig aufgerollten Kupferdrahtes mit hoher Selbstinduktion. Diese Tatsache benutzt man, indem man Funkenstrecke

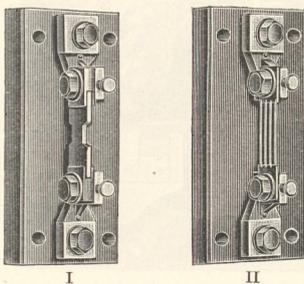


Fig. 431. Schalttafelsicherung. (I mit Zinn-Schmelzstreifen, II mit Silberdraht-Schmelzstreifen.)

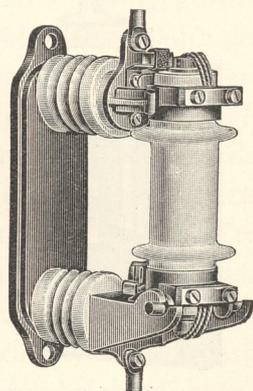


Fig. 432. Hochspannungs-Röhrensicherung (Siemens-Schuckert-Werke).

widerstandes einen besseren Weg bieten als einige Meter spiralförmig aufgerollten Kupferdrahtes mit hoher Selbstinduktion. Diese Tatsache benutzt man, indem man Funkenstrecke

und Selbstinduktion ähnlich wie in Fig. 434 gruppiert; es handelt sich dabei um eine Drehstromanlage. Der Strom wird vom Generator 1 erzeugt und von der Fernleitung 2 fortgeleitet. Vor Austritt aus der Zentrale hat der Strom jedoch in jeder Phase eine *Drosselspule* 3 zu passieren, eine Spule von großer Selbstinduktion bei sehr kleinem Ohmschen Widerstande, letzteres, um dem dauernd durchfließenden Nutzstrom einen möglichst geringen Widerstand zu bieten. Endlich enthält die Anlage drei Hörnerblitzableiter 4, die durch eine gemeinsame Erdplatte 5 geerdet sind. Schlägt der Blitz in die Fernleitung ein, so findet er infolge der in den Drosselspulen auftretenden Selbstinduktion keine Zeit, bis zur Maschine zu gelangen und dort Unheil zu stiften; er überspringt vielmehr den geringen Luftzwischenraum der Hörnerblitzableiter und geht zur Erde, wobei er den Maschinenstrom mitzureißen sucht. Es bildet sich infolgedessen zwischen der Funkenstrecke ein Lichtbogen, der, durch die elektrodynamische Wirkung des Stromes und den aufsteigenden Luftstrom nach oben getrieben, die Hörner entlang wandert (Fig. 435) und schließlich (nach etwa 1 Sekunde) abreißt, da die Maschinenspannung den immer größer werdenden Abstand nicht mehr überwinden kann.

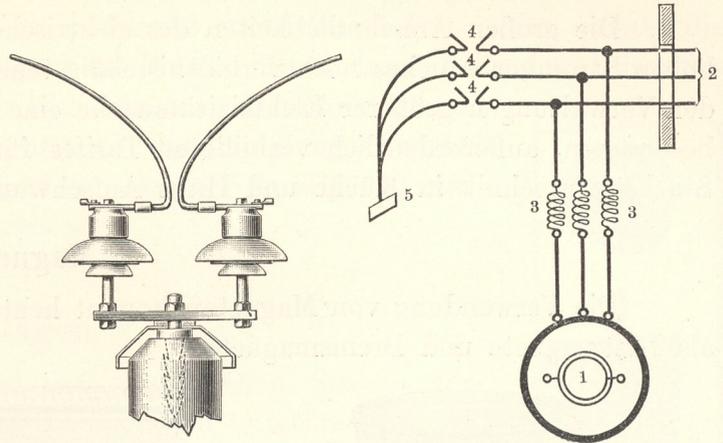


Fig. 433. Hörnerblitzableiter. Fig. 434. Schema einer Blitzschutzanlage.

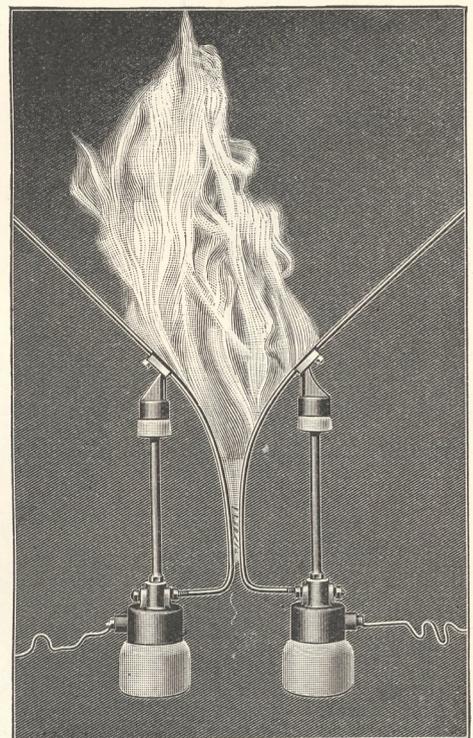


Fig. 435. Hörnerblitzableiter in Tätigkeit.

## 2. Koch- und Heizapparate.

Das elektrische Kochen und Heizen beruht auf der Anwendung Joulescher Wärme. Die *Heizkörper* bestehen gewöhnlich aus Metalldrähten oder -bändern, die auf verschiedene Art mit Isoliermaterial vereinigt sein können. Die Apparate nach dem *Prometheus-System* besitzen Heizkörper aus Glimmerstreifen, die mit einer feinen Edelmetallschicht überzogen sind. Bei den regulierbaren Apparaten sind die Heizkörper in mehrere Gruppen unterteilt, so daß man mittels von außen bedienbarer Kontakte verschiedene Wärmegrade erreichen kann. Belieb ist die dreistufige Regulierung, deren Anordnung Fig. 436 schematisch wiedergibt. Die in der Figur punktiert angedeutete Leitung ist an den einen Pol, die beiden ausgezogenen Leitungen sind an den zweiten Pol anzuschließen. Bei Schaltung I sind beide Heizkörpergruppen parallel geschaltet: es entwickelt sich die stärkste Hitze. Bei Schaltung IIa und IIb ist nur eine Gruppe eingeschaltet; Resultat: mäßige Hitze. Schaltung III ergibt, da beide Gruppen hintereinander geschaltet sind, die geringste Wärmewirkung und dient besonders zum Warmhalten von Speisen. Einen elektrischen Kochtopf zeigt Fig. 437.

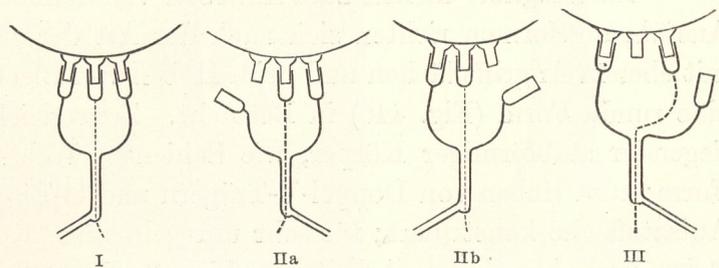


Fig. 436. Schaltung elektrischer Kochapparate.

Einen elektrischen Kochtopf zeigt Fig. 437. Fig. 438 veranschaulicht einen *elektrischen Zimmerofen*. Derartige Öfen sind Widerstandsöfen und enthalten Heizelemente verschiedener Form (Fig. 439).

Die großen Annehmlichkeiten des elektrischen Kochens und Heizens werden infolge des hohen Stromverbrauches noch verhältnismäßig teuer erkauft. Jedoch macht sich neuerdings in den Verwaltungen größerer Elektrizitätswerke eine Richtung bemerkbar, durch Schaffung eines besonderen, außerordentlich verbilligten Tarifes für Koch- und Heizzwecke diesem Zweige der Starkstromtechnik in Küche und Haus Aufschwung zu verschaffen.

### 3. Magnete.

Die Verwendung von Magneten kommt heutzutage immer mehr in Aufnahme, besonders als Lastmagnete und Bremsmagnete.

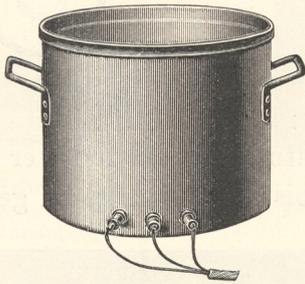


Fig. 437. Elektrischer Kochtopf, System Prometheus.

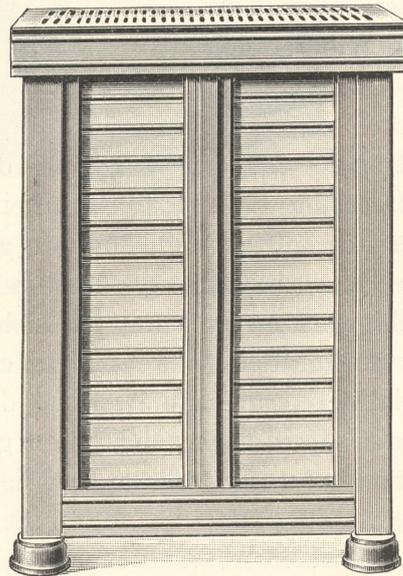


Fig. 438. Elektrischer Zimmerofen, System Prometheus.

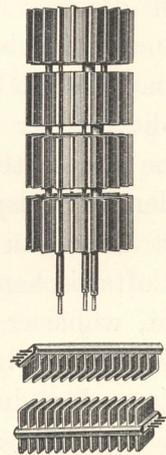


Fig. 439. Heizelemente elektrischer Öfen.

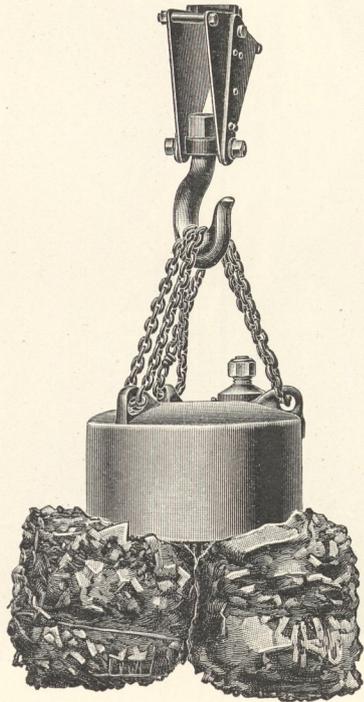


Fig. 440. Lastmagnet (Siemens-Schuckert-Werke).

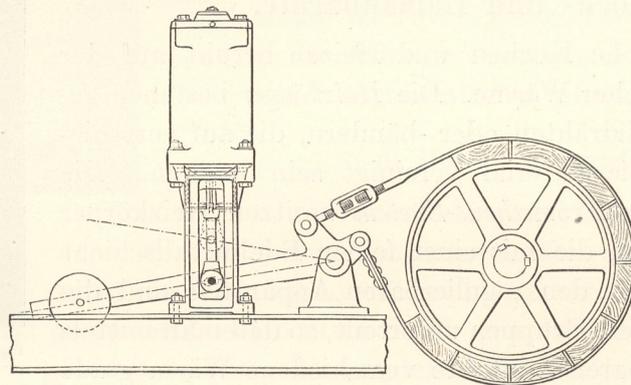


Fig. 441. Bremsmagnet mit Bremsvorrichtung.

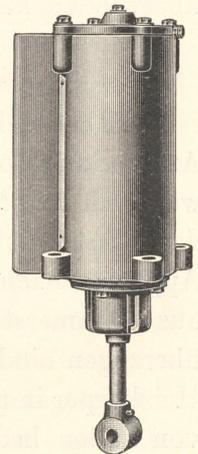


Fig. 442. Bremsmagnet.

**Lastmagnete** dienen zum Anheben von Schmiedeeisen-, Stahl- und Graugußkörpern. Die Ausführungsformen richten sich nach der Art der zu hebenden Stücke. Bei massiven Körpern mit ebenen Angriffsflächen und beim Heben von Blechen und Schweißpaketen kommt gewöhnlich eine runde Form (Fig. 440) in Betracht. Zum gleichzeitigen Anheben mehrerer nebeneinanderliegender stabförmiger Körper, wie Schienen, Walzeisen usw., eignet sich besser eine längliche Form; zum Heben von Doppel-T-Trägern und U-Eisen hat man besondere Magnete mit schmaler Aufsatzfläche konstruiert; für sehr unregelmäßige Körper Magnete mit mehreren verschieblichen Polen (vgl. Abteilung „Arbeitsmaschinen“, Fig. 538, S. 234).

Zum Betriebe der Kranlastmagnete ist Gleichstrom erforderlich. In Drehstromnetzen ist zu ihrer Verwendung die Aufstellung eines Drehstrom-Gleichstromumformers notwendig. Der Energieverbrauch der Magnete ist außerordentlich gering. Beispielsweise verbraucht ein Magnet von 820 kg Tragkraft nur 120 Watt, d. h. etwa 1,1 Ampere bei 110 Volt.

**Bremsmagnete** sind Elektromagnete, die bremsend zu wirken haben. Man richtet die Schaltung meist so ein, daß der erregte Magnet die Bremse lüftet, damit beim Ausbleiben des Stromes die Bremse auf alle Fälle in Tätigkeit tritt (Fig. 441). Damit die Bremse stoßfrei arbeitet, versieht man die Bremsmagnete mit Luftdämpfung. Fig. 442 zeigt einen Bremsmagnet, wie er in Verbindung mit der in Fig. 441 dargestellten Bremsvorrichtung vielfach verwendet wird.

## VI. Schaltanlagen.

Eine Schaltanlage hat die Aufgabe, dem elektrischen Strom vorgeschriebene Bahnen zu weisen und ihn gegebenenfalls zu unterbrechen. Sie enthält die Meßinstrumente zur Kontrolle der Maschinen sowie in größeren Anlagen die zur Bedienung der Maschinen erforderlichen Regulierapparate, endlich die zum Schutze der Leitungen nötigen Schutzvorrichtungen.

Fig. 443 zeigt eine *Motorschalttafel*. Sie besitzt einen Momenthebelausschalter, unverwechselbare Patronensicherungen und Stromzeiger und wird nahe dem zu betätigenden Motor an der Wand befestigt. Derartige Schaltvorrichtungen werden auch als *Schaltkasten* ausgeführt, bei denen ein eisernes Gehäuse alle stromführenden Teile umgibt. In Hochspannungsanlagen werden *Ölschaltkasten* verwendet, bei denen Schalter und Sicherungen unter Öl liegen.

In größeren Betrieben werden einzelne Marmor- oder Schieferfelder mit darauf montierten Apparaten zu einer *Schaltanlage* (Fig. 444) vereinigt. Diese muß übersichtlich sein und sowohl die Sicherheit des Betriebes wie die des Betriebspersonals in jeder Beziehung gewährleisten.

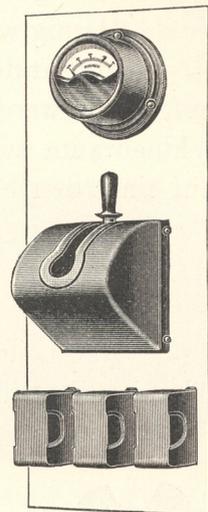


Fig. 443.  
Motorschalttafel.

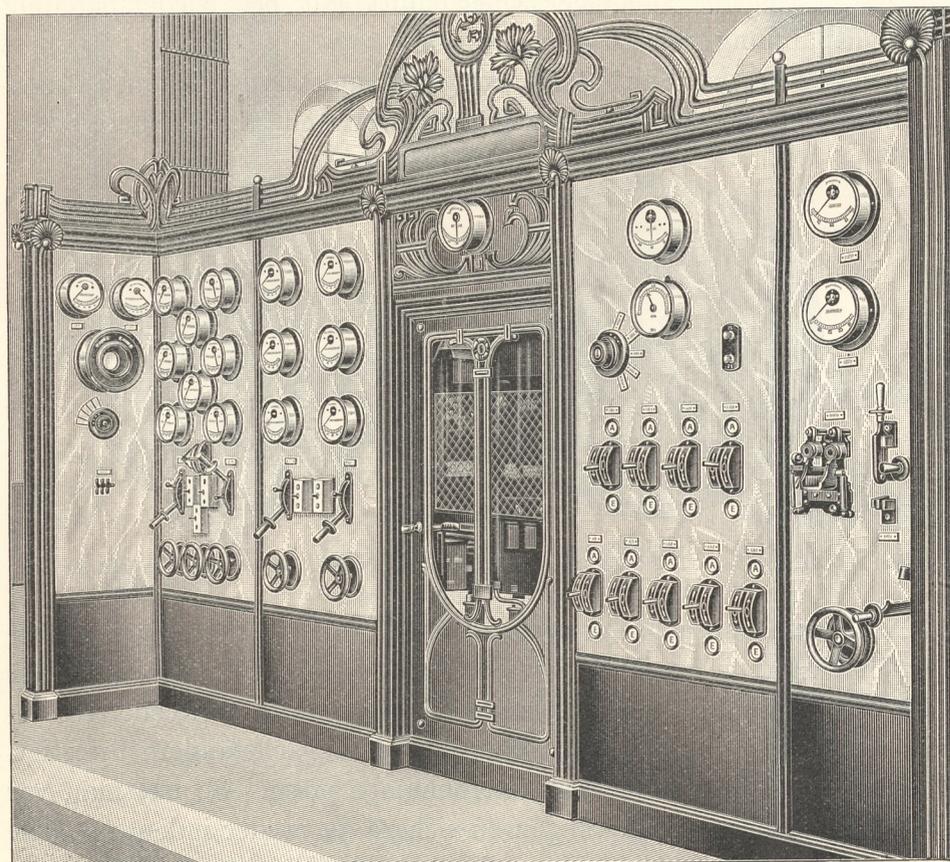


Fig. 444. Schalttafel des Kreis-Elektrizitätswerkes Schwelm (Siemens-Schuckert-Werke).

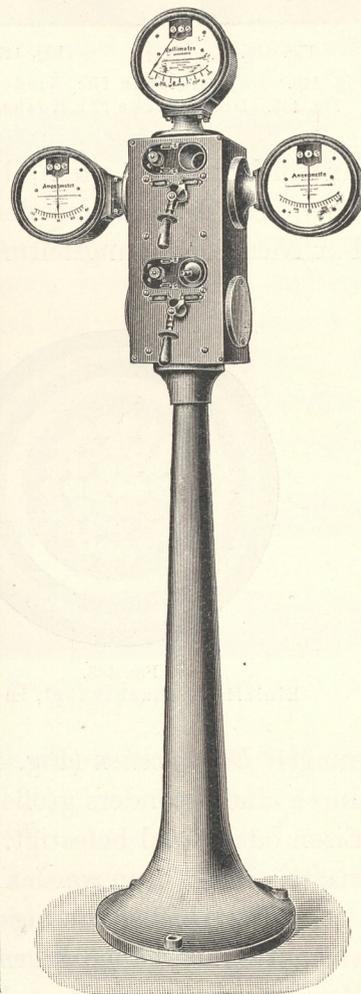


Fig. 445. Schaltsäule (A. E. G.).

Bei Hochspannungsanlagen vermeidet man die Anbringung hochspannungsführender Teile auf der Vorderseite der Schalttafel, wo sie der Berührung während des Betriebes zugänglich sind.

Vielmehr finden vorn nur die an der Niederspannungsseite der Meßtransformatoren angeschlossenen Instrumente und die Schalthebel zur Betätigung der Ölschalter Platz. Das die Hochspannungsapparate tragende Gerüst wird meistens in einem besonderen abgeschlossenen Raum untergebracht.

Häufig wird eine vorteilhafte Anordnung dadurch erreicht, daß man die Apparate und Instrumente für die Generatoren in *Schaltsäulen* (Fig. 445) unterbringt, die so auf dem Schaltpodium aufgestellt werden, daß der Schalttafelwärter bei der Beobachtung der Instrumente dem Maschinenraum zugewendet ist. Die Apparate und Instrumente der Abzweigungen werden dann auf einer den Schaltsäulen gegenüberliegenden Wand untergebracht.

## VII. Leitungen.

Als Leitungsmaterial verwendet man meistens Kupfer, bei hohen Kupferpreisen auch Aluminium. Für die gleiche Stromstärke müssen Aluminiumleitungen wegen des höheren spezifischen Widerstandes wesentlich stärker sein als Kupfer. So entspricht z. B. einer Kupferleitung von 50 qmm Querschnitt eine Aluminiumleitung von 82 qmm. In beiden Fällen ergibt sich der Widerstand von 1000 m Länge zu 0,35 Ohm. Während das Kupfergewicht in diesem Falle jedoch 445 kg beträgt, wiegt das Aluminium nur 214 kg, ist also um mehr als die Hälfte leichter.

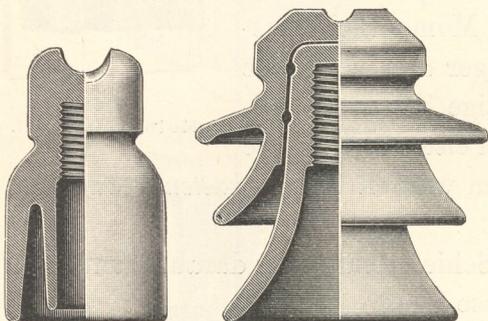


Fig. 446.

Fig. 447.

Fig. 446. Doppelglocke für Niederspannung.  
Fig. 447. Deltaglocke für Hochspannung.

### 1. Freileitungen.

Freileitungen sind aus blankem, hartgezogenem Kupferdraht bestehende oberirdische Leitungen. Als geringster zulässiger Querschnitt gilt bei Niederspannung ein solcher von 6 qmm, bei Hochspannung von 10 qmm.

Die Befestigung der Leitungen an den Leitungsträgern erfolgt mittels *Porzellanisolatoren*. Für Niederspannungsleitungen werden *Doppelglocken* nach Fig. 446 verwendet, für höhere Span-

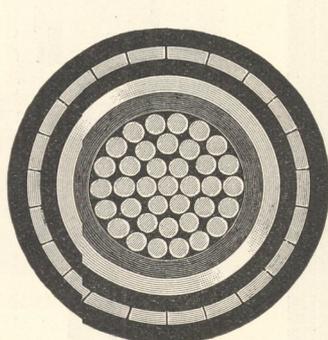


Fig. 448.

Einleiter-Schachtkabel, im Schnitt.

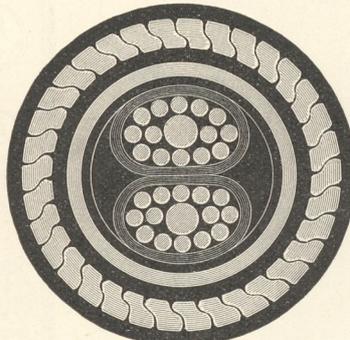


Fig. 449.

Zweileiter-Flußkabel, im Schnitt.

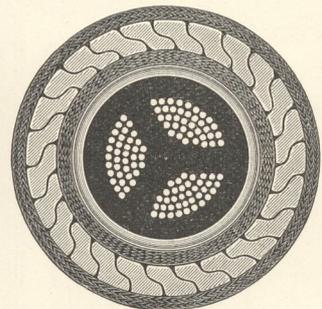


Fig. 450.

Drehstromkabel, im Schnitt.

nungen *Deltaglocken* (Fig. 447), bei denen die einzelnen Glocken weit voneinander abstehen, wodurch eine besonders große Betriebssicherheit erreicht wird. Der Isolator wird auf einer Stütze aus Eisen oder Stahl befestigt. Als Leitungsträger dienen Holzmaste, eiserne Rohrmaste oder Gittermaste. In Städten werden die Leitungen vielfach an Wandkonsolen oder Dachständern befestigt.

Bei Hochspannungsleitungen sind besondere Schutzmaßnahmen nötig. So hat man vor allem Wegübergänge gegen das Herabfallen von Leitungen zu sichern, entweder indem man die Mastlänge bzw. den Mastabstand so wählt, daß ein gerissener Draht außer Reichweite bleibt, oder durch Anbringung von *Fangnetzen* unterhalb der Leitungen.

## 2. Kabel.

In Fällen, wo man von der oberirdischen Verlegung elektrischer Leitungen absehen und die Leitungen im Erdboden oder gar in Seen und Flüssen verlegen muß, verwendet man *Kabel*.

Den stromleitenden Teil eines Starkstromkabels bildet die *Kabelseele*, eine Anzahl blanker Kupferdrähte, die in steilen Schraubenlinien umeinandergelegt sind. Die Seele erhält eine Umspinnung von mit isolierender Masse getränkter Jute. Dann wird das Kabel mit einem nahtlosen Bleimantel umpreßt, und darüber kommt eine aus Eisendrähnen oder Eisenband bestehende *Armatur*. Diese wird mit einer mehrfachen Umspinnung von Faserstoff bedeckt, die letztere mit Isoliermasse getränkt und das Ganze endlich, um das Kleben der Oberfläche zu verhindern, durch ein Bad von Kalkmilch gezogen. Ein solches Kabel zeigt Fig. 448 im Schnitt; es ist ein sogenanntes *Einleiter-Schachtkabel* mit rundem Leiter für 700 Volt Gleichstrom.

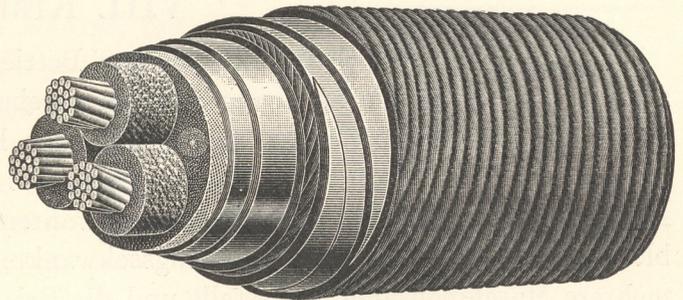


Fig. 451. Verseiltes Dreileiterkabel mit doppeltem Bleimantel und Eisenbandarmierung.

Man unterscheidet blanke Bleikabel, asphaltierte Bleikabel und asphaltierte Bleikabel mit Armatur.

*Blanke Bleikabel* besitzen als einzigen Schutz den Bleimantel; der Bleimantel der *asphaltierten Bleikabel* ist durch eine zwischen zwei neutralen Kompositionsschichten eingebettete Papierumspinnung und eine asphaltierte Juteschicht geschützt. Die *armierten asphaltierten Bleikabel* erhalten außer dem vorerwähnten Schutz eine Armatur aus Bandeisen oder Eisendrähnen und darüber wiederum einen Überzug von asphaltierter Jute, der die Eisenbänder vor dem Verrosten schützen soll.

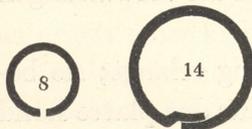
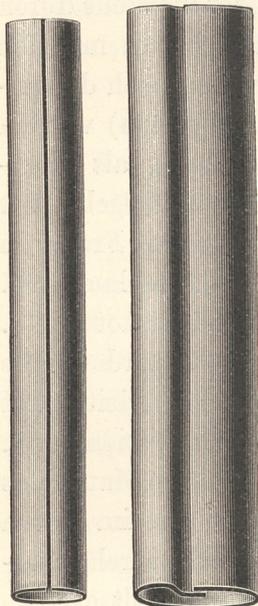


Fig. 453. Stahlrohre, System Peschel.

Nach der Anzahl der im Kabel enthaltenen Leitungen unterscheidet man *Einleiter*-, *Zweileiter*- und *Dreileiterkabel*. Die Leitungen sind miteinander verseilt oder (seltener) konzentrisch zueinander angeordnet. *Zweileiterkabel* verwendet man z. B. für Einphasenwechselstrom, wobei die eine Leitung den Strom hin-, die andere ihn zurückleitet. Fig. 449 zeigt ein solches verseiltes *Zweileiter*-(Fluß-)Kabel im Schnitt, wobei die Leitungen nicht runde, sondern sektorförmige Form haben, eine Anordnung, die eine bessere Ausnutzung des stromführenden Teiles gestattet. Fig. 450 veranschaulicht ein *Drehstromkabel* von Felten & Guil-

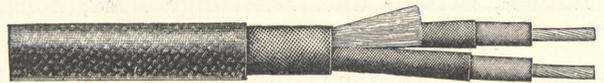


Fig. 452. Gummiaderleitung.

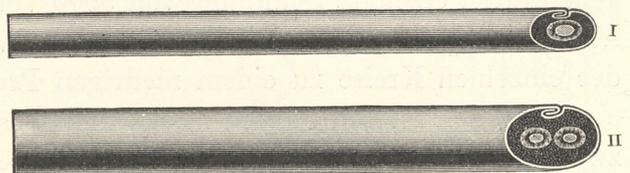


Fig. 454. Rohrdrähte, System Kuhlo. (I Einfachleitung, II Doppelleitung.)

leume in Mülheim a. R. Fig. 451 zeigt ein Kabel mit nach und nach abgenommenen Schichten.

## 3. Leitungen innerhalb von Gebäuden.

In geschlossenen Räumen gelangen hauptsächlich isolierte Leitungen zur Verwendung (Fig. 452). Ihre Verlegungsart ist eine sehr verschiedene. Wo der Anblick der offen verlegten Leitung nicht stört, genügt die Verlegung auf Isolierrollen. Viel häufiger ist jedoch die Verwendung von Rohren, in die der isolierte Leiter eingezogen wird. Diese Verlegungsart schützt am besten gegen mechanische Beschädigungen und gestattet eine unauffällige Verlegung. Die Rohre können aus Hartgummi, aus Papier mit dünnem Metallmantel bzw. starkem Eisenmantel, oder ohne isolierende Einlage einfach aus Metall bestehen. Zu Rohren der letzteren Art gehören *Stahlrohre*

*System Peschel* (Fig. 453). Außerdem verwendet man, als unauffälligste Verlegungsart, *Rohrdrähte* (Fig. 454) aus Einfach- oder Mehrfachgummiaderleitungen, die mit einem Schutzmantel aus Messing oder verbleitem Eisen dicht umpreßt sind. Der Metallmantel der Rohrdrähte kann als Rückleiter benutzt werden, so daß bei Verwendung dieses Systems eine bedeutende Ersparnis an Leitungsmaterial erzielt wird.

## VIII. Kraftstationen.

In der Kraftstation sind alle zum Betriebe einer elektrischen Anlage erforderlichen Maschinen und Apparate zu einem Ganzen vereinigt.

Die elektrische Energie der Kraftstation kann von einem oder mehreren Maschinensätzen geliefert werden. Damit im ersteren Falle eine möglichst gute wirtschaftliche Ausnutzung der Anlage erreicht wird, muß die Belastung während der ganzen Betriebszeit annähernd gleichgroß bleiben. Treten wesentliche Belastungsschwankungen für längere Zeiträume ein, so werden besser mehrere Maschinensätze aufgestellt und die Belastung so verteilt, daß jeder Maschinensatz möglichst voll ausgenutzt wird. Bei einer derartigen Anordnung ist auch die nötige Reserve vorhanden, falls einmal ein Maschinensatz infolge notwendig werdender Reparaturen u. dgl. stillgesetzt werden muß. In größeren Kraftstationen werden stets mehrere Maschinensätze verwendet.

Die Verbindung zwischen den Dynamomaschinen und der Schalttafel findet meistens durch Kabel statt. Bei Vorhandensein mehrerer Maschinen werden diese durch Ausschalter mit den hinter der Schalttafel befindlichen *Sammelschienen* verbunden. Von diesen zweigen sich die einzelnen Leitungen nach den Versorgungsgebieten ab. Auf der Schalttafel (vgl. Fig. 444) werden alle zum geregelten Betriebe der Anlage erforderlichen Instrumente und Apparate, als Spannungs-, Strom- und Leistungszeiger, Schalter, Sicherungen, Widerstände usw., untergebracht.

Als Kraftmaschinen kommen hauptsächlich Dampf- und Wasserkraftmaschinen in Frage; in neuerer Zeit werden Dampfturbinen viel verwendet, für kleinere Anlagen auch Gas- und Dieselmotoren.

Die billigste Antriebskraft bleibt das Wasser (vgl. Abteilung „Wind- und Wassermotoren“). Die Ausnutzung der Wasserkräfte hat denn auch im letzten Jahrzehnt eine außerordentliche Steigerung erfahren. Selbst in die kleinsten Gebirgsortschaften hat sich die Elektrizität auf diese Weise Eingang verschafft. Der Bau von Talsperren nimmt immer größere Dimensionen an. In der Urfttalsperre-Heimbach, südöstlich von Aachen, wird z. B. durch eine gewaltige Mauer das Tal der Urft kurz vor der Mündung in die Ruhr abgesperrt und das Gefälle für eine im ersten Ausbau auf 12 000 Pferdestärken bemessene Kraftstation ausgenutzt. Die in sechs Drehstromgeneratoren erzeugte Spannung von 5000 Volt wird in Öltransformatoren auf 35 000 Volt erhöht. Mit dieser Spannung wird die Energie in das Verteilungsgebiet geleitet, wo sie an die Verwaltungen der einzelnen Kreise zu einem niedrigen Preise abgegeben wird.

In den letzten Jahren haben die *Überlandzentralen* eine große Bedeutung erlangt; sie bezwecken eine Zentralisierung elektrischer Energie zu Licht- und Kraftzwecken für das platte Land unter Einschluß kleinerer Städte.

## IX. Kraftübertragung und Kraftverteilung.

### 1. Kraftübertragung.

Bei der *elektrischen Kraftübertragung* wird die an einem Ort erzeugte elektrische Energie zu einem oder mehreren Arbeitsorten geleitet, um dort wieder verbraucht zu werden.

Mit der Entfernung des Erzeugungsortes vom Verbrauchsort wachsen die Kosten für die die Kraftübertragung vermittelnden Leitungen. Infolgedessen sucht man den Leitungsquerschnitt möglichst zu verringern, was aber voraussetzt, daß auch die zu übertragende Stromstärke entsprechend niedrig gewählt wird. Da sich nun die elektrische Leistung als Produkt aus Spannung und Stromstärke bestimmt, ist man, um mit niedrigen Stromstärken zu arbeiten, an hohe

Spannungen gebunden. Es ist dies der einzige Weg, größere Energiemengen auf weite Entfernung zu übertragen. Deshalb ist zur Kraftübertragung Drehstrom viel geeigneter als Gleichstrom. Denn während man bei Gleichstrom nur selten über Spannungen von 1000 Volt hinausgeht, kann man bei Drehstrom durch Verwendung von Transformatoren Spannungen von 10 000 und 20 000 Volt und darüber erreichen. Beispielsweise werden bei der von den Siemens-Schuckert-Werken gebauten Anlage von Molinar am Flusse Jucar 30 000 PS nach Madrid, Valencia, Cartagena und Alcoy übertragen, wobei eine Spannung von 66 000 Volt angewendet wird. Die 240 km lange Leitung nach Madrid, die mit  $2 \times 3$  Kupferdrähten von 50 qmm Querschnitt projektiert wurde, hat allein ein Gewicht von etwa 650 t. Ist auch die Spannung von 66 000 Volt außerordentlich hoch, so ist sie doch nicht die äußerste, die für Hochspannungsanlagen in Frage kommt. Neuerdings wurde für die Kraftübertragungsanlage Riesa-Gröba der Aktiengesellschaft Lauchhammer eine Spannung von 110 000 Volt gewählt.

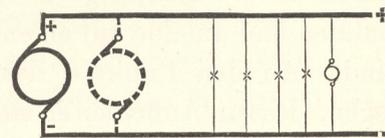


Fig. 455. Zweileitersystem.

## 2. Kraftverteilung.

Während die Kraftübertragung elektrische Energie von der Erzeugungsstelle zur Verbrauchsstelle zu leiten hat, fällt der *Kraftverteilung* die Aufgabe zu, die Energie zweckmäßig zu verteilen. Dies kann sowohl durch Gleichstrom wie durch Wechselstrom geschehen.

### a) Gleichstromsysteme.

Für Einzelanlagen und städtische Zentralen kleineren Umfanges wird fast durchgängig Gleichstrom verwendet. Als Verteilungssysteme kommen besonders das Zweileiter- und das Dreileitersystem in Frage.

a) **Zweileitersystem.** Dieses (Fig. 455) ist das meistverwendete Verteilungssystem. Die gebräuchlichsten Spannungen betragen 110, 220, 440 und 500 Volt. Sämtliche Stromverbraucher, als Lampen, Motoren, Heizkörper usw., werden parallel geschaltet, so daß, wenn man von dem in den Leitungen auftretenden Spannungsabfall absieht, an den Polen der Stromverbraucher stets die gleiche Spannung herrscht. Dabei ist eine Lampe bzw. ein Motor unabhängig von dem anderen, kann also nach Belieben ein- und ausgeschaltet werden. Sind in der Kraftstation mehrere Maschinen vorhanden, so werden diese ebenfalls parallel geschaltet. Fig. 456 veranschaulicht das Zweileiternetz einer kleinen Ortschaft. Die Querschnitte der Leitungen stufen sich immer mehr ab, je nachdem sie in der Hauptstraße, in kleineren Nebenstraßen oder endlich in Häusern verlegt werden.

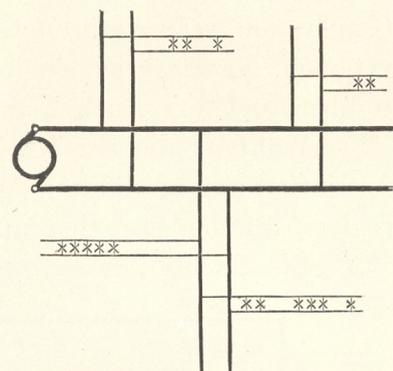


Fig. 456. Zweileiternetz.

β) **Dreileitersystem.** Dieses ist eine Kombination von zwei Zweileitersystemen, deren Stromerzeuger hintereinander geschaltet sind (Fig. 457). Haben die Maschinen je 110 Volt Spannung, so herrscht zwischen ihren äußeren Klemmen eine Spannung von 220 Volt. Die beiden inneren Leitungen werden zu einem gemeinsamen *Mittelleiter* vereinigt, den man auch *Nulleiter* nennt, weil er bei gleichmäßiger Belastung der beiden Netzhälften stromlos ist; bei ungleicher Belastung vermittelt er den Ausgleich der Ströme. Er erhält gewöhnlich nur den halben Querschnitt der *Außenleiter*. Da die günstigste Spannung der Glühlampen 110 Volt beträgt, so werden diese zwischen den Null- und einen Außenleiter eingeschaltet. Motoren hingegen legt man mit beiden Polen an die Außenleiter, da im anderen Falle das Netz zu ungleich belastet würde.

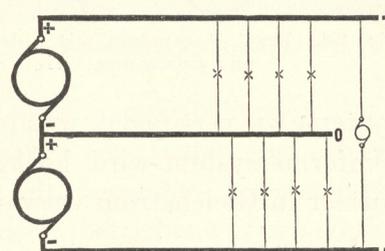


Fig. 457. Dreileitersystem mit zwei Maschinen.

Das Dreileitersystem läßt sich auch mit nur einer Maschine betreiben; die Spannungsteilung erfolgt dann durch eine Akkumulatorenbatterie oder durch einen besonderen *Spannungsteiler*.

Im ersten Falle (Fig. 458) teilt man die Akkumulatorenbatterie, die aus einer der Maschinen- spannung entsprechenden Elementenzahl bestehen muß, in zwei gleichgroße Teile 1 und 2; den positiven Pol der einen Hälfte 1 verbindet man mit dem positiven, den negativen Pol der anderen Hälfte 2 mit dem negativen Pol einer Nebenschlußmaschine 3 und legt die beiden noch freien Pole der Batteriehälften an die Ausgleichsleitung. — Der zweite Fall (Fig. 459) sieht eine *Dreileitermaschine* 1 vor. Diese unterscheidet sich von einer normalen Maschine nur durch zwei Schleifringe 2 und 3, die mit zwei diametralen Punkten der Ankerwicklung verbunden und an eine auf einen Eisenring aufgewickelte Spule, den Spannungsteiler 4, angeschlossen sind. An den Punkt 0 des Spannungsteilers kann man den Nulleiter eines Dreileiternetzes legen, dessen Außenleiter mit den Klemmen der Maschine verbunden sind. Während nun bei ungleicher Belastung der Netzhälften die vom Nulleiter geführten Gleichströme über den Spannungsteiler ungehindert zum Anker zurückfließen, d. h. sich ausgleichen können, ist den in den Ankerspulen erzeugten Wechselströmen ein derartiger Ausgleich infolge der hohen, im Spannungsteiler auftretenden Selbstinduktion unmöglich gemacht.

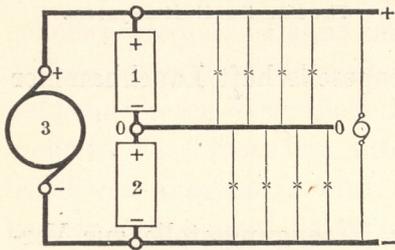


Fig. 458. Dreileitersystem mit einer Maschine und Akkumulatorenbatterie.

### b) Drehstromsystem.

Von den Wechselstromsystemen ist vor allem das Drehstromsystem sehr verbreitet. Es unterscheidet sich im Prinzip nicht von den Gleichstromsystemen, gestattet jedoch infolge der Verwendung von Transformatoren, weitere Entfernungen zu überbrücken. Auch hier werden Stromerzeuger und Stromverbraucher parallel geschaltet.

Während die zur Kraftübertragung verwendete Hochspannung jeden mit Rücksicht auf die Entfernung gewählten Wert annehmen kann, bevorzugt man zur Kraftverteilung auf der Niederspannungsseite Spannungen von 120, 220 und 500 Volt.

Ein Nachteil dieses Systems liegt darin, daß, da die Verwendung von Akkumulatoren ausgeschlossen ist, der Betrieb in der Zentrale unter Umständen nur einer einzigen Lampe wegen die ganze Nacht

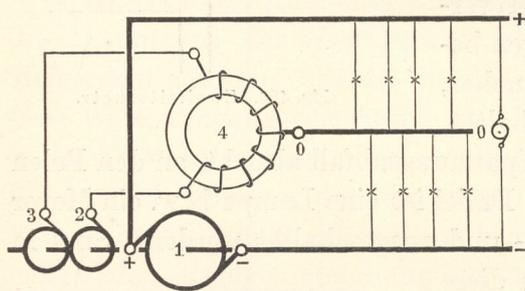


Fig. 459. Dreileitersystem mit einer Maschine und Spannungsteiler.

aufrecht erhalten werden muß; ein weiterer Nachteil darin, daß die Transformatoren auch dann Energie verbrauchen, wenn sie sekundär nicht belastet sind, d. h. *leerlaufen*. Hierdurch geht ein nicht unbeträchtlicher Teil der in der Zentrale erzeugten Energie nutzlos verloren.

### c) Kombiniertes System.

Um die Vorteile der Gleichstrom- und Drehstromsysteme zu vereinigen, wendet man kombinierte Systeme an. Bei dem Drehstrom-Gleichstrom-Umformersystem wird hochgespannter Drehstrom zu *Unterstationen* geführt, wo er durch Umformer in Gleichstrom verwandelt wird, der nun die Verwendung von Akkumulatoren gestattet.

## X. Verwendungsgebiete der Elektromotoren.

Der Elektromotor ist unzweifelhaft die vollkommenste Antriebsmaschine der Gegenwart. Er ist stets betriebsbereit und durch einen äußerst einfachen Schaltmechanismus zu betätigen; er läuft mit Last an und gestattet eine weitgehende Änderung seiner Drehzahl. Er bedarf fast keiner Bedienung und Wartung und zeigt in allen Teilen größte Einfachheit; er benötigt zur Aufstellung nur einen geringen Raum und läßt sich selbst an Decken und Wänden montieren. Diese Vorzüge haben dem Elektromotor auf fast allen Gebieten des modernen Wirtschaftslebens Eingang verschafft und ihn für weite Kreise der Industrie unentbehrlich gemacht.

Der Bergbau hat dem Elektromotor über und unter Tage eine dominierende Stellung

eingerräumt; der elektrische Antrieb von Fördermaschinen, Grubenventilatoren, Gesteinsbohrmaschinen und Wasserhaltungen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Ebenso vielseitige Verwendung hat der Elektromotor in Hütten- und Walzwerken gefunden, z. B. als Antrieb großer Walzenstraßen.

Besonders geeignet ist der elektrische Antrieb für Vorrichtungen, die mit häufigen Unterbrechungen arbeiten, und für solche, die großen Kraftschwankungen unterliegen, Bedingungen, wie sie beim Betriebe von Hebezeugen und Transportvorrichtungen gegeben sind. Hier ist der Antrieb durch Dampfmaschinen oder Explosionsmotoren weniger rentabel und wegen der großen Belastungsschwankungen und starken Überlastungen oft nicht durchführbar. Die schweren Laufkrane in Maschinenfabriken, alle neueren Krane in Hafenanlagen werden elektrisch betätigt.

An der gegenwärtigen Verbreitung der Personen- und Lastenaufzüge hat die Einführung des elektrischen Betriebes wesentlichen Anteil. Der Elektromotor zeigt sich in bezug auf Einfachheit und Wirtschaftlichkeit den früher verwendeten Betriebsmitteln erheblich überlegen. Dabei sind die Steuerapparate und Sicherungsvorrichtungen so zuverlässig und einfach in der Handhabung, daß jedermann einen Fahrstuhl selbst bedienen kann.

Die früher übliche Art der Kraftübertragung mittels Transmissionen wird ihrer vielen Nachteile wegen immer mehr verlassen. Neben einem großen Anlagekapital erfordern derartige Betriebe unverhältnismäßig hohe Unterhaltungskosten. In den vielen Lagern werden durch Reibung große Energiemengen nutzlos vergeudet; Ölverbrauch und Riemenverschleiß sind bedeutend. Auch macht eine größere Transmissionsanlage den Betrieb unübersichtlich und verdunkelt die Arbeitsräume. Durch den elektrischen Antrieb werden diese Übelstände beseitigt. In größeren Betrieben wird daher häufig die mechanische Energie der Dampfmaschine in elektrische verwandelt und ohne erhebliche Kraftverluste dem für jede Arbeitsmaschine vorgesehenen Einzelmotor zugeführt.

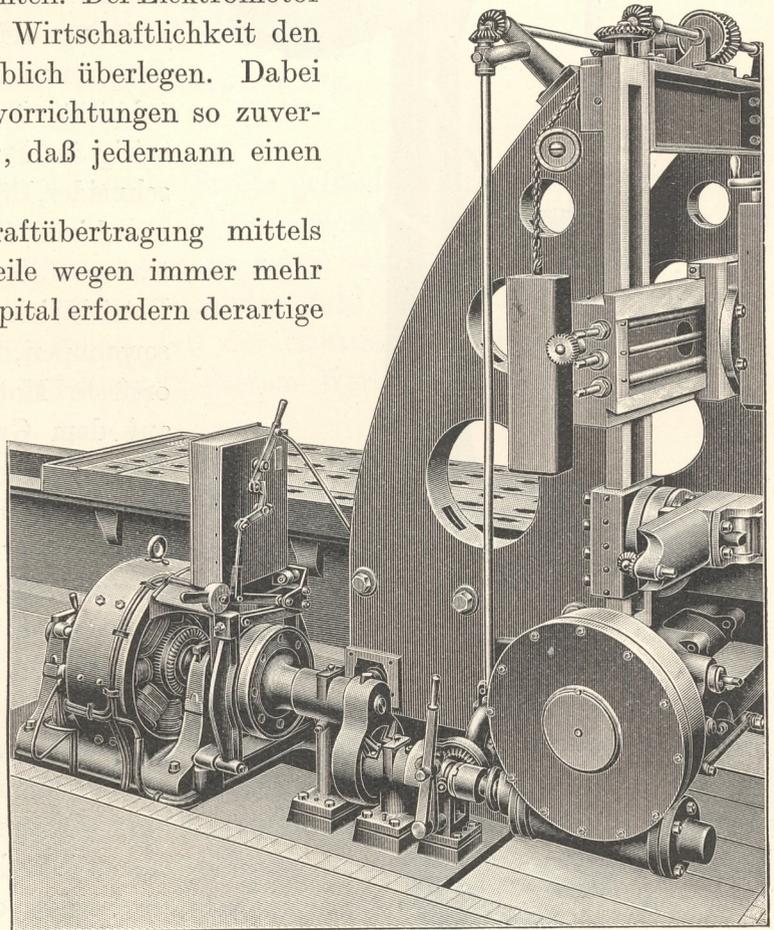


Fig. 460. Hobelmaschine mit direktem elektrischen Antrieb.

Fig. 460 stellt eine *Hobelmaschine* mit direktem elektrischen Antrieb dar und läßt die einzelnen Zubehörteile, wie Schneckengetriebe, Schalt- und Bremsvorrichtung, deutlich erkennen. Die Bedienung erfolgt von der anderen Seite der Maschine, wo sich zu diesem Zwecke ein besonders konstruierter Umsteuerapparat befindet. Fig. 461 veranschaulicht eine elektrisch betriebene *Tisch-Bohrmaschine* mit beweglicher Bohrspindel.

Vom gesundheitlichen Standpunkt außerordentlich wichtig sind die elektrischen *Kleinventilatoren*, wie man sie zur Lüftung in Wohnräumen, Hörsälen, Krankenhäusern, Werkstätten usw. verwendet. Sie werden als Tisch-, Wand- oder Deckenventilatoren ausgeführt.

Sehr verbreitet ist der Elektromotor im Druckereibetriebe. Die Regelung der Umlaufzahl ließ sich bei dem früher üblichen Transmissionsbetrieb nur umständlich und in wenigen Abstufungen vornehmen, wogegen die elektrische Regulierung auf einfache Weise durch Vorschalten von Widerständen bzw. durch Feldschwächung erfolgt.

Besondere Vorzüge in hygienischer Beziehung bietet die Reinigung von Wohn- und Arbeitsräumen durch elektrisch betriebene *Staubsaugeapparate*, sogenannte Entstäubungspumpen, die,

entweder fahrbar oder ortfest, durch eine Schlauch- oder Rohrleitung mit einem Staubsauger verbunden sind. Die Pumpe saugt durch die Öffnung des Staubsaugers einen kräftigen Luftstrom hindurch, der die auf seinem Wege lagernden Staubteile mit sich reißt. Der Staub wird von dem in der Pumpe zirkulierenden Wasser aufgenommen und auf diese Weise unschädlich gemacht.

Die großen Vorteile, welche die Einführung des elektrischen Betriebes den industriellen Unternehmungen brachte, hat sich auch die Landwirtschaft gesichert. Der Landwirt erzielt durch Verwendung des Elektromotors eine bessere Einteilung und Ausnutzung der Arbeitszeit, eine Ersparnis an Leuten, Gespannen und Zeit und somit eine bessere Rentabilität. Für diejenigen Maschinen, die nicht gleichzeitig im Betriebe sind, wie Schrotmühlen, Rübenschnneider, Düngermühlen, Häckselmaschinen, Molkereimaschinen, Schafscheren usw., richtet man die Motoren transportabel ein; dagegen sind für Maschinen, deren Betrieb sich über den ganzen Tag erstreckt, wie Wasserpumpen, Kühlanlagen, Brennermaschinen usw., ortfeste Motoren am Platze. Für kleinere Arbeiten auf dem Gutshofe genügen in der Regel tragbare Motoren, sogenannte *Motortragen* (Fig. 462), während für den Antrieb von Dreschkasten fahrbare Motoren verwendet werden, die den Ausbruch des Getreides je nach den Witterungsverhältnissen auf freiem Felde, in der Feldscheune oder auf dem Gutshofe ermöglichen.

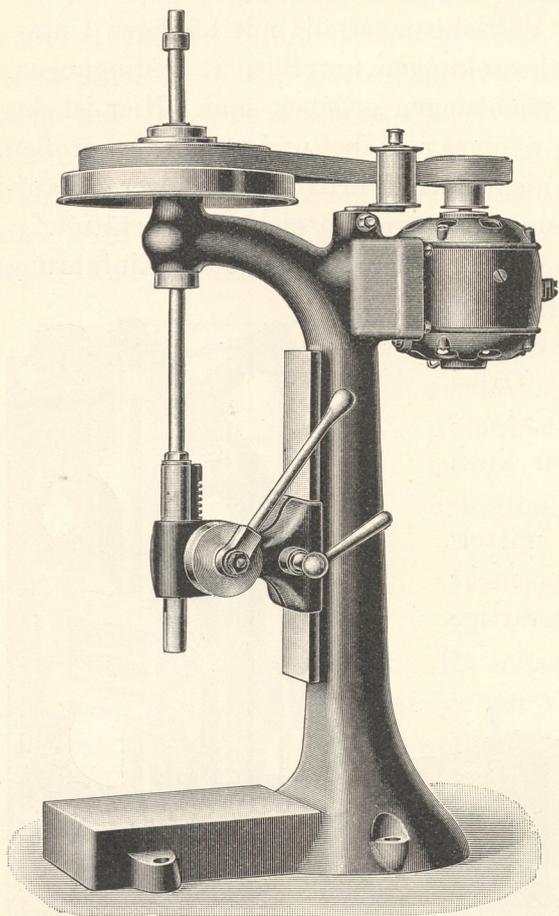


Fig. 461. Tisch-Bohrmaschine mit elektrischem Antrieb.

Zu den landwirtschaftlichen Arbeiten, welche die größten Ansprüche an Mensch und Vieh stellen, gehört das Pflügen. Es hat sich daher bei der Bestellung schweren Bodens und beim tiefen Pflügen frühzeitig der Dampfplug Eingang verschafft. Durch den Bau der Überlandzentralen ist es möglich geworden, den elektrischen Strom auch zum Betriebe größerer Pflüge zu benutzen. Hierdurch läßt sich nicht nur gegebenenfalls der Dampfplug vollständig ersetzen, sondern es können nunmehr auch solche Arbeiten (wie z. B. Schälen, Eggen, Walzen) maschinell und vor allem wirtschaftlich vorgenommen werden, für die der schwere Dampfplug ungeeignet ist. Der für das Pflügen verwendete Strom bildet andererseits eine günstige Belastung für das Elektrizitätswerk und trägt mithin wesentlich dazu bei, den Betrieb des Werkes rentabler zu machen.

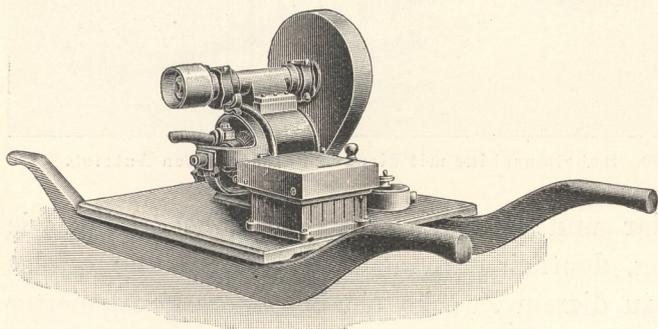


Fig. 462. Motortrage (Bergmann-Elektrizitätswerke).

für das Pflügen verwendete Strom bildet andererseits eine günstige Belastung für das Elektrizitätswerk und trägt mithin wesentlich dazu bei, den Betrieb des Werkes rentabler zu machen.