

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

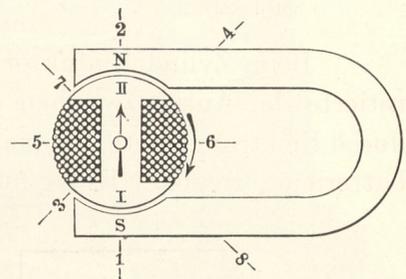


Fig. 316. Zylinderinduktor.

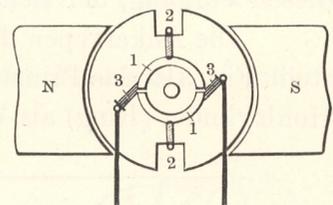


Fig. 317. Prinzip des Kommutators.

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.

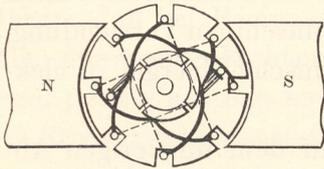


Fig. 318. Trommelanker (Achtnuten-Anker).

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

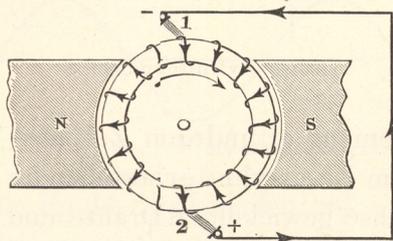


Fig. 319. Prinzip des Ringankers.

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

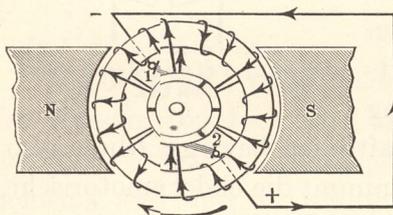


Fig. 320. Ringanker.

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.

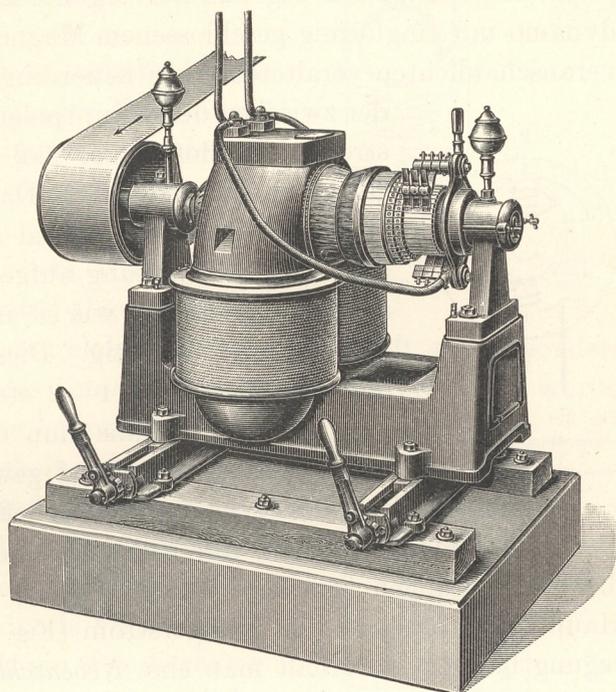


Fig. 321. Gleichstromdynamo älterer Bauart (Siemens & Halske).

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.

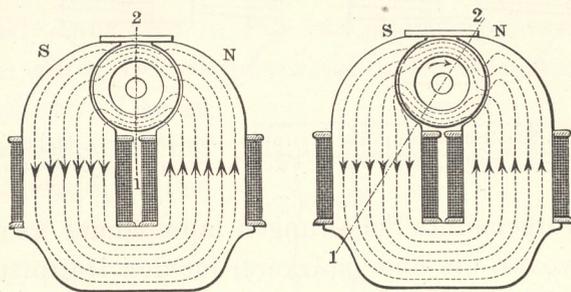


Fig. 322. Kraftlinienbild der Maschine Fig. 321 bei stromlosem Anker. Fig. 323. Kraftlinienbild der Maschine Fig. 321 bei Belastung.

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 (*Ankerückwirkung*) 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.

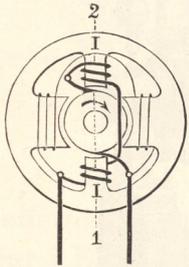


Fig. 324. Prinzip der Wendepole.

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

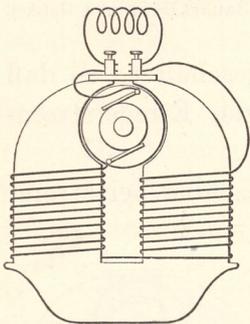


Fig. 325.

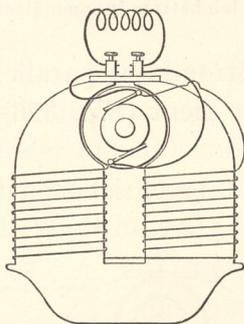


Fig. 326.

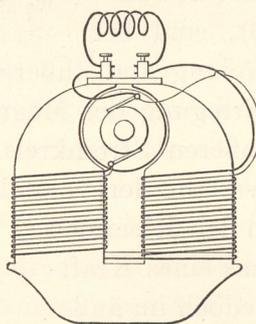


Fig. 327.

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

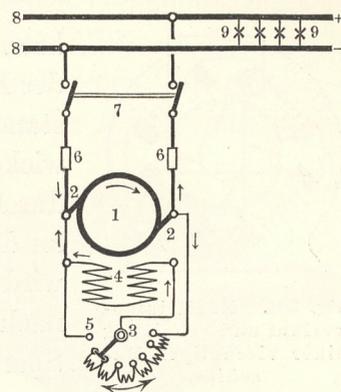


Fig. 328. Schaltungsschema der Nebenschlußmaschine.

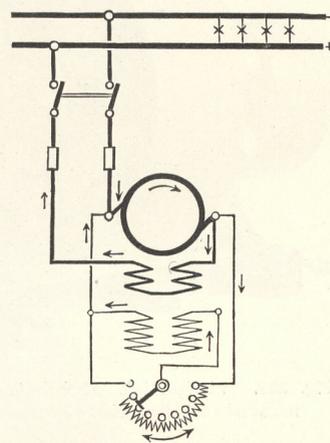


Fig. 329. Schaltungsschema der Compoundmaschine.

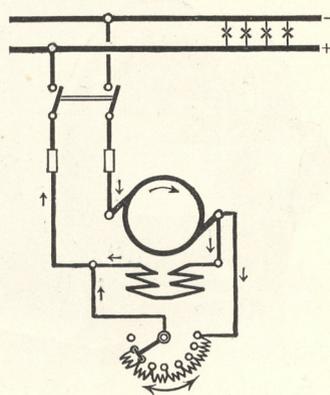


Fig. 330. Schaltungsschema der Hauptstrommaschine.

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.

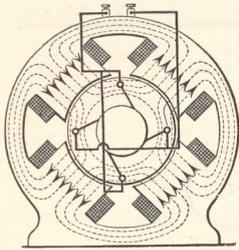


Fig. 331. Kraftlinienverlauf und Schaltung einer vierpoligen Maschine.

Die einer Dynamomaschine entnommene elektrische Leistung ergibt sich als das Produkt aus Klemmenspannung (Volt) und Stromstärke (Ampere) in Watt bzw. Kilowatt. Sie wird erhalten

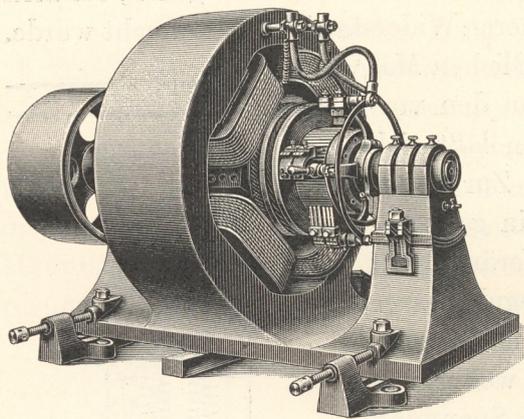


Fig. 332. Vierpolige Gleichstrom-Nebenschlußmaschine (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

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.

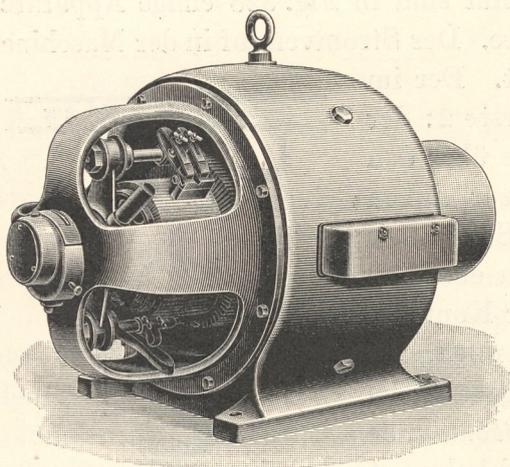


Fig. 333. Gleichstrommaschine für Riemenantrieb in offener Ausführung (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

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

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-

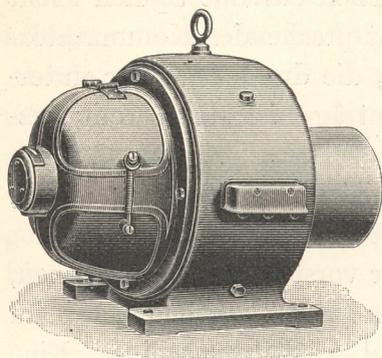


Fig. 334.

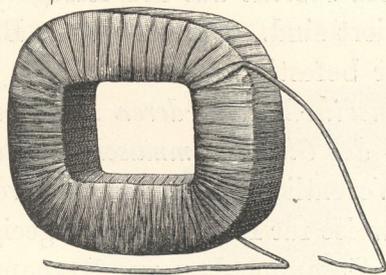


Fig. 335.

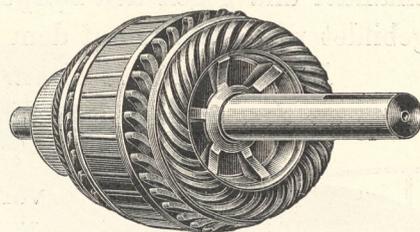


Fig. 336.

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

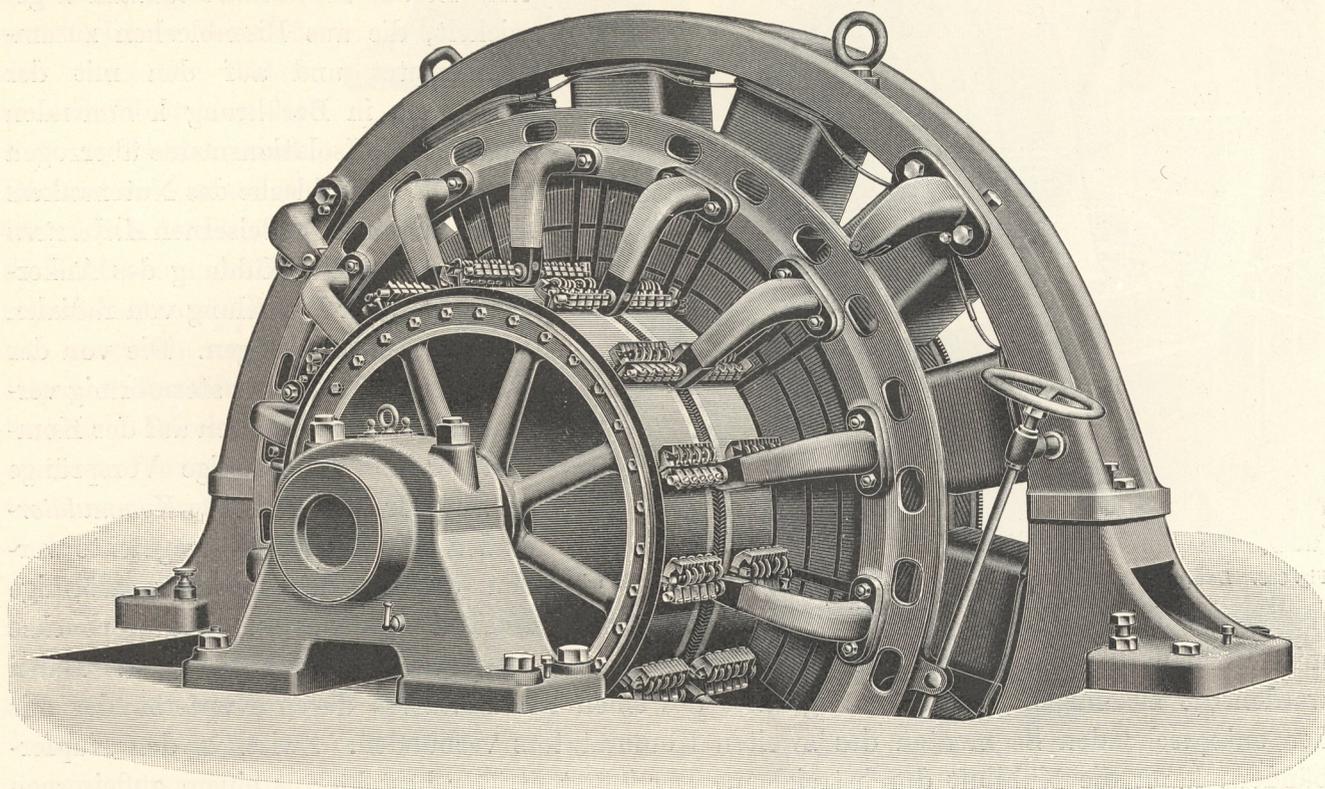


Fig. 337. Langsamlaufender Gleichstromgenerator für Zusammenbau mit der Antriebsmaschine (Siemens-Schuckert-Werke).

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.

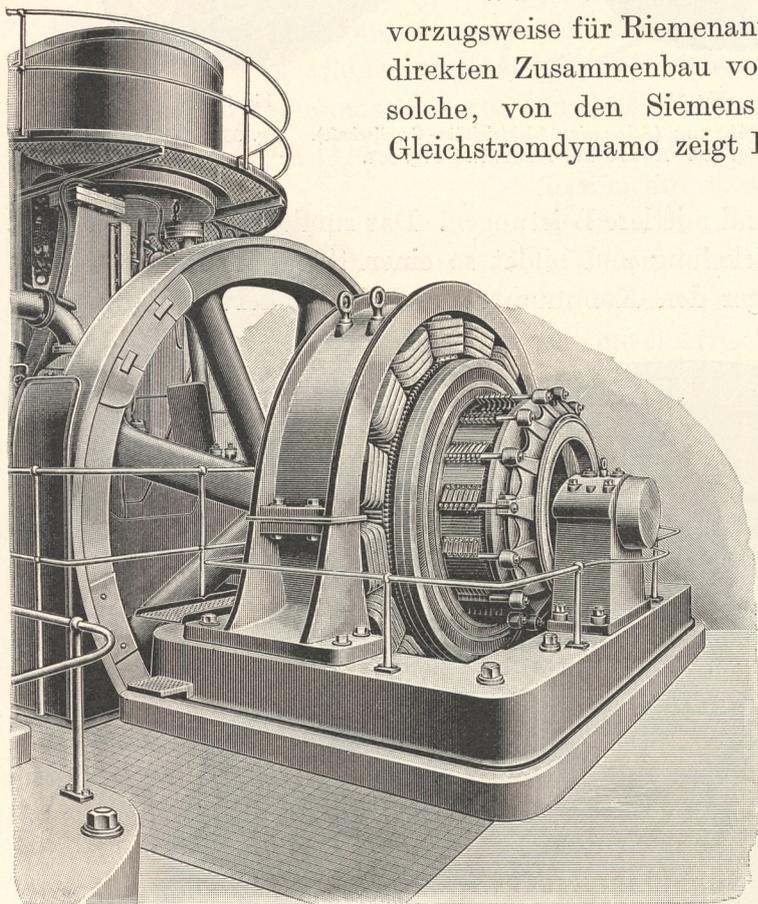


Fig. 338. Langsamlaufender Gleichstromgenerator, direkt gekuppelt mit Dampfmaschine (Bergmann-Elektrizitätswerke).

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 aufgezoogene 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

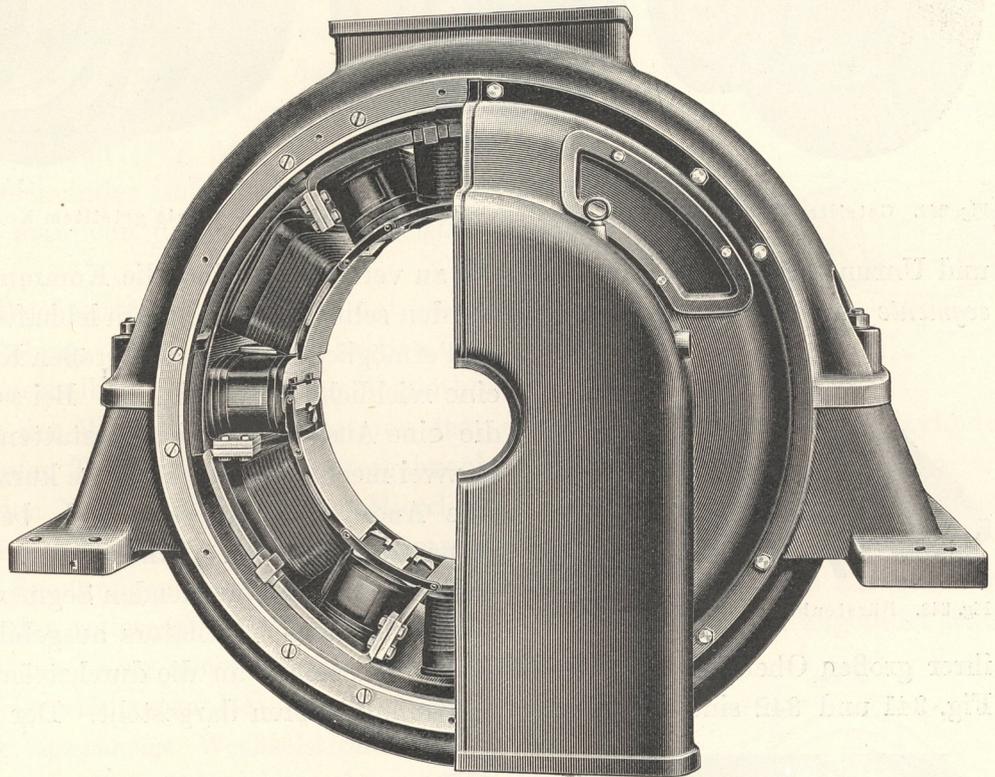


Fig. 339. Magnetgestell und Gehäuse eines Gleichstrom-Turbogenerators mit Wendepolen.

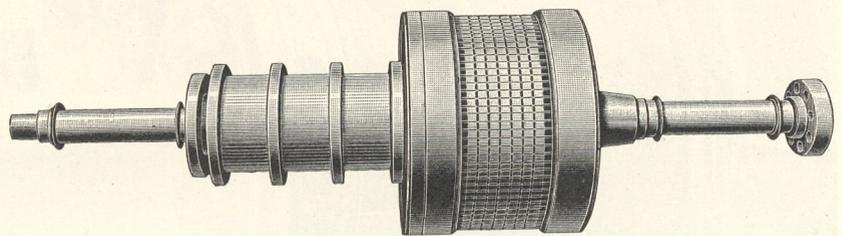


Fig. 340. Anker für 1200 KW.

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

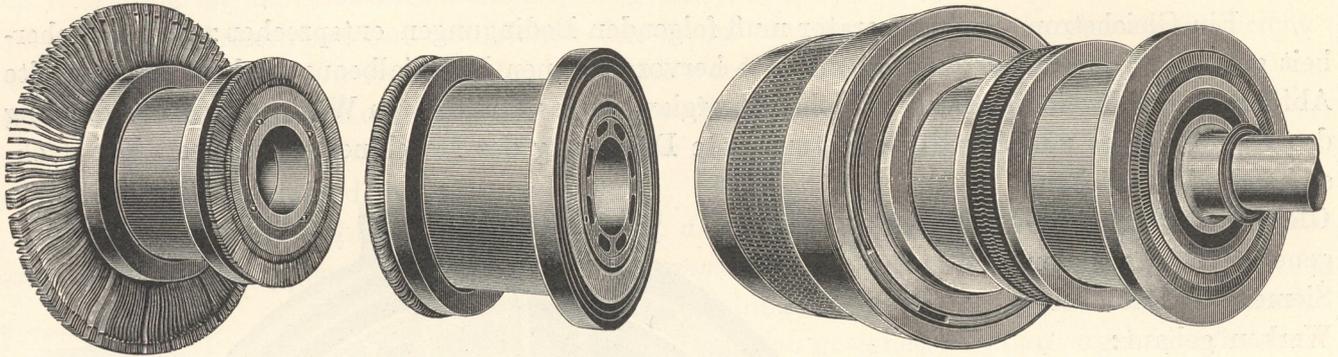


Fig. 341.

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

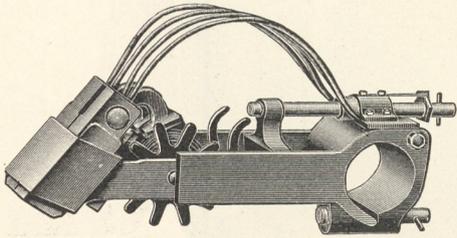


Fig. 343. Bürstenhalter mit Kohlebürsten.

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

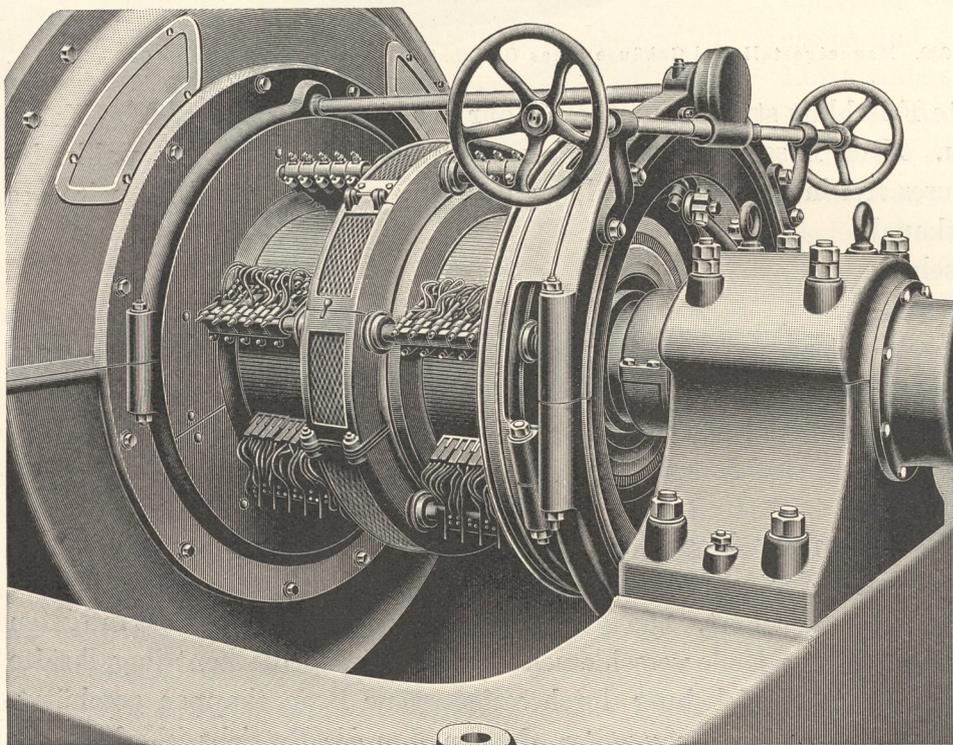


Fig. 344. Geteilter Kommutator mit Kohlebürstenbesetzung.

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 Tragrings 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

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 Bürsten-

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 (2×110) und 440 (2×220) 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.

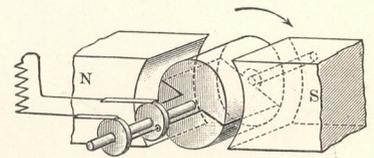


Fig. 345. Prinzip der Wechselstrommaschine.

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.

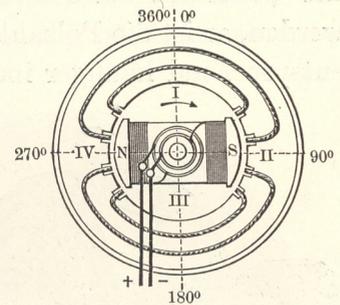


Fig. 346. Einphasengenerator.

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° 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° Drehung, und fällt dann wieder auf Null. Der Nordpol ist jetzt bei III angelangt, hat sich also um 180° 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° Drehung, erreicht die Spannung ihr negatives Maximum, um nach weiteren 90° , 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

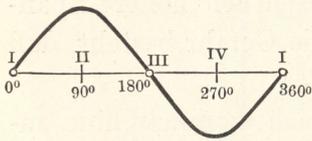


Fig. 347. Verlauf des Wechselstroms.

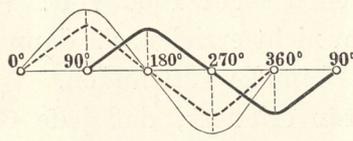


Fig. 348. Prinzip der Phasengleichheit und Phasenverschiebung.

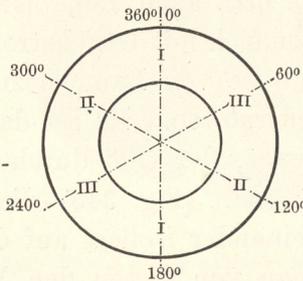


Fig. 349. Wickelungsschema eines Drehstromgenerators.

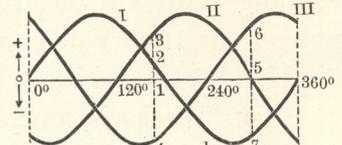


Fig. 350. Verlauf des Drehstroms.

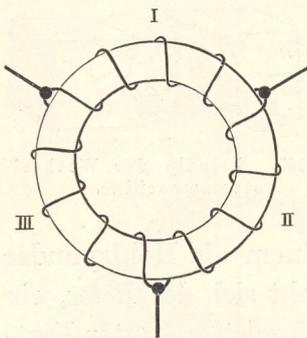


Fig. 351. Dreieckschaltung.

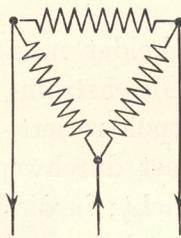


Fig. 352. Dreieckschaltung (schematische Darstellung).

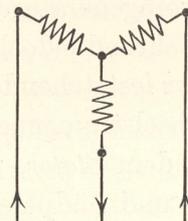


Fig. 354. Sternschaltung (schematische Darstellung).

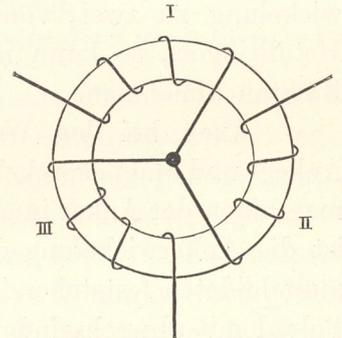


Fig. 353. Sternschaltung.

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.

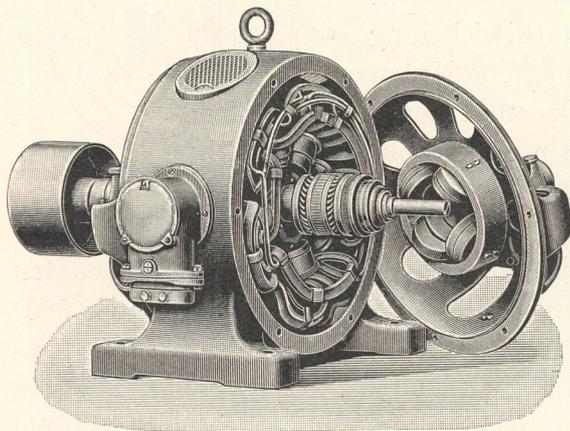


Fig. 355. Drehstromgenerator mit eingebauter Erregermaschine (Lagerschild abgenommen).

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° 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° ihr positives Maximum. An diesem Punkte ist die Stromstärke Null; mithin ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke ebenfalls Null. Nach 180° ist die Spannung Null, während die Stromstärke ihr positives Maximum innehat; das Produkt ist also wieder Null. Auch nach 270° und 360° 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° 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

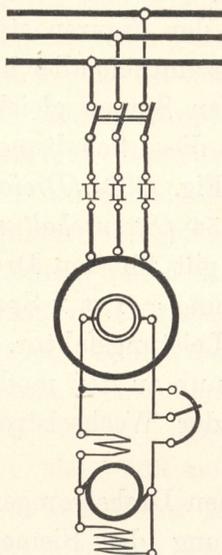


Fig. 356. Schaltschema eines Drehstromgenerators.

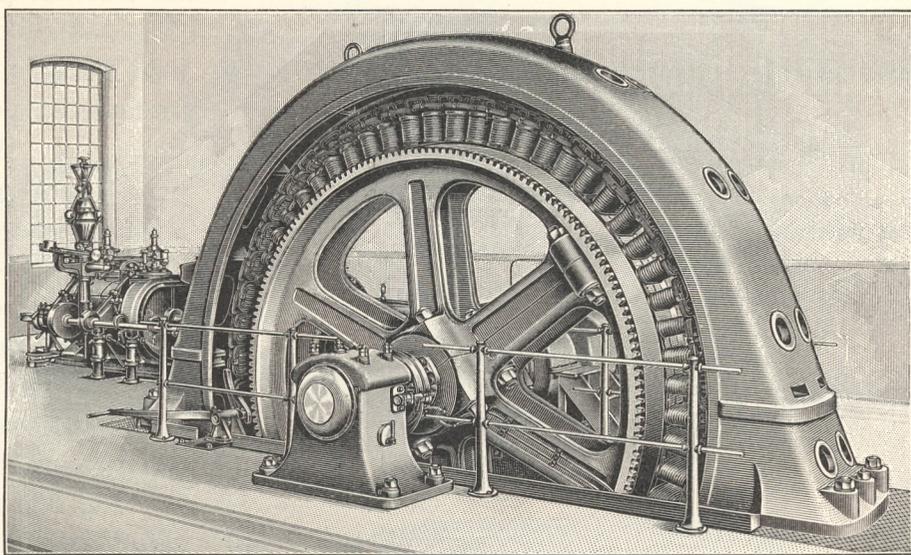


Fig. 357. Langsamlaufender Drehstrom-Schwungradgenerator für direkte Kuppelung mit der Antriebsmaschine.

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° 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 Wickelungen eingebracht, deren Achsen um 120° voneinander entfernt sind. Die Wickelung I (Fig. 349) habe ihre Achse bei 0° und 180° , die Achse der Wickelung II liege bei 120° und 300° und die der Wickelung III bei 240° und 60° . Ein im Stator rotierendes Magnetfeld induziert in diesen drei voneinander unabhängigen Wickelungen drei voneinander unabhängige Spannungen, deren Maximalwerte, ebenso wie die Nullwerte, auch immer nach 120° Drehung auftreten.

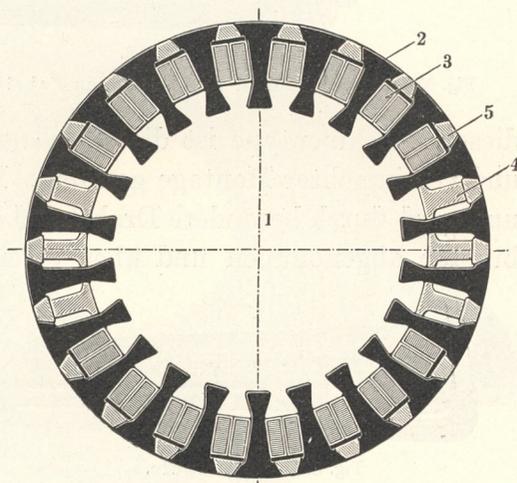


Fig. 358. Zweipoliger Rotor eines Drehstrom-Turbogenerators im Querschnitt.

Trägt man die Momentanwerte der drei Einzelspannungen, wie beim Einphasengenerator, auf, so erhält man Fig. 350; die drei Phasen des Drehstromes sind um 120° ($\frac{1}{3}$ 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

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

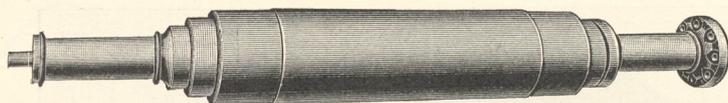


Fig. 359.

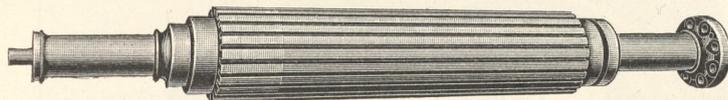


Fig. 360.

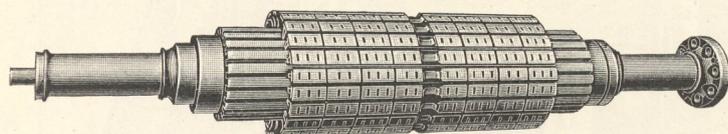


Fig. 361.

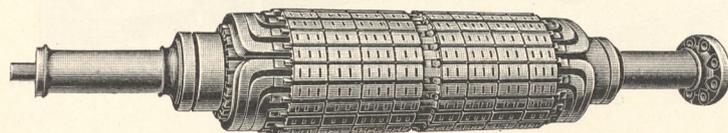


Fig. 362.

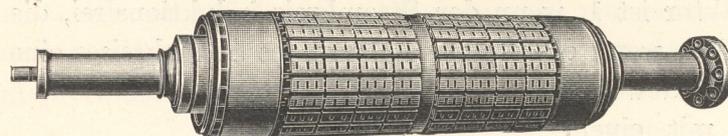


Fig. 363.

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-

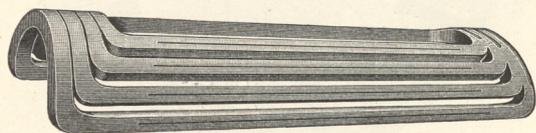


Fig. 364. Rotorspule.

seitenlagers eingebauten Bronze-Schleifringen des Generators geleitet. Ein Nebenschlußregulator erübrigt sich, da die Erregermaschine als Compoundgenerator ausgeführt ist. — Fig. 356 veranschaulicht das Schalt-

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

des 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

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

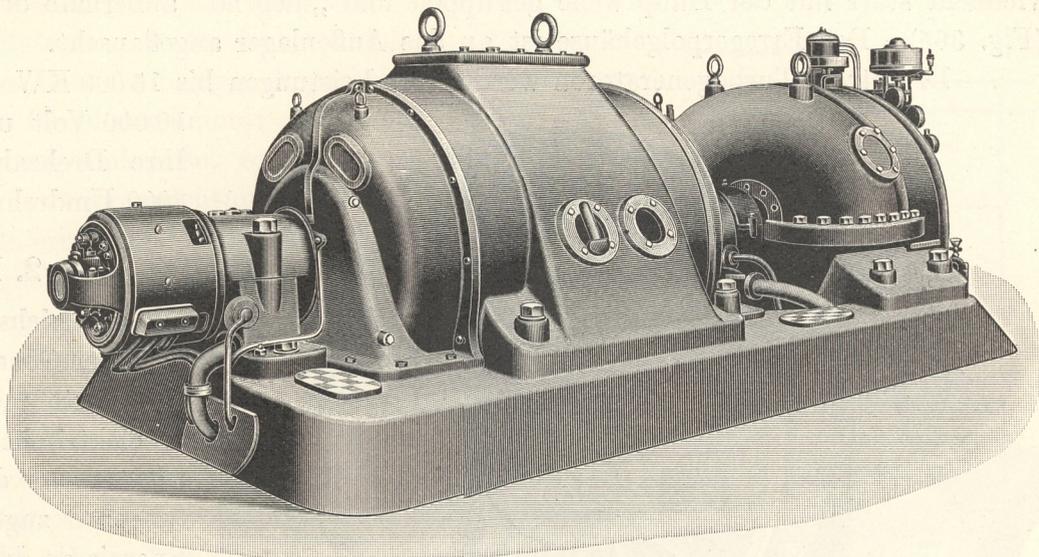


Fig. 365. Drehstrom-Turbo-generator mit A. E. G.-Dampfturbine.

Fig. 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

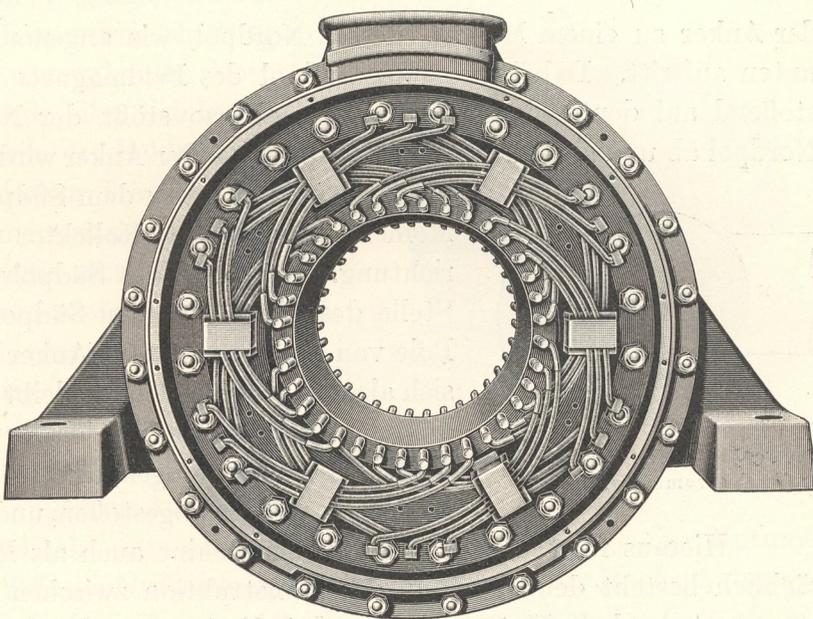


Fig. 366. Statorwicklung (Stabwicklung).

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.

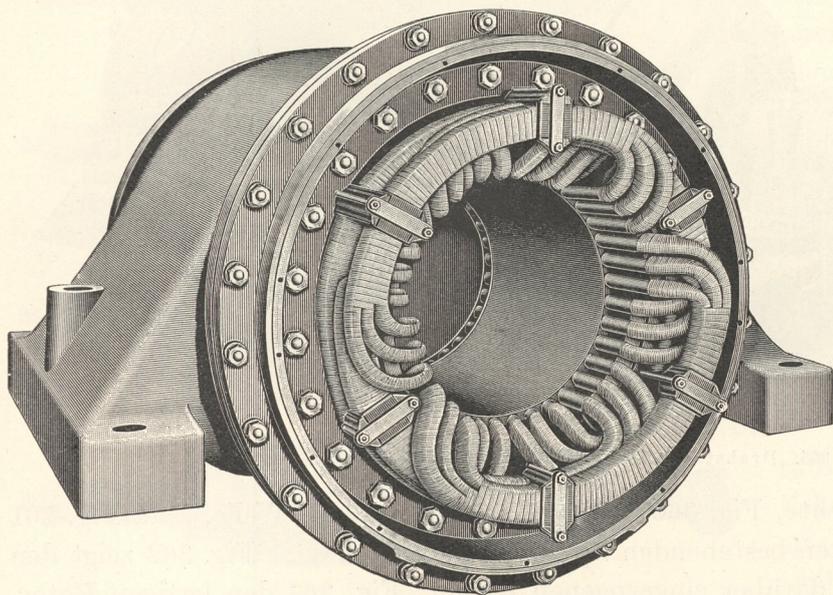


Fig. 367. Statorwicklung (genähte Wickelung).

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,

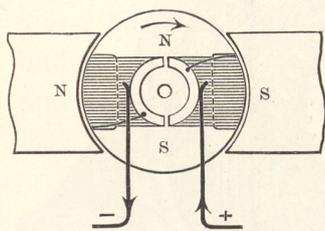


Fig. 368. Prinzip des Gleichstrommotors.

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 Hilfwicklung, 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

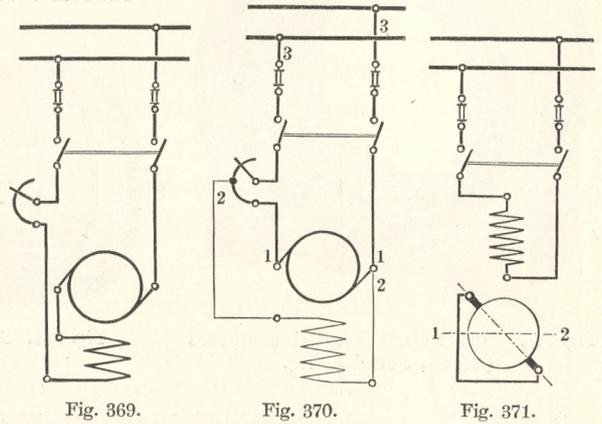


Fig. 369. Schalt-schema eines Hauptstrommotors.
Fig. 370. Schalt-schema des Nebenschlußmotors.
Fig. 371. Schalt-schema des Repulsionsmotors.

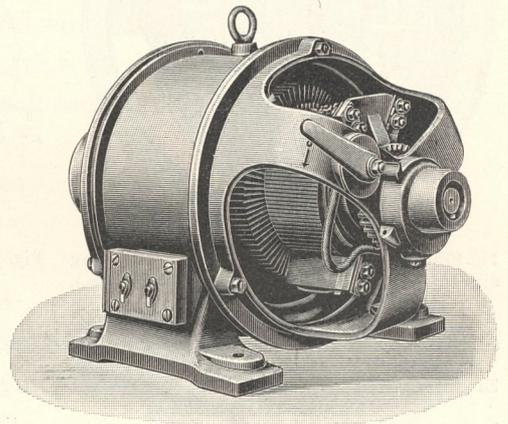


Fig. 372. Einphasen-Repulsionsmotor (Brown, Boveri & Cie.).

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.

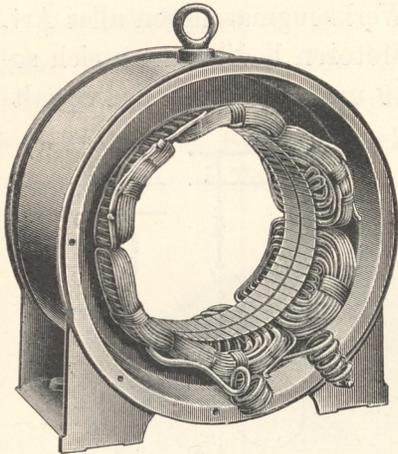


Fig. 373. Stator eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

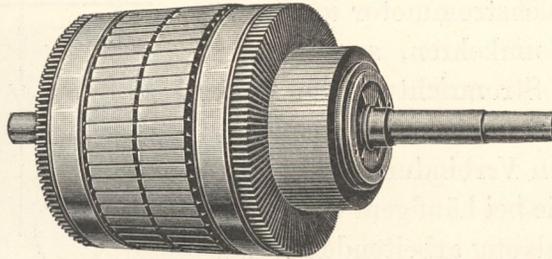


Fig. 374. Anker eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

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:

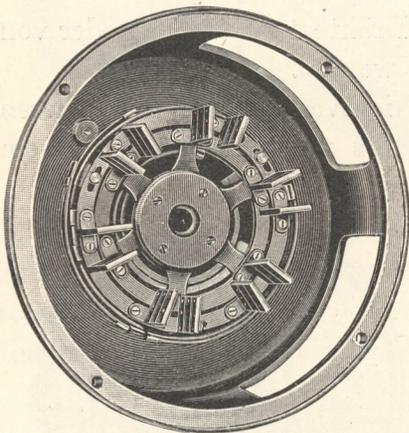


Fig. 375. Lagerschild und Bürstenbesetzung eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

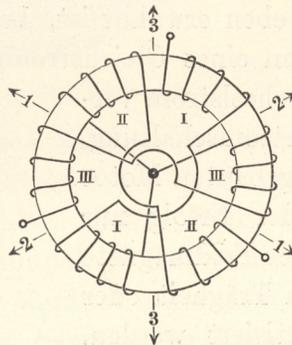


Fig. 376. Drehfeld-Prinzip.

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

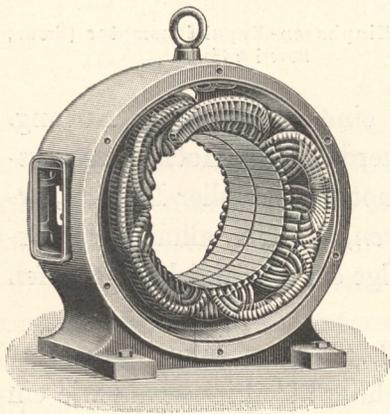


Fig. 377. Stator eines Drehstrommotors (A. E. G.).

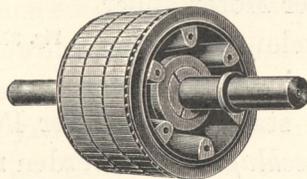


Fig. 378. Kurzschlußanker (A. E. G.).

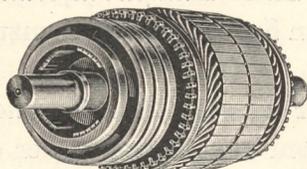


Fig. 379. Schleifringanker (A. E. G.).

entstehen in den Drahtwindungen durch die Rotation des Feldes bzw. durch das Vorbeiwandern seiner Pole

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 abzuweichen, 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. Er läßt sich auch ventiliert gekapselt oder vollkommen geschlossen herstellen.

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

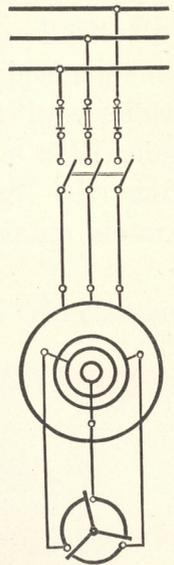


Fig. 380. Schalt-schema eines Drehstrommotors mit Schleifringanker.

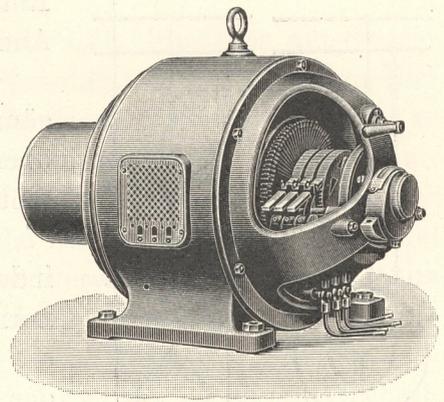


Fig. 381. Drehstrommotor in offener Ausführung (A. E. G.).

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-

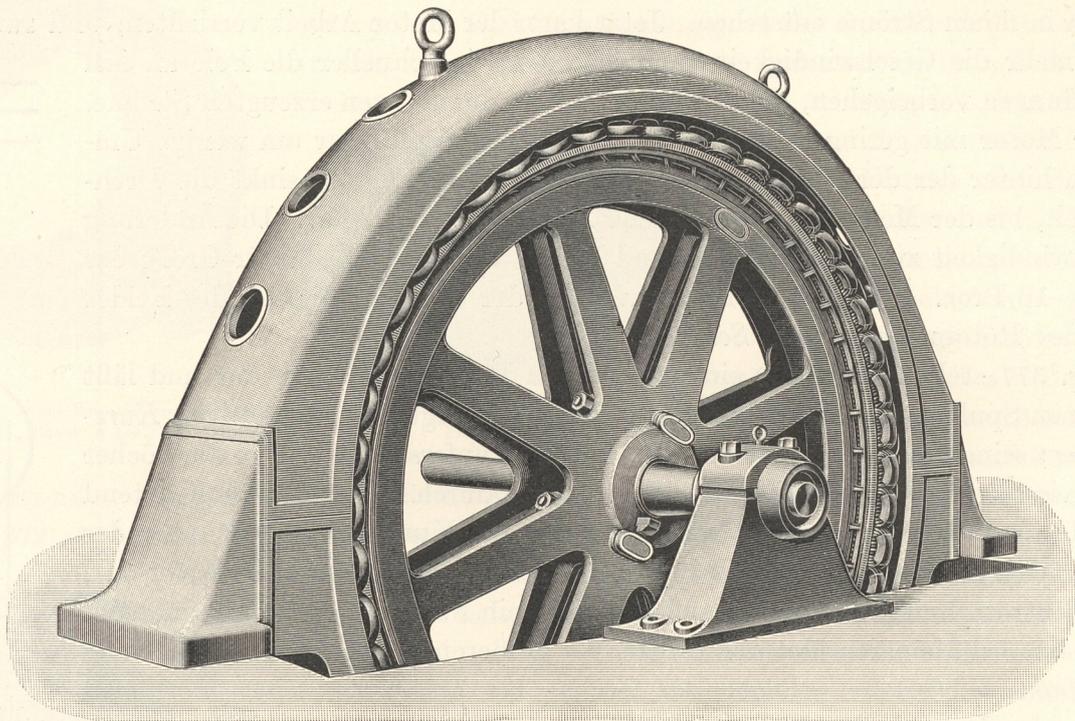


Fig. 382. Drehstrommotor für große Leistungen (Siemens-Schuckert-Werke).

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.

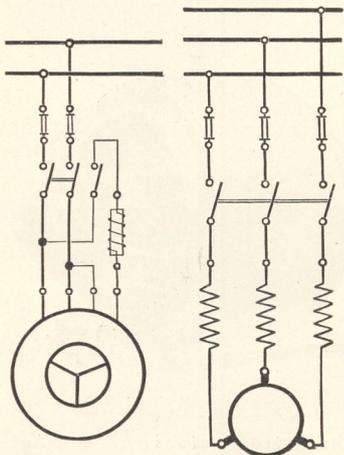


Fig. 383.

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° 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° 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

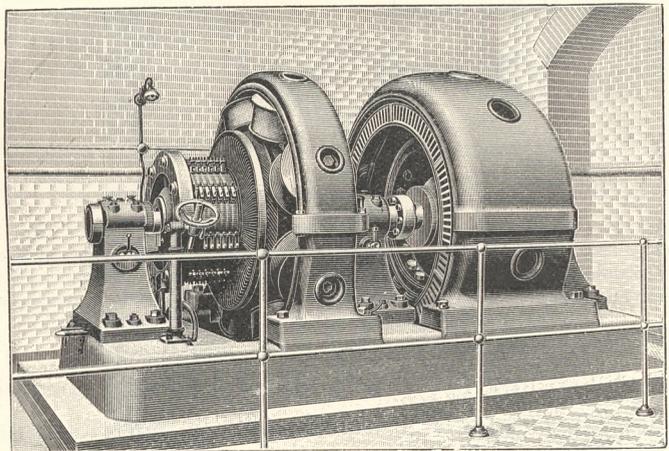


Fig. 385. Motorgenerator.

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.

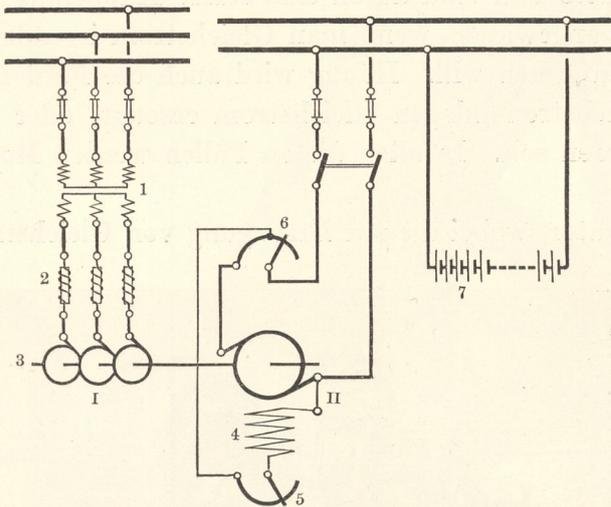


Fig. 386. Schaltplan einer Umformeranlage. Anlassen von der Gleichstromseite. (I Drehstromseite, II Gleichstromseite des Umformers; 1 Drehstromtransformator, 2 Drosselspulen, 3 Schleifringe, 4 Nebenschlußwicklung, 5 Nebenschlußregler, 6 Anlasser, 7 Akkumulatorenbatterie.)

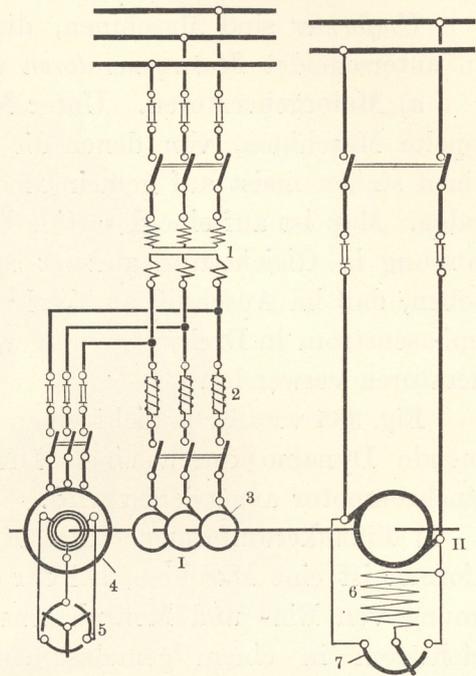


Fig. 387. Schaltplan einer Umformeranlage. Anlassen von der Drehstromseite. (I Drehstromseite, II Gleichstromseite des Umformers; 1 Drehstromtransformator, 2 Drosselspulen, 3 Schleifringe, 4 Anwurfmotor, 5 Anlasser, 6 Nebenschlußwicklung, 7 Nebenschlußregler.)

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.

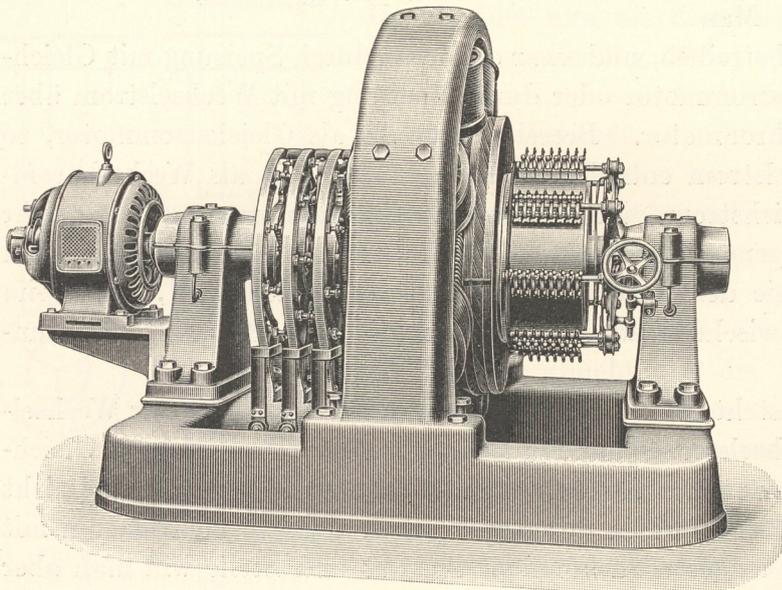


Fig. 388. Einankerumformer mit Anwurfmotor (A. E. G.).

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

Das Anlassen des Einankerumformers erfolgt bei Vorhandensein eines spannungsführenden Gleichstromnetzes am besten von der Gleichstromseite aus in der üblichen Art des Anlassens eines Gleichstrommotors (Fig. 386). Ist ein spannungsführendes 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 66 000 Volt übersetzt und gehört zur Manteltype. Sein Gesamtgewicht beträgt 38 000 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.

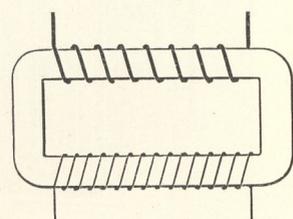


Fig. 389. Prinzip des Transformators.

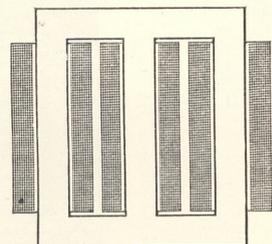


Fig. 390. Drehstromtransformator (Anordnung 1).