

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.

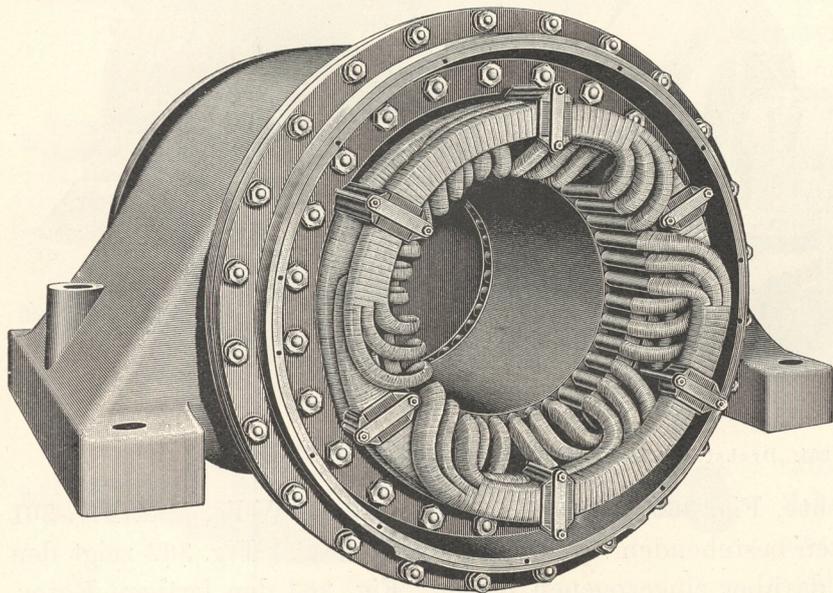


Fig. 367. Statorwicklung (genähte Wickelung).

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,

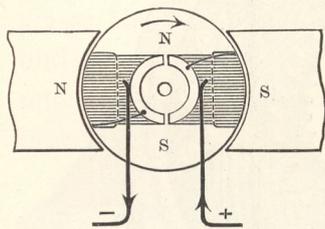


Fig. 368. Prinzip des Gleichstrommotors.

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

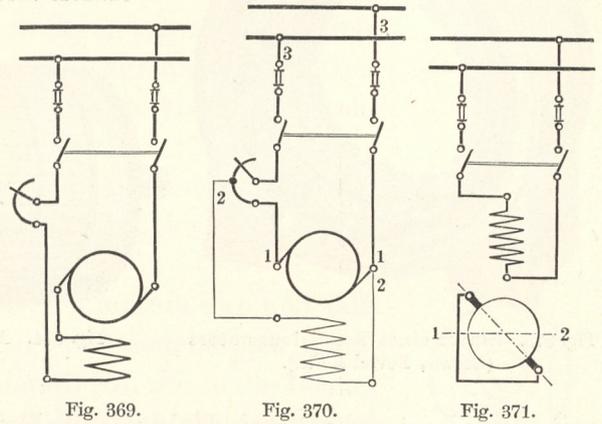


Fig. 369. Schaltschema eines Hauptstrommotors.  
Fig. 370. Schaltschema des Nebenschlußmotors.  
Fig. 371. Schaltschema des Repulsionsmotors.

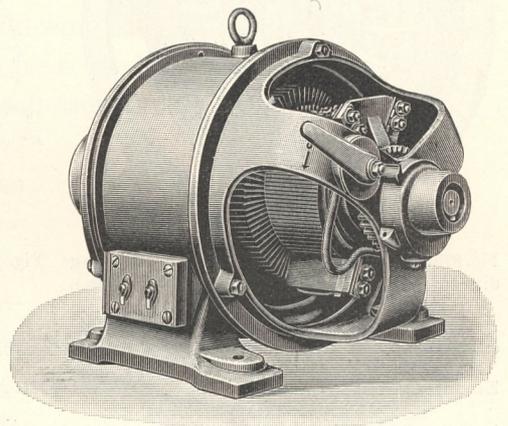


Fig. 372. Einphasen-Repulsionsmotor (Brown, Boveri & Cie.).

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.

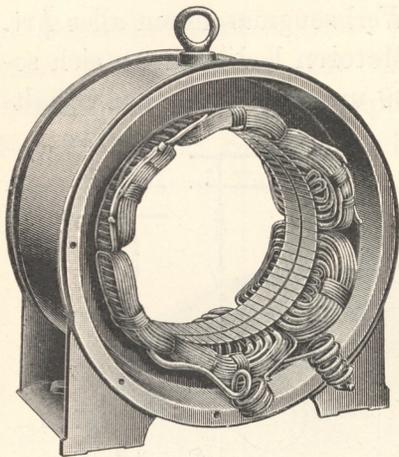


Fig. 373. Stator eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

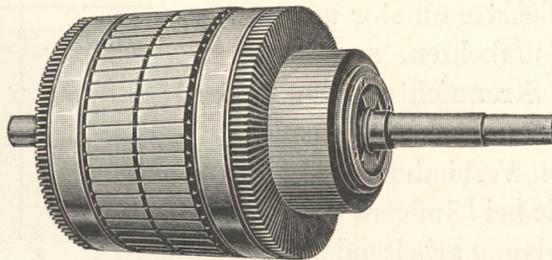


Fig. 374. Anker eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

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:

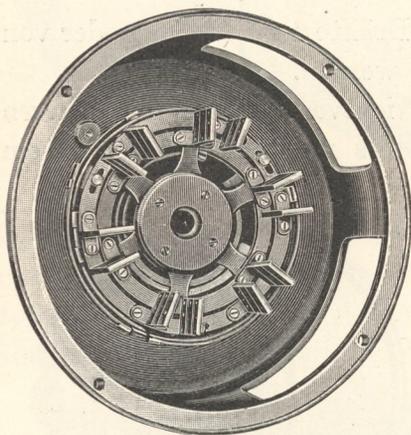


Fig. 375. Lagerschild und Bürstenbesetzung eines Repulsionsmotors (Brown, Boveri & Cie.).

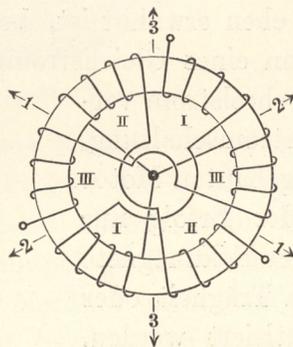


Fig. 376. Drehfeld-Prinzip.

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

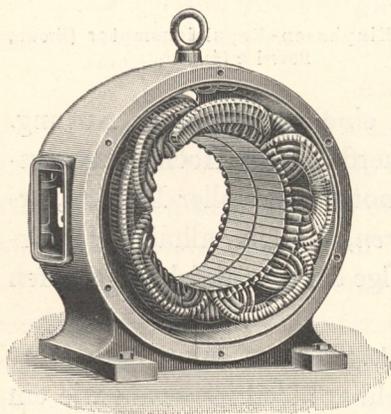


Fig. 377. Stator eines Drehstrommotors (A. E. G.).

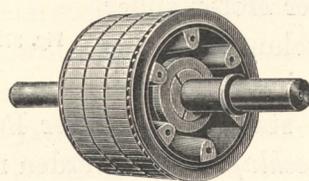


Fig. 378. Kurzschlußanker (A. E. G.).

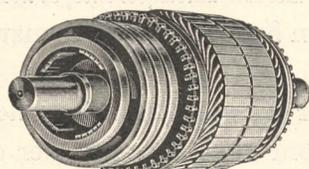


Fig. 379. Schleifringanker (A. E. G.).

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. 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

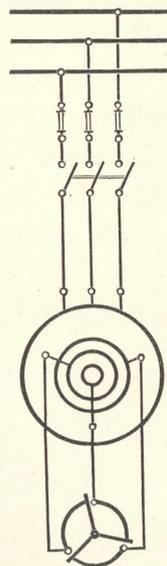


Fig. 380. Schalt-schema eines Drehstrommotors mit Schleifringanker.

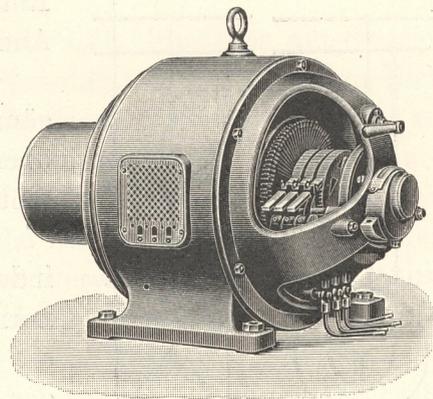


Fig. 381. Drehstrommotor in offener Ausführung (A. E. G.).

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-

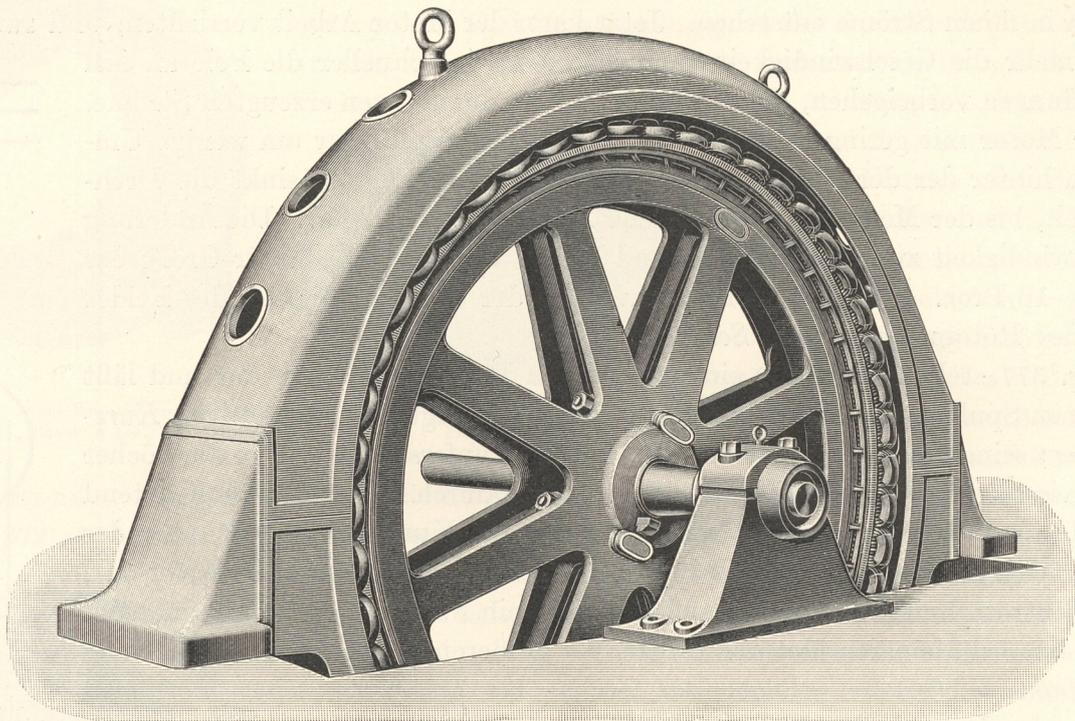


Fig. 382. Drehstrommotor für große Leistungen (Siemens-Schuckert-Werke).

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.

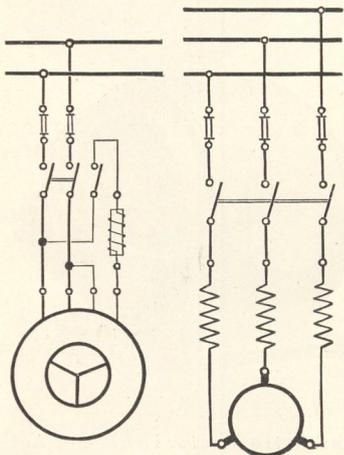


Fig. 383.

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  $120^\circ$  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

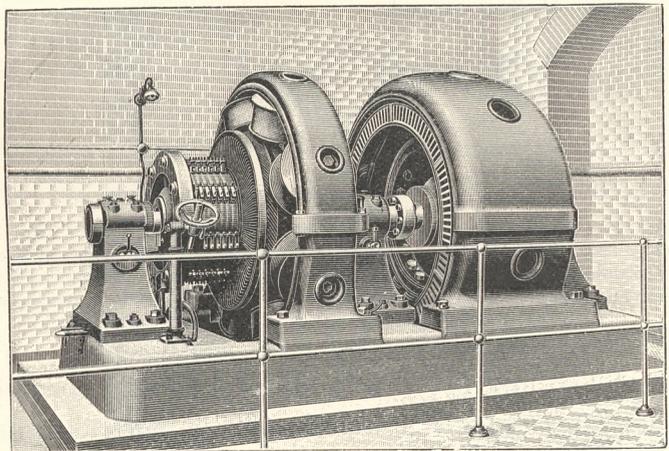


Fig. 385. Motorgenerator.

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