



**Der Graetz für Alle**

**Graetz, Leo**

**Stuttgart, 1929**

Viertes Kapitel. Dynamomaschinen für Gleichstrom und Wechselstrom.

---

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83225](#)

## VIERTES KAPITEL

# DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

Wenn man auch prinzipiell auf verschiedene Weise, durch chemische Prozesse, durch Wärme, durch Bewegung (Induktion) elektrische Ströme von jeder gewünschten hohen Spannung und von beliebig großer Stromstärke erzeugen kann, so hat sich doch von diesen Methoden die eine, nämlich die Erzeugung von Strömen durch Induktion, als die bei weitem zweckmäßigste erwiesen, wenn es sich darum handelt, auf einfache Weise starke Ströme von beliebig hoher Spannung hervorzubringen. Die elektrischen Ströme, die heutzutage in jeder Stadt, fast in jedem Dorf zu den vielfältigsten Zwecken benutzt werden, werden allgemein durch Induktion, d. h. durch die Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie gewonnen, und zwar vermittels Induktion durch Magnete, durch *Magnetoinduktion*.

Sobald man, das ist ja die Entdeckung von *Faraday*, einen Drahtkreis, am besten eine Drahtspule, in der Nähe eines Magneten irgendwie bewegt, so werden in dem Drahtkreis, in der Drahtspule momentane Induktionsströme erregt. Vorteilhaft ist es, in die Spule noch einen Kern von weichem Eisen zu bringen, da dieser in der Nähe des Magneten selbst magnetisch wird. Die Veränderung der Stärke des Magnetismus im Eisenkern erzeugt dann selbst ebenfalls in der umgebenden Drahtspule kräftige Induktionsströme.

Welche Form man den Drahtspulen mit ihren Eisenkernen gibt, ist zunächst gleichgültig. Man kann flache Eisenkerne mit Draht umwickeln, man kann lange Eisenzylinder entweder der Quere nach oder der Länge nach mit Drahtwindungen umgeben, man kann endlich eiserne Ringe ganz mit Draht umwinden; in jedem Falle werden Induktionsströme entstehen, wenn diese Spulen mit ihren Kernen in der Nähe von Magneten bewegt werden. Nur wird natürlich je nach der Anordnung die Induktion bald stärker, bald schwächer sein. Im allgemeinen wird man selbstverständlich darauf sehen müssen, daß der zu induzierende Draht sich in möglichst starken magnetischen Feldern bewegt. Man gibt den Spulen immer eine rotierende Bewegung. Wenn sich dabei eine Spule abwechselnd zu einem Nordpol und dann zu einem Südpol hin bewegt, so entstehen natürlich zunächst immer Ströme wechselnder Richtung, *Wechselströme*.

Solche Maschinen, die durch Bewegung von Drahtspulen gegen Magnete (oder umgekehrt) Ströme erzeugen, nennt man *magnetelektrische Maschinen*. Um die Drahtspulen bequem vor abwechselnden Polen vorbeizubewegen, sind die Magnete immer Hufeisenmagnete. Man nennt den Hufeisenmagneten, welcher die Ströme induziert, den *induzierenden Magneten* oder auch den *Feldmagneten*,

#### VIERTES KAPITEL

die Drahtspulen mit ihren Eisenkernen bezeichnet man als *Induktor* oder *Anker*.

Man kann diese Maschinen so konstruieren, daß man den Feldmagneten rotieren und den Anker feststehen läßt. Das hat sogar Vorteile aus dem Grunde, weil es dadurch ohne Schwierigkeit möglich ist, die Ströme aus den Drahtspulen des feststehenden Ankers in einen äußeren Stromkreis zu leiten.

Will man umgekehrt, wie es durchgängig geschieht, den Magneten feststehen lassen und die Spulen bewegen, so muß man eine Einrichtung treffen, daß man von den Enden der beweglichen Spulen den Strom für den äußeren Stromkreis, der sich ja nicht mitbewegt, auch während der Bewegung abnehmen kann. Dies erreicht man dadurch, daß man die Drahtenden der Spulen des Ankers an die Drehachsachse führt, auf die Achse zwei Metallringe aufschiebt, die voneinander und von der Achse isoliert sind, und jedes Ende des Spulendrahtes mit einem dieser Ringe verbindet. Diese beiden Ringe bilden also die beiden Enden der Spule, sie rotieren mit der Spule mit. Auf diesen Ringen läßt man je eine feststehende Bürste aus Kupferdraht oder auch aus Kohle schleifen und verbindet diese Bürste mit dem äußeren Schließungskreis. Dadurch wird der Strom aus dem Anker in den äußeren Schließungskreis geführt.

In jedem Fall werden die Spulen des Ankers, wenn sie sich abwechselnd vor einem Nordpol und dann vor einem Südpol bewegen, von *Wechselströmen* durchflossen, und wenn man in der genannten Weise die freien Enden der ganzen Spule an metallische Ringe auf der Achse führt, an die man durch Bürsten den äußeren Stromkreis anlegt, so wird auch der äußere Stromkreis von Wechselströmen durchflossen.

Man kann aber, wie zuerst ein Italiener, *Pacinotti*, zeigte, auch eine Anordnung treffen, bei welcher, obwohl die Spulen selbst Wechselströme enthalten, der äußere Stromkreis nicht von Wechselströmen, sondern von gleichgerichteten Strömen durchflossen wird. Dieses wurde von Pacinotti dadurch erreicht, daß er als Eisenkern einen geschlossenen eisernen Ring nahm und diesen vollständig mit Draht umwickelte und diesen Ring zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten rotieren ließ. Ein solcher Induktor, den man gewöhnlich den *Grammeschen Ring* nennt, weil er durch *Gramme* erst allgemein bekannt wurde, wird praktisch so ausgeführt, wie es **Fig. 52** zeigt. Die Umwicklung des Ringes besteht aus einer großen Anzahl von einzelnen Drahtspulen. Das Ende einer Spule und der Anfang der folgenden werden an die Drehachsachse geführt und dort zusammen in Kupferstreifen c eingelötet. Die Kupferstreifen sitzen alle voneinander isoliert auf der Achse und drehen sich mit dieser. Man bezeichnet diesen wichtigen Teil der Maschine als *Kommutator* oder *Kollektor (Stromsampler)*. Es sind also auf dem Kollektor ebenso viele Kupferstreifen vorhanden wie einzelne Spulen, und die Spulen sind alle hintereinander verbunden, so daß sie eine vollständige gleichlaufende Umwicklung des Eisenringes bilden. Auf dem Kollektor schleifen nun an bestimmten Stellen P und  $P_1$  zwei Bürsten B und  $B_1$ , welche von ihnen den Strom abnehmen und in die äußere Leitung

### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

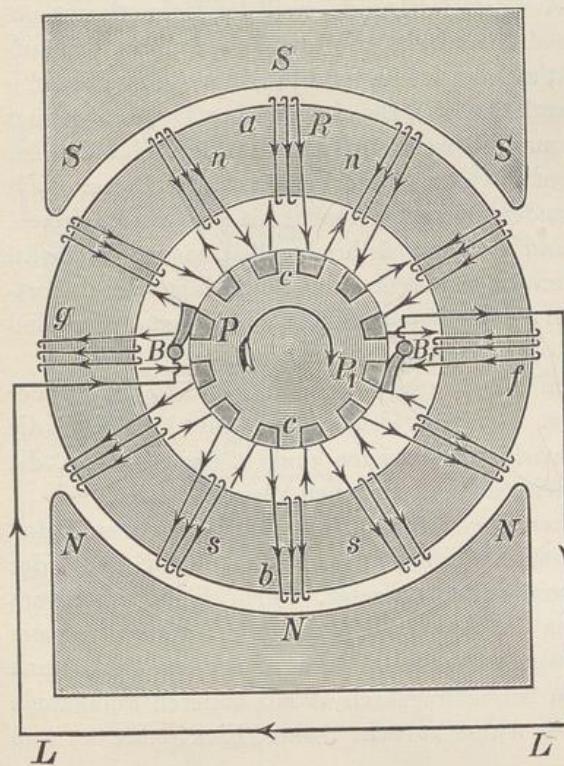
LL senden. Oberhalb und unterhalb des Ringes befinden sich die Pole des Feldmagneten, etwa oben der Südpol S, unten der Nordpol N. Die Richtung der in einem Draht durch Bewegung in einem Magnetfeld entstehenden Induktionsströme ist durch die *Rechte-Hand-Regel* bestimmt. Man hält den Zeigefinger der rechten Hand in die Richtung der Kraftlinien, den Daumen in die Richtung der Bewegung, dann gibt der Mittelfinger die Richtung des entstehenden Induktionsstromes. Durch Anwendung dieser Regel sieht man, daß alle Spulen des Ringes, die gerade in der oberen Hälfte sich befinden, Induktionsströme von einer und zwar alle von derselben Richtung, und die in der unteren Hälfte Ströme von der entgegengesetzten Richtung liefern müssen. In unserer Figur fließen, von vorn gesehen, oben die Ströme von hinten nach vorn, unten dagegen von vorn nach hinten. Zu der einen Bürste  $B_1$  fließt also dauernd, wie die Pfeile der Figur zeigen, von oben und unten der Strom hin, von der anderen  $B$  fließt er nach oben und unten fort. Legt man an diese Bürsten die äußere Leitung LL an, so fließt in dieser der Strom stets von  $B_1$  nach B, bleibt also tatsächlich stets gleichgerichtet.

Bei dem Grammeschen Ring berühren also die Bürsten nicht immer *dieselben* Drahtenden, sondern im Gegenteil *jedesmal andere*. Bei der Rotation des Ringes kommen immer andere und andere Kupferstreifen, also die Enden von anderen und anderen Spulen an die Bürsten. Diese letzteren nehmen also der Reihe nach von den *aufeinanderfolgenden* Spulen den Strom ab, und daher kommt es, daß sie immer einen Strom von gleicher Richtung aussenden, weil eben jede Spule, sobald sie in dieselbe Lage in bezug auf die Magnetpole kommt, gleich induziert wird.

+

Ein wesentliches Moment zur Vervollkommnung der Maschinen besteht aber in folgendem. Die Feldmagnete einer Maschine bildet man natürlich zweckmäßig als *Elektromagnete* aus, weil diese viel kräftiger sind, viel stärkere magnetische Felder erzeugen als Stahlmagnete. Aber hier trat nun sofort folgende wichtige Frage auf:

**Fig. 52**



#### VIERTES KAPITEL

Um die Feldmagnete zu bilden, wenn sie Elektromagnete sein sollen, braucht man einen Strom, der eben um die Eisenkerne der Feldmagnete herumfließt. Muß man diesen Strom aus irgendeiner Quelle nehmen, z. B. aus einer Batterie, oder kann man den Strom, der im Anker entsteht, selbst zur Magnetisierung der Feldmagnete benutzen?

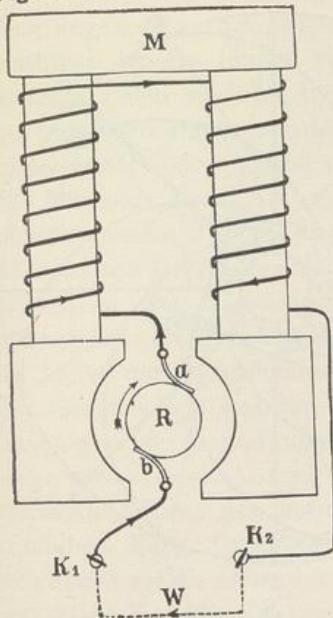
Die Stellung dieser Frage war eine bedeutende und prinzipiell höchst wichtige Tat. Und der Fortschritt, der in der Stellung und Lösung dieser Frage liegt, ist eine der bedeutendsten Errungenschaften, welche die Technik dem Genie von Werner Siemens zu danken hat, der im Jahre 1867 diese Frage aufwarf und zugleich löste. Siemens sagte sich, daß es gewiß nicht nötig sei, die Elektromagnete durch einen fremden Strom, etwa von einer Batterie, erregen zu lassen, sondern daß man diese durch den Strom der Maschine selbst erregen lassen könne. Wenn einmal in einem Anker ein Strom erzeugt sei, so braucht man diesen ja bloß in Windungen um die Eisenkerne der Feldmagnete passend herumzuführen, um diese zu starken Magneten zu machen. Dies ist das berühmte *Dynamoprinzip* von Siemens, und nach diesem Prinzip, entweder in direkter oder in modifizierter Anwendung, werden sämtliche elektrischen Maschinen gebaut. Es ist bei diesen Maschinen von vornherein gar kein eigentlicher Magnet vorhanden; der schwache Magnetismus, der in jedem Eisenkern vorhanden ist, leitet die Wirkung ein, und erst durch den Gang der Maschine werden die Magnete erzeugt und beeinflussen dann in der erheblichsten Weise die Wirksamkeit der Maschine. Aus diesem Grunde, weil der Magnetismus gewissermaßen nur als Zwischenprodukt auftritt, um die Verwandlung der aufgewandten Arbeit in Elektrizität zu vermitteln, nannte Siemens diese Maschinen *Dynamomaschinen* (von dynamis, Arbeit). Bei einer solchen Dynamo genügt der schwache Magnetismus, der auch in weichem Eisen immer vorhanden ist, um zuerst einen schwachen Strom in dem Anker zu erzeugen. Dieser fließt nun um die Eisenkerne in passender Richtung, macht sie also zu Magneten, allerdings zunächst schwachen, und wird nun dadurch selbst wieder verstärkt. So verstärkt der Strom fortwährend den Magnetismus, der Magnetismus fortwährend den Strom, bis schließlich die Magnete zum Maximum magnetisiert sind und so die höchste Wirksamkeit der Maschine erreicht ist.

Die Dynamomaschinen gestatten aber auch gewisse Modifikationen in der Anwendung des Dynamoprinzips. Es lassen sich nämlich die drei Teile, die bei jeder arbeitenden Dynamomaschine vorhanden sind, 1. der Anker, 2. die Magnete, 3. der äußere Stromkreis, in verschiedener Weise schalten.

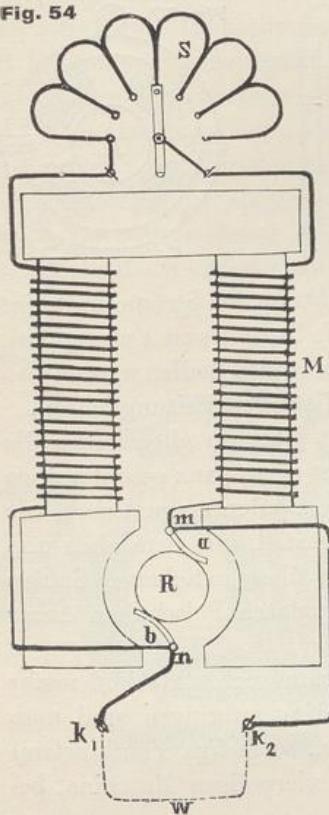
Zunächst kann man den Anker der Maschine, die Feldmagnete und den äußeren Schließungskreis *hintereinander schalten*, so daß also das Schema der Dynamomaschine so aussieht, wie es **Fig. 53** zeigt. Darin fließt der Strom der Reihe nach von den Drähten des Ankers R durch die Bürste a um die Windungen der beiden Elektromagnetschenkel M herum zur einen Polklemme K<sub>2</sub>, von dieser durch den äußeren Schließungskreis W zur anderen Polklemme K<sub>1</sub> und durch die Bürste b in den Anker zurück. Anker, Elektromagnet und

## DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

**Fig. 53**



**Fig. 54**



äußerer Schließungsdrähten bilden also einen einzigen unverzweigten Stromkreis. Solche Maschinen nennt man *Hauptstrommaschinen*.

Man kann aber auch den Strom, der von dem Anker kommt, direkt in die äußere Leitung führen und um die Magnete herum nur einen Zweigstrom senden. Eine solche Anordnung zeigt das Schema in **Fig. 54**. Hier teilt sich der Strom, der durch die Bürsten a und b aus dem Anker R kommt, bei m und n und geht zum Teil zu den Polklemmen  $k_2$  und  $k_1$  und von diesen durch den äußeren Schließungskreis w, zum Teil aber geht er um die Magnete M. Man bezeichnet Maschinen mit dieser Anordnung als *Nebenschlußmaschinen*. In die Magnetbewicklung wird gewöhnlich noch ein variabler Widerstand S (ein Regulierwiderstand) eingeschaltet, um die Stärke des Magnetstroms beliebig zu verändern. Seine Einrichtung ist aus der Figur selbst klar und ist auch auf S. 24 beschrieben. Durch Regulieren des Widerstandes der Magnetbewicklung kann man, wie wir gleich besprechen werden, die Leistung der Maschine regulieren. Gerade aus diesem Grunde werden Nebenschlußmaschinen jetzt meistenteils, in mehr als 90 Proz. aller Fälle, angewendet.

Eine dritte Schaltung, die in manchen Fällen mit Vorteil angewendet wird, ist die sogenannte *gemischte Schaltung* oder *Compoundschaltung*. Diese besteht darin, daß man die Magnete sowohl durch den Hauptstrom als durch einen Zweigstrom erregen läßt. So gebaute Maschinen nennt man *Compoundmaschinen*. Sie werden aber nur in wenigen ganz bestimmten Fällen benutzt.

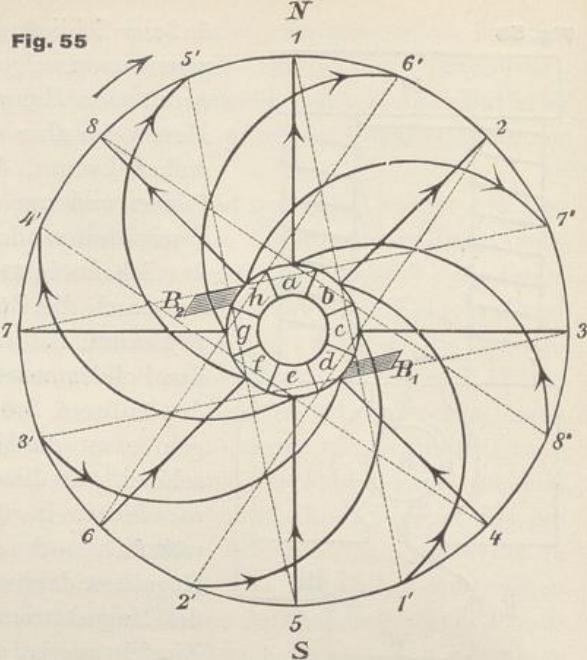
Der Grammesche Ringanker ist übrigens heute nur noch ein historischer Apparat. Der Anker der Dynamomaschinen wird jetzt durchgängig als sogenannter *Trommelanker* gebildet. Dabei liegen die Drähte auf einem eisernen Zylinder, parallel der Drehungsachse, und werden auf der Vorderfläche des Zylinders zu den einzelnen Lammellen des Kommutators geführt und durch

#### VIERTES KAPITEL

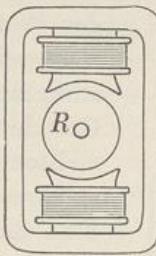
diese passend zusammengeschaltet. **Fig. 55** zeigt die Verbindungen der Drähte. Es ist dabei angenommen, daß auf den Zylindern 8 Drähte (oder Drahtspulen) gelegt sind, so daß der Kollektor auch 8 Segmente a bis h enthält. Der Draht 1 geht z. B. auf der Vorderfläche des Zylinders von a zum Punkt 1, dann über den Zylinder und auf der Rückfläche (wie die punktierte Linie es anzeigt) schräg nach unten und kommt auf der Vorderfläche an den Punkt 1. Dieser wird nun durch die gebogene Verbindung mit dem nächsten Kollektorsegment b verbunden, von dem der Draht 2 ausgeht. Dieser gelangt ebenso nach 2', wird zu c geführt, von dem aus Draht 3 weitergeht usw. Dreht sich der Zylinder mit den Drähten im Sinne des Uhrzeigers und ist oben ein Nordpol, unten ein

Südpol, so geben die Pfeile an den Drähten die Richtung der Ströme nach der Rechten-Hand-Regel an. Zum Segment d fließen die Ströme von 4 und 3' hin, von Segment h fließen sie nach 8 und 7' fort. An diesen beiden Stellen werden also die Bürsten  $B_1$  und  $B_2$  angelegt, welche die Ströme in die äußere Leitung führen. Die äußere Form der Maschinen aller Fabriken ist jetzt im allgemeinen die gleiche geworden. Das Eisen der Feldmagnete bildet einen ganz geschlossenen Kreis um den Anker und wird durch aufgeschobene Spulen magnetisiert, wie es **Fig. 56** zeigt. Man sieht ein geschlossenes Eisengestell, von dem oben und unten Eisenkerne nach innen gehen, die durch die übergeschobenen Spulen magnetisiert werden. Zwischen den passend abgerundeten Polschuhen dieser Magnetkerne befindet sich der Anker R.

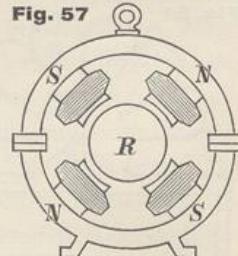
Bei dieser Ringform des Magnetgestells kann man nun auch statt *bloß zweier Magnetpole eine beliebige gerade Anzahl* auf dem Ring anbringen, und man unterscheidet danach vierpolige, sechspolige usw., *vielpolige (multipolare) Maschinen*. **Fig. 57** gibt das Schema einer solchen vierpoligen Maschine, bei



**Fig. 56**



**Fig. 57**



### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

welcher die vier abwechselnden Nord- und Südpole auf einem Ringgestell aus Eisen angebracht sind und den innen liegenden Anker induzieren. Größere Maschinen werden immer vielpolig ausgeführt. Zwischen je zwei entgegengesetzten Polen schleifen Bürsten auf dem Kollektor, so daß eine sechspolige Maschine sechs Bürsten enthält. Die einander entsprechenden Bürsten können hintereinander oder parallel verbunden werden.

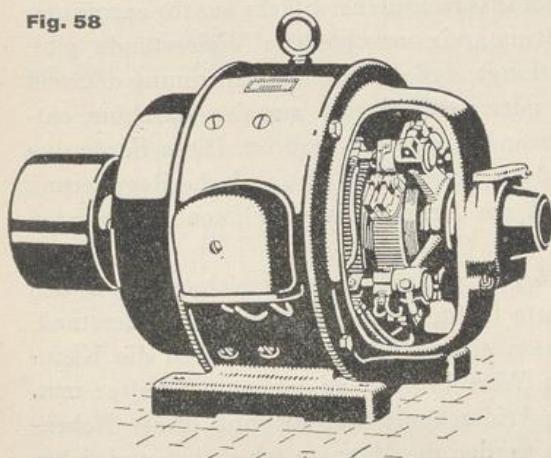
Eine Maschine dieser Art zeigt **Fig. 58**. Es ist das eine Maschine der Siemens-Schuckertwerke (SSW) in Berlin, die vier Magnetschenkel und einen Trommelanker besitzt. Der Trommelanker ist breit, auf dem eisernen Ring sitzen vier Magnetpole, der Kommutator enthält also vier Bürstenreihen, von denen jede aus zwei Bürsten besteht.

Der Anker der Dynamomaschine wird gewöhnlich von einer Dampfmaschine oder Gasmaschine gedreht, und zwar in der Weise, daß ein Riemen vom Schwungrad der Dampfmaschine auf eine Riemenscheibe der Dynamomaschine gelegt wird. Dieser Antrieb wird namentlich deswegen oft gewählt, weil die Dynamomaschinen gewöhnlich sehr viel rascher rotieren müssen als die Dampfmaschinen. Bei größeren Maschinen mit vielen Polen wird die Dynamomaschine auch direkt auf die Achse der Dampfmaschine gesetzt und rotiert dabei langsam. Eine solche Kombination nennt man eine *Dampfdynamo*. Die größeren Dynamomaschinen werden auch vielfach von *Dampfturbinen* angetrieben, welche an sich sehr große Umdrehungszahlen haben. Man setzt auch dabei gewöhnlich die Dynamomaschine direkt auf die Achse der Turbine und nennt eine solche Kombination *Turbodynamo*.

In den Dynamomaschinen wird also durch die Drehung des Ankers eine elektromotorische Kraft (Spannung) erzeugt, welche einen Strom sowohl durch die Ankerdrähte selbst als um die Magnete und durch den äußeren Stromkreis treibt. Die Größe dieser elektromotorischen Kraft hängt nun direkt ab von der Stärke des magnetischen Feldes; je stärker dieses ist, desto größer ist auch

die elektromotorische Kraft. Die Stärke des Magnetfeldes hängt aber davon ab, wie der Eisenkern des Ankers gegen die Pole der Magnete liegt. Je näher der Anker an diesen ist, umso stärker ist das Feld, umso größer ist die Spannung der entstehenden Induktionsströme. Ferner hängt die Spannung ab von der Drehungsgeschwindigkeit des Ankers. Je rascher der Anker sich dreht, umso größer ist die erzeugte elektromotorische Kraft. Bei sonst gleichbleibenden

**Fig. 58**



#### VIERTES KAPITEL

Verhältnissen wächst die elektromotorische Kraft einer solchen Maschine direkt mit der Tourenzahl des Ankers (Zahl der Umdrehungen in einer Minute). Endlich hängt die elektromotorische Kraft noch wesentlich ab von der Zahl der Drähte, die auf dem Eisenkern des Ankers liegen. Die elektromotorische Kraft wächst direkt mit der Zahl dieser Drähte. Ein Anker, der mit 1000 Drähten versehen ist, gibt unter sonst gleichen Umständen eine doppelt so große elektromotorische Kraft wie ein Anker, der nur mit 500 Windungen belegt ist.

Man hat es daher im allgemeinen bei einer Maschine von bestimmter Form (bestimmtem Typus) in der Hand, durch die Zahl der Ankerwindungen und durch die Tourenzahl, die man verändern kann, jede beliebige elektromotorische Kraft (Spannung) zu erzeugen.

Die elektromotorische Kraft der Maschine treibt den Strom durch den ganzen äußeren und inneren Stromkreis. Ein Teil dieser elektromotorischen Kraft dient dazu, den inneren, der andere den äußeren Widerstand zu überwinden. An den Klemmen der Maschine, an welche der äußere Widerstand angelegt wird, herrscht also eine Spannung, welche kleiner ist als die gesamte elektromotorische Kraft, weil sie den Strom eben nur noch durch den äußeren Widerstand zu treiben braucht. Diese Spannung, die besonders wichtig ist, nennt man allgemein und bezeichnenderweise die *Klemmenspannung* der Maschine. Erinnern wir uns an den Begriff des *Spannungsverlustes*, den wir früher (S. 22) eingeführt haben. Danach ist die elektromotorische Kraft gleich dem Spannungsverlust auf dem ganzen Wege, also gleich dem Spannungsverlust im inneren und dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis zusammen. Die Klemmenspannung dagegen hat den Strom nur durch den äußeren Stromkreis zu treiben. Sie ist also gleich dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis allein.

Man mißt die Klemmenspannung einer Maschine in Volt, indem man an die Klemmen dauernd ein Voltmeter (S. 23) im Nebenschluß zum äußeren Stromkreis anlegt. Die Klemmenspannung ist im allgemeinen bei einer Maschine nicht immer dieselbe, wenn man Ströme verschiedener Stärke aus ihr entnimmt, d. h. wenn man dem äußeren Stromkreis verschiedene Widerstände gibt. Es wird aber sehr häufig gerade verlangt, daß die Klemmenspannung dauernd dieselbe bleibt, ob man nun viel oder wenig Strom aus der Maschine entnimmt, d. h. ob der äußere Widerstand klein oder groß ist. Diese Forderung läßt sich sehr leicht bei *Nebenschlußmaschinen* durch eine einfache Regulierung erfüllen, und gerade deswegen sind die Nebenschlußmaschinen am meisten in Gebrauch.

Man braucht nämlich nur, wie es in Fig. 54 (auf S. 65) gezeichnet ist, in den Zweigstrom, welcher um die Magnete fließt, einen regulierbaren Widerstand, den sogenannten *Nebenschlußregulator*, einzuschalten, um dadurch die Klemmenspannung auf jeden beliebigen Wert bringen zu können. Schaltet man nämlich in die Magnetbewicklung Widerstände ein, so wird dieser Nebenstrom schwächer, und infolgedessen werden die Magnete schwächer und daher

### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

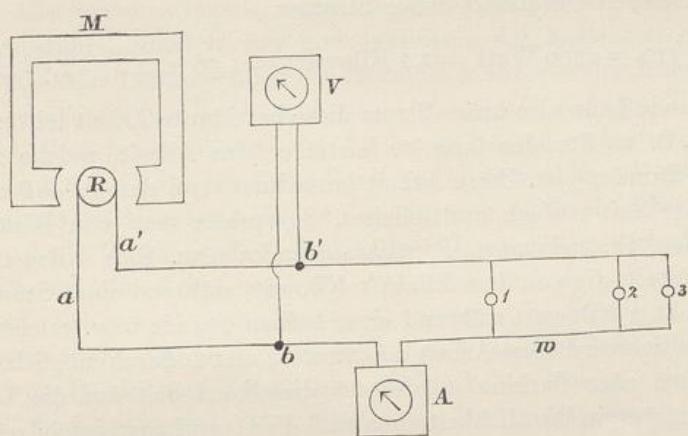
auch die Klemmenspannung der Maschine kleiner. Schaltet man Widerstände aus dem Regulator, also aus dem Nebenstrom aus, so wird dieser letztere stärker und daher auch die Klemmenspannung der Maschine. So kann man durch einfaches Ein- und Ausschalten von Widerständen die Klemmenspannung der Maschine verändern, oder man kann sie auch, wenn man will, immer auf dieselbe Größe bringen, die man an einem Voltmeter erkennt.

Um die Stromstärke im äußeren Stromkreis zu messen, wird natürlich in diesen ein Amperemeter eingeschaltet.

Die Verbindung einer Dynamomaschine mit dem Voltmeter, dem Amperemeter und dem äußeren Stromkreis ist in **Fig. 59** gezeichnet. Von dem Anker R der Maschine M gehen zwei Drähte aus, a b und a' b', welche die Hauptleitungen für die dazwischenzuschaltenden Apparate 1, 2, 3 usw. bilden. In den einen dieser Drähte wird das Amperemeter A eingeschaltet. Das Voltmeter V dagegen wird zwischen die beiden Drähte gelegt, indem das eine Ende b an den einen, das andere Ende b' an den andern Draht der Hauptleitung angeschlossen wird. Bei der wirklichen Benutzung der Dynamomaschinen sind allerdings diese Apparate noch nicht ausreichend. Vielmehr werden dann noch Ausschalter und Sicherungen mit einzuschalten sein, von denen wir aber erst im folgenden sprechen werden.

Die Dynamomaschinen liefern die elektrischen Ströme auf Kosten der Arbeit, welche man aufwenden muß, um den Anker vor den Magnetpolen zu drehen. Wenn nämlich die Dynamomaschine durch den äußeren Widerstand geschlossen ist und also ein Strom im Anker und in dem äußeren Widerstand zirkuliert, so entsteht infolge der elektromagnetischen Kräfte zwischen den Magneten und dem Strom im Anker eine Widerstandskraft, welche der Bewegung des Ankers Widerstand leistet. Es stemmt sich eine Kraft der Bewegung des Ankers entgegen, und wir müssen daher fortwährend von neuem Arbeit aufwenden, diese widerstehende Kraft zu überwinden. Es wird also direkt mechanische Arbeit mittels dieser Dynamomaschinen in Elektrizität verwandelt. Die mechanische

**Fig. 59**



#### VIERTES KAPITEL

Arbeit oder, wie wir besser sagen, die *mechanische Energie verwandelt sich in elektrische Energie*.

Das Maß für die elektrische Energie ist aber, wie wir oben S. 28 gesehen haben, nicht etwa die Stromstärke allein, sondern es ist das Produkt aus der Stromstärke und der Spannung des Stromes. In jedem Moment, solange der Strom fließt, besitzt er eine gewisse Energie, in jedem Moment kann er also eine Arbeit leisten, er besitzt also einen *Effekt*, worunter man die *pro Sekunde* geleistete Arbeit versteht. Einen Effekt mißt man mechanisch in *Pferdestärken*. Ein Pferd kann nämlich, wie man als Mittelwert annimmt, in jeder Sekunde 75 kg 1 m hoch heben, also eine Arbeit von 75 mkg leisten. Ein Wasserfall, bei dem in jeder Sekunde 1000 kg Wasser 30 m tief herunterfallen, kann also in jeder Sekunde 30 000 mkg Arbeit leisten, d. h. er hat einen Effekt von 400 Pferdekräften.

Der Effekt eines Stromes in irgend einem Stück eines Leiters wird also gemessen durch das Produkt aus seiner Stärke und dem Spannungsunterschied an den Enden dieses Leiterstücks. Drückt man die Stromstärken in Ampere und die Spannungen in Volt aus, so ist der Effekt eines Stromes ausgedrückt in *Volt-Ampere* oder *Watt*. Der ganze Effekt in einem Stromleiter ist also gleich

$$\text{Spannungsunterschied seiner Enden (in Volt)} \times \text{Stromstärke (in Ampere)}$$

(Benennung: Watt).

Für große Effekte nimmt man als Einheit 1 Kilowatt, welches gleich 1000 Watt ist, so daß ein Strom auch den Effekt hat

$$\frac{\text{Zahl der Volt} \times \text{Zahl der Ampere}}{1000} \text{ Kilowatt}$$

Nun sind 736 Watt gleich einer Pferdekraft (1 HP), folglich ist 1 Kilowatt gleich 1,36 Pferdekräften, und daher ist auch der Effekt eines Stromes leicht in Pferdekräften (HP) auszudrücken. Fließt also ein Strom mit der Stromstärke 20 Ampere durch einen Leiter, an dessen Enden der Spannungsunterschied 110 Volt ist, so ist der elektrische Effekt dieses Stromes

$$20 \times 110 = 2200 \text{ Watt} = 2,2 \text{ Kilowatt} = 1,36 \times 2,2 = 2,99 \text{ HP}.$$

In jeder Sekunde kann also unser Strom diese bestimmte Arbeit leisten. Fließt der Strom z. B. 10 Stunden lang, so leistet er eine Arbeit, welche  $2,2 \times 10$  (Kilowatt  $\times$  Stunden) ist. Diese Arbeit bezeichnet man derart, daß man den Effekt mit der Zeit einfach multipliziert. So spricht man von *Wattstunden*, *Kilowattstunden*, *Wattsekunden*, *Pferdekraftstunden* usw. Eine Kilowattstunde ist also die Arbeit, die von dem Effekt 1 Kilowatt während einer Stunde oder von dem Effekt 2 Kilowatt während einer halben Stunde usw. geleistet wird. Selbstverständlich wird diese Arbeit des Stromes erst dadurch möglich, daß die Dampfmaschine oder Turbine mindestens dieselbe Arbeit auf die Dynamomaschine überträgt, in Wirklichkeit aber muß die Dampfmaschine oder Turbine

### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

natürlich mehr Arbeit leisten, weil sie noch die Reibung der Maschine und die sonstigen schädlichen Widerstände zu überwinden hat.

Wichtig ist besonders der *Effekt im ganzen äußeren Stromkreis* einer Dynamomaschine. Gerade die Vorgänge im *äußeren Stromkreis*, z. B. das Brennen von Lampen oder das Treiben von elektrischen Motoren oder galvanoplastische Vorgänge, sind es ja, welche die nützliche Arbeit der Dynamomaschinen ausmachen.

Da die Spannung an den Enden des äußeren Stromkreises die Klemmspannung ist, so gibt die Klemmenspannung einer Maschine, in Volt ausgedrückt, multipliziert mit der Stromstärke im äußeren Stromkreis in Ampere, den *äußeren Effekt* in Watt oder, wenn man die Zahl der Watt durch 1000 dividiert, in Kilowatt. Außer diesem äußeren, *nutzbaren Effekt* verbraucht aber jede Maschine noch einen bestimmten Effekt in ihrem Innern bloß dadurch, daß der Strom im Anker und um die Magnete herumfließt. Es ist die Aufgabe einer jeden Maschinenkonstruktion, diesen Effekt im Innern möglichst klein zu machen, damit der Hauptteil der aufgewendeten Arbeit im äußeren Stromkreis wirklich nutzbar verwendet werden kann. Das Verhältnis des äußeren Effekts zum gesamten (im Innern der Maschine und im äußeren Stromkreis zusammen) entwickelten Effekt nennt man den *elektrischen Wirkungsgrad* der Maschine und drückt ihn in Prozenten aus. Dieser beträgt bei den größten Maschinen bis zu 96 Proz., wenn die Maschinen, wie man sagt, *voll belastet* sind, d. h. wenn die Stromstärke im äußeren Kreis so groß ist, wie sie bei der betreffenden Maschine sein soll. Das Verhältnis des Effektes im äußeren Stromkreis zu dem gesamten von der Antriebsmaschine auf die Dynamomaschine übertragenen mechanischen Effekt (welcher größer ist als der gesamtelektrische Effekt, weil ja noch die Arbeit zur Überwindung der mechanischen Widerstände, der Reibung usw. in ihm enthalten ist) bezeichnet man als den *Wirkungsgrad* der Maschine. Er beträgt bei kleinen Maschinen 75—80 Proz., bei großen steigt er bis zu 95 Proz.

Unsere bisherigen Betrachtungen bezogen sich alle auf Dynamomaschinen, welche Gleichströme liefern, auf *Gleichstromdynamos*. Man erhält solche, wie oben angeführt, dadurch, daß man mittels des Kollektors die Ströme aus dem Ring- oder Trommelanker der Reihe nach von verschiedenen Spulen, nicht immer von derselben Spule, abnimmt. Wenn man dagegen direkt von einer und derselben Spule dauernd den Strom in die äußere Leitung sendet, so erhält man bei der Rotation dieser Spule vor abwechselnden Magnetpolen immer Wechselströme. Man kann das an der Fig. 52 S. 63 direkt sehen. Verfolgt man eine Spule, z. B. die Spule a, die in der Figur gerade oben steht, bei ihrer Rotation um die Achse, so sieht man, daß auf der oberen Hälfte, wenn die Spule sich von B nach oben bis  $B_1$  bewegt, der Strom in ihr von hinten nach vorn fließt, daß er dagegen in ihr von vorn nach hinten fließt, wenn die Spule von  $B_1$  sich auf der unteren Hälfte bei B bewegt. An den Stellen B und  $B_1$  findet also bei jeder Spule eine Richtungsänderung ihres Stromes

#### VIERTES KAPITEL

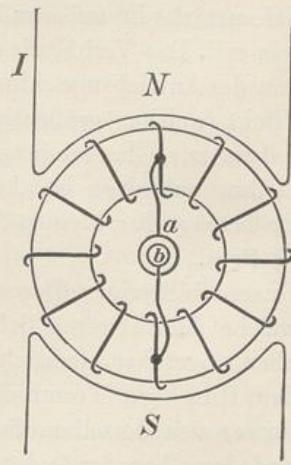
statt. Verbindet man also, wie es in **Fig. 60** gezeichnet ist, das eine Ende einer Spule mit einem metallischen Ring *a* auf der Achse, und das Ende der diametral gegenüberliegenden Spule mit einem anderen Ring *b* auf der Achse, der aber von *a* isoliert sein muß, so haben diese metallischen Ringe immer entgegengesetzte Spannung, also einen Spannungsunterschied, und wenn man die beiden Ringe durch einen Draht verbindet, so fließt in diesem ein Strom. Aber der Spannungsunterschied der beiden Pole ist ein wechselnder, bald ist der Ring *a* positiv und *b* negativ, nach einer halben Umdrehung ist *a* negativ und *b* positiv. Der Spannungsunterschied der beiden Ringe — den man kurz die Spannung des Wechselstromes nennt — verläuft so, wie es **Fig. 61** zeigt. Die Spannung nimmt von *a* an, wo sie Null ist, bei der Rotation der Spulen erst positive Werte an, die bei *b*, wo sie  $b\beta$  ist, ein Maximum besitzt, dann nimmt die positive Spannung ab bis *c*, wo sie Null wird; beim Weiterdrehen wird die Spannung negativ bis zu einem Maximum  $d\delta$  bei *d*, und diese negative Spannung nimmt wieder ab bis *e*, wo der Vorgang von neuem beginnt. Man bezeichnet die Zeit, welche verfließt von der Stelle *a* bis zur Stelle *e* als die *Periode* des Wechselstroms. Sie ist in Fig. 60 gleich der Zeit, in welcher der Grammesche Ring eine vollständige Umdrehung gemacht hat.

Man denkt sich in Fig. 61 die Strecke zwischen *a* und *e* in 360 Grade eingeteilt und bezeichnet jeden Grad und die zugehörige Spannung als eine *Phase* der Spannung.

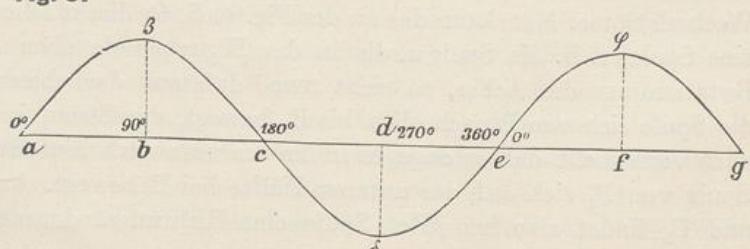
Verbindet man nun die beiden metallischen Ringe *a* und *b* unserer Maschine Fig. 60 durch eine Leitung, so fließt in dieser ein Wechselstrom, dessen Stärke auch durch eine solche Kurve wie in Fig. 61 dargestellt wird. Auch der Strom fängt bei Null an, erreicht ein Maximum nach einer Richtung, wird wieder Null, fließt dann in entgegengesetzter Richtung, erreicht ein Maximum und wird dann wieder Null, wonach der Vorgang von neuem beginnt. Die Periode für den Strom ist natürlich genau dieselbe wie für die Spannung.

Da also Spannung und Strom wechselnde Werte annehmen, so muß man eine Festsetzung treffen, was man unter der Stromstärke und der Spannung

**Fig. 60**



**Fig. 61**



### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

eines Wechselstroms versteht. Man ist übereingekommen, bei einem Strom oder einer Spannung, die durch eine Kurve wie in **Fig. 61** dargestellt werden, unter der Spannung des Wechselstroms zu verstehen die maximale Spannung (also die Spannung b β in Fig. 61) multipliziert mit 0,7, und ebenso ist die Stromstärke des Wechselstroms gleich 0,7 mal der maximalen Stromstärke. Die Amperemeter und Voltmeter für Gleichstrom, welche auf dem Hineinziehen eines Eisenkerns in eine Drahtspule beruhen, messen auch die Stromstärke und Spannung von Wechselströmen. Nur muß die Skala derselben für Wechselströme besonders eingeteilt sein.

Die Wechselströme spielen eine überaus bedeutende Rolle in der Technik, und zwar deswegen, weil man bei ihnen sehr hohe Spannungen leicht erzeugen kann, was bei Gleichstrommaschinen deswegen nicht möglich ist, weil bei diesen die hohen Spannungen am Kollektor sich in Funken ausgleichen. Gleichstrommaschinen werden höchstens für 1000 oder 2000 Volt Spannung gebaut, während man Wechselstrommaschinen für viele Zehntausende von Volt konstruieren kann. Wir werden besprechen, daß die Fortleitung elektrischer Ströme umso billiger ist, je höher die Spannung derselben ist.

Aus diesem Grunde werden Wechselstrommaschinen vielfach gebaut und sogar zum Teil solche von kolossalen Dimensionen. Ja, es werden die elektrischen Zentralen in den größeren Städten und die Überlandzentralen meistenteils überhaupt nur noch mit Wechselstrom (resp. dem bald zu erwähnenden Drehstrom) ausgeführt, eben wegen der sonst unerreichbaren Billigkeit dieses Systems.

Die *Wechselstrommaschinen* bestehen alle aus den induzierten Drahtspulen, die man zusammen auch hier als *Induktor* oder *Anker* oder *Armatur* bezeichnet, und den induzierenden Feldmagneten. Als Magnete werden nur Elektromagnete benutzt. Zur Magnetisierung der Feldmagnete braucht man bei jeder Wechselstrommaschine einen Gleichstrom. Dieser wird gewöhnlich von einer kleinen Gleichstrommaschine erzeugt, die entweder ganz getrennt von der Wechselstrommaschine ist oder die auf derselben Achse sitzt wie die Hauptmaschine für Wechselstrom. Während sich bei den Gleichstrommaschinen allgemein der Typus herausgebildet hat, daß die Feldmagnete ruhen und der Anker sich innerhalb eines feststehenden ringförmigen Gestells dreht, auf dem die Feldmagnete angebracht sind, ist bei den Wechselstrommaschinen gerade der umgekehrte Typus als vorteilhaft erkannt worden, nämlich daß die Feldmagnete rotieren und daß außen um sie herum der Anker feststehend angeordnet wird, so daß man von festen Klemmen den Strom vom Anker nach außen führen kann. Den feststehenden Teil einer Wechselstrommaschine nennt man den *Stator*, den gedrehten den *Rotor*. Meistenteils bilden also die Feldmagnete den Rotor und der Anker den Stator.

Um die Art der Konstruktionen von Wechselstrommaschinen zu erkennen, sollen die **Fig. 62–64** als Schema dienen. Der Anker besteht bei diesen aus einem feststehenden äußeren Ring von Eisen (R in **Fig. 62**), der die induzierenden Drahtspulen trägt. Die Feldmagnete M sind sternförmig im Innern des

#### VIERTES KAPITEL

Ringes angeordnet, und dieser Magnetkranz wird durch eine Dampfmaschine gedreht, während der Anker festbleibt. Die Feldmagnete werden durch den Strom einer besonderen Gleichstrommaschine erregt. Die Pole der Feldmagnete sind abwechselnd nord- und südmagnetisch und tragen abgerundete Polschuhe, wo sie dem Ring gegenüberstehen. Der eiserne Ring selbst ist an seinem inneren Umfang mit einer Anzahl von Nuten versehen, und zwar sind dreimal soviel Nuten vorhanden als Magnetpole. Fig. 62 zeigt den Magnetkranz M und den Eisenring R mit seinen Nuten. Die Drahtwickelung des Ankers wird nun in die Nuten eingelegt, und zwar kann man mehrere Wechselstromkreise erhalten, je nach der Art, wie man die Nuten zur Wickelung benutzt.

Um einen *einzig*en, sogenannten *einfachen* oder *einphasigen Wechselstrom* zu erhalten, legt man, wie Fig. 63 zeigt, Drähte in die Nuten 1 und 3 und verbindet diese wie in der Figur; die folgende Wickelung legt man in die Nuten 4 und 6 usw., läßt also die Nuten 2, 5, 8 usw. frei. Da die Wickelungen, deren drei mit a, b, c bezeichnet sind, in jedem Moment dieselbe Lage gegen die verschiedenen Magnetpole haben, so werden sie von den sich drehenden Magneten in gleicher Weise induziert, aber natürlich entstehen in a und c Ströme, die entgegengesetzte Richtung haben wie die in b, weil gegen die ersteren sich gerade ein Nordpol, gegen die letzteren sich gerade ein Südpol bewegt. Wenn man daher die Spulen alle hintereinander schalten will, so hat man die Spule b entgegengesetzt zu verbinden, also das Ende von a mit dem Ende von b und den Anfang von b mit dem Anfang von c. Die freien Enden der ersten und der letzten Spule werden dann zu feststehenden Klemmen geführt, von denen man den Wechselstrom in den äußeren Stromkreis führen kann. Rotiert das Magnetrad, so wird die Richtung der Ströme im Anker immer umgekehrt, sobald ein Nordpol an die Stelle des früheren Südpols gelangt ist und umgekehrt. Die Periode des Wechselstroms ist also die Zeit, in welcher ein Pol des Magneten sich von der Spule a bis zu genau derselben Lage gegen die Spule c bewegt hat.

Man kann aber auch durch eine andere Benutzung der Nuten aus derselben Anordnung drei verschiedene Stromkreise bilden, deren jeder Wechselströme enthält, jedoch so, daß die Wechsel in der Richtung des Stromes nicht bei allen drei in demselben Moment, sondern in aufeinanderfolgenden Zeiten geschehen. Ein solches System von drei Wechselströmen nennt man *dreiphasigen Wechsel-*

Fig. 62

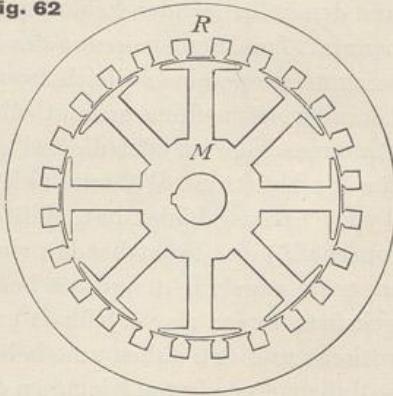
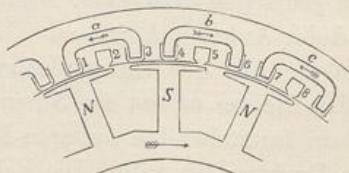
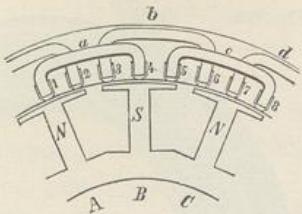


Fig. 63

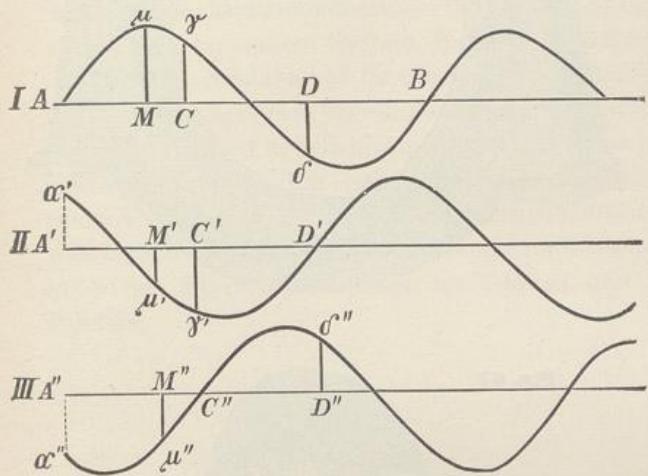


### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

**Fig. 64**



**Fig. 65**



etwa gerade seine größte Stärke nach einer Richtung hat, so wird in Spule b und in Spule c gleichzeitig ein Strom induziert werden, der schwächer ist und in den beiden nach verschiedenen Richtungen geht. Bei der Rotation der Magnete entsteht nun in jeder Spule, z. B. in a, wieder derselbe Stromimpuls wie bei der in der Figur gezeichneten Lage, sobald der erste Nordpol links (A) sich nach rechts bewegt hat, bis in die Lage des nächsten Nordpols rechts (C). Dieselbe Lage wie a hat nun die Spule d usw. Kurz, wenn man die 1., 4., 7. . . Spule miteinander verbindet, ebenso die 2., 5., 8. . . , ferner die 3., 6., 9. . . , so erhält man drei getrennte Stromleiter, in denen Wechselströme auftreten, die nicht gleichzeitig ihre größten und kleinsten Werte haben, sondern die, wie man es nennt, verschiedene *Phasen* besitzen. Jeder von den drei Strömen ist gegen den nächsten um  $120^\circ$  ( $\frac{360^\circ}{3}$ ) in der Phase verschoben. Der gleichzeitige Zustand der drei Ströme ist durch **Fig. 65** dargestellt. Wenn der Strom I gerade bei A von Null aufwärts geht, so hat der Strom II in demselben Moment die Stärke  $A' a'$ , die so groß ist wie die Stärke des Stromes I an derjenigen Stelle, die um  $120^\circ$  von A entfernt ist (nämlich bei C). Und der Strom III hat in demselben Moment die Stärke  $A'' a''$ , die so groß ist wie die Stärke von II an einer Stelle, die um  $120^\circ$  von A' entfernt ist (nämlich bei C') oder wie die Stärke von I an einer Stelle, die um  $240^\circ$  von A entfernt ist (nämlich bei D). Bei den

strom oder kurz *Drehstrom*. Um aus der Maschine Drehströme zu erhalten, macht man die Wicklung so, wie es in

**Fig. 64** angedeutet ist.

Die erste Wicklung a wird in Nute 1 und 4 gelegt, die zweite b in 3 und 6, die dritte c in 5 und 8 usw.; es wird also keine Nute frei gelassen. Man sieht aus der Figur, daß in einem und demselben Moment die Spule a gerade über der Mitte zweier Magnetpole sich befindet, während die Spule b über den Anfängen, die Spule c über den Enden der Magnetpole steht. Wenn also in der Spule a der induzierte Wechselstrom

#### VIERTES KAPITEL

Drehstrommaschinen werden nun die drei Anfänge der drei Spulensysteme in der Maschine selbst miteinander verbunden, und die drei anderen Enden werden zu je einer festen Klemme geführt. Von diesen drei Klemmen gehen dann drei Leitungen aus, welche die *Drehströme* nach außen führen.

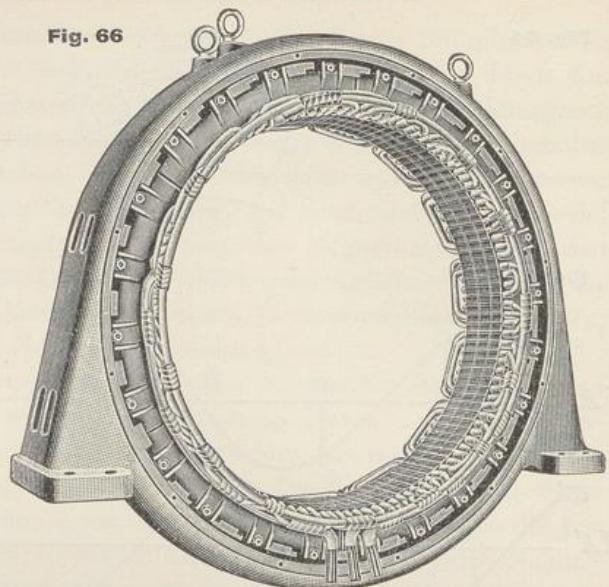
Die Abbildung eines ausgeführten Stators einer Drehstrommaschine der *Bergmann-Elektrizitätswerke* zeigt **Fig. 66**. Das ringförmige Gehäuse aus Eisen enthält auf seiner Innenseite die Spulen, welche in halbgeschlossene Nuten eingelegt und zweckmäßig isoliert sind. Der Rotor, der Magnetkranz, ist aus **Fig. 67** ersichtlich, und die ganze Maschine wird durch **Fig. 68** dargestellt. Das Gehäuse erhält noch Schutzhügel, um die Spulen vor Beschädigung zu schützen. An der ausgeführten Maschine (**Fig. 68**)

sieht man noch vorn auf derselben Achse eine kleine Gleichstrommaschine, die den Erregerstrom für die Magnete liefert.

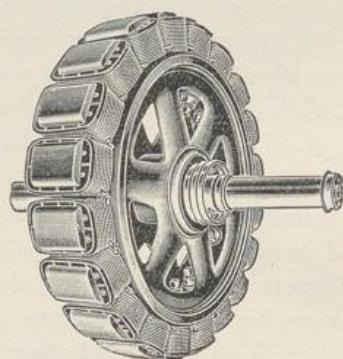
Um die Spannung in den Wechsel- und Drehstrommaschinen zu ändern, reguliert man den Erregerstrom der Magnete. Indem man diesen stärker oder schwächer macht, wird auch die Spannung des Wechselstromes oder der Drehströme stärker oder schwächer.

Zur Messung der Spannung der Wechsel- und Drehströme sowie der Stromstärke in den Leitungen werden auch hier *Voltmeter* und *Amperemeter* direkt in der Nähe der Maschine angebracht. Und dabei hat man bei einfachem Wechselstrom, *Einphasenstrom*, ganz ebenso wie bei Gleichstrom, nur je ein Voltmeter und ein Amperemeter anzuwenden. Das Voltmeter wird zwischen die beiden Leitungen, die von der Maschine ausgehen, gelegt, das Amperemeter kommt direkt in die Leitung des Hauptstroms. Dagegen bei Drehstrom, wo man drei

**Fig. 66**



**Fig. 67**



### DYNAMOMASCHINEN FÜR GLEICHSTROM UND WECHSELSTROM

Leitungen hat, hat man die Spannung zwischen je zweien der drei Leitungen (1 und 2, 1 und 3, 2 und 3) zu messen und die Stromstärke in jedem Zweige. Für den letzteren Zweck hat man also drei Amperemeter, in jeden Leiter des Hauptstromes eines, einzuschalten. Für die Spannungsmessung hat man ebenso drei Voltmeter, und zwar je eines in den Nebenschluß zwischen die Klemmen 1 und 2, 1 und 3, 2 und 3 zu legen.

Obwohl Wechselströme nicht so einfach zu behandeln sind wie Gleichströme, steht doch die Technik des Wechselstroms der Technik des Gleichstroms ebenbürtig da. Die Dynamomaschinen für das eine System sind ebenso leistungsfähig wie die für das andere System. Beide Arten setzen heute 85 bis 95 Proz. der von Dampfmaschinen auf sie übertragenen Arbeit in elektrische Energie um. Die Dynamomaschinen verwandeln also direkt mechanische Arbeit in elektrische Energie, und zwar in beliebigem Betrage. Man hat heutzutage vielfach Dynamomaschinen von solcher Größe, daß eine Maschine 10 000 Pferdekräfte aufnehmen, also die Arbeit von 10 000 Pferden kontinuierlich in elektrische Energie verwandeln kann, ja es sind Wechselstrommaschinen gebaut worden, die bis zu 60 000 Pferdekräfte Effekt aufnehmen und in elektrische Energie umwandeln.

Fig. 68

