



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000308532





# Wechselstromtechnik.

In vier Bänden.

---

III. Band.

Wechselstromgeneratoren.

---

Von

M. T. ZSAKULA

dipl. Maschineningenieur, Assistent an der techn. Hochschule in Budapest.

---

Mit 133 Abbildungen.

---

WIEN und LEIPZIG.

A. HARTLEBEN'S VERLAG.



# Elektro-technische BIBLIOTHEK.



LX. Band.

## Wechselstromtechnik.

III. Band.

Wechselstromgeneratoren.

A. Hartleben's Verlag.  
WIEN UND LEIPZIG.

# A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek.

Eine Darstellung des ganzen Gebietes  
der angewendeten Elektricität nach dem Standpunkte der Gegenwart.

## INHALT DER SAMMLUNG:

1. Band. Glaser-De Cew. Die dynamo-elektrischen Maschinen. Ihre Geschichte, Grundlagen, Construction und Anwendungen. 6. Aufl., bearb. von Dr. F. Auerbach. — 2. Band. Die elektrische Kraftübertragung und ihre Anwendung in der Praxis, mit besonderer Rücksicht auf die Fortleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. 3. Aufl. — 3. Band. Das elektrische Licht. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 3. Aufl. — 4. Band. Die galvanischen Batterien, Accumulatoren und Thermosäulen. Eine Beschreibung der hydro- und thermo-elektrischen Stromquellen, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 4. Aufl. — 5. Band. Die Verkehrs-Telegraphie, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von J. Sach. — 6. Band. Telephon, Mikrophon und Radiophon, mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von Theodor Schwartz. 3. Auflage. — 7. Band. Die Elektrolyse, Galvanoplastik u. Reinmetallgewinnung, mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Eduard Japing. 2. Aufl. — 8. Band. Die elektrischen Mess- u. Präcisions-Instrumente. Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde. Von A. Wilke. 2. Aufl. — 9. Band. Die Grundlehren der Elektricität, mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 3. Aufl. — 10. Band. Elektrisches Formelbuch mit einem Anhang, enthaltend die elektrische Terminologie in deutscher, französischer und englischer Sprache. Von Prof. Dr. P. Zech. — 11. Band. Die elektrischen Beleuchtungs-Anlagen, mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Ausführung. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 3. Aufl. — 12. Band. Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen und das Signalwesen. Von L. Kohlfürst. — 13. Band. Die elektrischen Uhren und die Feuerwehr-Telegraphie. Von Dr. A. Tobler. — 14. Band. Die Haus- u. Hôtel-Telegraphie. Von O. Canter. 2. Aufl. — 15. Band. Die Anwendung der Elektricität für militärische Zwecke. Von Dr. Fr. Waechter. — 16. Band. Die elektrischen Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis. Von J. Zacharias. 2. Aufl. — 17. Band. Die elektrische Eisenbahn bezüglich ihres Baues und Betriebes. Von Jos. Krämer. — 18. Band. Die Elektro-Technik in der prakt. Heilkunde. Von Prof. Dr. Rud. Lewandowski. — 19. Band. Die Spannungs-Elektricität, ihre Gesetze, Wirkungen und technischen Anwendungen. Von Prof. K. W. Zenger. — 20. Band. Die Weiltliteratur der Elektricität und des Magnetismus, 1860—1883. Von Gustav May. — 21. Band. Die Motoren der elektr. Maschinen mit Bezug auf Theorie, Construction und Betrieb. Von Theodor Schwartz. — 22. Band. Die Generatoren hochgespannter Elektricität. Von Prof. Dr. J. G. Wallentin. — 23. Band. Das Potential und seine Anwendung zur Erklärung elektrischer Erscheinungen. Von Dr. O. Tumlirz. — 24. Band. Die Unterhaltung und Reparatur der elektr. Leitungen. Von J. Zacharias. — 25. Band. Die Mehrfach-Telegraphie auf Einem Drahte. Von A. E. Granfeld. — 26. Band. Die Kabeltelegraphie. Von Max Jüllig. — 27. Band. Das Glühlicht, sein Wesen und seine Erfordernisse. Von Etienne de Fodor. — 28. Band. Geschichte der Elektricität. Von Dr. Gust. Albrecht. — 29. Band. Blitz und Blitz-Schutzvorrichtungen. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — 30. Band. Die Galvanostegie mit besonderer Berücksichtigung der fabrikmässigen Herstellung von Metallüberzügen. Von Josef Schaschl. — 31. Band. Die Technik des Fernsprechwesens. Von Dr. V. Wiefelbach. — 32. Band. Die elektro-technische Photometrie. Von Dr. Hugo Krüss. — 33. Band. Die Laboratorien der Elektro-Technik. Von Aug. Neumayer. — 34. Band. Elektricität und Magnetismus im Alterthume. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — 35. Band. Magnetismus u. Hypnotismus. Von G. W. Gessmann. 2. Aufl. — 36. Band. Die Anwendung der Elektricität bei registrirenden Apparaten. Von Dr. Ernst Gerland. — 37. Band. Elektricität und Magnetismus als kosmotellurische Kräfte. Von Dr. Theodor Hoh. — 38. Band. Die Wirkungsgesetze der dynamo-elektr. Maschinen. Von Dr. F. Auerbach. — 39. Band. Materialien für Kostenvoranschläge elektr. Lichtanlagen. Von Etienne de Fodor. — 40. Band. Die Zeittelegraphen und die elektr. Uhren vom praktischen Standpunkte. Von Ladislaus Fiedler. — 41. Band. Die elektrischen Motoren mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Strassenbahnen. Von Etienne de Fodor. — 42. Band. Die Glühlampe. Ihre Herstellung und Anwendung in der Praxis. Von J. Zacharias. — 43. Band. Die elektrischen Verbrauchsmesser. Von Etienne de Fodor. — 44. Band. Die elektrische Schweissung und Löthung. Von Etienne de Fodor. — 45. Band. Die elektrischen Accumulatoren und ihre Verwendung in der Praxis. Von J. Sack. — 46. Band. Elektricität direct aus Kohle. Von Etienne de Fodor. — 47., 48., 49. und 50. Band. Angewandte Elektrochemie. In 4 Bänden. Von Dr. Franz Peters. I. Band, Die Primär- und Secundär-Elemente. 2. Band. I. und II. Abthlg., Anorganische Elektrochemie. 3. Band. Organische Elektrochemie. — 51. und 52. Band. Materialistisch-hypothetische Sätze und Erklärung des Wesens und der Kraftäusserungen des elektrischen Fluidums. In zwei Bänden. Von Dr. F. Ph. Stögermayr. — 53., 54., 55. und 56. Band. Elektrometallurgie und Galvanotechnik. Ein Hand- u. Nachschlagewerk für die Gewinnung und Bearbeitung der Metalle auf elektrischem Wege. In vier Bänden. Von Dr. Fr. Peters. — 57. Band. Elektrische Strassenbahnen. Von Johannes Zacharias. — 58., 59., 60., Band. Wechselstromtechnik. Von M. T. Zsakula. I. Band. Der einphasige Wechselstrom. II. Band. Mehrphasige Wechselströme und Wechselstromsysteme. III. Band. Wechselstromgeneratoren — u. s. w., u. s. w.

Pro Band geheftet à 3 K 30 h = 3 Mark. Gebunden à 4 K 40 h = 4 Mark. Ab Band 57 pro Band geheftet à 4 K 40 h = 4 Mark. Gebunden à 5 K 50 h = 5 Mark.

**Jeder Band ist für sich vollkommen abgeschlossen und einzeln käuflich.**

# Wechselstromtechnik.

III. Band.

## Wechselstromgeneratoren.

Von

M. T. ZSAKULA

dipl. Maschineningenieur, Assistent an der techn. Hochschule in Budapest.

Mit 133 Abbildungen.



WIEN und LEIPZIG.

A. HARTLEBEN'S VERLAG.

1904.

(Alle Rechte vorbehalten.)



1-301738

K. u. k. Hofbuchdruckerei Carl Fromme in Wien.

BPU-B-195/2017

## I n h a l t.

---

	Seite
I. Kapitel. Geschichtliche Entwicklung der Wechselstromgeneratoren . . . . .	1
II. Kapitel. Allgemeines über Wechselstromgeneratoren. Einteilung der Wechselstrommaschinen . . . . .	92
III. Kapitel. Die Erzeugung der wechselstrom-elektromotorischen Kraft . . . . .	98
Induktionsverhältnisse in einer Drahtschleife unter verschiedenen Bedingungen bei gleichmäßiger Geschwindigkeit. Induktionsverhältnisse bei Gleichpolmaschinen. Wechseipolmaschinen mit gegenüberliegenden gleichnamigen Magnetpolen. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse. Einfluß der Spulendimensionen bei Wechselstrommaschinen. Wicklungen der Wechselstromgeneratoren.	
IV. Kapitel. Der Wechselstromgenerator im Betriebe . . . . .	163
Spannungsverhältnisse. Ankerückwirkung. Selbstinduktion. Charakteristische Kurven der Wechselstrommaschinen. Induktionsgenerator. Wirkungsgrad der Wechselstrommaschinen. Parallelschalten der Wechselstrommaschinen.	
Namen- und Sachregister . . . . .	197

---



# Wechselstromgeneratoren.





## I. Kapitel.

# Geschichtliche Entwicklung der Wechselstromgeneratoren.

Die ersten Maschinen, mit welchen man elektrische Ströme zu erzeugen bestrebt war, waren Wechselstrommaschinen. Bis zur Entdeckung der Induktion durch Faraday konnte man elektrische Ströme nur durch galvanische Batterien erzeugen. Die Unvollkommenheit dieser Stromquellen, sowie die großen Kosten solcher Stromerzeugung standen der Entwicklung der Elektrotechnik hindernd im Wege und nur die Nutzbarmachung der Erscheinung der Induktion ermöglichte elektrische Energie verhältnismäßig billig herzustellen. Tatsächlich finden wir, daß jene Bestrebungen, welche die Anfänge der mächtig entwickelten heutigen Elektrotechnik bilden, in diesen Zeitpunkt fallen.

Allgemeines Bestreben war, die Batterien durch Maschinen zu ersetzen, wobei man das Augenmerk darauf richtete, durch Maschinen ebenfalls Gleichstrom zu erzeugen. Man verwendete zu diesem Zwecke Kommutatoren, welche auf der rotierenden Achse befestigt waren und den induzierten Wechselstrom in Gleichstrom verwandelten.

Die erste, öffentlich bekannt gewordene Maschine rührt von Pixii aus dem Jahre 1832 her. Diese Maschine besaß einen mit vielen Windungen versehenen Elektromagnet, vor dessen Polen ein

permanenter Magnet mit vertikaler Achse drehbar angeordnet war (Fig. 1). Um möglichst große Drehgeschwindigkeit herstellen zu können, ist die Achse mit einem konischen Zahnrad versehen, dessen Zähne in ein größeres Kegelrad eingreifen, welches durch eine Kurbel in rasche Rotation versetzt werden kann. In den Windungen werden beim

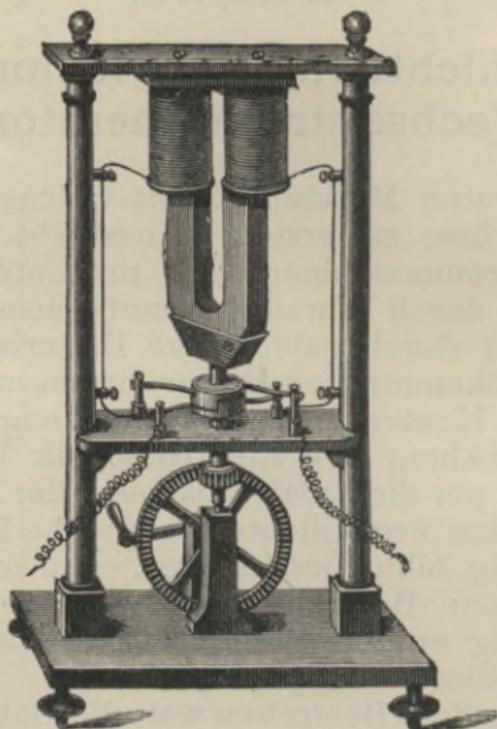


Fig. 1.

Betriebe Wechselströme induziert, welche durch den rotierenden Kommutator und die vier Schleifbürsten gleichgerichtet werden. Durch diese Vorrichtung fließt in den äußeren Stromkreis Gleichstrom, wollte man Wechselstrom erhalten, müßte man den Kommutator ganz weglassen und den äußeren Stromkreis mit den Enden der Elektromagnetwicklung direkt verbinden.

Um die Wirkungsweise dieser Maschine gut überblicken zu können, betrachten wir die in Fig. 2 dargestellte Anordnung, welche die Hauptteile der Pixi'schen Maschine zeigt.

$NS$  ist der rotierende permanente Magnet.  $a b$  die Pole des Elektromagneten, welcher der Einfachheit halber an beiden Schenkeln nur eine Drahtlage hat. Die Drähte sind vom Eisenkerne und

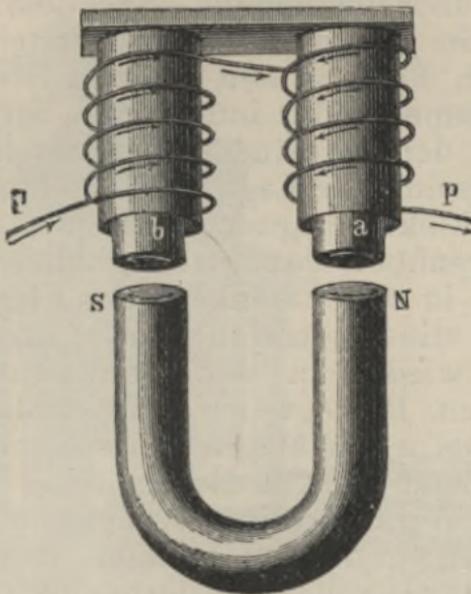


Fig. 2.

voneinander isoliert und in der bezeichneten Weise untereinander verbunden.

Nehmen wir an, daß der permanente Magnet vom Elektromagneten aus gesehen in der Richtung der Uhrzeigerbewegung rotiert. Nähert sich bei der Drehung der Nordpol  $N$  dem Pole  $a$ , dann werden in den Windungen nach Lenz' Gesetz induzierte Ströme solcher Richtung entstehen, welche die Bewegung hindern. Die Bewegung wird gehemmt, wenn die induzierten Ströme bei  $a$  ebenfalls einen Nordpol erzeugen, die Stromrichtung in

den am Schenkel *a* liegenden Drahtwindungen wird also durch die eingezeichneten Pfeile gegeben, d. h. vom Pole aus gesehen, der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt sein.

Auf der anderen Seite nähert sich der Südpol dem Schenkel *b*. Bei *b* muß demnach ein Südpol entstehen und die Richtung des induzierten Stromes in den Drahtwindungen wird mit der Uhrzeigerbewegung übereinstimmen. Nachdem die beiden Drahtlagen in geeigneter Weise miteinander verbunden sind, fließt in den äußeren Stromkreis bei *p p'* die Summe beider induzierten Ströme.

Kommt der permanente Magnet in die in der Figur eingezeichnete Lage, d. h. stehen die Pole *N* und *S* den Elektromagnetschenkeln *a*, beziehungsweise *b* gegenüber, dann treten nahezu alle Kraftlinien bei *a* in den Eisenkern des Elektromagnets, durchsetzen diesen, treten bei *b* aus demselben, um bei *S* wieder in den permanenten Magnet hineinzutreten. Bewegt sich nun der Magnet weiter, dann muß bei *a* ein Magnetpol südlicher Polarität entstehen, denn nur in diesem Falle wird der induzierenden Wirkung eine magnetische, hemmende Wirkung entgegentreten können. In diesem Zeitpunkte ändert also die induzierte elektromotorische Kraft ihre Richtung, sie wird jener der eingezeichneten entgegengesetzt sein.

Andererseits entsteht bei *b* ein Nordpol, welcher den sich entfernenden Südpol zurückhalten will und den sich nähernden Nordpol *N* zurückstößt. Die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft bleibt also solange dieselbe, bis *N* vor *b* und *S* vor *a* zu stehen kommt.

Von diesem Zeitpunkte angefangen, wiederholen sich die eben beschriebenen Induktionserscheinungen während der Bewegung des Magnetes, jedoch in umgekehrter Reihenfolge. Die Stromrichtung in der Bewicklung des Elektromagnetes bei geschlossenem

äußeren Stromkreise wird also mit der eingezeichneten solange übereinstimmen, bis  $N$  wieder unter  $a$  und  $S$  unter  $b$  zu stehen kommt. Von nun an treten die Induktionserscheinungen in der beschriebenen Nacheinanderfolge auf.

Wir ersehen also, daß im induzierten Stromkreise dieselben Verhältnisse nach einer vollen Umdrehung des Magnetes eintreten, d. h. daß der

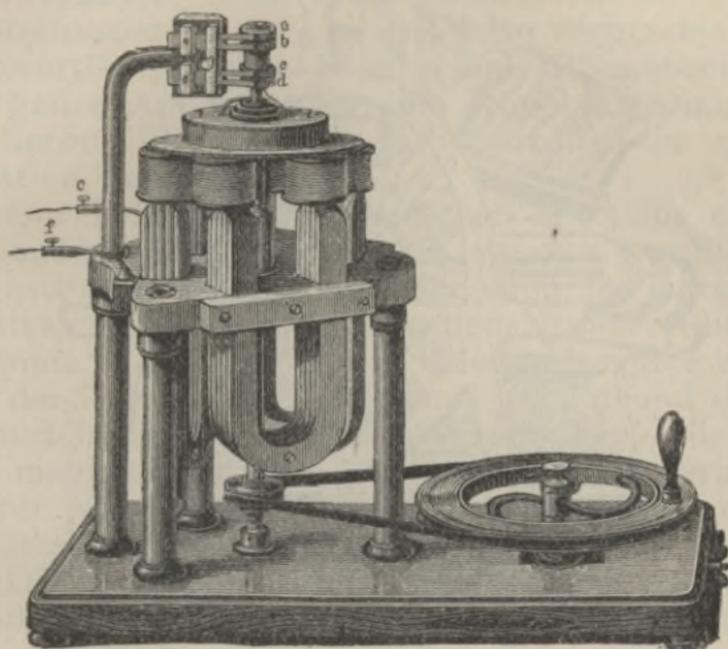


Fig. 3.

induzierte Wechselstrom während einer Umdrehung des Magnetes eine volle Periode hat. Die induzierte elektromotorische Kraft ist zweimal Null und hat zwei Maximalwerte entgegengesetzten Vorzeichens.

Der effektive Wert der elektromotorischen Kraft wird unter sonst gleichen Umständen um so größer, je schneller der Magnet sich dreht, dies zieht aber zugleich eine Vergrößerung der Periodenzahl des induzierten Wechselstromes nach sich.

Im selben Jahre, als Pixii seine Maschine veröffentlichte, konstruierte auch Saxton eine Maschine, welche sich von der ersteren darin unterschied, daß sowohl die Magnete, als auch die Induktorrollen horizontale Lagen einnahmen. Die Magnete waren hierbei feststehend, die rotierende Bewegung führten die leichteren Induktorrollen aus. Hier ist

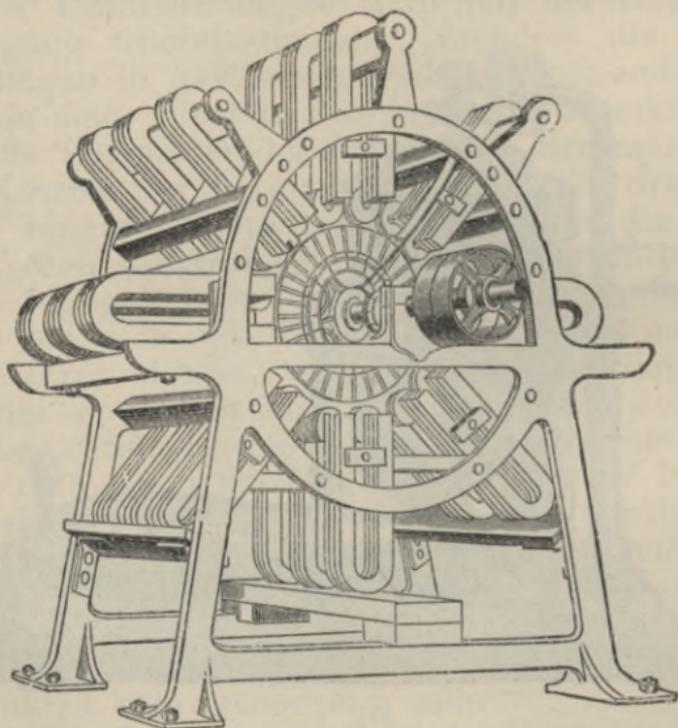


Fig. 4.

auch Clarke zu erwähnen, dessen Maschine (1836) nur jenen Unterschied aufwies, daß der Magnet mit den Polen nach unten vertikal aufgestellt war und die Induktorrollen nicht vor den Polen, sondern seitlich rotierten.

Die ungünstige Anordnung der Magnete und der Induktorrollen, sowie die schlechte Raumausnutzung waren die Ursachen, weshalb diese

Maschinen nicht besonders befriedigten. Einen Fortschritt in dieser Hinsicht bildet Stöhrers Maschine (1844), welche mehrere Magnete und Induktorrollen besaß. Ihre Einrichtung ist aus Fig. 3 ersichtlich.

Drei, aus Stahllamellen zusammengesetzte permanente Magnete sind in einem Gestell so angeordnet, daß die sechs Pole an der Peripherie eines Kreises liegen. Über diesen Polen rotieren um eine vertikale Achse sechs Induktorrollen, welche untereinander in geeigneter Weise verbunden sind. Die vertikale Achse besitzt eine Riemenscheibe, der ganze Apparat aber eine Riementransmission, mit deren Hilfe man die Induktorrollen in rasche Rotation versetzen kann.

Der Erfolg der Stöhrerschen Maschine eiferte nun andere Konstrukteure an, auf dem von Stöhrer eingeschlagenen Weg weiterzugehen. Im Jahre 1849 konstruierte Nollet seine unter dem Namen „Alliance“ bekannte Maschine (Fig. 4). Diese Maschine wurde von der Compagnie „l'Alliance“ gebaut und diente hauptsächlich zu Beleuchtungszwecken. Sie war eine magnetelektrische Maschine mit acht Gruppen starker Magnete, welche strahlenförmig auf einem gußeisernen Gestell befestigt waren.

Die horizontale Achse trug mehrere Messingscheiben, welche nebeneinander angeordnet waren und deren jede mit 16 Induktorspulen versehen war. Diese Spulen hatten Kerne aus weichem Eisen und sie bewegten sich zwischen den Polen benachbarter Magnete. Die Magnete waren so angeordnet, daß sowohl die benachbarten, als auch die in einer Reihe stehenden Pole abwechselnde Polaritäten ergaben, wodurch erreicht wurde, daß die Induktorrollen immer zwischen ungleichnamigen Magnetpolen rotierten. Hierdurch wurde ermöglicht, daß der aus den zusammengeschalteten Spulen erzeugte Wechselstrom eine beträchtliche Stärke hatte.

Die Alliancemaschine hatte keinen Kommutator zum Gleichrichten der induzierten Wechselströme, diese wurden als solche im äußeren Stromkreise verwendet. Die Fortführung des Wechselstromes erfolgte durch Bürsten und zwei Schleifringe, deren einer mit der Achse verbunden, der andere aber von ihr isoliert war. Das eine Ende der Induktorbewicklung war mit der Achse verbunden,

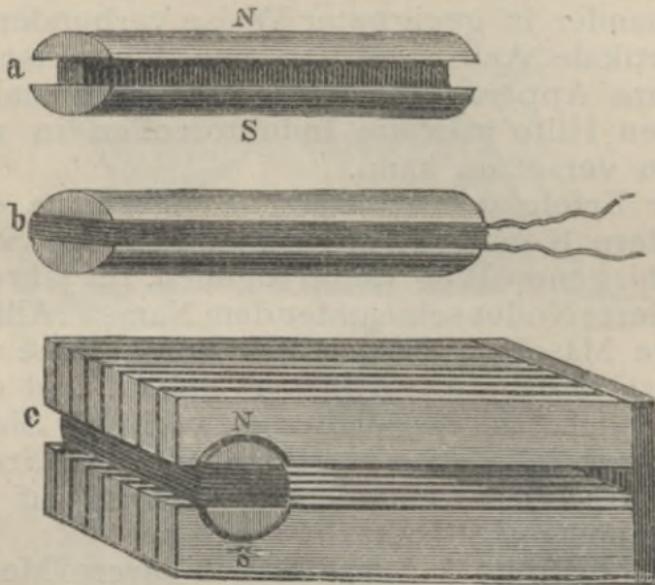


Fig. 5.

das andere aber zu dem zweiten Schleifring geführt.

Diese Maschine war zu kostspielig und in ihrer Bauart zu kompliziert, weshalb sie sich nicht behaupten konnte und mit der Zeit verdrängt wurde.

Im Jahre 1856 erfand Werner von Siemens seinen Doppel-T-Anker (Fig. 5). Durch diesen Anker konnte die Induktionswirkung wesentlich erhöht werden. Er besteht aus einem Eisenkerne von der Form Fig. 5 a, in dessen zwei Nuten die

Bewicklung verlegt wurde. Die fertige Armatur hatte die Form von Fig. 5 b. Diese Armatur wurde dann zwischen die Pole einer Magnetgruppe geschoben, welche so zusammengestellt war, daß alle gleichnamigen Pole auf eine Seite zu liegen kamen, außerdem waren die Schenkel so geformt, daß sie den Anker beinahe ganz umgaben.

Das eine Ende der Bewicklung war mit der Achse leitend verbunden, das andere führte aber

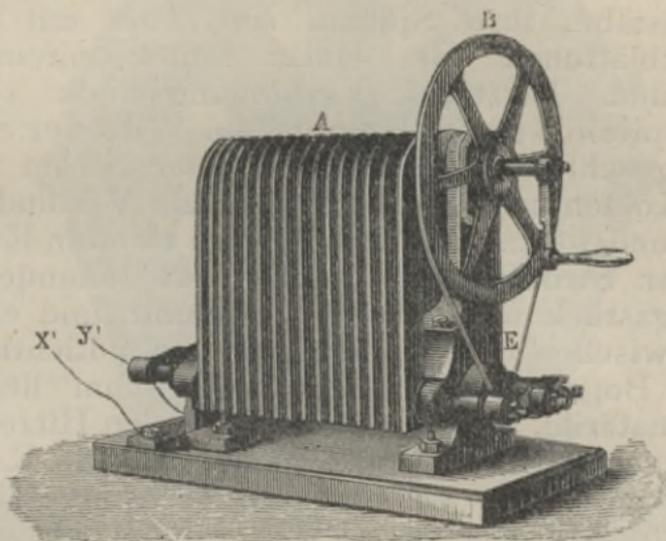


Fig. 6.

zu einem isolierten Schleifring. Zwei Bürsten, welche auf der Achse und am letztgenannten Schleifring lagen, bildeten die beiden Pole dieser Wechselstrommaschine.

In Fig. 6 ist eine Siemenssche Maschine mit Doppel-T-Anker zusammengestellt abgebildet. Der Anker wird mit Hilfe der Riementransmission *BE* in rasche Rotation versetzt, wodurch in den Windungen starker Wechselstrom induziert wird, welcher durch die Leitungen *x' y'* in den äußeren Stromkreis fließt.

Die Siemenssche Maschine wird heute nur mehr zum Betriebe von Fernsprechläuteapparaten benützt.

Die Erfindung der Jablochhoff-Kerze gab den Impuls, daß nun den Wechselstrommaschinen mehr Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Diese Kerzen bestehen aus zwei senkrecht aufgestellten Kohlenstäben, zwischen welchen der freigelassene schmale Raum mit Gips, Kaolin etc. ausgefüllt ist. Die Stromzuführung geschieht am unteren Ende der Kohlenstäbe, ihre Spitzen sind aber mit einem Graphitblättchen oder einem Leiter miteinander verbunden. Letzteres Verbindungsstück schützt eine Papierhülse vom Herabfallen. Wird der Stromkreis geschlossen, dann fließt der Strom durch einen Kohlenstab, durch das leitende Verbindungsstück, und gelangt dann durch den zweiten Kohlenstab zur Stromquelle zurück. Das leitende Verbindungsstück wird hierbei verbrannt, und es entsteht zwischen den Kohlenspitzen ein Lichtbogen. Dieser Bogen schmilzt das unter ihm liegende Isoliermaterial, welches bei der großen Hitze auch verflüchtigt wird. In dem Maße, als die Kohlenspitzen abbrennen, zieht sich der Lichtbogen immer mehr abwärts, bis er an den Enden der Kohlen erlischt.

Nachdem bei Gleichstrom die positive Kohle etwa doppelt so schnell abbrennt, als die negative, kann man für die Jablochhoffschen Kerzen nur Wechselstrom benutzen. Man fand in diesen Kerzen ein geeignetes Mittel, um die Verteilung des elektrischen Lichtes durchführen zu können, und tatsächlich verbreiteten sich diese sehr schnell und gaben Anregung dazu, daß die Konstruktion der Wechselstrommaschinen lebhafter betrieben wurde.

Mit der Zeit ergab sich aber, daß diese Beleuchtungsart nicht ganz tadellos ist, da die Kerzen flackern, ihr Licht aufwärts senden und wenn sie

erlöschen, von selbst nicht wieder in Funktion treten. Sind mehrere Kerzen nacheinander geschaltet, dann zieht das Erlöschen einer das Erlöschen sämtlicher Kerzen nach sich, wenn dies nicht mit be-

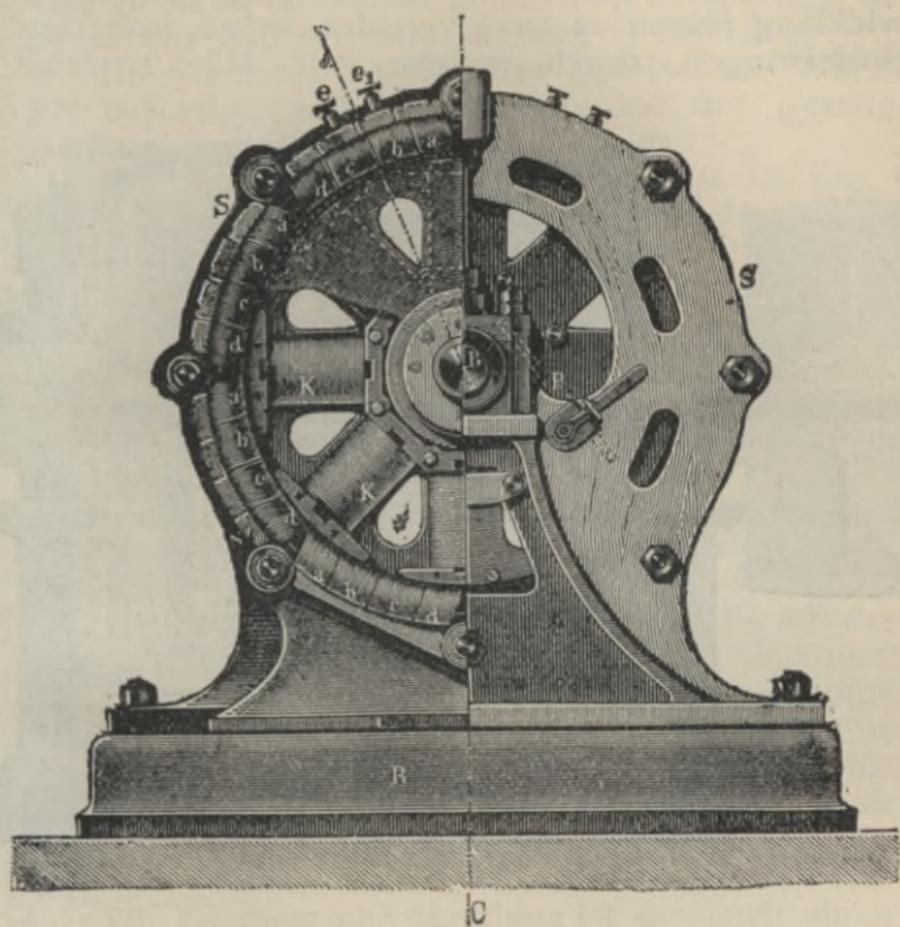


Fig. 7.

sonderen Vorrichtungen verhindert wird. Hierdurch verliert aber diese Lampe ihren größten und vielleicht einzigen Vorteil, welcher in dem besteht, daß sie keinen Regulierungsmechanismus besitzt.

Zur Speisung von Jablochkoff-Kerzen baute Gramme seine Wechselstrommaschine, welche aus

Fig. 7 ersichtlich ist. In dem von einem Ringanker umschlossenen Raume bewegt sich ein aus acht Elektromagneten bestehendes Magnetrad *KK*. Die Bewicklungen der Magnete sind nacheinander geschaltet, das Ende, sowie der Anfang dieser Bewicklung führen zu zwei von der Achse isolierten Schleifringen, durch welche mit Hilfe zweier

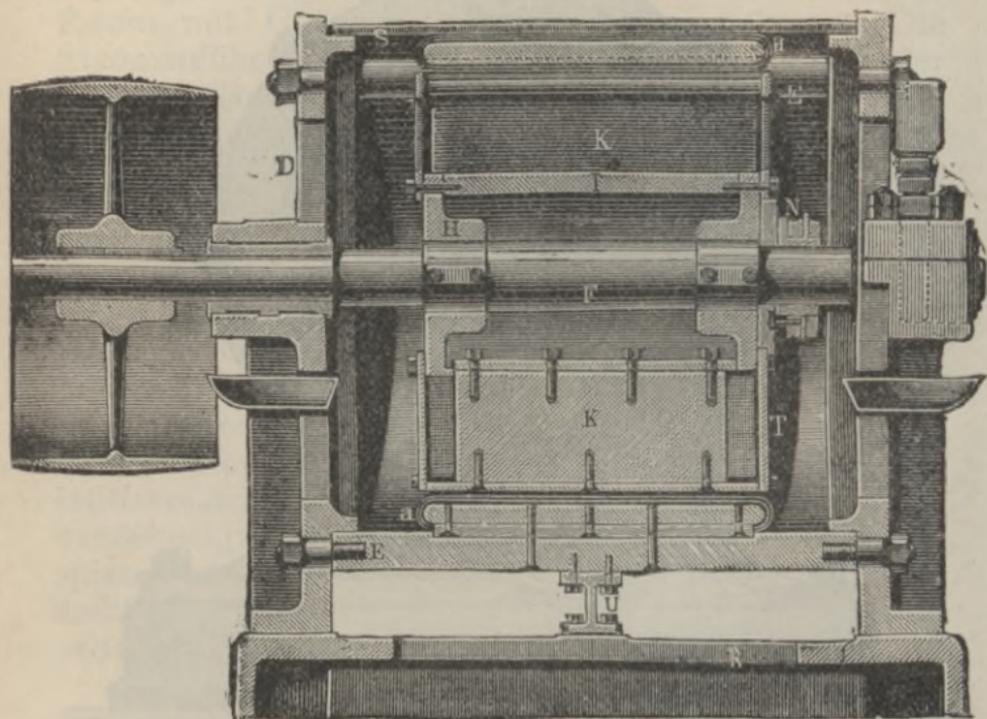


Fig. 8.

Schleifbürsten der erregende Gleichstrom zu den Elektromagneten geleitet wird. Alle Elektromagnete besitzen entsprechend geformte Polschuhe, außerdem ist das Magnetrad auf beiden Seiten mit durchlöcherten Messingplatten abgeschlossen.

Die Armatur besteht aus einer Ringwicklung, und zwar ist der Ring auf acht gleiche Teile geteilt. Jeder Teil besitzt vier Spulen *a*, *b*, *c* und *d*,

welche so gewickelt und untereinander verbunden sind, daß die induzierten Ströme sich summieren und einen Wechselstrom von der gewünschten Stärke ergeben. Die Enden der Armaturwicklung sind zu fixen Klemmen geführt, an welche sich die Leiter des äußeren Stromkreises anschließen.

Die Armatur ist auf die gußeisernen Wände *SS* befestigt, welche ihrerseits auf der gemeinsamen Grundplatte *R* stehen.

Der Längsschnitt der Maschine ist in Fig. 8 abgebildet. In dieser Figur sind auch die Schleifringe *N* ersichtlich, durch welche der Gleichstrom zu den Elektromagneten geführt wird.

Die Wirkungsweise dieser Maschine ist nun folgende:

Die zu einer Abteilung gehörigen vier Spulen sind in demselben Sinne gewickelt. Die Spulen der nächstfolgenden Gruppe haben einen entgegengesetzten Wicklungssinn, da sie der induzierenden Wirkung eines Magnetpoles ausgesetzt sind, dessen Polarität jenerdes die erste Spulengruppe induzierenden Magnetpoles entgegengesetzt ist. Alle mit denselben Buchstaben bezeichneten Spulen sind nacheinander geschaltet und bilden einen selbständigen Stromkreis. Den vier Spulenabteilungen *a*, *b*, *c* und *d* entsprechend, haben wir also bei dieser Maschine vier selbständige Stromkreise, welche jede für sich Gruppen von Jablockhoff-Kerzen mit Strom versorgen.

Die Grammesche Maschine ist demnach eigentlich eine Mehrphasenmaschine, welche vier phasenverschobene Ströme erzeugt, doch hatte Gramme sie nur als Einphasengenerator benutzt und die vier Ströme unabhängig voneinander verwendet.

Diese Maschine braucht im Betriebe eine Gleichstromquelle, daß die Elektromagnete erregt werden können. Da dieser Umstand nachteilig ist, versuchte Gramme dem dadurch abzuhelpen, daß er

die Wechselstrommaschine und die Erregermaschine zusammenbaute. Diese unter dem Namen Auto-Excitatrice bekannte Maschine ist aus den Fig. 9 und 10 ersichtlich.

*E* ist die Gleichstrommaschine, welche den Erregerstrom für die rotierenden Elektromagnete der Wechselstrommaschine *I* liefert. Am oberen Teile

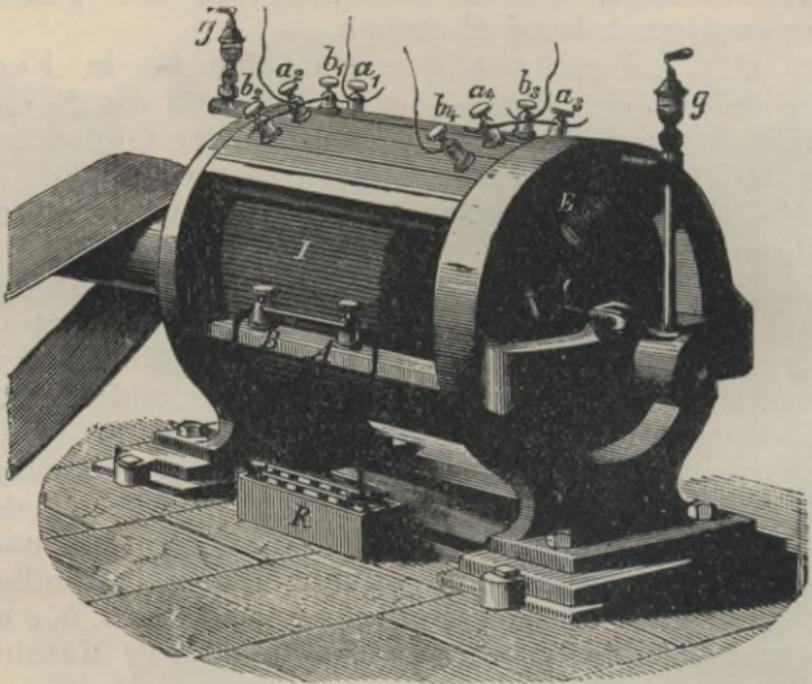


Fig. 9.

der Maschine sind acht Klemmen sichtbar, welche die Pole der obenerwähnten vier Wechselstromkreise bilden. Die Schaltung ist in diesem Falle so durchgeführt, daß zwei äußere Stromkreise entstehen, je zwei der Armaturspulengruppen sind also zu einem Ganzen verbunden.

Die Klemmen *AB* an der Seite der Maschine gehören zum Erregerkreis und sollen die Zuführungen eines Regulierwiderstandes *R* aufnehmen.

Mit diesem Widerstande kann man die Stärke des Erregerstromes und dadurch auch die Intensität des magnetischen Feldes der Wechselstrommaschine verändern und hierdurch der Wechselstromspannung den gewünschten Wert geben.

Fig. 10 zeigt den Gleichstromteil dieser Doppelmaschine in Querschnitt. Der Elektromagnet hat Doppelpole, die Gleichstrommaschine ist aber nur zweipolig.

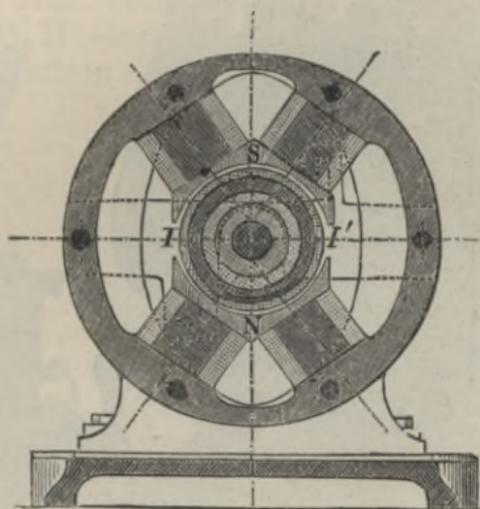


Fig. 10.

Die Wechselstrommaschine von Siemens & Halske hat einen Scheibenanker ohne Eisenkern. Die Maschine ist aus Fig. 11 ersichtlich. Sie besitzt zwölf Elektromagnetpaare, welche einander gegenüberstehen. Die Elektromagnetwicklungen sind untereinander so verbunden, daß alle nebeneinanderliegenden und alle gegenüberstehenden Pole von entgegengesetzter Polarität sind. Infolge dieser Disposition übersetzen alle Kraftlinien jenen Luftraum, in dem die Spulen des Scheibenankers rotieren, wodurch eine starke induzierende Wirkung erzielt wird. Zur gleichmäßigeren Verteilung der

Kraftlinien sind alle Pole mit flachen Polschuhen versehen.

Die Eisenkerne der Elektromagnete sind auf zwei gußeisernen Ständer geschraubt, welche auf einer gemeinsamen Grundplatte stehen und oben

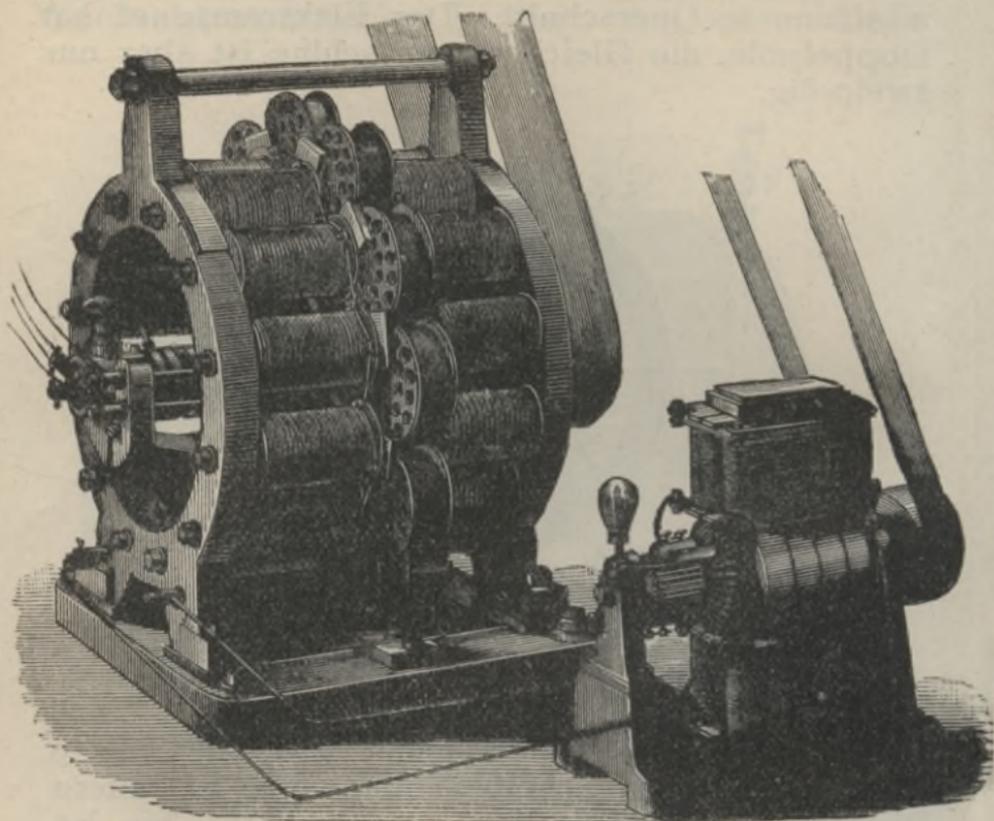


Fig. 11.

durch ein starkes Querstück zusammengehalten werden.

Der rotierende Scheibenanker hat zwölf flache Spulen, welche keinen Eisenkern besitzen. Man hat diese Eisenkerne weggelassen, um den durch die fortwährende Ummagnetisierung entstehenden Hysterisisverlust, sowie den Wirbelstromverlust

im Eisenkerne beseitigen zu können. Die Wicklung der Spulen ist mit einer Anzahl von Schleifringen verbunden, welche durch Bürsten den Wechselstrom dem äußeren Stromkreise zuführen.

Den Erregerstrom liefert eine besondere Gleichstrommaschine, welche in der Figur neben der Wechselstrommaschine abgebildet ist.

Die Wirkungsweise dieser Maschine ist aus Fig. 12 leicht zu verstehen. In dieser sind zwei Spulen in drei verschiedenen Lagen dargestellt. Spule I und II sind so geschaltet, daß sich die Ströme in jedem Zeitpunkte summieren. In der

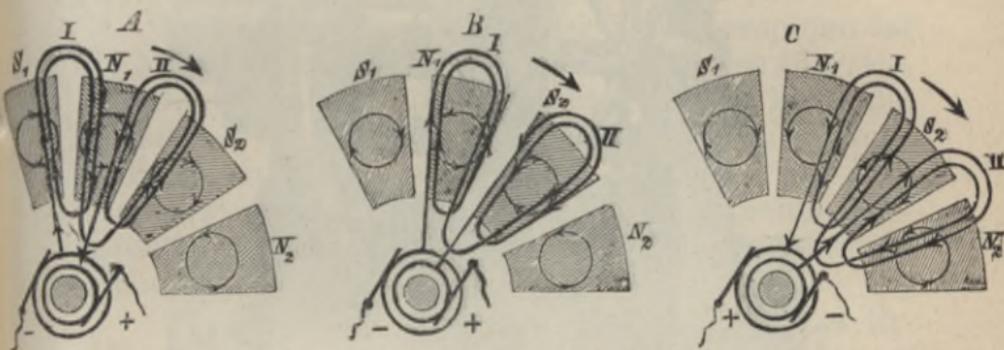


Fig. 12.

Lage A sind beide Spulen symmetrisch zwischen zwei Magnetpolen. Die Kreise in den schraffierten Flächen bedeuten den Verlauf der Magnetisierungsströme, welche die Nord- und Südpole der Magnete erzeugen.

Denken wir uns die Armaturspulen vor den Magneten, dann sehen wir, daß in A bei der angegebenen Drehrichtung Spule I einem Nordpole sich nähert. Bei einem Generator muß Arbeit geleistet werden, um elektrische Energie erhalten zu können, die Stromrichtung in Spule I muß also mit der eingezeichneten Pfeilrichtung übereinstimmen, denn nur bei solcher Richtung entsteht an der dem

Nordpole zugewendeten Seite der Armaturspule ein Nordpol. Bei Spule II ist die Richtung des induzierten Stromes entgegengesetzt, da diese Spule einem Südpole sich nähert. Die geeignete

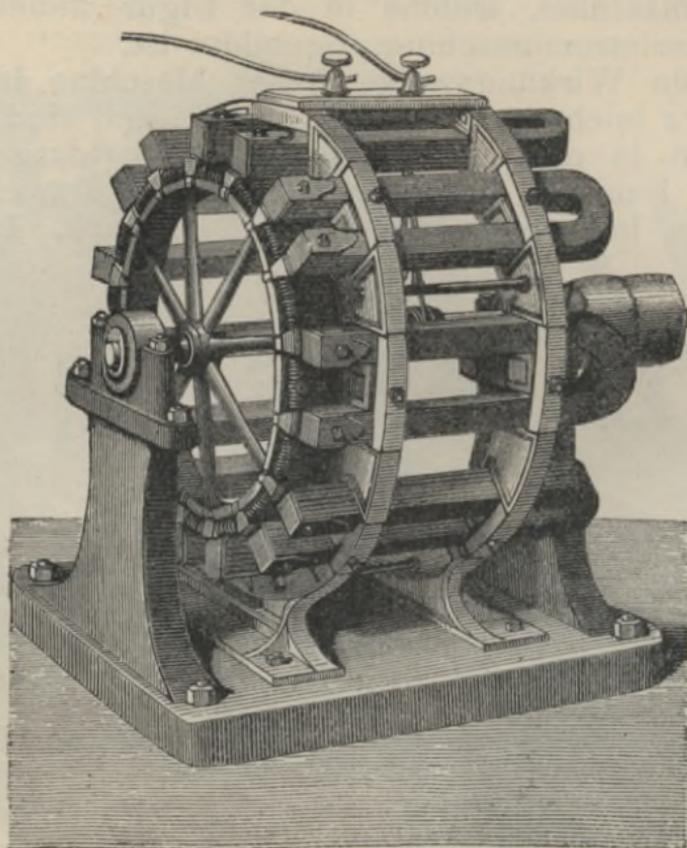


Fig. 13.

Verbindungsweise beider Spulen ermöglicht, daß die induzierten Ströme sich summieren.

In der Lage *B* sind beide Spulen gerade den Polen gegenüber. In diesem Zeitpunkte finden in den Spulen Richtungswechsel der induzierten Ströme statt, denn von dieser Lage angefangen entfernt sich die Spule I vom Nordpol und nähert sich dem

Südpol, folglich muß an der dem Magnetpole zugewandten Seite ein Südpol entstehen. Dasselbe gilt für Spule II, jedoch im entgegengesetzten Sinne.

Endlich in der Lage *C* sind die Induktionsverhältnisse jenen in Lage *A* entgegengesetzt. Spule I kam in die Lage der Spule II der Fig. 12*A* und Spule II ist unter denselben Induktionsverhältnissen als I war, in der oben zitierten Figur. Der Unterschied ist also der, daß die Richtung des Stromes im äußeren Stromkreise wechselte. Es entsteht also in dem von den Schleifringen abzweigenden Stromkreise ein Wechselstrom.

Wegen der Anordnung der Induktorspulen ist die Maschine von De Méritens zu erwähnen (Fig. 13).

Die Schenkel der Magnete liegen hier alle horizontal, und zwar so, daß alle Pole nach einer Seite ragen. Die aufeinander folgenden Pole sind von abwechselnder Polarität und alle haben entsprechend geformte Polansätze, um die Induktionswirkung erhöhen zu können.

Bei dieser Maschine ist die Armatur das Erwähnenswerte. Sie besteht aus einem Rad, dessen Kranz durch die Induktionsspulen gebildet wird. Der Eisenkern jeder Induktionsspule ist aus 50 Stück 1 mm dicken Eisenlamellen gebildet und ist entsprechend geformt (Fig. 14). Die Länge einer Spule entspricht der Entfernung zwischen zwei benachbarten Magnetpolen, so daß im Augenblicke, da die Ansätze des Spulenkernes unter die Polschuhe der Magnete kommen, der Eisenkern der Induktorrolle stark magnetisiert wird. Liegt die Induktorrolle in der in Fig. 14 dargestellten Lage, dann ist ihr Eisenkern sowohl der Wirkung des Nord- als auch jener des Südpoles ausgesetzt, weshalb er seinen Magnetismus gänzlich verliert. Durch die Änderung der Richtung der den Spulenkern durchsetzenden Kraftlinien wird in der Armatur

ein Wechselstrom erzeugt, der durch Schleifringe und Bürsten dem äußeren Stromkreise zugeführt wird.

Mit der Zeit verlor die Jablochhoff-Kerze immer mehr an Bedeutung, da ihr solche Mängel anhaften, welche nicht zu beseitigen waren. Hierzu kam noch der Umstand, daß die Regulierungsvorrichtungen der Gleichstrombogenlampen weiter verbessert wurden, so daß bald die elektrische

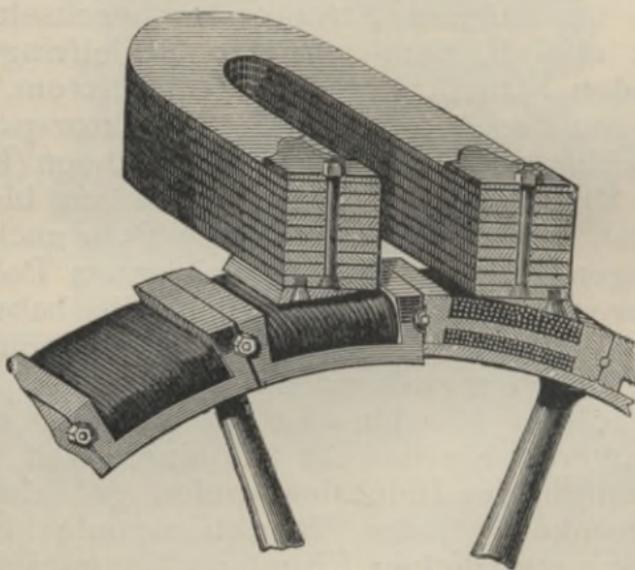


Fig. 14.

Bogenlichtbeleuchtung nur mit Gleichstrom betrieben wurde. Der Wechselstrom diente hauptsächlich zur Speisung von Glühlampen.

Dies war die Ursache, weshalb die Konstruktion der Wechselstrommaschinen, trotzdem sie früher so lebhaft betrieben wurde, zurückging. Erst die Erfindung der Wechselstromtransformatoren, welche ermöglichten, daß die elektrische Energie in bequemer und rationeller Weise umgeformt und auf große Entfernungen ohne große Verluste geleitet

werden konnte, bildete den Wendepunkt in der Entwicklung der Wechselstromgeneratoren und von dieser Zeit angefangen eroberte sich der Wechselstrom immer größere Verwendungsgebiete und ermöglichte die Durchführung solcher Probleme, deren Verwirklichung seinerzeit als unmöglich erschien.

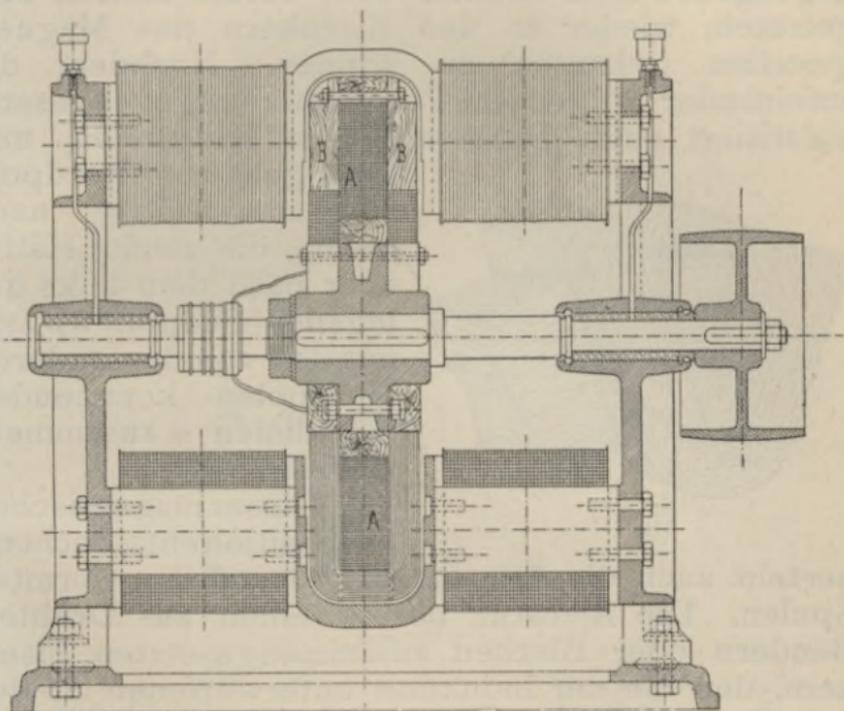


Fig. 15.

Im Jahre 1882 ließ Ziperowsky einen Wechselstromgenerator patentieren, dessen Konstruktion die folgende ist:

Auf einer gemeinsamen Grundplatte (Fig. 15) stehen zwei gußeiserne Ständer, welche je acht einander gegenüberstehende Elektromagnete tragen. Die Polarität der einander gegenüberstehenden Magnete sind dieselben, außerdem sind beide Polenden durch

ein entsprechend geformtes Gußstück miteinander verbunden. Die aufeinander folgenden Pole sind entgegengesetzt polarisiert, wodurch ein eigenartiges magnetisches Feld erzeugt wird. Betrachten wir nämlich den Verlauf der Kraftlinien, so sehen wir, daß sie von beiden Seiten in den Eisenkern der Armatur eintreten, um beim nächsten Pole entgegengesetzter Polarität, nach beiden Seiten ausgetreten, wieder in den Eisenkern des Magnetgestelles gelangen zu können. Nachdem die aufeinander folgenden Polschuhe entgegengesetzt polarisiert sind, teilen sich die Kraftlinien, und

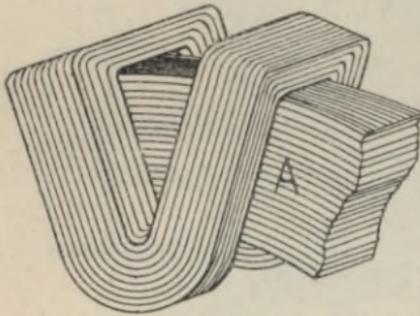


Fig. 16.

zwar geht vom Nordpole aus die Hälfte nach rechts, die zweite Hälfte aber nach dem links gelegenen Südpol, wo sie mit den von den anderen Nordpolen kommenden Kraftlinien zusammen treffen.

Dieser magnetischen Disposition entsprechend besteht auch die Armatur aus besonders geformten Spulen. Die Armatur besitzt einen aus Drähten, Bändern oder Blechen zusammengesetzten Eisenkern, den die der Induktion unterworfenen Spulen umgeben. Die Bewicklungsweise ist aus Fig. 16 ersichtlich, wo A den Eisenkern der Armatur bedeutet. Wie aus dieser Figur ersichtlich, ist die Armatur weder nach der Art der Ring- noch jener der Trommelwicklung bewickelt, sie kann vielmehr als eine Art Scheibenwicklung betrachtet werden. Sowohl die Seiten- als auch die oberen Drähte sind der induzierenden Wirkung ausgesetzt, nur jener Teil bleibt induktionslos, welcher der Achse am nächsten liegt. Nachdem aber in diesem Teile die Rotationsgeschwindigkeit eine kleine ist und außer-

dem dieser Teil der Spule kurz ist, wirkt dieser Umstand nicht nachteilig.

Aus Fig. 17 ist die Ansicht, sowie der Querschnitt dieser Maschine ersichtlich. Man sieht, daß

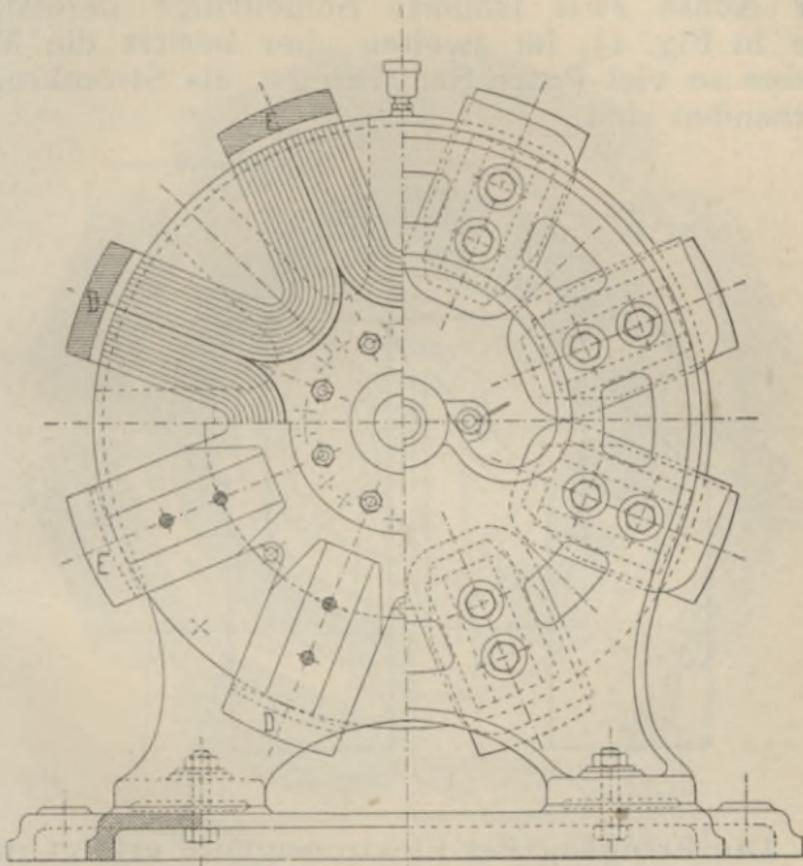


Fig. 17.

die Breite der Armaturspulen der Teilung der Magnetpole entspricht, die Anzahl der Pole und der Spulen sind also einander gleich.

Die Spulen werden zur Armatur mit den Holzklötzen *BB* (Fig. 15) befestigt; diese Klötze dienen zugleich als Zwischenstücke der Verbindungsteile der

einzelnen Spulen untereinander. Die Spulen werden entweder alle nach Fig. 18 zu einem Ganzen zusammengeschaltet oder sie sind selbständig und versehen von einander unabhängige Stromkreise mit elektrischer Energie. Im ersten Falle sind auf der Achse zwei isolierte Schleifringe befestigt, wie in Fig. 15, im zweiten aber besitzt die Maschine so viel Paare Schleifringe, als Stromkreise vorhanden sind.

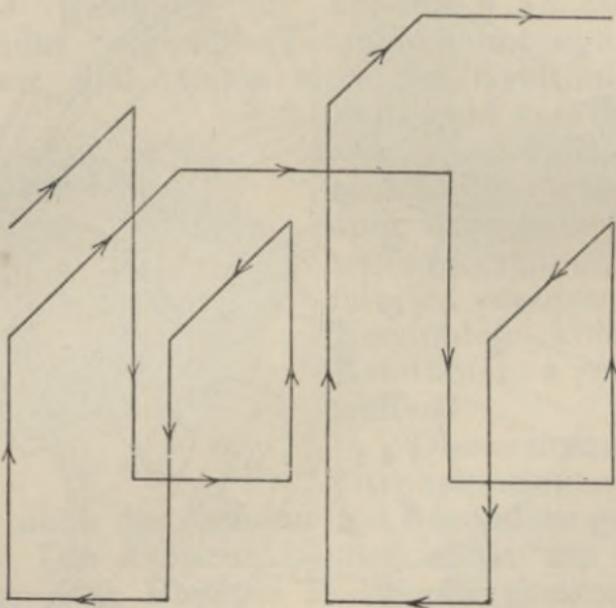


Fig. 18.

Die Erregung der Elektromagnete erfolgt entweder aus einer äußeren Gleichstromquelle oder wird hierzu der erzeugte Wechselstrom verwendet, nachdem er zuvor in einer geeigneten Weise gleichgerichtet wurde. Im letzteren Falle kann die Armatur zwei Wicklungen besitzen, die entweder gleich liegen oder aber gegeneinander so verschoben sind, daß in einem System die induzierte elektromotorische Kraft maximal ist, wenn sie im zweiten in demselben Zeitpunkte Null wird.

Eine andere Ausführungsform dieser Maschine ist in den Fig. 19 und 20 dargestellt.

Die Magnete sind nicht mit der Achse parallel, sondern liegen alle in einer Ebene, die auf die

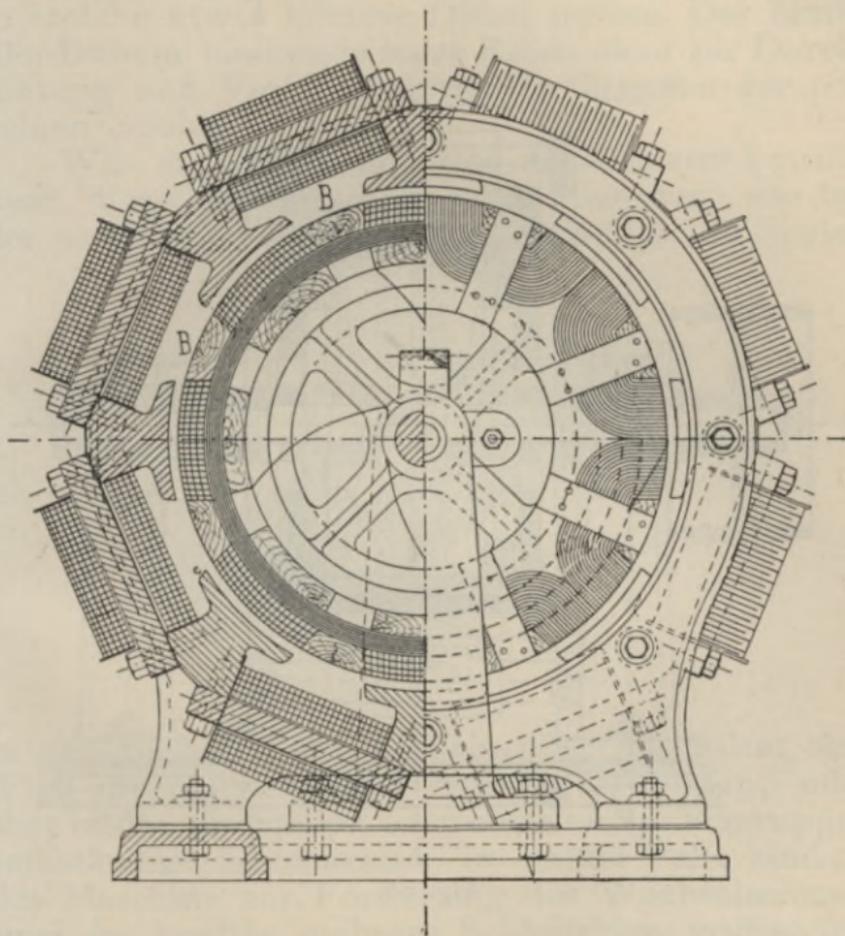


Fig. 19.

Achse senkrecht steht. Die Polschuhe bilden Doppelpole, ihre Polarität ist abwechselnd nord- und südmagnetisch. Der Magnetkranz ist zwischen zwei, aus unmagnetischem Material bestehenden Ständern befestigt, da bei dieser Ausführung die

Ständer nicht zugleich die Leiter der Kraftlinien sind, wie bei Fig. 15.

Die Armatur besteht aus einer zylindrischen Trägerkonstruktion, deren Mantelfläche durch den Eisenkern und die Armaturspulen gebildet wird

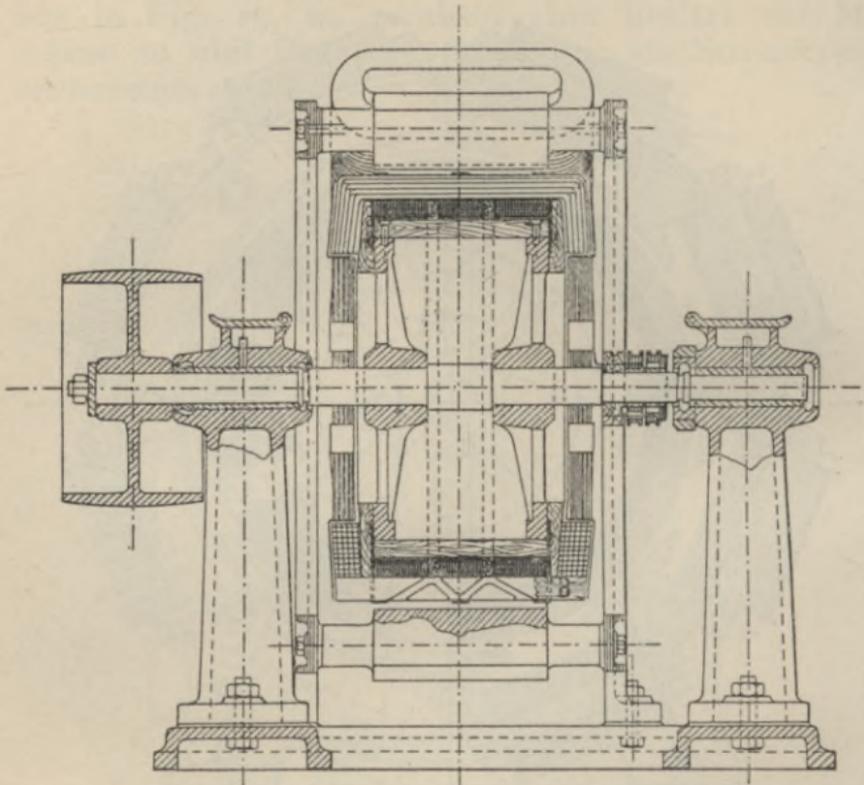


Fig. 20.

(Fig. 20). Eine Armaturspule ist aus Fig. 21 ersichtlich. Sie ist jener in Fig. 14 ähnlich geformt, nur ist ihre Länge größer. Die Holzklötze *B* dienen auch hier zur Befestigung der Spulen, sie sind mit entsprechenden Einschnitten versehen, welche ermöglichen, daß im Betriebe zu den Spulen immer frische Luft gelangt. Die Luftzirkulation wird

noch dadurch unterstützt, daß Ventilatorflügel, welche im inneren Teile der in der Mitte offenen Armatur sich befinden, den Luftstrom ständig gegen den Eisenkern der Armatur treiben. Wie aus Fig. 21 ersichtlich, besitzt der Holzklotz *B* zwei Ausschnitte, in welche etwas kürzere Dübel passen. Der hinter den Dübeln bleibende leere Raum dient zur Durchführung und Verbindung der Drahtenden der einzelnen Spulen.

Was die Schaltungsweise der Armatur betrifft, kann diese gerade so ausgeführt werden, wie bei der ersten Type, daß nämlich entweder alle Spulen

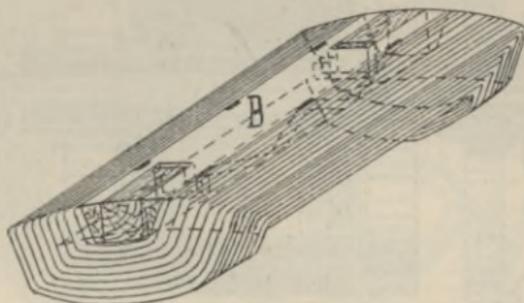


Fig. 21.

in geeigneter Weise nacheinander geschaltet sind (Fig. 18) und so einen Stromkreis bilden, oder aber bilden die Spulen oder einzelne Spulengruppen selbständige Stromkreise. Im ersten Falle sind an der Maschine zur Fortleitung des Wechselstromes zwei, im zweiten mehrere Schleifringe vorhanden.

Alle bisher beschriebenen Wechselstrommaschinen benötigten im Betriebe eine Gleichstromquelle zur Erregung der Elektromagnete. Man verwandte hierzu entweder eine gewöhnliche Gleichstrommaschine oder baute die Wechsel- und die Gleichstrommaschine in einem Generator zusammen, wie dies Gramme bei seiner Auto-Excitatrice tat.

Um diesem Übelstande abzuweichen, konstruierten Zipernowsky und Déri im Jahre 1883 eine Wechselstrommaschine, die selbsterregend war, bei der also der zur Erregung der Elektromagnete benötigte Gleichstrom durch geeignete Kommutierung des Wechselstromes erzeugt wurde.

Die Maschine ist in den Fig. 22 und 23 im Längsschnitt und teilweise im Querschnitt dargestellt.

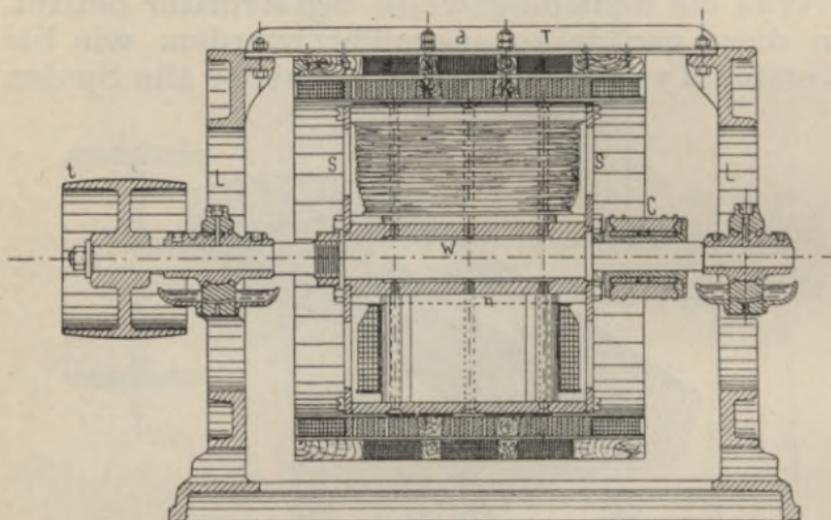


Fig. 22.

Die sechs Elektromagnete trägt ein sechseckiges, auf die Achse der Maschine aufgekeiltes Gußstück *n* (Fig. 23). Die Elektromagnete haben alle entsprechend geformte Polschuhe *p*, welche samt den Kernen der Magnete durch lange Schrauben am erwähnten Gußstück befestigt werden. Die Polaritäten der aufeinander folgenden Pole sind einander entgegengesetzt, auch ist die Bewicklung so durchgeführt, daß der zur Verfügung stehende Raum, möglichst ausgenutzt wird. Um dem Magnetrad eine größere Stabilität verleihen zu können, sind an beiden Seiten desselben die Metallscheiben

SS angebracht, welche an mehreren Stellen durchlöchert sind, um den Magneten die zur Kühlung nötige Luft zuführen zu können.

Die Armatur besitzt soviel Spulen, als Elektromagnete vorhanden sind. Die Drähte der Spulen

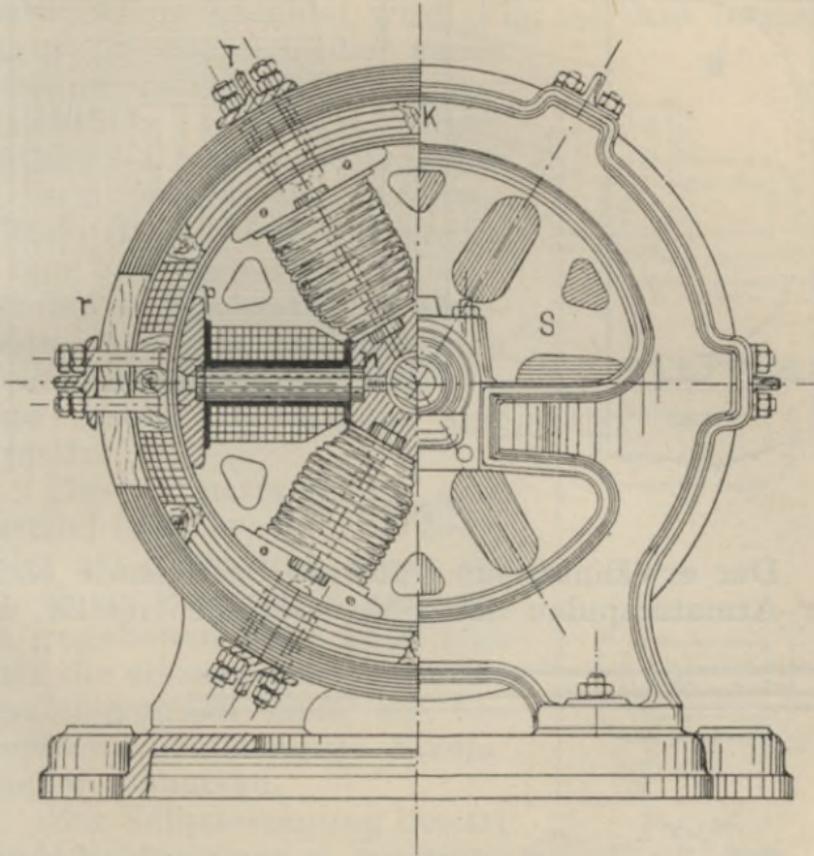


Fig. 23.

sind auf entsprechend geformte und aus Gußeisen hergestellte Kerne gewickelt, wie dies auch Fig. 24 zeigt. Um die Wicklung ausführen zu können, sind auf diesen Kern beiderseits Metallplatten gelegt, wodurch dann der Wicklungsraum hergestellt wird. Damit beim Betriebe diese Platten durch Vibration

kein unangenehmes Geräusch verursachen, sind zwischen die Armaturspulen Holzstücke *K* befestigt.

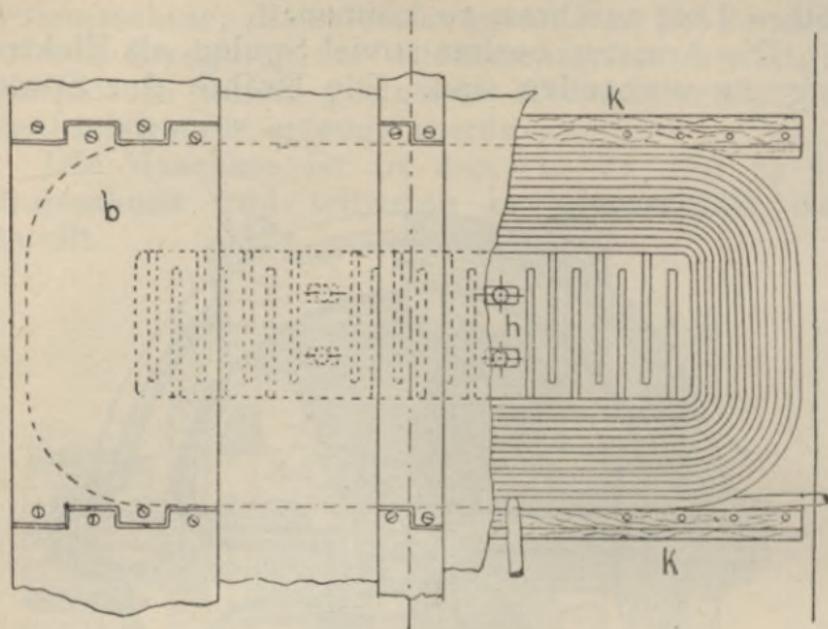


Fig. 24.

Der erwähnte, aus Gußeisen bestehende Kern der Armaturspulen hat diese spezielle Gestalt, um

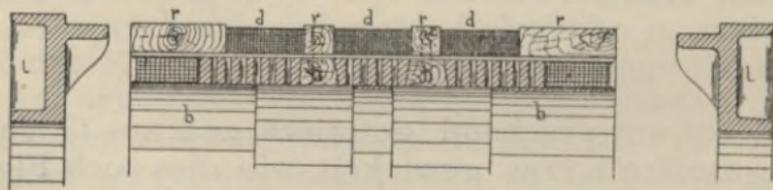
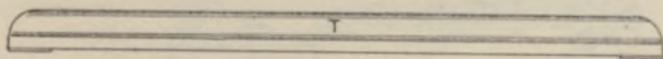


Fig. 25.

im Betriebe leicht ummagnetisiert werden zu können. Auf diesen Umstand wurde schon bei der Her-

stellung des Kernes Bedacht genommen, da man diesen vor der Verwendung sorgfältig ausglühte. Dieser Kern bildet aber nicht die Armatur, er ist nur ein Bestandteil des eigentlichen Armaturkörpers. Der letztere besteht aus aus Eisendraht gebildeten Zylindern  $d$ , welche zwischen Holzringen  $r, r$  durch Aufwicklung gebildet wird (Fig. 25). Aus letzterer Figur ist zugleich die ganze Zusammenstellung der Armatur ersichtlich. Die zwei Seitenstände  $LL$  tragen die Traverse  $T$ , auf welche die Armatur mittels durchgehender Schrauben befestigt wird. Diese Schrauben durchsetzen die Holzklötze  $h-h$  und die Holzringe  $r-r$  und ermöglichen dadurch eine stabile Befestigung der Armatur.

Die Armaturspulen sind parallel (Fig. 26) oder in Serie (Fig. 27) geschaltet, wenn sie zu einem Stromkreis gehören, im gegebenen Falle kann man aber die einzelnen Spulen oder Spulengruppen auch als besondere, unabhängige Stromquellen benutzen.

Zur Selbsterregung besitzt die Maschine einen eigenartigen Kollektor, welcher auf der Achse innerhalb oder außerhalb des Lagers sitzt ( $C$  in Fig. 22). Seine Einrichtung ist aus der Fig. 28 ersichtlich.

Die Sektoren  $S_1$  und  $S_2$  sind zu den Ringen  $r_1$ , beziehungsweise  $r_2$  geschaltet, während die Sektoren  $S_3$  von beiden Ringen isoliert sind. Diese letzteren sind abwechselnd mit den ringförmigen Leitern  $u_1$  und  $u_3$  und dem mittleren  $u_2$  verbunden,

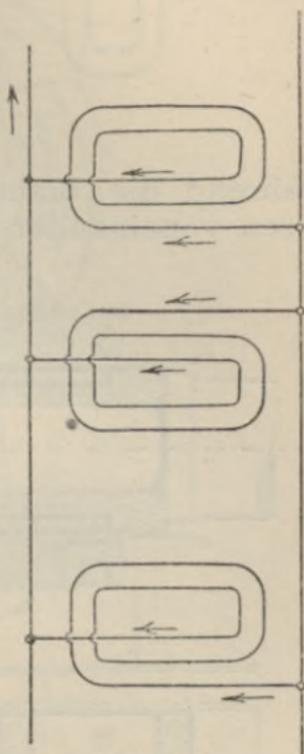


Fig. 26.

wodurch erreicht wird, daß die zweitfolgenden  $S_3$ -Sektoren miteinander in leitender Verbindung sind,

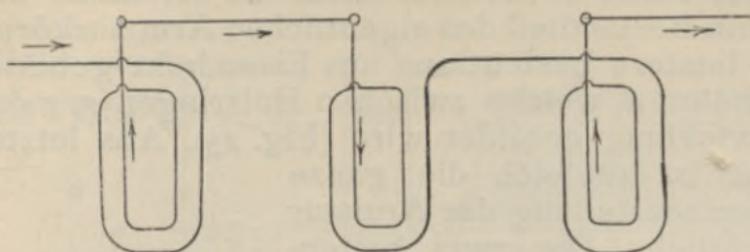


Fig. 27.

während die diametral gegenüberliegenden Sektoren voneinander isoliert sind.

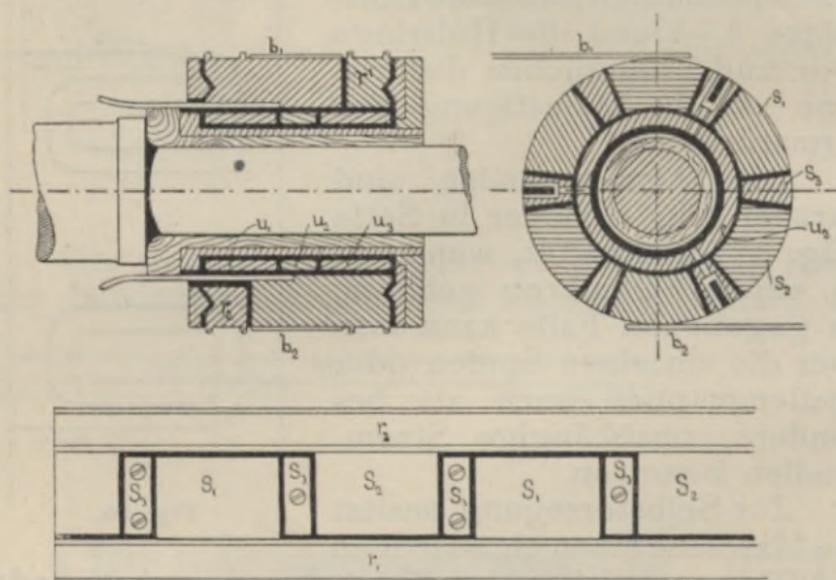


Fig. 28.

Diese Anordnung bezweckt, daß die Elektromagnetbewicklung gerade in dem Augenblicke aus dem Stromkreis ausgeschaltet wird, wenn im Wechselstromkreis die Stromumkehr stattfindet. Nach diesem Zeitpunkte kommen die Sektoren  $S_1$

und  $S_2$ , beziehungsweise  $S_2$  und  $S_1$  mit den Bürsten  $b_1$  und  $b_2$  in Berührung, und nachdem die Zahl dieser Sektoren mit der Zahl der Elektromagnete übereinstimmt, wird erreicht, daß in die Elektro-

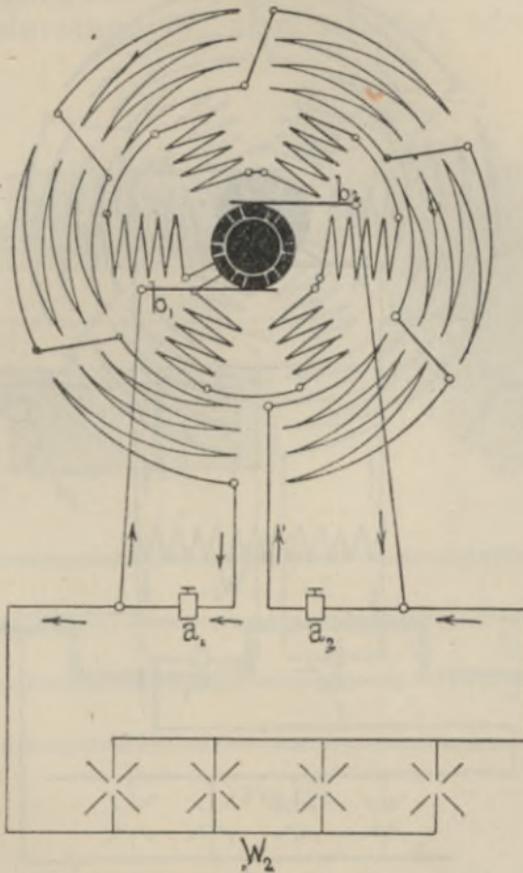


Fig. 29.

magnetwicklung, welche mit den Ringen  $r_1$  und  $r_2$  verbunden ist, ein kontinuierlicher Strom fließt. Der Widerstand dieser Bewicklung ist so gewählt, daß die Erregerstromstärke der gewünschten Magnetisierung entspricht.

Die Schaltungsweise des Kommutators ist aus Fig. 29 ersichtlich.  $a_1$  und  $a_2$  sind die Klemmen des Wechselstromgenerators, welche die Anschluß-

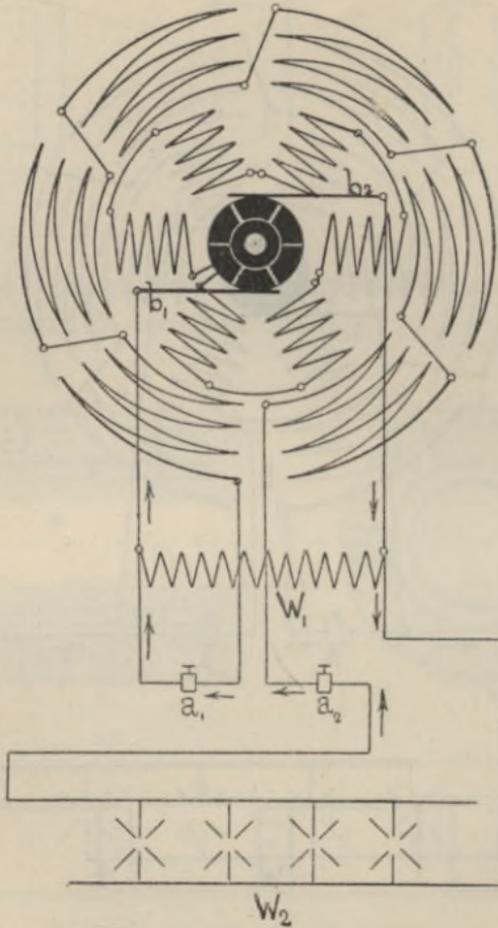


Fig. 30.

punkte des äußeren Stromkreises  $W_2$  bilden. Von diesen Punkten zweigen die Zuleitungen zur Erregung ab, der Erregerstromkreis ist demnach zum äußeren Stromkreise parallel geschaltet.

Eine andere Schaltungsweise des Erregerstromkreises ist in Fig. 30 abgebildet.

$a_1$  und  $a_2$  sind wieder die Klemmen der Wechselstrommaschine. In einem Zeitpunkte fließt der Wechselstrom von  $a_1$  teils durch die Bürste  $b_1$  in die Magnetbewicklung, teils durch den regulierbaren Widerstand  $W_1$  zum äußeren Stromkreis  $W_2$ ,

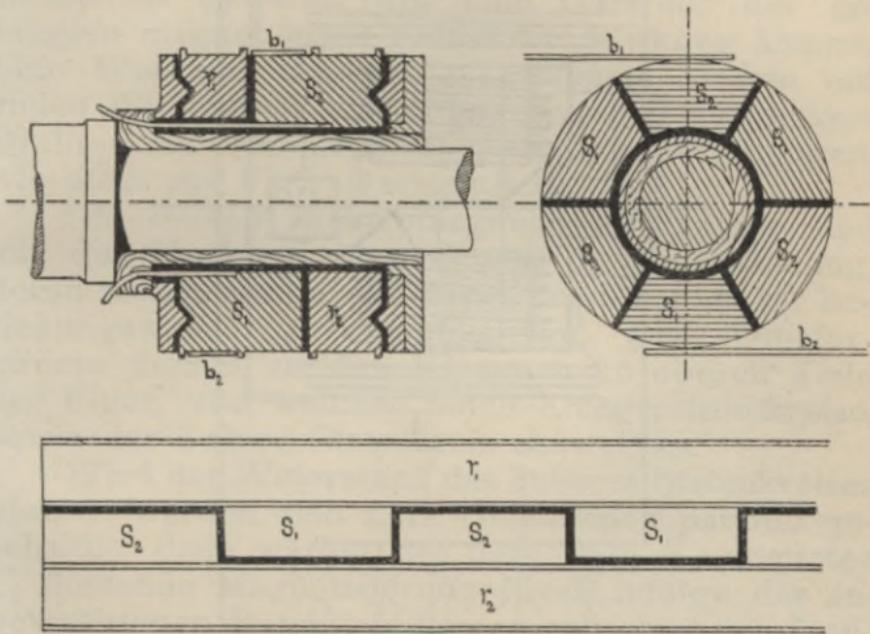


Fig. 31.

nachdem er zuvor mit dem durch die Elektromagnete geflossenen Teilstrom sich wieder vereinigt hatte. Bei  $a_2$  fließt er in die Maschine zurück. Die Erregung zweigt hier also von den Endpunkten des Widerstandes  $W_1$  ab, die Stärke des magnetisierenden Stromes hängt demnach von jener Potentialdifferenz ab, welche zwischen den Endpunkten von  $W_1$  herrscht. Durch Veränderung

dieses Widerstandes läßt sich die Intensität des induzierenden magnetischen Feldes regulieren.

Die Einrichtung des Kommutators ist einfacher als in Fig. 28. Die Sektoren  $S_1$  und  $S_2$  (Fig. 31) sind Teile der beiden Ringe  $r_1$  und  $r_2$ , welche mit den Drähten des Elektromagnetes verbunden sind.  $S_1$  und  $S_2$  sind voneinander isoliert, die Bürsten

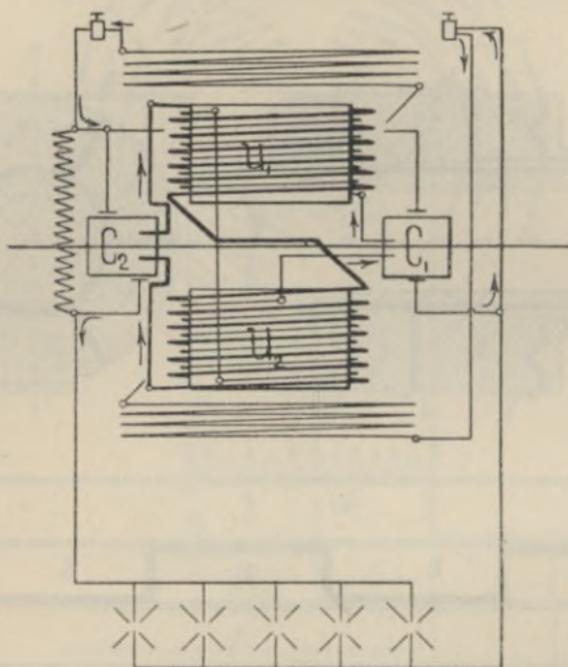


Fig. 32.

schleifen auf dem Ringe  $r_1$  oder  $r_2$  und den Sektoren  $S_1$   $S_2$ . Nehmen wir an, daß die eine Bürste an  $r_1$ , die andere an den Sektoren schleift, dann wird die Magnetbewicklung kurzgeschlossen, wenn  $S_1$  unter die Bürste kommt und erhält nur dann Strom, wenn die Sektoren  $S_2$  mit der Bürste sich berühren. Die Bewicklung erhält also intermittierenden Strom und nachdem die Zahl der Sektoren mit der Zahl der Magnetpole übereinstimmt, sind

die Stromimpulse alle gleich gerichtet. In dieser Weise wird die Magnetisierung aufrechterhalten.

Die beschriebenen zwei Schaltungsweisen lassen sich kombinieren, zu dem Zwecke, daß bei veränderlichem äußeren Widerstande die Stromstärke sich selbsttätig reguliert. Die Elektromagnete haben in diesem Falle zwei voneinander unabhängige Wicklungen, auch sind die Stromrichtungen in diesen so gewählt, daß eine Differenz der erzeugten magnetischen Felder zur Wirkung kommt. Eine Wicklung besteht aus dünnem Drahte mit vielen Windungen, die andere dagegen aus dickem Drahte und verhältnismäßig wenigen Windungen, wie auch aus Fig. 32 ersichtlich.

Die beiden Elektromagnetbewicklungen sind mit den Kommutatoren  $C_1$  und  $C_2$  in Verbindung, deren Konstruktion mit denen in den Fig. 28, beziehungsweise 31 übereinstimmt. Die Armaturströme fließen zu den Klemmen im oberen Teile der Figur, von welchen beide Erregerstromkreise, sowie der äußere Stromkreis abzweigen.

Wird der Widerstand des äußeren Stromkreises kleiner, werden also z. B. Glühlampen parallel geschaltet, dann wächst der durch den Kommutator  $C_2$  fließende Magnetisierungsstrom infolge der angewachsenen Potentialdifferenz zwischen den Endpunkten des Widerstandes  $W_1$  (Fig. 30). Nachdem in diesem Falle der durch  $C_1$  fließende andere Erregerstrom schwächer wird, gewinnt erstere Wicklung an ihrer erregenden Wirkung. Durch geeignete Wahl der Widerstände beider Bewicklungen läßt sich erreichen, daß die Stromstärke sich selbsttätig auf den gewünschten Wert einreguliert.

Diese Regulierung wird auch dann erreicht, wenn eine Bewicklung von einer unabhängigen Gleichstromquelle den Erregerstrom erhält. In diesem Falle bleibt der Kommutator  $C_1$  im Betrieb, die



erregenden Wechselstrommaschine beschriebenen Kommutatoren verwendet oder durch eine Kommutatorkonstruktion, welche nachfolgend beschrieben werden soll.

Die Konstruktion dieses Kommutators ist aus Fig. 33 ersichtlich. Er besteht aus zwei Schleifringen  $S_1$  und  $S_2$ , welche mit den ebenso bezeichneten Segmenten in Verbindung stehen. Sowohl die Schleifringe als auch die Segmente sind voneinander isoliert.

Auf diesen Kommutator schleifen vier Bürsten, und zwar zwei auf den Schleifringen und zwei auf den Segmenten. Die Enden der Elektromagnet-

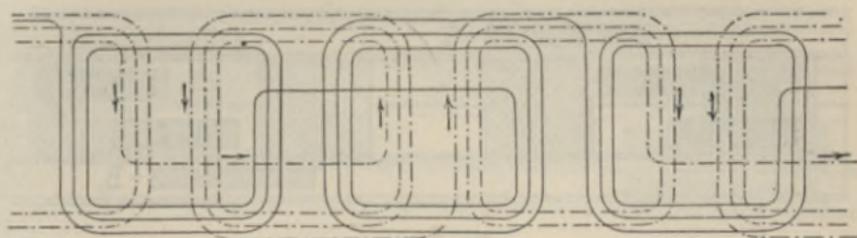


Fig. 34.

bewicklung sind mit den Schleifringen, der äußere Gleichstromkreis aber mit jenen Bürsten verbunden, welche an diesen Schleifringen liegen. Die zwei anderen Bürsten des Kommutators werden mit den Zuleitungen der Armatur in Verbindung gebracht.

Dieser Kommutator liegt außerhalb der Achse der Maschine, weshalb die Achse in ihrer Längsrichtung durchgebohrt ist. Durch diese Bohrung führen jene Drähte, welche den gleichgerichteten Wechselstrom in die Magnetbewicklung führen.

Damit der so erzeugte Gleichstrom möglichst gleichmäßig und konstant wird, sind an der Armatur zwei Spulensysteme angebracht, welche neben-

einander oder übereinander befestigt sind und die gegeneinander um die halbe Spulenteilung verschoben werden, wie dies Fig. 34 schematisch zeigt.

Zur Kommutierung des so erzeugten Wechselstromes sind zwei Bürstenpaare nötig, welche gegeneinander um denselben Winkel verschoben werden, um welchen die erwähnten zwei Spulensysteme gegeneinander verschoben sind (Fig. 35).  $B_1$  und  $B_2$  sind die Bürsten, mit denen der gleichgerichtete Wechselstrom fortgeführt wird, während jene Bürsten, die mit den Wechselstromquellen in Verbindung stehen, mit  $b_1$  und  $b_2$  bezeichnet sind.

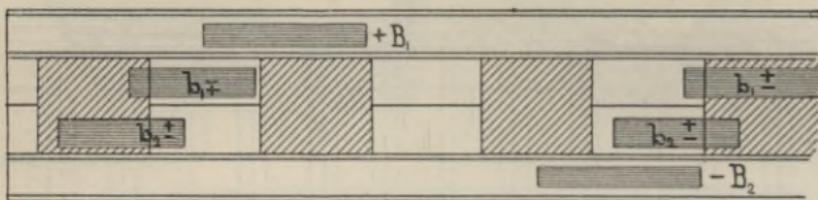


Fig. 35.

Jene Teile des Kommutators, welche miteinander in leitender Verbindung stehen, wurden schraffiert gezeichnet, beziehungsweise weiß gelassen.

Nachdem in bestimmten Zeitpunkten beide Bürsten auf demselben Segment schleifen, werden hierdurch die zwei Stromkreise unter Vermittlung der Bürsten  $b_1$  und  $b_2$  nacheinander geschaltet. Die Anzahl der Segmente muß natürlich mit der Zahl der Pole des Elektromagneten übereinstimmen.

Die Beaufsichtigung der Bürsten ist einfacher, wenn alle in derselben Linie liegen, weshalb die Konstruktion des Kommutators so modifiziert werden muß, daß dies durchgeführt werden kann. Dieser modifizierte Kommutator ist aus Fig. 36 ersichtlich. Hier liegen die Enden der Bürsten

alle in derselben Geraden, dafür sind aber die Segmente des Kommutators um denselben Winkel gegeneinander verschoben, um welchen zuvor die Berührungslinien der zusammengehörigen zwei Bürsten verschoben waren. Benutzt man die in Fig. 35 abgebildete Konstruktion, dann benötigt man drehbare Bürstenträger; solche wurden bereits bei dieser Maschine — überhaupt als erste bei Wechselstromgeneratoren — auch verwendet.

Diese Wechselstrommaschine kann durch entsprechende Schaltungen entweder für konstante Spannung oder für konstante Stromstärke eingerichtet werden. Dient der erzeugte Wechselstrom

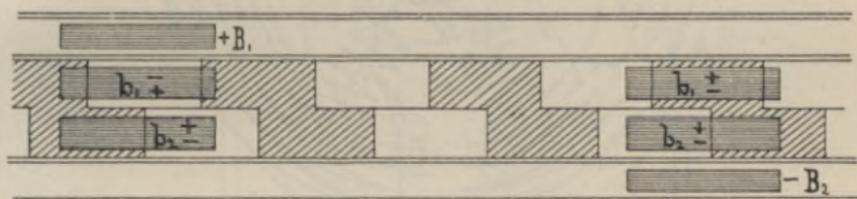


Fig. 36.

zur Speisung parallel geschalteter Glühlampen, dann wird die erste, die isopotentielle Schaltung angewendet. Hält er aber in Serie geschaltete Bogenlampen im Betrieb, dann muß die zweite oder die isodynamische Schaltung in Anwendung gebracht werden.

Die Schaltung für konstante Spannung ist in Fig. 37 schematisch abgebildet. Der äußere Stromkreis ist aus parallel geschalteten Glühlampen gebildet, die ihren Energiebedarf teils aus den Armaturspulen, teils aber aus solchen Spulen erhalten, die den zur Erregung nötigen, gleichgerichtet zu verwendenden Wechselstrom erzeugen. Zur Erzeugung dieses Wechselstromes dient entweder eine Spule oder Spulengruppe der Armatur, oder

ist eine besondere Wicklung vorhanden, welche über oder neben der eigentlichen Armaturbewicklung liegt. Der zur Erregung verwendete Strom fließt bei  $b_1$  und  $b_2$  als Gleichstrom in die Magnet-

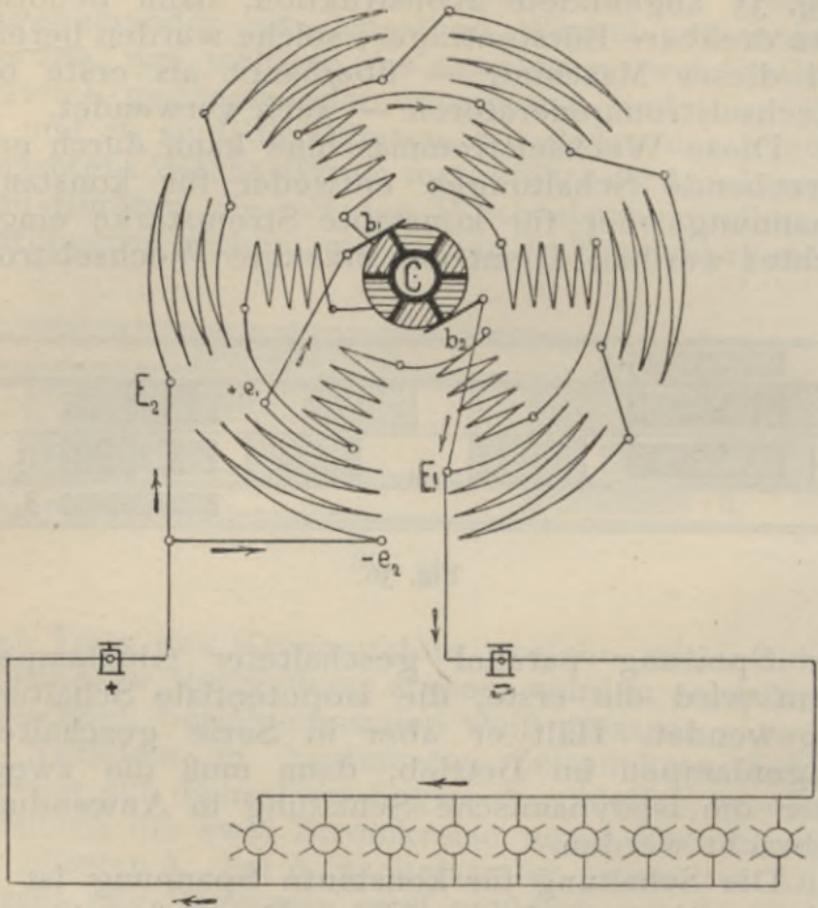


Fig. 37.

bewicklung, unterstützt aber im äußeren Stromkreis den Arbeitsstrom als Wechselstrom. Mit anderen Worten, die den erregenden Wechselstrom erzeugende Armaturspule ist mit dem äußeren Stromkreise in Serie geschaltet, bedeutet aber für diesen

eine Stromquelle, weshalb jede Veränderung im Widerstande des äußeren Stromkreises zugleich eine Veränderung des Erregerstromes verursacht. Durch geeignete Wahl der Verhältnisse im Erregerstromkreis ist zu erreichen, daß die Spannung der

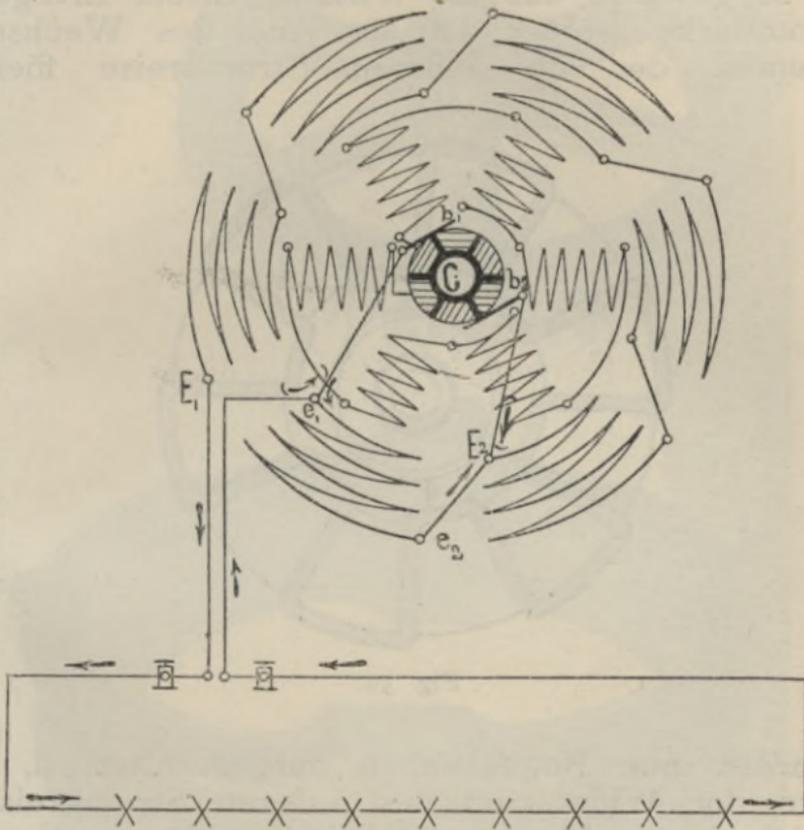


Fig. 38.

Maschine bei variabler Belastung nahezu konstant bleibt.

Für die isodynamische Wirkung ist die Schaltung eine andere (Fig. 38). Die Erregung erhält zwar wieder eine besondere Armaturspule, doch ist diese mit den anderen Armaturspulen in Serie geschaltet.

Der Erregerkreis zweigt bei den Punkten  $e_1$   $e_2$  ab und wird sowohl vom eigentlichen Erregerstrom, als auch vom äußeren Wechselstrom durchflossen, jedoch erst dann, nachdem letzterer den äußeren Stromkreis bereits durchflossen hat.

Die elektromotorische Kraft des Erregerkreises ist so gewählt, daß die Wirkung dieser Erregerstromstärke größer ist als jene des Wechselstromes, der im äußeren Stromkreise fließt.

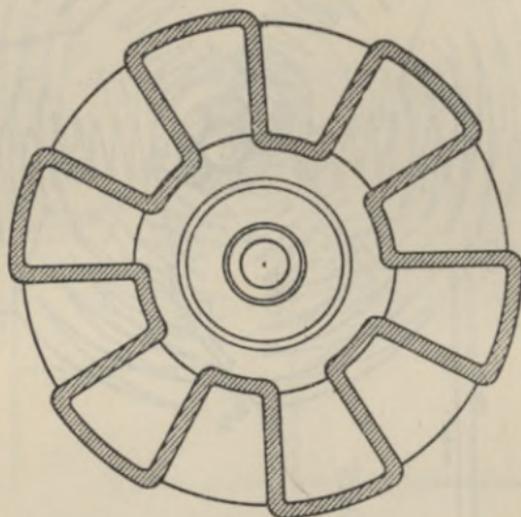


Fig. 39.

Werden nun Bogenlampen ausgeschaltet, d. h. wird der Widerstand des äußeren Stromkreises kleiner, dann kommt die Wirkung des in diesen Stromkreis fließenden und die Magnetbewicklungen ebenfalls durchsetzenden Wechselstromes, der dem eigentlichen Erregerstrom entgegengesetzt magnetisiert, immer mehr zur Geltung, wodurch im äußeren Stromkreise eine nahezu konstante Stromstärke erreicht wird.

Hopkinson konstruierte eine Wechselstrommaschine, die eine Scheibenarmatur besaß. Die

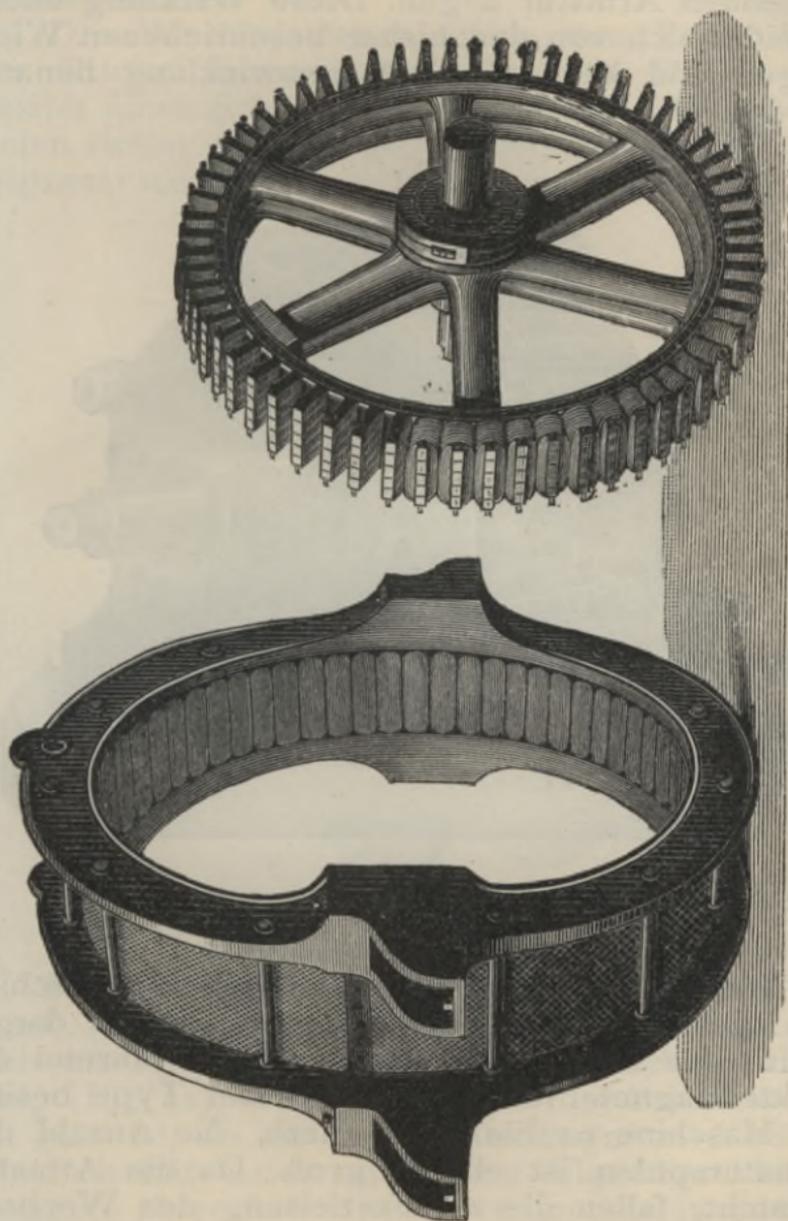


Fig. 40.

Armaturbewicklung ist aus Kupferstreifen hergestellt, welche in Nuten der aus Bandeisen bestehenden Armatur liegen. Diese Wicklung unterscheidet sich von den bisher beschriebenen Wicklungen und kann als Schlangenumwicklung benannt werden (Fig. 39).

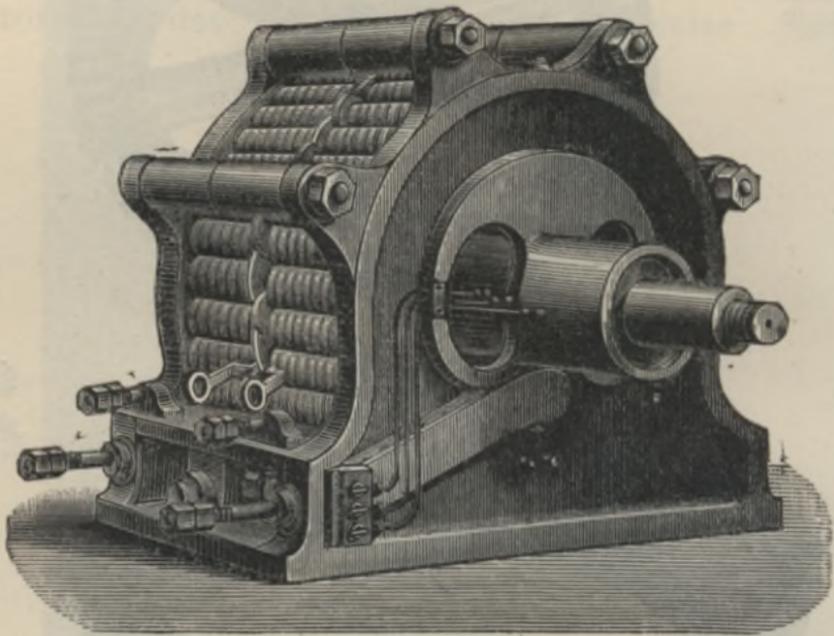


Fig. 41.

Eine neuere Type der Wechselstrommaschine von Siemens & Halske ist in der Fig. 40 dargestellt. Die Armatur ist feststehend, während die Elektromagnete rotieren. Bei dieser Type besitzt die Maschine 62 Elektromagnete, die Anzahl der Armaturspulen ist ebenso groß. Da die Armatur feststeht, fallen die zur Fortleitung des Wechselstromes nötigen Schleifringe weg, welcher Umstand in Anbetracht der erzeugten hohen Wechselstrom-

spannung nur vorteilhaft ist. Die Erregung der Elektromagnete erfolgt aus einer besonderen Gleichstrommaschine.

Die Wechselstrommaschine von Ferranti ist der älteren Siemensschen Maschine ähnlich. Sie besitzt einen Scheibenanker, welcher zwischen den Polen zweier einander gegenüber liegenden Elektromagnetsysteme rotiert. Eine Type, die Ferranti mit

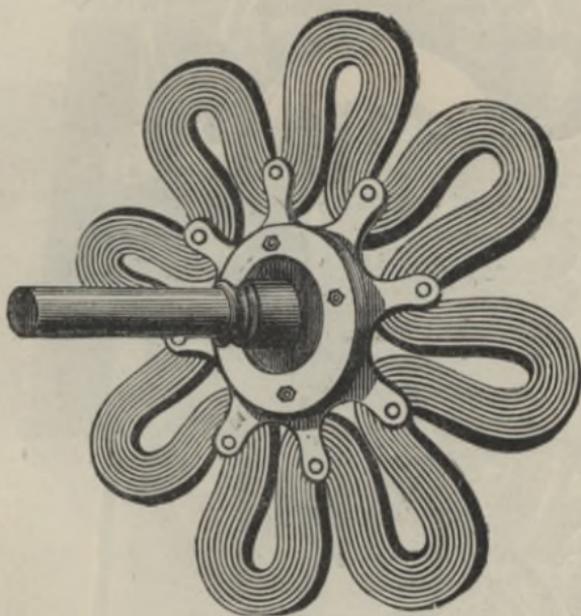


Fig. 42.

A. Thompson und W. Thomson gemeinsam entwarf, ist in Fig. 41 abgebildet. Die Armatur hat eine aus Kupferbändern bestehende Scheibenwicklung (Fig. 42), wobei die Anzahl der Schleifen halb so groß ist, als die der Elektromagnete. Nachdem die Polaritäten der aufeinander folgenden Elektromagnete abwechselnd sind, werden die in den einzelnen Schleifenteilen induzierten Wechselströme sich summieren, da die Schleifenteile in denselben

Zeitpunkten entgegengesetzten magnetischen Polen sich nähern, beziehungsweise von solchen sich ent-

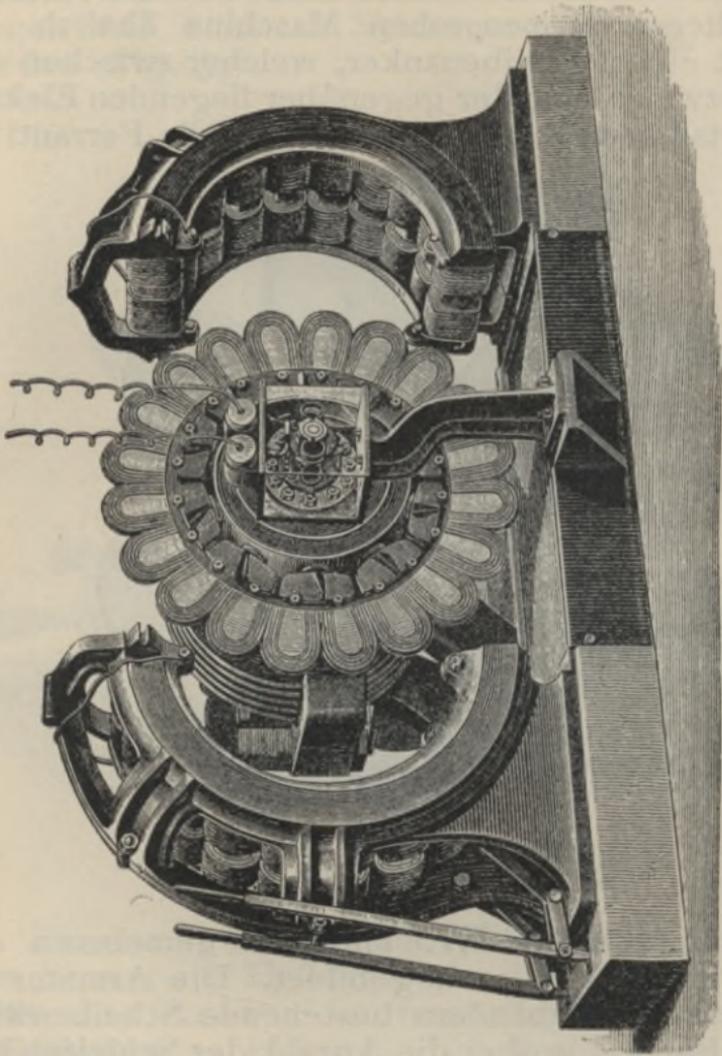


Fig. 43.

fernen. Der Wechselstrom wird zu isolierten Schleifringen geführt, auf welchen die mit dem äußeren Stromkreise in Verbindung stehenden Bürsten schleifen.

Eine andere Ferranti-Maschine mit Spulnwickelung ist aus den Fig. 43 und 44 ersichtlich.

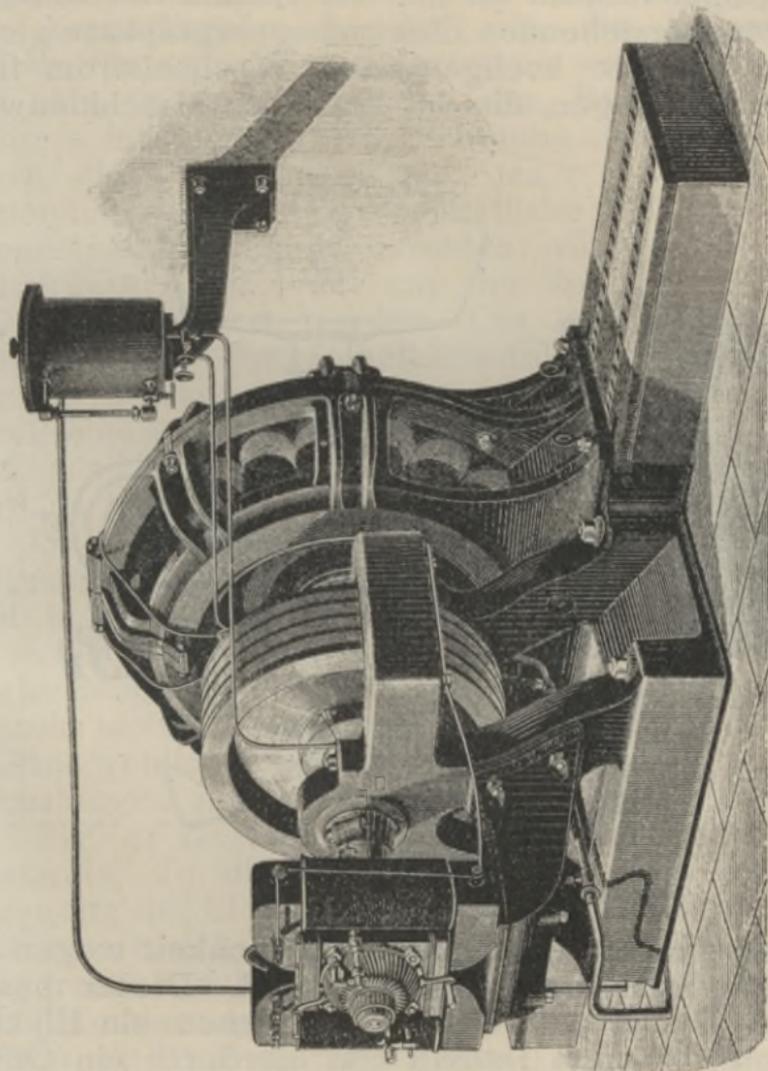


Fig. 44.

Fig. 43 zeigt diese Wechselstrommaschine in dem Zustande, als die Magnetgestelle zurückgeschoben wurden, um eine Ausbesserung an der

Armatur vornehmen zu können. In der Mitte ist die Armatur ersichtlich, welche bei dieser Type 20 flache, keinen Eisenkern besitzende Spulen hat. Die Spulenzahl ist mit der Anzahl der einander gegenüberstehenden Elektromagnetpolpaare gleich. Der erzeugte hochgespannte Wechselstrom führt zu Schleifringen, die am Ende der Maschinenwelle

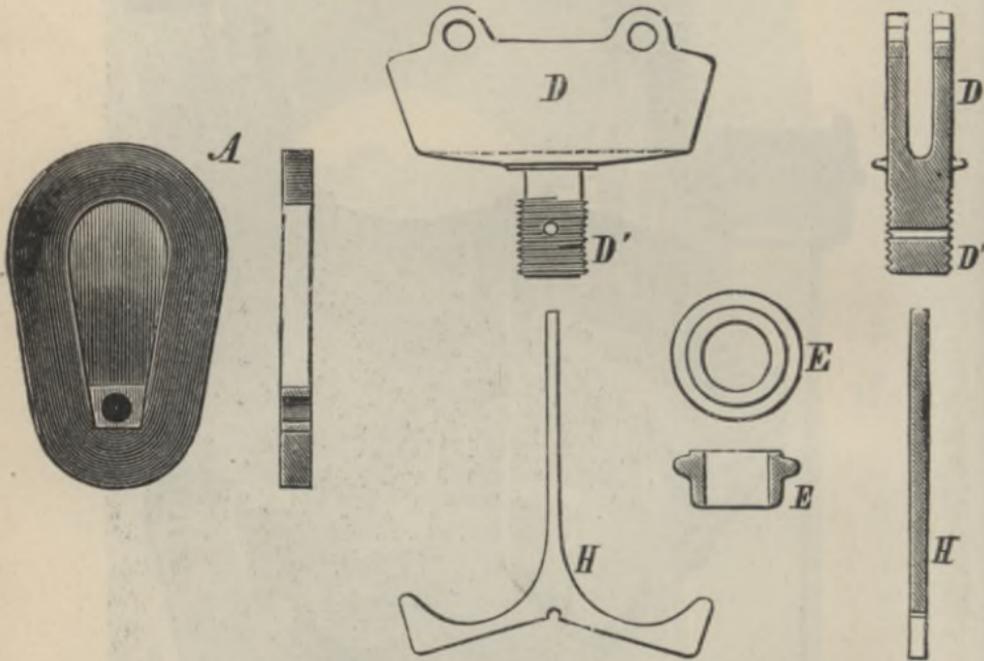


Fig. 45.

sitzen und die der Lebensgefährlichkeit wegen mit einem Glaskasten umgeben sind. Dieser besitzt einen Deckel aus Gußeisen, welchen ein Elektromagnet solange festhält und hierdurch ein Öffnen unmöglich macht, bis die Maschine im Betriebe ist.

Die Einzelteile der konstruktiven Ausführung der Armaturspulen sind in der Fig. 45 dargestellt. A ist eine Armaturspule mit einem aus Kupfer bestehenden Kern, von dem Kupferstreifen strahlen-

förmig ausgehen. Der Spulenkern hat in seinem der Achse zugewendeten Teile eine Bohrung, die zur Befestigung der Spule an eine auf die Achse aufgekeilte Bronzescheibe dient. Zur Befestigung der Armaturspulen benutzt man die Träger *D*, welche für zwei Spulen derart verwendet werden, daß man je eine Spule bei den Bohrungen des Trägers anbringt und eine Schraube anzieht, welche durch diese Bohrungen und jener des Armaturspulenkernes geht. Die Ebonitstücke *H* isolieren die nebeneinander liegenden Spulen, während die Porzellanringe *E* zur Isolierung der Spulen von dem Träger *D* benutzt werden. Die Befestigung des letzteren zur Bronzescheibe erfolgt dadurch, daß der mit Schraubenwindungen versehene Zapfen *D'* durch eine Aussparung der Bronzescheibe gesteckt und dann mit einer Schraubenmutter angezogen wird.

Die Polaritäten der aufeinander folgenden Magnete sind entgegengesetzt, dies ist auch der Fall bei den gegenüberstehenden Polen. Durch diese Disposition ist erreicht, daß die Spulen durch starke Magnetfelder rotieren. Das Magnetgestell besteht aus Gußeisen, es ist aus zwei symmetrischen Hälften gebildet, welche mit Hilfe von Hebeln und Zahnstangen auseinander gezogen werden können.

Fig. 44 zeigt die Maschine in betriebsfähigem Zustande. In dieser Abbildung ist auch die zur Erregung der Elektromagnete benutzte Gleichstrommaschine ersichtlich, deren Armatur auf der Verlängerung der Hauptwelle sitzt. Die Schmierung der Maschine erfolgt von einer Stelle, indem das Öl aus einem Behälter zu allen Lagern fließt. Das abfließende verbrauchte Öl wird in einem Gefäß aufgefangen und nach Reinigung desselben wieder verwendet.

Die Ursache, weshalb Ferranti die schlangenförmige Wicklung verließ und bei seinen neueren

Konstruktionen lieber die Spulenwicklungen anwendete, lag darin, daß ein Fehler in der Armatur

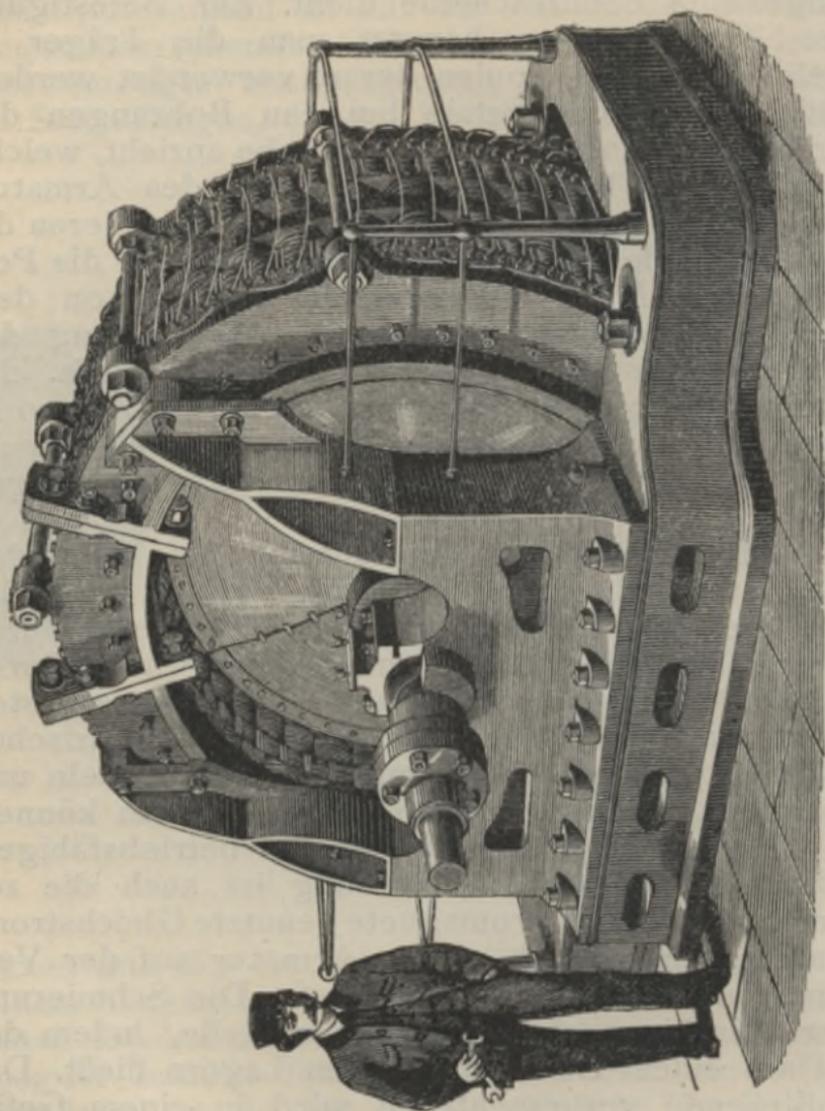


Fig. 46.

im ersten Falle den Ersatz der ganzen Armatur erforderte, während im zweiten Falle nur jene Spule zu ersetzen war, welche beschädigt wurde.

Im Jahre 1882 baute Gordon eine Wechselstrommaschine, die zwei Spulensysteme hatte. Diese Maschine ist in Fig. 46 abgebildet. Die Armaturspulen stehen fest und sind in zwei Reihen angeordnet. Zwischen diesen Reihen rotiert das Magnetrad, welches scheibenförmig ausgeführt ist. Die Scheibe hat an beiden Seiten Elektromagnete, welche in abwechselnder Polarität einander folgen. Bei der abgebildeten Type sind 32 Magnetpole an jeder Seite der Scheibe, während die Anzahl der Armaturspulen auf einer Seite 64 beträgt. Diese Maschine war also eigentlich eine Zweiphasenmaschine, doch benutzte Gordon die zwei Ströme ganz unabhängig voneinander, die beiden Wechselströme waren nicht verkettet. Diese Maschine wurde also von Gordon als eine einphasige Wechselstrommaschine mit zwei Stromkreisen betrachtet.

Die Armaturspulen sind auf zwei gußeisernen Seitenstücke montiert, welche mit den Lagerstellen in entsprechender Weise verbunden sind. Die Erregermaschine sitzt mit der Hauptmaschine auf derselben Welle, der Erregerstrom wird durch Schleifringe zu den Windungen der Elektromagnetbewicklung geführt.

Gordons Maschinen zeichnen sich durch ihre Dimensionen aus. Sie wurden durchwegs für Beleuchtungszentralen gebaut, die größte Type speiste 5000 Stück 20 Kerzen starke Glühlampen.

Die Wechselstrommaschine von Lontin hat einen Polanker. Die induzierten Drähte sind nämlich auf Eisenkerne gewickelt, welche so angeordnet wurden, daß sie einen Kranz bildeten (Fig. 47). Das Magnetrad ist aus 24 Elektromagneten gebildet, ebensoviel beträgt die Zahl der Armaturspulen. Die Polaritäten der Magnete sind einander entgegengesetzt, die Bewicklung ist so ausgeführt, daß der zur Verfügung stehende Raum möglichst ganz ausgenutzt wird. Die Magnetisierung besorgt

eine besondere Gleichstrommaschine, die entweder an der Verlängerung der Hauptwelle sitzt oder durch eine Hilfsmaschine angetrieben wird.

Was die Armaturwicklung betrifft, ist diese in zwölf Teile geteilt. Je zwei Armaturspulen sind zusammengeschaltet, die Enddrähte der so entstehenden zwölf Stromkreise sind zu Klemmen geführt, welche rechts und links von der Welle, am

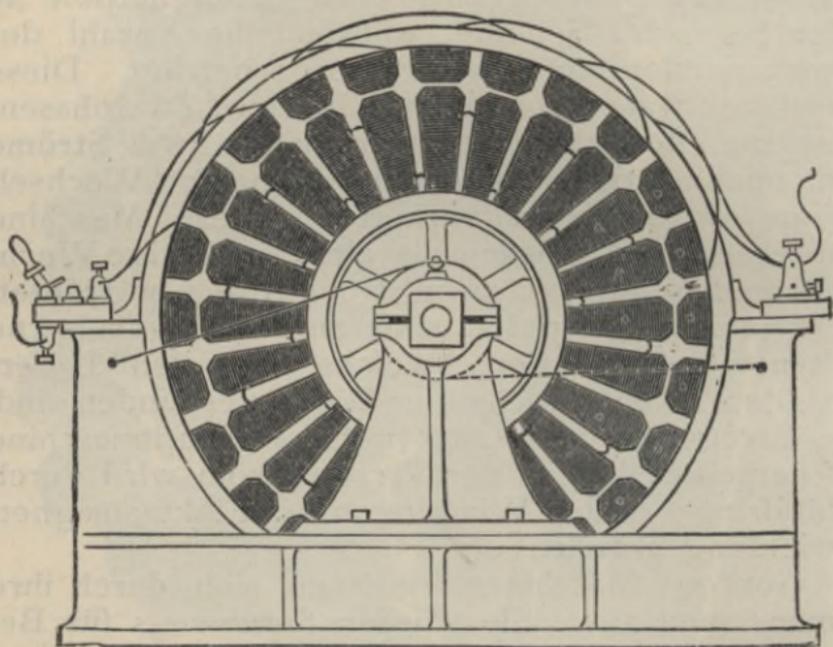


Fig. 47.

Gestelle der Maschine angebracht sind. Durch entsprechende Verbindung dieser Klemmen untereinander lassen sich die zwölf Stromkreise in Serie oder parallel schalten.

Der Hauptnachteil dieser Maschine lag in der großen Erwärmung der Eisenkerne, welcher Umstand verhinderte, daß die Maschine längere Zeit in ununterbrochener Tätigkeit gehalten werde.

In der Mitte der Achtzigerjahre des 19. Jahrhunderts baute die Westinghouse-Gesellschaft eine

Wechselstrommaschine, deren Konstruktion aus den Fig. 48 bis 50 ersichtlich ist. Die abgebildete Type hat 16 feststehende Magnetpole, die außerhalb der Armatur auf einem zweiteiligen Gestell angebracht sind. Die Bewicklungen dieser Magnete

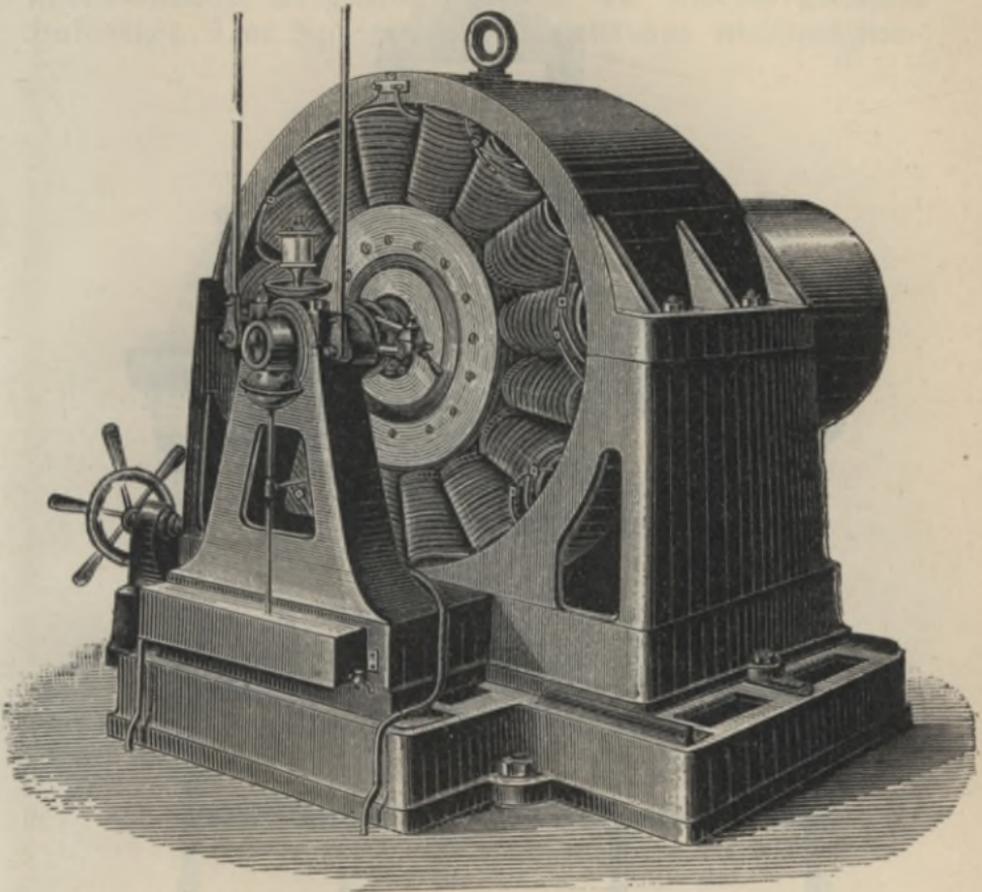


Fig. 48.

sind nacheinander geschaltet und so ausgeführt, daß die aufeinander folgenden Pole entgegengesetzt polarisiert sind. Die Eisenkerne besitzen Polschuhe, welche zugleich die Träger der Magnetspulen sind. Die fertig gewickelten Magnetspulen werden auf die Eisenkerne geschoben, diese aber

mit Schrauben auf den äußeren Maschinenkranz befestigt. Die obere Hälfte des Magnetsystemes

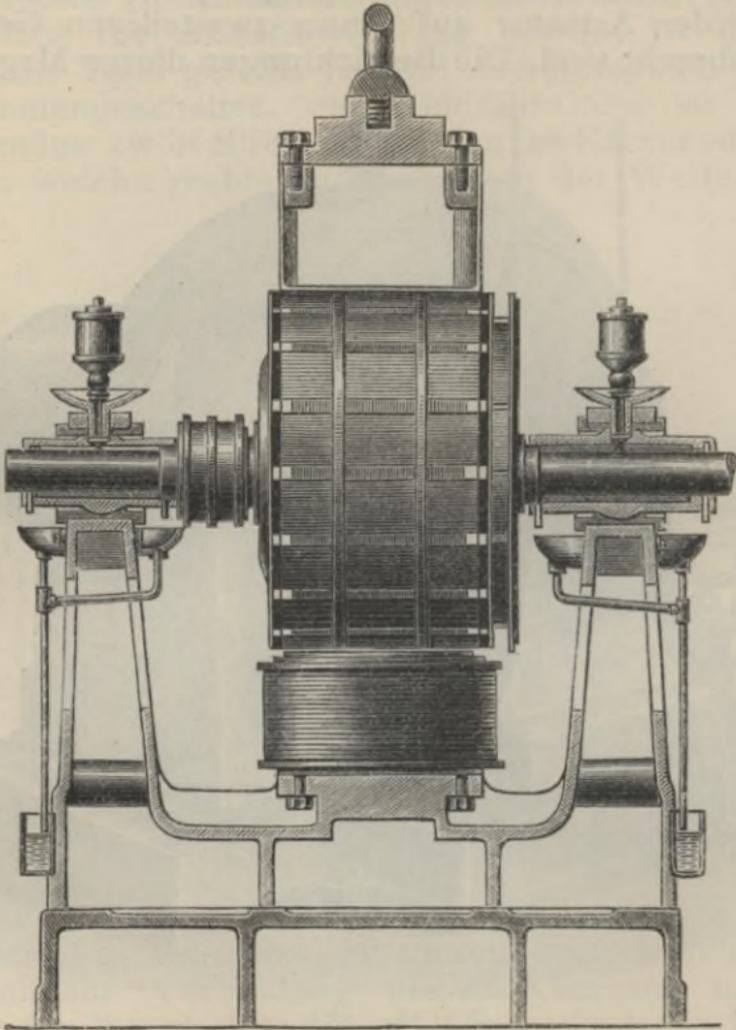


Fig. 49.

kann gehoben werden, um etwaige Reparaturen der Maschine leicht vornehmen zu können.

Der Armaturkern besteht aus Eisenblechen, welche zur Vermeidung der Wirbelströme voneinander isoliert sind, und besitzt zur Kühlung

mehrere Ventilationskanäle. Die Armaturbewicklung ist aus zwei Gruppen nacheinander geschalteter Spulen gebildet, welche letztere auf eigenen Schablonen gewickelt werden. Die Drähte verlaufen zur Achse parallel, an den Umkehrstellen sind sie rechtwinklig umgebogen und an diesen Stellen befestigt. Der Spulenkern besteht aus nichtmagne-

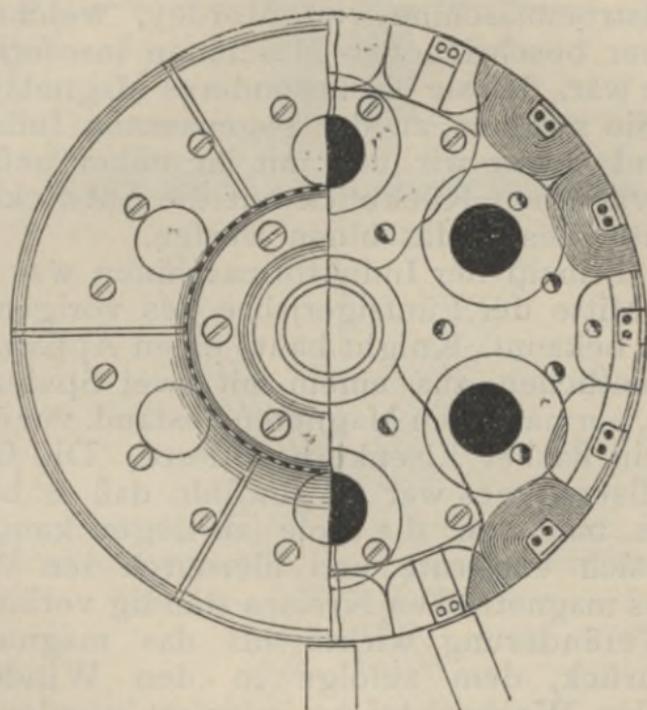


Fig. 50.

tischem Materiale, auf diesen werden die bereits fertiggestellten Spulen geschoben.

In der Armatur entstehen zwei parallel geschaltete Stromkreise, welche mit zwei isolierten Schleifringen verbunden sind. Der Luftraum zwischen den Armaturdrähten und den Magnetpolen ist klein gehalten, ein Umstand, der von guter Wirkung ist, da hierdurch die Streungsverluste

klein gehalten werden können. Die Erregung der Elektromagnete besorgt eine Gleichstrommaschine, die durch eine eigene Kraftmaschine angetrieben wird.

Diese Westinghouse-Maschinen wurden für 1000 Volt gebaut, sie lieferten einen Wechselstrom von 225 Perioden und dementsprechend hatten sie eine überaus hohe Tourenzahl.

In diese Zeit fällt auch die Konstruktion einer Wechselstrommaschine von Mordey, welche von den bisher beschriebenen Maschinen insofern verschieden war, daß sie ein besonderes Magnetsystem hatte. Sie gehörte zu der sogenannten Induktortype, und bevor wir uns mit ihr näher befassen, wollen wir einen Rückblick auf die Entwicklungsgeschichte dieser Maschinen werfen.

Das Prinzip der Induktormaschinen war schon vor der Mitte der Fünfzigerjahre des vorigen Jahrhunderts bekannt. Knight baute einen Apparat, der im wesentlichen aus einem mit zwei Spulen versehenen, permanenten Magneten bestand. vor dessen Polen ein flacher Eisenkern rotierte. Die Gestalt dieses Eisenkernes war so gewählt, daß er bei der Rotation bald vor die Pole zu liegen kam, bald wieder sich entfernte und hierdurch den Widerstand des magnetischen Kreises ständig veränderte. Diese Veränderung wirkte auf das magnetische Feld zurück, dem zufolge in den Windungen der Spulen Wechselströme induziert wurden. Die Spannung des induzierten Stromes war desto größer, je mehr Windungen die Spulen besaßen, je stärker der permanente Magnet war und je rascher der Eisenkern rotierte. Auch ist die Entfernung der Magnetpole vom rotierenden Eisenkerne von Einfluß auf die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft.

Dieser Apparat war zwar eine Wechselstrommaschine, doch war er zu primitiv konstruiert, um mit demselben größere Wirkungen erreichen zu können.

Wheatstone konstruierte ebenfalls eine solche Wechselstrommaschine, diese ist in Fig 51 abgebildet. Sie bestand aus sechs permanenten Magneten

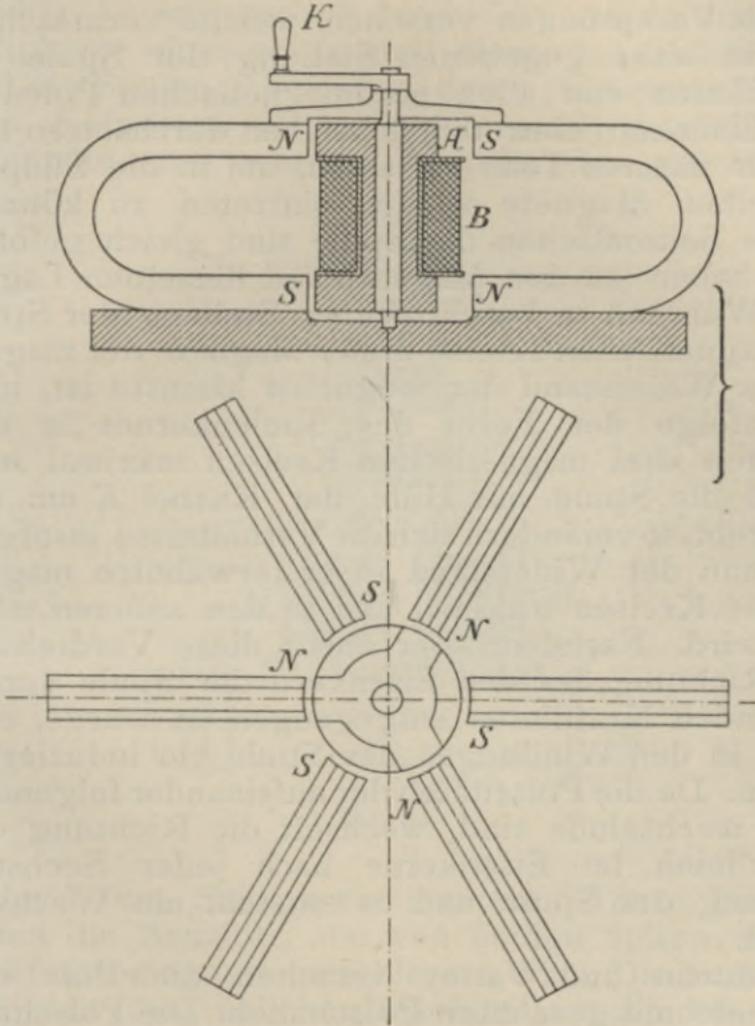


Fig. 51.

NS, welche strahlenförmig und zueinander symmetrisch verteilt waren. Ihre Pole lagen an der Peripherie eines Kreises und waren so angeordnet, daß einem Nordpole ein Südpol folgte. In dem

durch die Pole der Magnete umschlossenen Raum befindet sich die Spule *B*, welche den speziell geformten Eisenkern *A* besitzt. Dieser Kern dient zugleich als Drehungsachse, an den Stirnflächen ist er mit Vorsprüngen versehen, welche verursachen, daß in einer gegebenen Stellung der Spule die Kraftlinien von allen nordmagnetischen Polen in den Eisenkern eintreten, denselben durchsetzen und ihn im unteren Teile verlassen, um in die Südpole derselben Magnete wieder eintreten zu können. Beide Seitenflächen der Spule sind gleich geformt und haben zu den Magnetpolen dieselben Lagen.

Während in beschriebener Stellung der Spule im magnetischen Kreise dreier Magnete der magnetische Widerstand der möglichst kleinste ist, muß er infolge der Form des Spulenkernes in den anderen drei magnetischen Kreisen maximal sein. Wird die Spule mit Hilfe der Kurbel *K* um  $60^{\circ}$  verdreht, so verändern sich die Verhältnisse insofern, daß nun der Widerstand in ersterwähnten magnetischen Kreisen maximal und in den anderen minimal wird. Nachdem aber durch diese Verdrehung die Richtung der den Eisenkern der Spule durchsetzenden Kraftlinien entgegengesetzt wurde, entsteht in den Windungen der Spule ein induzierter Strom. Da die Polaritäten der aufeinander folgenden Pole wechselnde sind, wechselt die Richtung der Kraftlinien im Eisenkerne nach jeder Sechsteldrehung der Spule und es entsteht ein Wechselstrom.

Martin und Varley versahen die Pole der Magnete mit gezahnten Polschuhen. Die Polschuhe schlossen eine entsprechend gezahnte Eisenscheibe ein, welche zwischen den Polen drehbar angeordnet war. Die Zahnvorsprünge an den Polen und an der Scheibe dienten zur Veränderung des magnetischen Widerstandes der magnetischen Kreise, welcher Umstand verursachte, daß in den Windungen

einer die Achse der rotierenden Scheibe umfassenden Spule Wechselströme induziert wurden.

Eine praktischere Konstruktion als die bisher beschriebenen, rührt von Holmes her. Sie ist in der Fig 52 schematisch dargestellt. An der inneren Peripherie eines als Gestell dienenden Gußstückes sind die Spulen *S* befestigt, deren jede einen Eisenkern *E* besitzt. Die Spulen sind gewöhnliche Solenoide und werden nacheinander geschaltet,

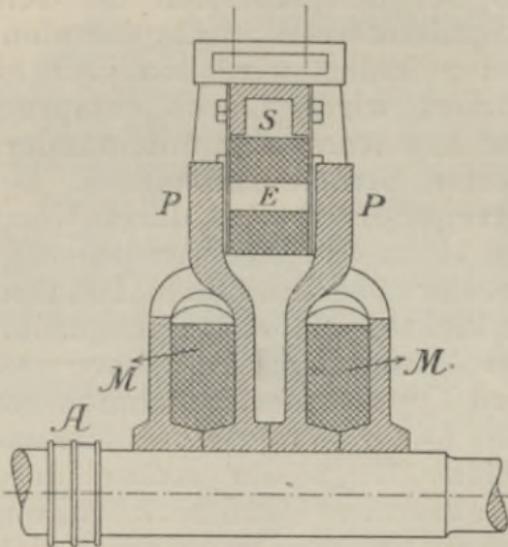


Fig. 52.

wodurch ein Stromkreis entsteht. Diese Spulen bilden die Armatur, die von beiden Seiten durch die Elektromagnete umschlossen wird. Die letzteren sind von den üblichen insofern verschieden, daß zur Erzeugung eines Feldsystemes nur eine Erreger- spule vorhanden ist, deren Achse mit der Maschinen- achse zusammenfällt.

Ein Magnetsystem wird durch zwei Scheiben gebildet, deren zackenförmige Ränder klauenartig ineinander greifen. Die Magnetisierungsspule *M*

liegt zwischen diesen Scheiben, deren unterer Teil zu diesem Zwecke entsprechend ausgebildet ist. Die Magnetpole sind  $P$ , und nachdem diese ineinander greifen, sind die Polaritäten der nebeneinander liegenden Pole einander entgegengesetzt. Solche Magnetsysteme sind an der Maschine zwei vorhanden, und zwar sind sie gegeneinander so verdreht, daß die gegenüber stehenden Pole entgegengesetzt polarisiert sind.

Diese Anordnung der Magnetpole hat zur Folge, daß bei der Rotation die Richtung der durch den Spulenkern  $E$  durchgehenden Kraftlinien fortwährend geändert wird, wodurch ein Wechselstrom induziert wird. Durch entsprechende Verbindung der Armaturspulen miteinander lassen sich alle induzierten Ströme summieren.

Der Erregerstrom wird durch Vermittlung der Schleifringe  $A$  zu den Erregerspulen geführt.

Alle bisher beschriebenen Induktormaschinen wurden im kleinen Maßstabe ausgeführt. Erst auf der Wiener Ausstellung im Jahre 1883 sah man eine größere Type dieser Maschinen von Klimenko ausgestellt. Diese hatte zwei vierarmige Eisenkreuze, welche längs der Achse durch ein entsprechend geformtes Gußstück miteinander verbunden waren. Die Erregerspule war nicht rotierend, nur der durch sie umgeschlossene Eisenkern bewegte sich. Man hatte also auf einer Seite der Maschine lauter Nordpole, auf der anderen nur Südpole, welche einander gegenüber standen und zwischen sich die Armaturspulen einschlossen. Sowohl die letzteren als auch die Erregerspule waren auf Seitenträger befestigt, so daß bei dieser Wechselstrommaschine nur der Eisenkern sich bewegte. Hierdurch waren Schleifringe unnötig geworden, die Zuführung des Erregerstromes und die Fortführung des erzeugten Wechselstromes erfolgte aus feststehenden Klemmen.

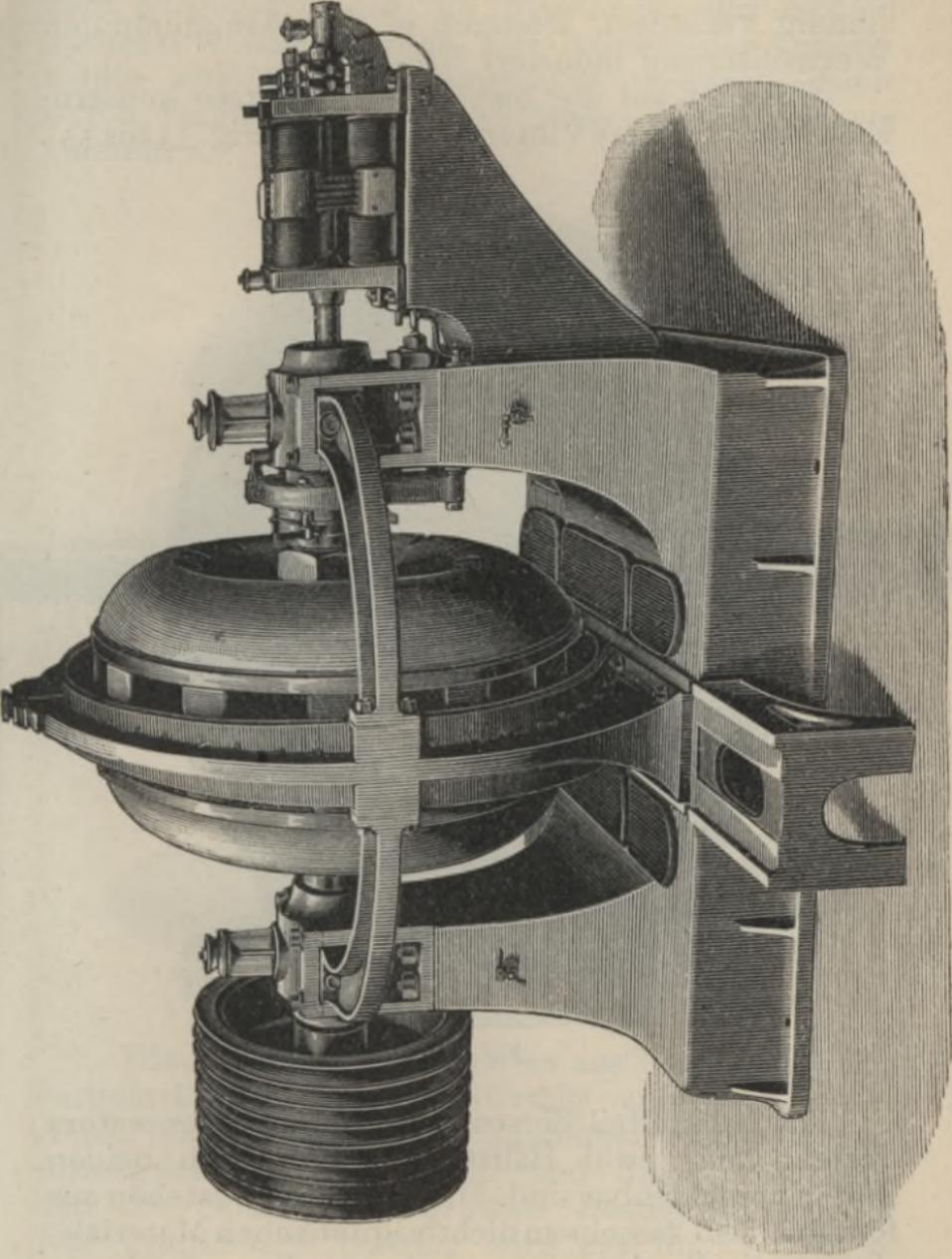


Fig. 53.

Durch die Bewegung der Magnetpole wird der Verlauf der Kraftlinien in den Eisenkernen ständig verändert, wodurch in den Armaturspulen Wechselströme induziert werden.

Gestützt auf die bisherigen Resultate konstruierte Mordey seine Viktoria-Maschine (Fig. 53 bis 55).

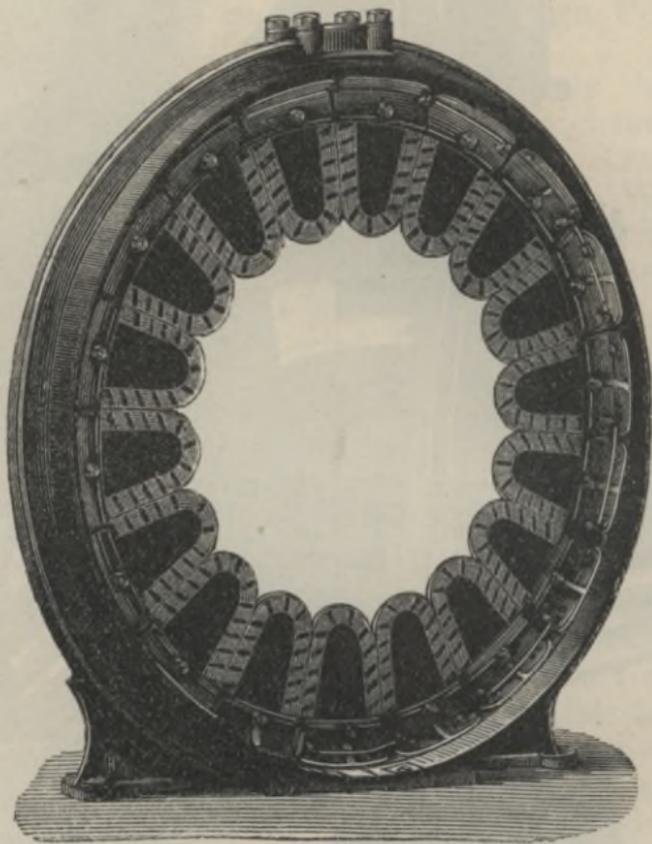


Fig. 54.

Der Mittelteil dieses Wechselstromgenerators besteht aus zwei Hälften, welche nach beiden Seiten verschiebbar sind. Diese Hälften bestehen aus Rotguß, also aus einem nichtmagnetischen Materiale, sie tragen die Armaturspulen, wie dies aus Fig. 54 ersichtlich ist. Die Armatur besitzt hier überhaupt

kein Eisen, die Armaturspulen sind nämlich so flach ausgeführt, daß die Eisenkerne der Spulen entbehrt werden konnten. Der Rahmen der Armatur mußte aus Rotguß hergestellt werden, damit durch magnetische Nebenschlüsse keine Verluste entstehen.

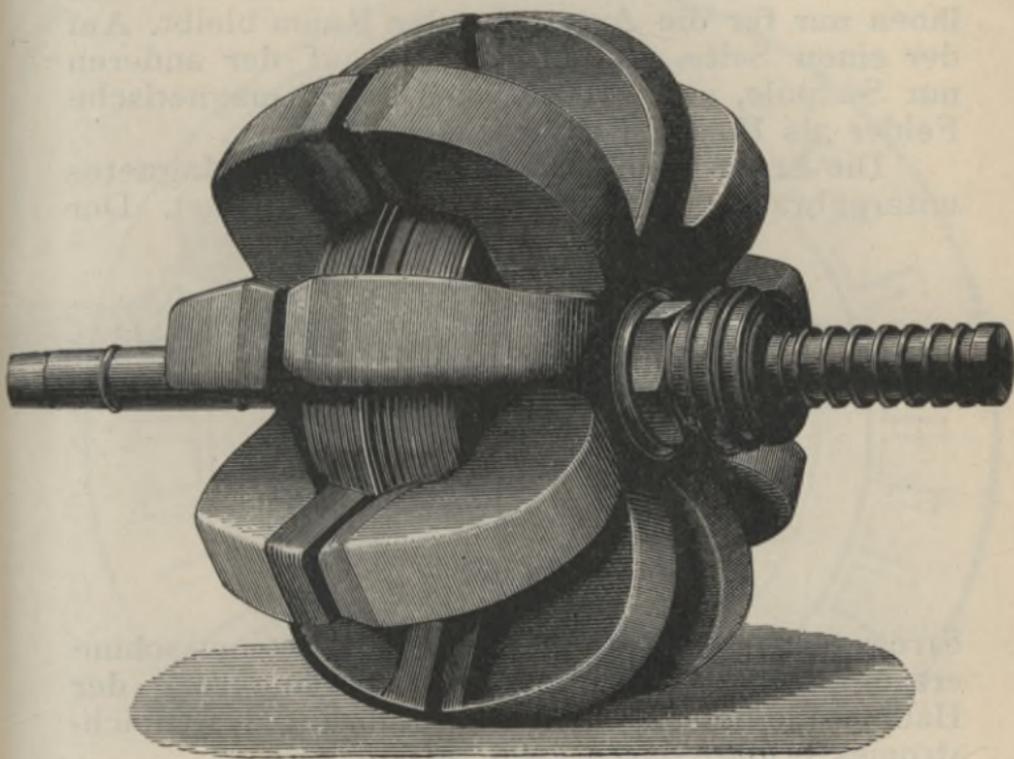


Fig. 55.

Die Armaturspulen werden aus Kupferbändern hergestellt, sie sind keilförmig und gegen die Achse abgestumpft. Der Spulenkern besteht aus diamagnetischem Materiale und dient nur dazu, daß die Spule eine größere Festigkeit erhalte. Der Träger der Armatur wird auf beiden Seiten mit Blechkappen versehen, um der Maschine einen ruhigen Gang zu verleihen, da die rotierenden

Magnetpole einen starken Luftzug verursachen würden.

Der Magnet ist aus Fig. 55 ersichtlich. Er hat einen Eisenkern, welcher von der Achse durchsetzt wird. Dieser Eisenkern hat an seinen beiden Enden klauenförmige Polschuhe, deren gegenüberliegenden Teile so nahe zueinander kommen, daß zwischen ihnen nur für die Armaturspulen Raum bleibt. Auf der einen Seite sind nur Nord-, auf der anderen nur Südpole, und es entstehen soviel magnetische Felder als Polschuhe vorhanden sind.

Die Erregerspule ist im Mittelteile des Magnetes untergebracht, sie rotiert mit dem Magnet. Der

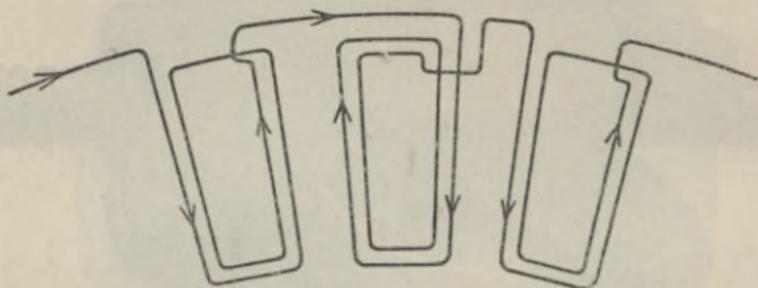


Fig. 56.

Erregerstrom wird durch eine Gleichstrommaschine erzeugt, deren Armatur auf die Verlängerung der Hauptwelle befestigt ist. Die Zuführung des Gleichstromes erfolgt durch zwei Schleifringe.

Die Zahl der Armaturspulen ist doppelt so groß, als die der Magnetpole. Die Induktionswirkung entsteht dadurch, daß die rotierenden Kraftlinien die Ebenen der Spulen bald durchsetzen und bald verlassen. Die Spulen sind nacheinander geschaltet, die Enden der ersten und der letzten Spule sind zu feststehenden Klemmen geführt. Die Schaltung ist aus Fig. 56 ersichtlich.

Woodhouse & Rawson bauten die Kingdon-Wechselstrommaschine, welche ebenfalls zur In-

duktortype gehört. Bei dieser Maschine ist nur ein aus Eisenkernen bestehendes Induktionsrad  $r, r$  (Fig. 57) beweglich, die Armaturspulen und die Erregerspulen sind unbeweglich.  $N_1 S_1 N_2 S_2 N_3 \dots$

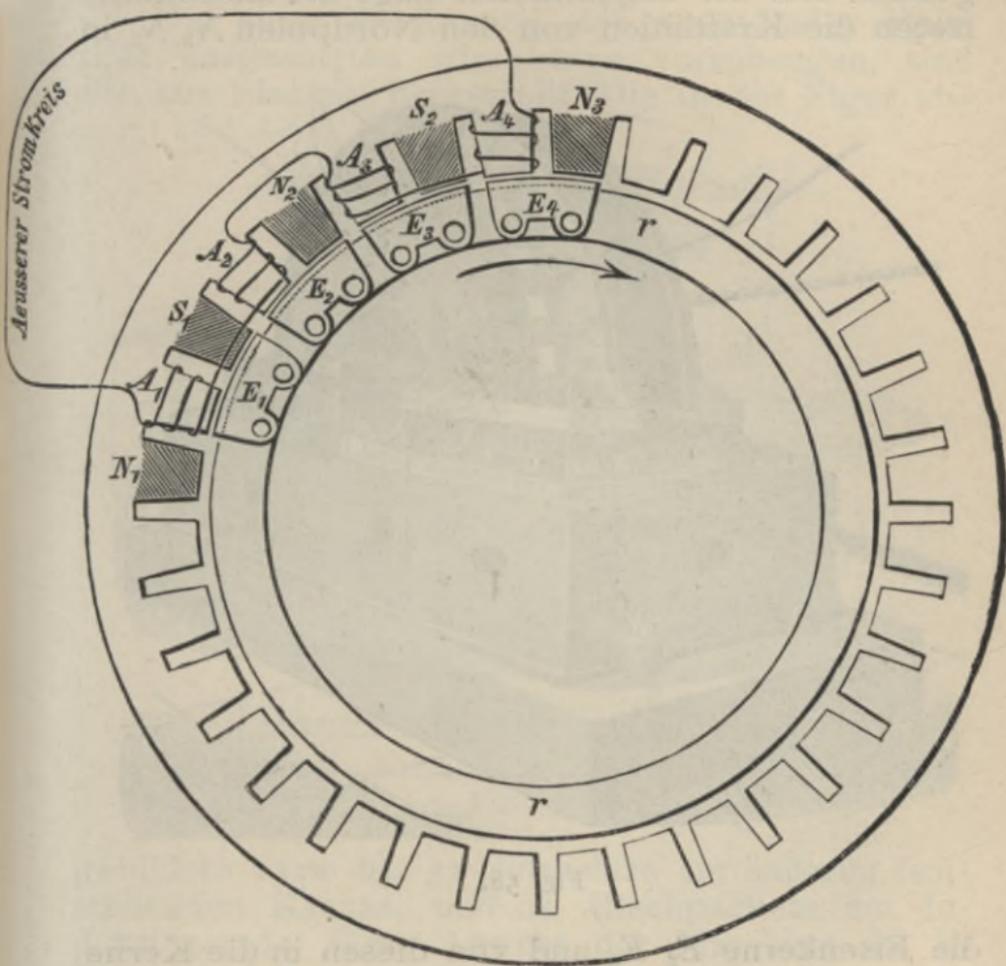


Fig. 57.

sind die durch Gleichstrom erregten Magnetpole, welche mit den Armaturspulen auf demselben Eisenkranz sitzen. Die Armaturspulen  $A_1 A_2 A_3 A_4 \dots$  besitzen Bewicklungen, welche nacheinander geschaltet werden. Das Induktionsrad ist aus dia-

magnetischem Materiale, es trägt nur an seiner Peripherie Eisenkerne  $E_1 E_2 E_3 E_4 \dots$ , welche die Induktionswirkung hervorrufen.

Der Vorgang bei der Induktion ist nun folgender. Bei der abgebildeten Lage der Eisenkerne treten die Kraftlinien von den Nordpolen  $N_2 N_3$  in

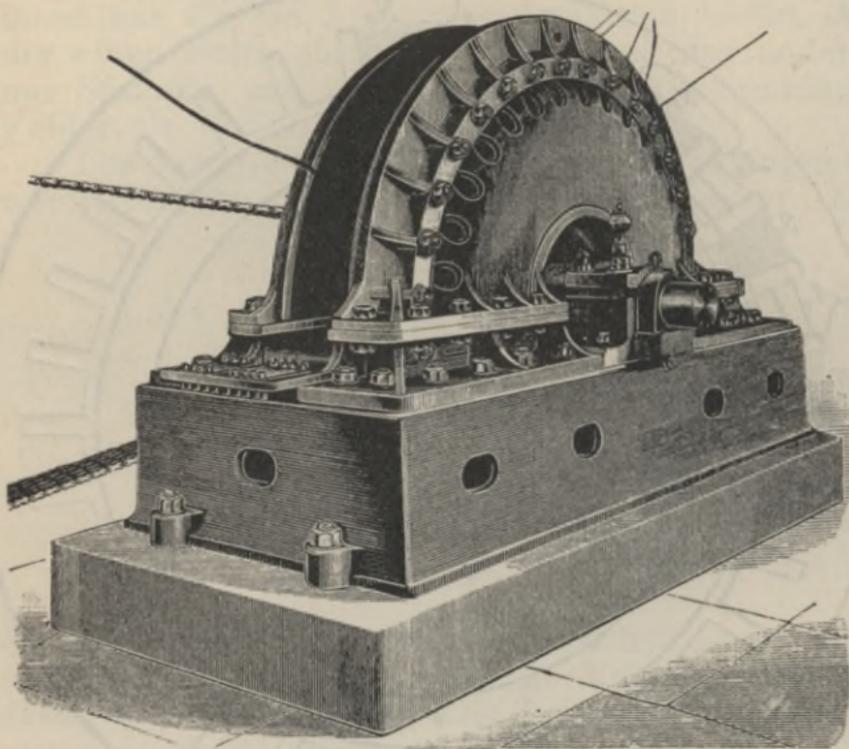


Fig. 58.

die Eisenkerne  $E_2 E_4$  und von diesen in die Kerne der Armaturspulen  $A_2 A_4$ . Unterdessen sind  $A_1 A_3$  den Wirkungen der Südpole  $S_1 S_2$  ausgesetzt. Dreht sich das Magnetrad weiter, dann verändern sich die Richtungen der Kraftlinien in den Eisenkernen der Armaturspulen und es wird eine Lage geben (nach Vorwärtsbewegen der Eisenkerne  $E_1 E_2 \dots$  um eine Spulenbreite), wo die Armaturspulen  $A_1$

$A_3$  unter dem Einfluß der Nordpole  $N_1 N_2$  und die Spulen  $A_2 A_4$  unter die Wirkung der Südpole  $S_1 S_2$  kommen. Dies wiederholt sich bei jedem Vorwärtücken der Eisenkerne des Induktionsrades, wodurch ein Wechselstrom entsteht.

Um einer Erwärmung der wechselnder Polarität ausgesetzten Eisenkerne vorzubeugen, sind alle aus Blechen hergestellt. Die in der Figur ab-

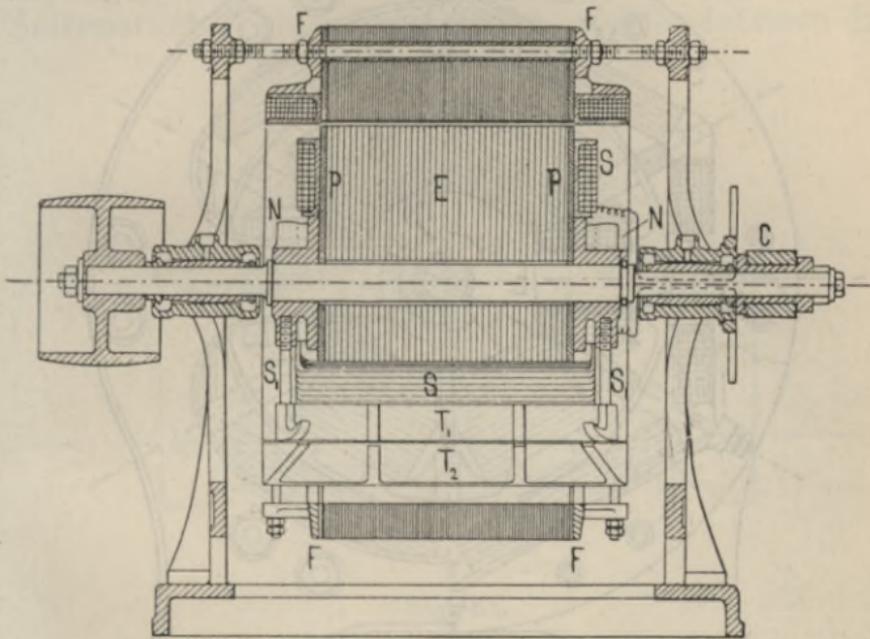


Fig. 59.

gebildete Type hat 32 Polansätze am äußeren feststehenden Kranze, und 16 Blechpakete am Induktionsrade. Eine Ansicht der Maschine ist in Fig. 58 wiedergegeben.

Im Jahre 1888 konstruierte Zipernowsky eine Wechselstrommaschine, die ausgedehnte Verwendung fand und die die erste Maschine war, welche in Zentralen parallel geschaltet wurde.

Die Konstruktion dieser Maschine ist aus den Fig. 59 und 60 ersichtlich. Sowohl die Magnet-

als auch die Armaturkerne sind aus  $0,5\text{ mm}$  starken Blechen zusammengestellt, welche durch Papier oder eine Lackschicht voneinander isoliert sind, um ein Anwachsen der Wirbelströme zu verhindern.

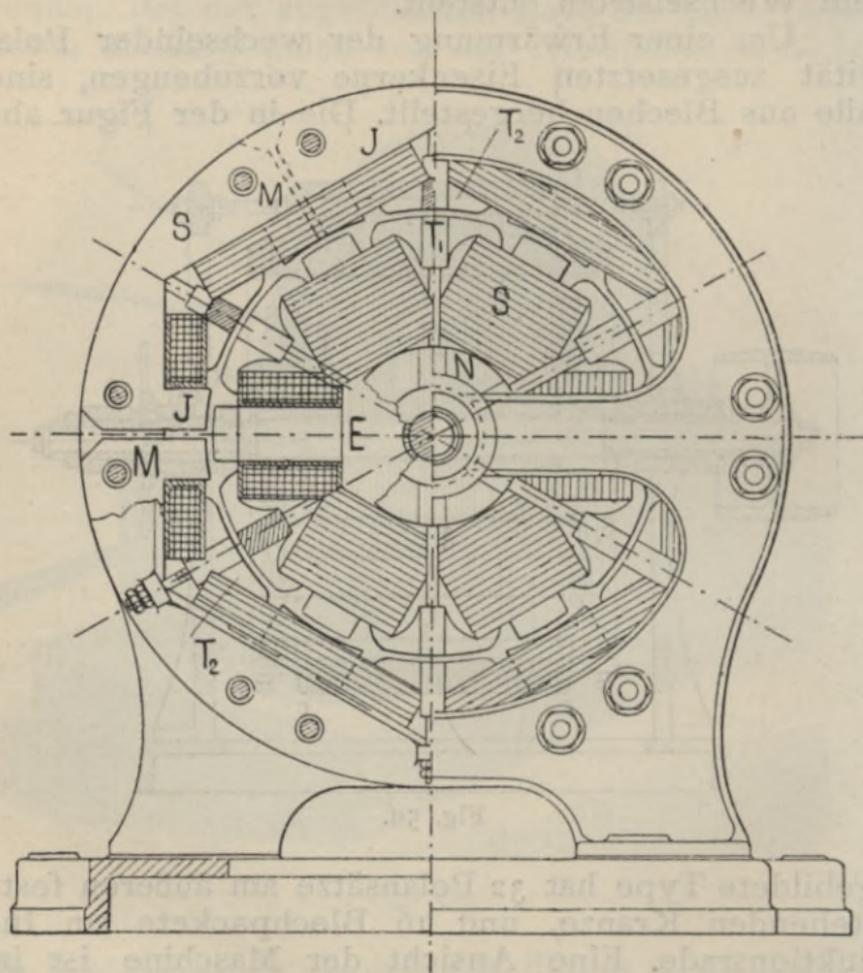


Fig. 60.

zu können. Die Bleche  $E$  des rotierenden Magnetrades sind durch die Platten  $P$  zusammengehalten, welche durch die Teile  $N$  fest an den so entstandenen Magnetkern angedrückt werden. Auf die sechs Speichen des Eisenkernes werden die Erreger-

spulen  $S$  geschoben, die durch die Träger  $T_1$  gegen die Wirkung der Zentrifugalkraft geschützt werden. Diese Träger sind mit den Seitenscheiben  $N$  durch die Schrauben  $S_1$  verbunden, wodurch das ganze Magnetsystem ein solides Gefüge erhält.

Die Armatur ist feststehend und hat soviel Spulen, als Magnetpole vorhanden sind. Die Armaturspulen sitzen auf Eisenkernen, welche durch durchgehende Schraubenbolzen zwischen zwei Seitenstücken gehalten werden, welche letztere das

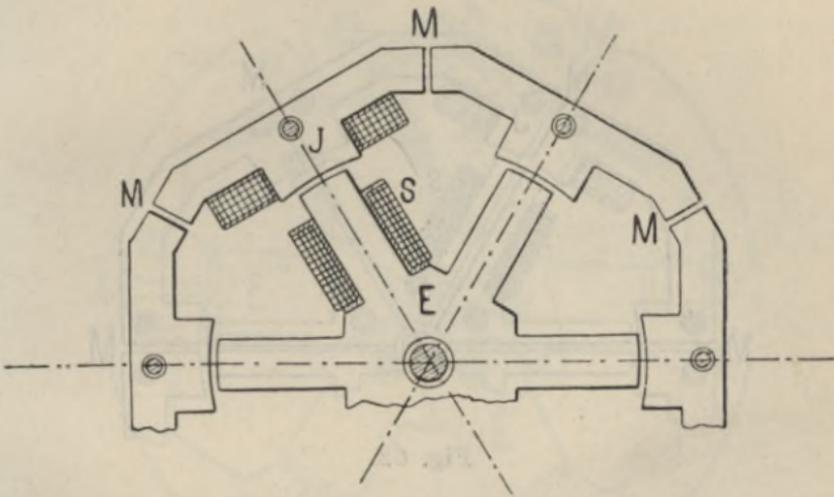


Fig. 61.

Gestell der Maschine bilden. Die Befestigung der Spulen erfolgt durch die Traversen  $T_2$ , die mit Schrauben mit dem Maschinenrahmen verbunden werden. Das Zusammenpressen der Armaturbleche geschieht mit Hilfe der Gußstücke  $F$ , welche die oben erwähnten Schraubenbolzen durchlassen und deren der Achse zugewendete Teil zugleich als Stütze der Armaturspulen dient.

Die Erregung der Magnete erfolgt entweder aus einer besonderen Gleichstromquelle oder durch die erzeugten Ströme selbst, nur muß in letzterem

Falle einer der bereits beschriebenen Komutatoren verwendet werden, der den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt.

Bei kleineren Maschinen sind die Bleche der Armatur und des Magnetes aus einem Stücke ausgestanzt, bei größeren Typen werden diese Eisenkerne aus Blechsegmenten zusammengesetzt. Dies kann in zweierlei Weise durchgeführt werden, und zwar entweder so wie dies in Fig. 60 geschah, daß nämlich die Stoßfugen im Armaturkerne parallel zu dem Verlaufe der Kraftlinien sind, oder nach

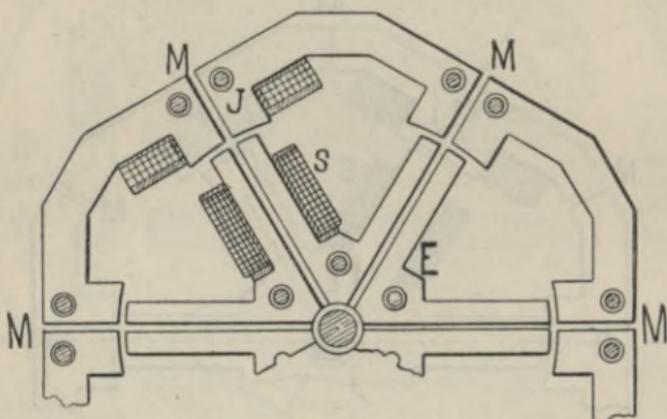


Fig. 62.

Fig. 61, wo die Ebenen der Stoßfugen auf die Richtung der Kraftlinien im Armaturkerne senkrecht stehen. Im ersten Falle bedeuten die Stoßfugen im magnetischen Kreise keinen Widerstand, im zweiten Falle vergrößern sie zwar den Widerstand des magnetischen Kreises, doch ist diese Ausführung doch vorteilhafter, denn die einzelnen Teile der Armatur lassen sich leicht abmontieren, ohne daß ein Lösen anderer Maschinenteile nötig wäre.

Während in Fig. 61 der Magnetkern aus einem Stücke bestehenden Eisenblech zusammengesetzt ist, besteht er in der in Fig. 62 abgebildeten Aus-

führung aus soviel Teilen, als Pole vorhanden sind. In diesem Falle sind die Bleche so zusammengesetzt, daß die Stoßfugen immer in die Mitte der Erregerspule kommen, was aus magnetischer Hinsicht nur vorteilhaft ist. Die Aufteilung des Magnetkernes kann aber auch nach Fig. 63 erfolgen, in welchem Falle dann der magnetische Widerstand

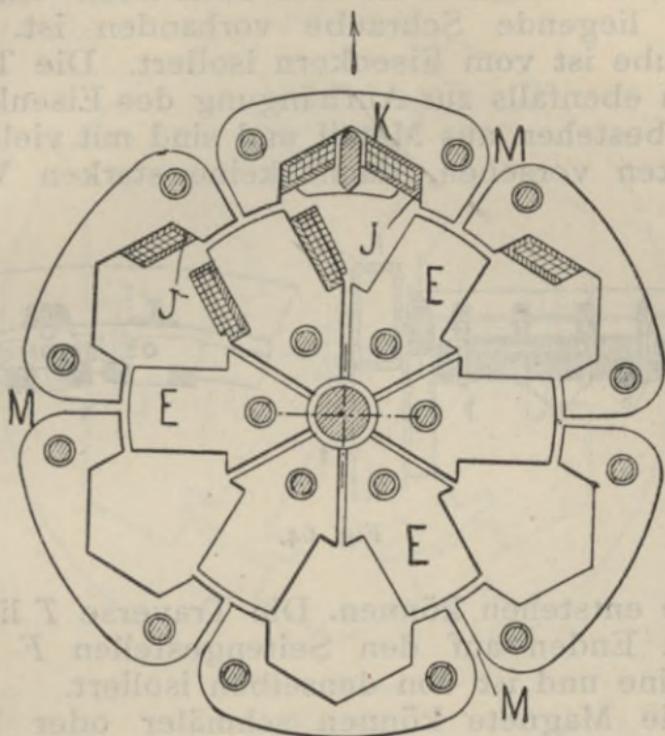


Fig. 63.

vergrößert wird, da nun in den Weg der Kraftlinien Luftzwischenräume geschaltet werden.

Bei der letzten Ausführung ist der Armaturkern so aufgeteilt, wie in Fig. 62. Trotzdem läßt sich eine jede Armaturspule leicht herausnehmen, da der Eisenkern der Armaturspule in Richtung des eingezeichneten Pfeiles bequem herausziehbar ist. In dieser Weise ist der Vorteil der leichten

Montierung der Armaturteile mit dem Vorteile des verringerten magnetischen Widerstandes verbunden.

Die Konstruktion der Armatur ist aus Fig. 64 ersichtlich. Der Armaturkern ist aus *T*-förmigen Blechen zusammengesetzt und wird durch Schrauben an der Traverse *T* festgehalten. Die Seitenplatten *P P* dienen zum Zusammenpressen der Armaturbleche, zu welchem Zwecke auch noch eine horizontal liegende Schraube vorhanden ist. Diese Schraube ist vom Eisenkern isoliert. Die Teile *N* dienen ebenfalls zur Aufhängung des Eisenkernes; diese bestehen aus Metall und sind mit vielen Einschnitten versehen, damit keine starken Wirbel-

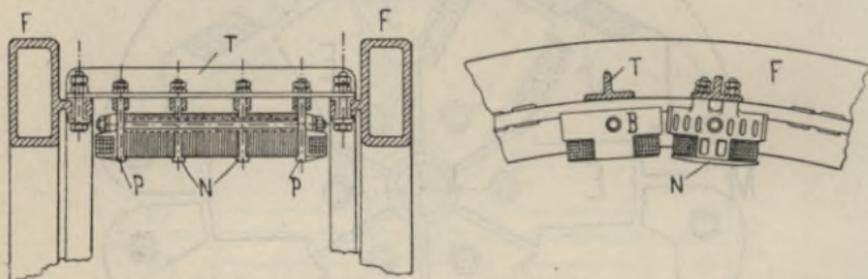


Fig. 64.

ströme entstehen können. Die Traverse *T* liegt an beiden Enden auf den Seitengestellen *F F* der Maschine und ist von denselben isoliert.

Die Magnete können schmaler oder breiter als die Polansätze der Armatur sein, ihre Dimensionen beeinflussen die Kurvenform des erzeugten Wechselstromes. Auch kann das Magnetrad mit Polschuhen versehen werden, welche entweder mit dem Magnetkern ein Stück bilden oder auf denselben aufgeschraubt werden. In Fig. 65 ist eine Konstruktionsform dargestellt, bei welcher sowohl die Armatur, als auch die Magnetkerne aus ganzen Blechen zusammengesetzt sind, außerdem sind die Magnete mit Polschuhen versehen.

Endlich ist in Fig. 66 eine Disposition abgebildet, bei welcher die Armatur und die Magnete nicht übereinander, sondern nebeneinander stehen. Der Eisenkern  $K$  des Magnetes steht den Eisenkernen  $K^1$  und  $K^2$  der Armatur gegenüber. Diese letzteren werden aus Blechstücken zusammengestellt, deren eines im unteren Teile der Figur besonders ge-

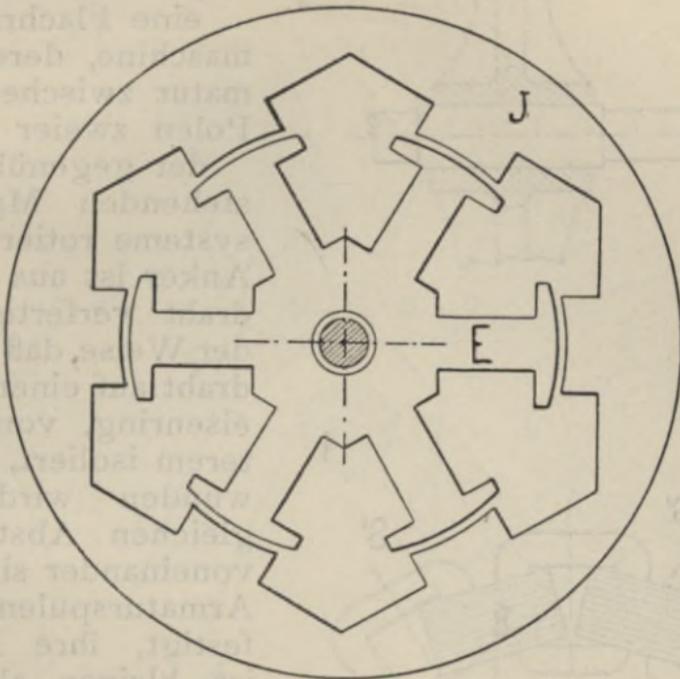


Fig. 65.

zeichnet ist. Der danebenstehende Figurenteil zeigt die Armatur von der Seite. Hierbei sind  $S'$   $S'$  die Spulen und  $B$  die Eisenkerne der Armatur.

Zum Schlusse sei noch bemerkt, daß später die Eisenkerne der Magnete aus den in Fig. 67 abgebildeten Blechformen zusammengestellt wurden. Die Anordnung hat den Vorteil, daß bei ihr im Eisenkerne überhaupt keine Luftzwischenräume entstanden, da die Bleche abwechselnd nach rechts

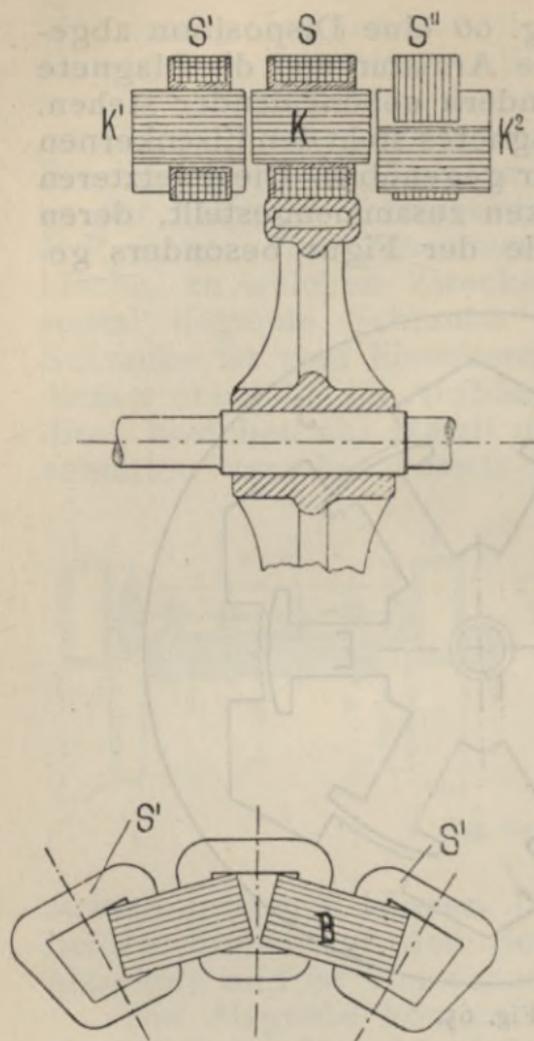
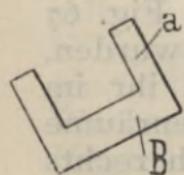


Fig. 66.



Die Magnete sind mit entsprechend geformten Polschuhen versehen. Die Polarität der aufeinanderfolgenden Pole ist abwechselnd nord- und südmagnetisch, während die einander gegenüberstehenden Pole gleiche Polaritäten besitzen. Beide

und links gelegt wurden, wie dies in der Figur punktiert angedeutet ist.

Die Wechselstrommaschine von Kapp ist in Fig. 68 abgebildet. Sie ist eine Flachringmaschine, deren Armatur zwischen den Polen zweier einander gegenüberstehenden Magnetensysteme rotiert. Der Anker ist aus Eisendraht gefertigt, in der Weise, daß Eisendraht auf einen Gußeisenring, von letzterem isoliert, aufgewunden wird. In gleichen Abständen voneinander sind die Armaturspulen befestigt, ihre Breite ist kleiner als die Hälfte der Entfernung der Symmetrieachsen der aufeinanderfolgenden Magnetpole.

Magnetsysteme sind auf vertikale Gußstücke geschraubt; diese Seitenteile sind noch mit starken Bolzen miteinander verbunden, wodurch der Maschine die nötige Stabilität gegeben wird.

Im Jahre 1888 machten Ferraris und Tesla ihre epochemachenden Entdeckungen, die mehrphasigen Wechselströme betreffend. Diese Ent-

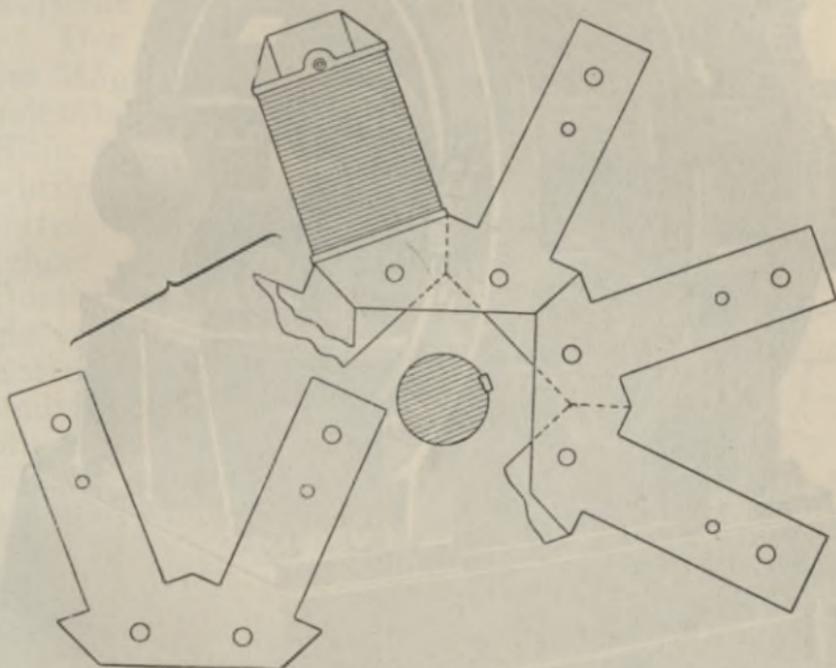


Fig. 67.

deckungen eröffneten für die Wechselströme ein neues Verwendungsgebiet, nämlich jenes der elektrischen Arbeitsübertragung durch Wechselströme. Bis zu dieser Zeit benutzte man Wechselstrom nur zu Beleuchtungszwecken, da die Wechselstrommotoren in der Praxis nicht gut verwendbar waren. Ihr Hauptnachteil bestand darin, daß sie nicht allein anliefen, welcher Umstand sie von vielen Anwendungsgebieten ausschloß. Hierzu

kamen noch die einfache Wirkungsweise und die vortrefflichen Eigenschaften des Gleichstrommotors, was auch dazu beitrug, daß die Ver-

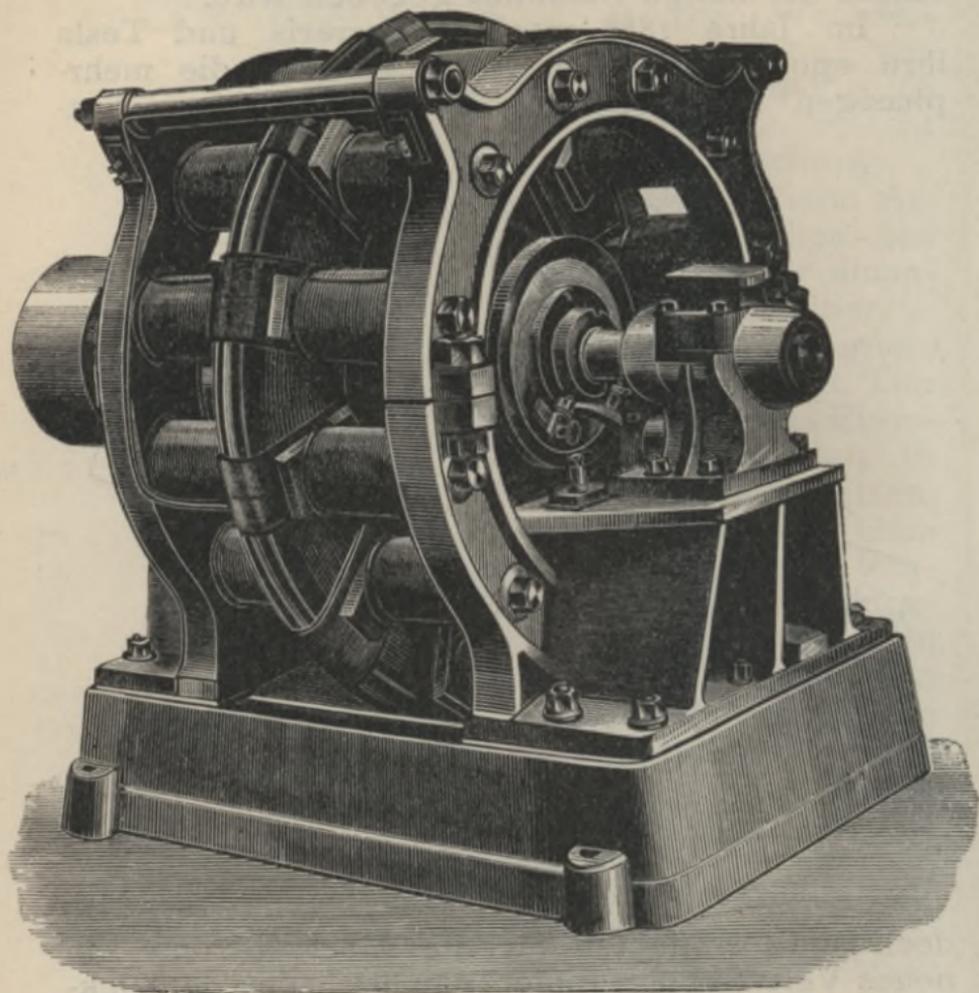


Fig. 68.

wendung des Wechselstromes nur zu Beleuchtungszwecken beschränkt blieb.

Die Mehrphasenmotoren besitzen alle guten Eigenschaften des Gleichstrommotors, und fingen auch an, rasch an Verbreitung zu gewinnen. Sie

laufen von selbst an, haben guten Wirkungsgrad, und was am vorteilhaftesten ist, sie besitzen keinen Kollektor, jenen empfindlichsten Teil einer Gleichstrommaschine. Kleinere Wechselstrommotoren haben überhaupt keine beweglichen Stromzuführungsteile, größere besitzen solche in Form von Schleifringen, welche aber billig sind und im Betriebe keine besondere Aufsicht erheischen.

Der erste Beweis der Möglichkeit der Arbeitsübertragung mit Hilfe des Drehstromes, wurde auf der Frankfurter Ausstellung im Jahre 1891 erbracht. Dort wurde eine Energie von 150 PS auf eine Entfernung von 175 km

mittels Drehstromes übertragen. Man benutzte hierbei Spannungen von 15.000 und 30.000 Volt, und diesem Umstande ist es auch zuzuschreiben, daß trotz den Anfangsbeschwerlichkeiten der Wirkungsgrad der Arbeitsübertragung 75% betrug.

Die Natur des Drehstromes ist aus dem zweiten Bande dieses Werkes bekannt. Hier wollen wir nur einen Blick auf die historische Entwicklung der Mehrphasenmaschinen werfen, mit den Eigenschaften der Mehrphasenmaschinen werden wir uns später eingehender befassen.

Bradleys Mehrphasenmaschine ist in Fig. 69 schematisch dargestellt. Sie besitzt eine Ring-

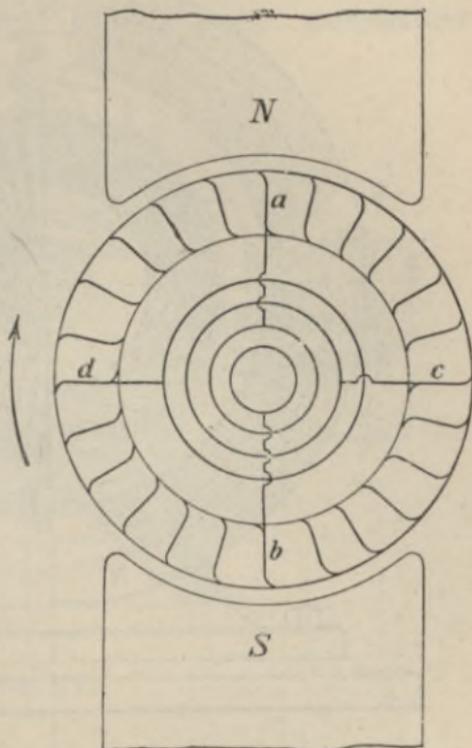


Fig. 69.

armatur mit geschlossener Wicklung, welche in unserem Falle zwischen zwei Magnetpolen rotiert. Vier gegeneinander symmetrisch liegende Punkte der Wicklung sind mit vier isolierten Schleifringen

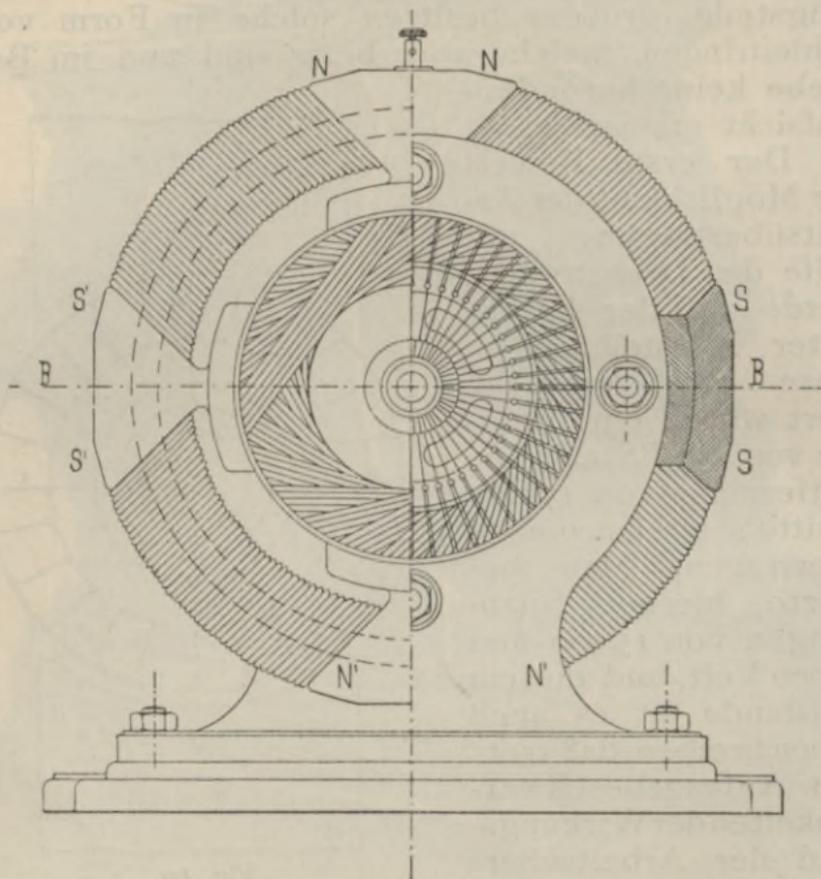


Fig. 70.

verbunden, welche mit dem äußeren Stromkreise durch Vermittlung von Schleifbürsten in Verbindung stehen. Bei dieser Maschine bekommt man zwei-, beziehungsweise vierphasigen Wechselstrom, je nachdem man die Stromkreise der Armatur zusammenschaltet.

Die Drehstrommaschine der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vormals Schuckert & Co. hatte eine Flachringarmatur. Sie hatte außer den vier Schleifringen auch einen Kollektor, so daß Wechsel- und Gleichstrom zugleich erzeugt werden konnten.

Die Anordnung, aus einem Anker zugleich Wechselstrom und Gleichstrom zu erzeugen, wurde Zipernowsky bereits im Jahre 1880 patentiert.

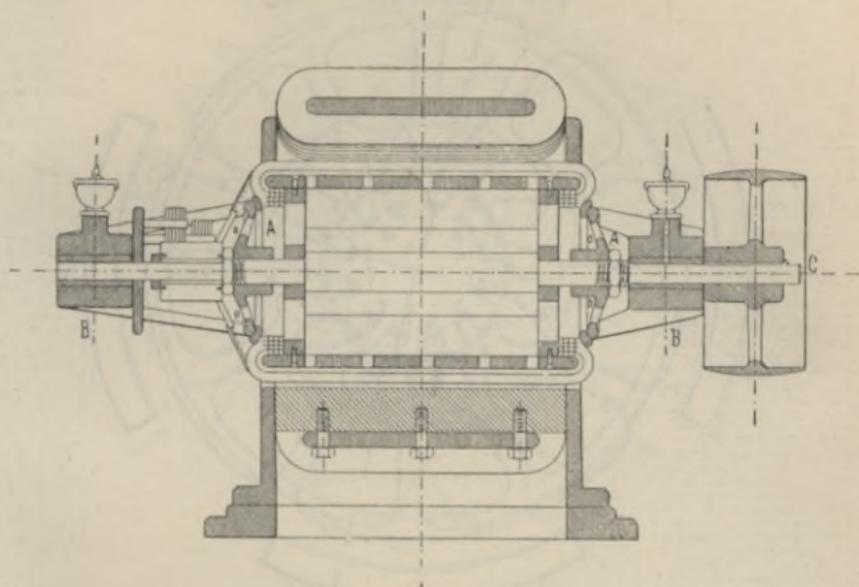


Fig. 71.

Diese Maschine war mehrpolig und hatte einen Anker mit Serienwicklung. In Fig. 70 ist sie in Schnitt und Ansicht, in Fig. 71 in Längsschnitt dargestellt.

A ist die Armatur, deren Eisenkern aus Drähten oder Blechen zusammengesetzt wird. Die Wicklung besteht aus zusammenschalteten Spulen, deren Längsseiten mit der Achse parallel laufen. Die relativen Lagen der einzelnen zusammenschalteten Spulenseiten zu den magnetischen Feldachsen sind

dieselben, so daß in demselben Zeitpunkt alle unter denselben Induktionsverhältnissen stehen. Die Enden der Armaturdrähte führen zu den Segmenten eines Kollektors, durch den die in der Armatur induzierten Wechselströme gleichgerichtet werden.

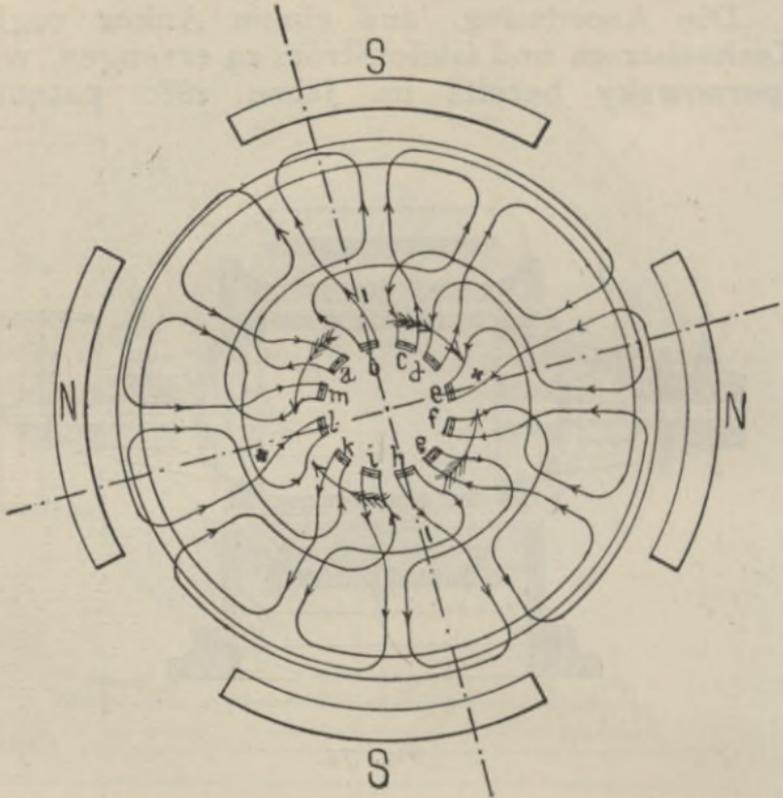


Fig. 72.

Fig. 72 und 73 zeigen die Wicklungen der Armatur. Erstere ist eine parallel geschaltete Armatur einer vierpoligen Maschine, letztere eine Armatur mit Serienschaltung. Im ersten Falle sind vier, im zweiten zwei Bürsten zur Fortleitung des Stromes notwendig.

Will man nun von der Maschine Wechselstrom fortführen, dann verbindet man jene Kollekt-

torsegmente, auf welchen die Bürsten in derselben Zeit aufliegen, mit isolierten Schleifringen (Fig. 74). Auf diesen Schleifringen liegen jene Bürsten, die den Wechselstrom in den äußeren Stromkreis führen.

Durch diese Konstruktion, welche bereits einen Umformer darstellt, ist ermöglicht, daß sich

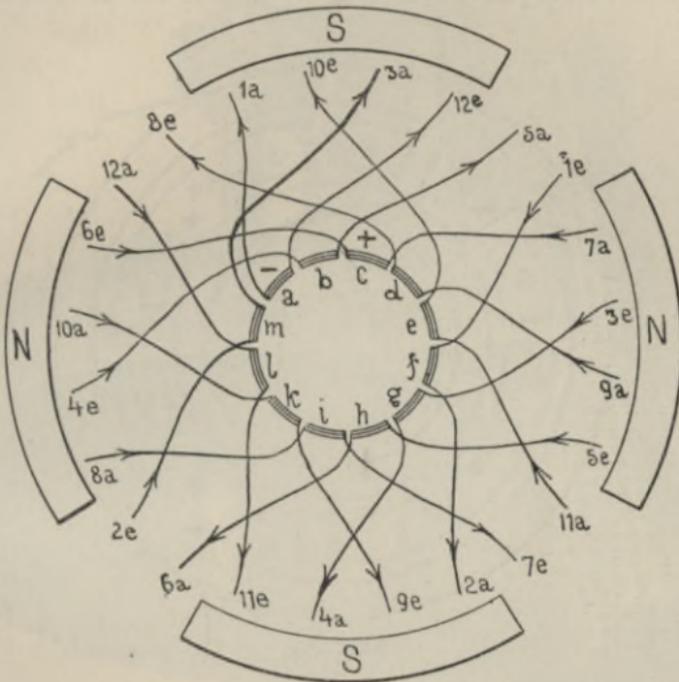


Fig. 73.

die Maschine selbst magnetisiert. Man kann weiters aus derselben Armatur zu gleicher Zeit Gleich- und Wechselstrom erzeugen oder die Maschine als Gleichstrommotor in Betrieb setzen und von den Schleifringen Wechselstrom fortführen. Umgekehrt läßt sich der zur Verfügung stehende Wechselstrom leicht in Gleichstrom umwandeln.

Die Siemenssche Mehrphasenstrommaschine ist ähnlich gebaut als die in Fig. 11 abgebildete

Einphasenmaschine. Sie besitzt 16 Magnetpaare und 24 Armaturspulen und ist zur Erzeugung von Dreiphasenstrom bestimmt. Hierbei sind jene Spulen, welche unter gleichen Phasenverhältnissen stehen, nacheinander geschaltet. In dieser Weise entstehen drei Serien nacheinander geschalteter Spulen, welche untereinander vereinigt werden. Die drei Drahtenden der Wicklung werden zu drei isolierten

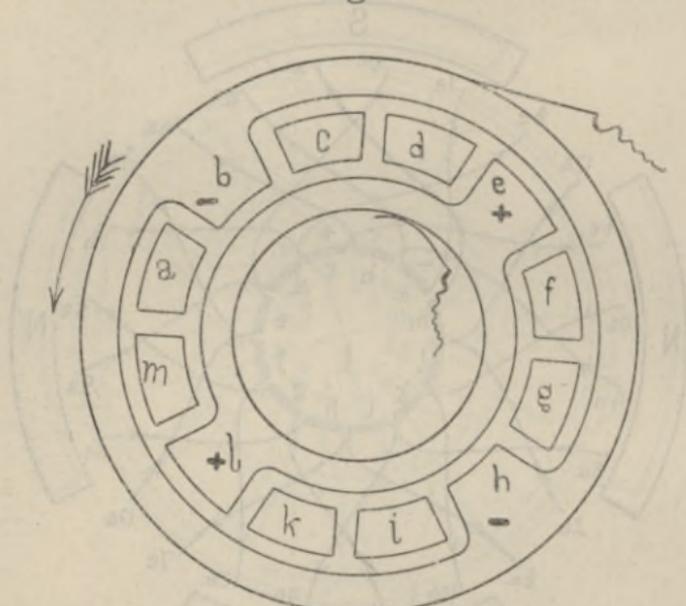


Fig. 74.

Schleifringen geführt, zwischen welchen die volle Drehstromspannung herrscht.

Zu den Versuchen der elektrischen Arbeitsübertragung mit Drehstrom von Lauffen nach Frankfurt a. M. baute die Maschinenfabrik Oerlikon einen Drehstromgenerator, der in den Fig. 75 und 76 dargestellt ist. Die Armatur ist feststehend und besitzt eine Stabwicklung. In jeder Phase sind 32 Kupferstäbe von 29 mm Durchmesser nacheinander geschaltet. Der Eisenkern der Armatur ist aus Blechen zusammengesetzt, welche zur Unter-

bringung der Stabwicklung mit  $33\text{ mm}$  weiten Nuten versehen sind. Die Verbindung der zu einer Phase

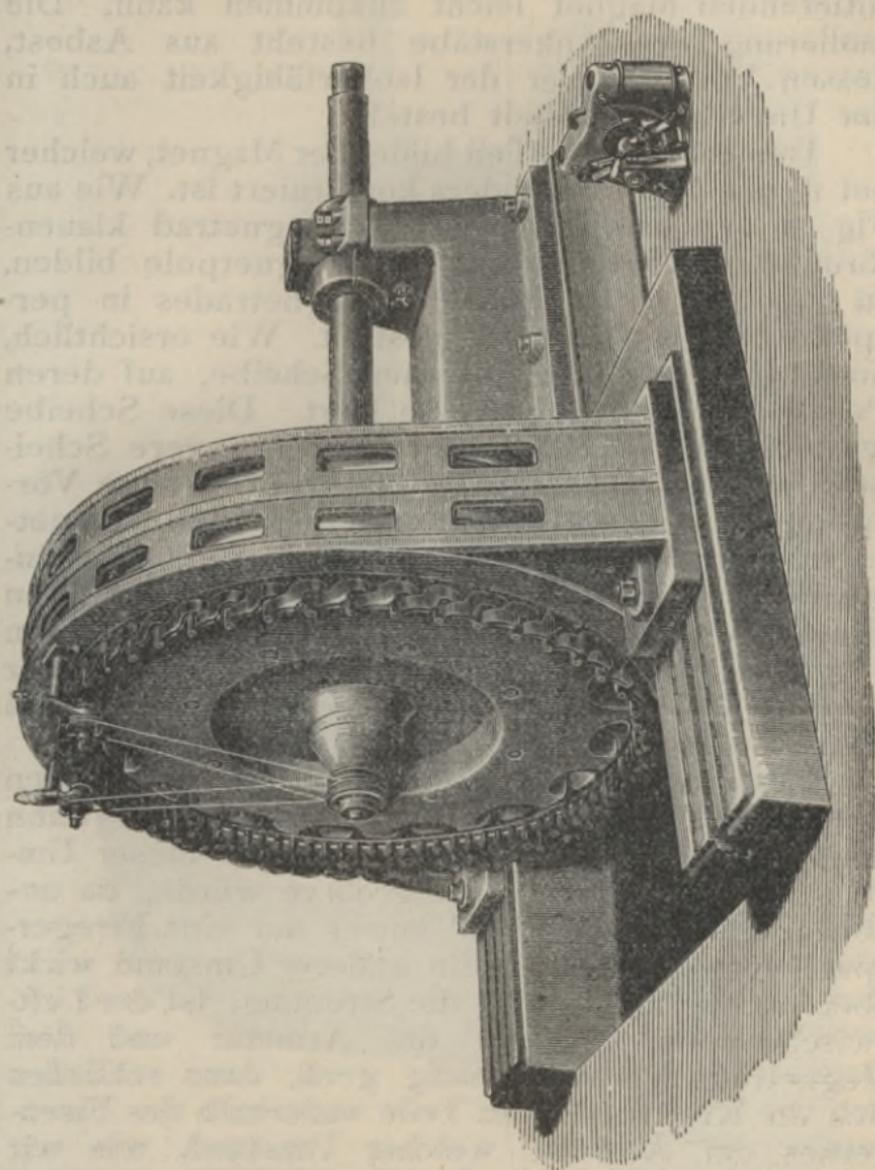


Fig. 75.

gehörenden Stäbe erfolgt durch entsprechend geformte Kupferbügel, die auch aus den Figuren ersichtlich sind. Die ganze Armatur ist in einem

verschiebbaren Gestell untergebracht, welche ermöglicht, daß man zu den Ankerdrähten und dem rotierenden Magnet leicht zukommen kann. Die Isolierung der Ankerstäbe besteht aus Asbest, dessen Vorteil außer der Isolierfähigkeit auch in der Unverbrennlichkeit besteht.

Den rotierenden Teil bildet der Magnet, welcher bei dieser Type besonders konstruiert ist. Wie aus Fig. 76 ersichtlich, besitzt das Magnetrad klauenförmige Ansätze, welche die Magnetpole bilden. In Fig. 77 ist ein Teil des Magnetrades in perspektivischer Ansicht dargestellt. Wie ersichtlich, besteht er aus einer eisernen Scheibe, auf deren Peripherie die Erregerspule liegt. Diese Scheibe wird von beiden Seiten durch zwei andere Scheiben aus Gußstahl bedeckt, die klauenförmige Vorsprünge besitzen. Die Montierung des Magnetrades wird so durchgeführt, daß diese Klauen ineinander greifen. Fließt durch die Windungen Gleichstrom, dann werden die beiden Seitenscheiben entgegengesetzt magnetisiert, wodurch dann an der Peripherie des Magnetrades abwechselnd Nord- und Südpole entstehen.

Diese Anordnung der Magnetpole besitzt den Vorzug der großen Einfachheit. Die Maschine kann vielpolig ausgeführt werden, ohne daß dieser Umstand die Kosten stark vergrößern würde, da unabhängig von der Polzahl immer nur eine Erregerspule verwendet wird. Ein anderer Umstand wirkt aber nachteilig, nämlich die Streuung. Ist der Luftzwischenraum zwischen der Armatur und dem Magnetrad verhältnismäßig groß, dann schließen sich die Kraftlinien zum Teile außerhalb des Eisenkernes der Armatur, welcher Umstand, wie wir später sehen werden, sehr störend wirkt.

Die Erregung erfolgt mit Hilfe einer kleinen Gleichstrommaschine, welche in den Fig. 75 und 76 auch abgebildet ist. Diese Drehstrommaschine

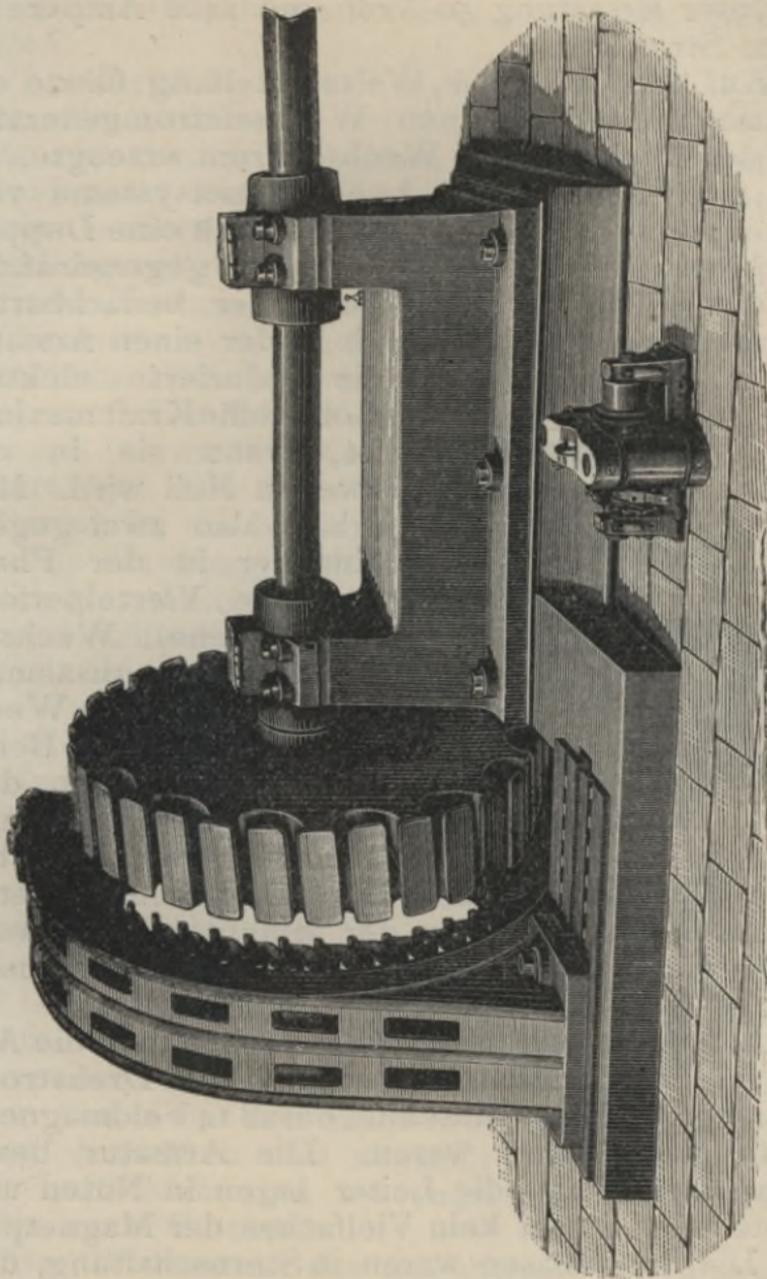


Fig. 76.

liefert bei 150 Touren in der Minute und induktionsloser Belastung 50 Volt und 1400 Ampère in jedem Stromkreise.

Auf der Chicagoer Weltausstellung führte die Westinghouse Co. einen Wechselstromgenerator vor, der zweiphasigen Wechselstrom erzeugte. Es sind zwei Anker- und zwei Magnetsysteme vorhanden; dieser Generator ist demnach eine Doppelmaschine. Die Ankerspulen sind gegeneinander um die Hälfte der Entfernung der benachbarten Polmitten verdreht, wodurch in der einen Armatur

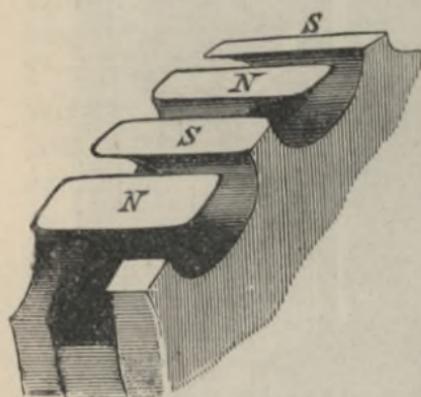


Fig. 77.

die induzierte elektromotorische Kraft maximal ist, wenn sie in der zweiten Null wird. Man erhält also zwei gegeneinander in der Phase um eine Viertelperiode verschobene Wechselströme, welche zusammen den zweiphasigen Wechselstrom ergeben. Beide Armaturen haben dieselbe Spulenzahl und beide Elektromagnete besitzen dieselbe Polzahl. Die Maschinen leisteten bei 200 Umdrehungen in der Minute 750 Kilowatt, wobei die Periodenzahl des erzeugten Wechselstromes 60 betrug.

Auf derselben Ausstellung stellte auch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft ihren Drehstromerzeuger aus. Diese Maschine besaß 14 Feldmagnete, welche feststehend waren. Die Armatur besaß Trommelwicklung, die Leiter lagen in Nuten und bildete ihre Anzahl kein Vielfaches der Magnetpolzahl. Die drei Phasen waren in Sternschaltung, den neutralen Punkt bildete der Eisenkörper der Armatur, indem die Enden der Phasen mit demselben

in elektrischer Verbindung waren. Die Anfänge der Phasenwicklungen führten zu drei Schleifringen.

Die Leistung dieser Maschine betrug 72 Kilowatt, die Tourenzahl pro Minute 424. Die Spannung zwischen zwei Leitern war 120 Volt und die Periodenzahl war 60. Bei den neueren Konstruktionen isoliert man den Armaturkern von der Wicklung vollständig und verwendet bei Drehstrom in Sternschaltung vier Schleifringe.

Siemens & Halske in Berlin bauten Drehstrommaschinen mit feststehendem Anker und rotierenden Magneten. Die Magnete sitzen auf einem Radstern, dessen Lage an der Welle mit Schrumpfringen gesichert ist. Die Armaturdrähte liegen in Nuten, und zwar ist die Nutenzahl 3 für je einen Magnetpol. Die Erregung der Magnete erfolgt durch eine Gleichstrommaschine, welche mit der Wechselstrommaschinenachse direkt verbunden ist.

Die in der Fig. 78 schematisch abgebildete Maschine ist eine Konstruktion der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Dieser Generator gehört der Induktortype an. Sowohl die Erregerspule  $S$  als auch die Armatur  $AA$  sind feststehend. Vor den aus Blechen zusammengesetzten Eisenkernen der Armatur rotiert ein massiver, mit Polfortsätzen versehener Eisenkern  $II$ . Die durch die Erregerspule  $S$  erzeugten Kraftlinien treten aus dem Gestell  $G$  der Maschine in einen Ankerkern  $A$ , durchsetzen dann die zwischen der Armatur und dem rotierenden Eisenkerne befindliche Luftschicht, treten bei  $I$  in den massiven Eisenkern, durchsetzen denselben und kommen nach durchqueren einer Luftschicht und des anderen Armaturkernes wieder nach  $G$  zurück.

Der Widerstand des magnetischen Kreises ist am kleinsten, wenn die Armaturpole den rotierenden Polhörnern gerade gegenüber stehen. Befindet

sich ein Polhorn gerade in der Mitte zwischen zwei Armaturpolen, dann ist der Widerstand des magnetischen Kreises maximal. Diese Veränderung im Widerstande des magnetischen Kreises erzeugt in den Spulen induzierte Ströme. Je nach der Verteilung der Armaturspulen für ein Polhorn kann man Ein- oder Mehrphasenstromgeneratoren auf diesem Prinzipie bauen. Bei der Maschine, die jetzt beschrieben wurde, sind dreimal soviel Arma-

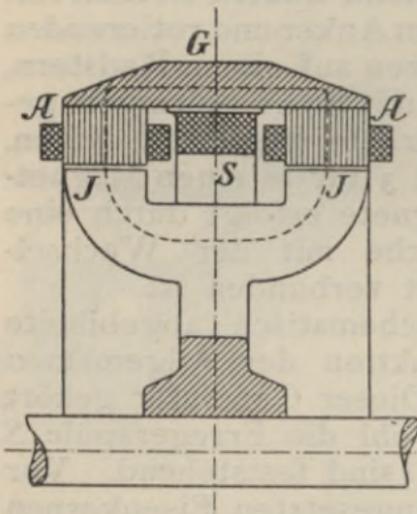


Fig. 78.

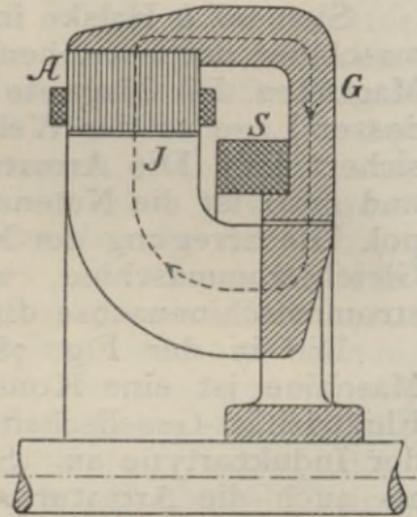


Fig. 79.

turpole als rotierende Polhörner, diese erzeugt also dreiphasigen Wechselstrom.

In Fig. 79 ist eine andere Type dieser Gesellschaft dargestellt, welche sich in ihrer Wirkungsweise mit der eben beschriebenen deckt. Die Bezeichnungen sind dieselben als bei Fig. 78, der Verlauf der Kraftlinien ist gestrichelt gezeichnet.

Bei beiden Maschinen braucht nicht der ganze Eisenkern der Maschine aus Blechen zu bestehen, sondern nur der Teil, vor welchem die Polhörner rotieren. Die anderen Teile bestehen aus massivem Guß.

Das soeben beschriebene Konstruktionsprinzip läßt sich mannigfaltig ausbilden. Der Hauptvorteil dieser Maschinen liegt in dem Umstand, daß alle Bewicklungsteile feststehen und nur ein Gußstück rotiert, welches keine Aufsicht erfordert. Die Isolation sowohl der Anker- als auch der Magnetspulen läßt sich vortrefflich durchführen, außerdem sind die Bewicklungen während des Betriebes immer zu überblicken. Die Erregung erfordert wenig Energie und da die Wicklung aus dicken Stäben bestehen kann und die Streuung gering ist, hat die Maschine bei Belastung keinen großen Spannungsabfall.

Wir sind nun in die neuere Periode der Geschichte der Wechselstrommaschinen gelangt. Die Typen zeigen nunmehr untereinander keine allzu scharfen Unterschiede, bei der Konstruktion derselben ging man von solchen Grundideen aus, welche in Maschinentypen schon verwirklicht wurden und suchte vornehmlich Maschinen zu konstruieren, welche nicht so sehr in ihrer Ausführungsform, sondern mehr in ihren Betriebseigenschaften der erreichbaren Grenze der Vollkommenheit sich nähern. Es entstand eine große Zahl verschiedener Konstruktionen, auf deren Beschreibung wir aber wegen Raummangel verzichten müssen. Dies können wir um so mehr tun, als die neueren Maschinentypen in der Fachliteratur ausführlich behandelt sind und deren Auffindung keine Schwierigkeiten bereitet.

## II. Kapitel.

### Allgemeines über Wechselstrom- generatoren.

Bevor wir in eine eingehende Untersuchung der Eigenschaften und Betriebsverhältnisse der Wechselstrommaschinen uns einlassen, wollen wir einige allgemein gehaltene Betrachtungen über Wechselstromgeneratoren machen.

Zunächst sei auf jene Umstände aufmerksam gemacht, welche zwischen den Gleichstrom- und den Wechselstrommaschinen bestehen und welche in Betracht zu ziehen sind, wenn man sich für die Anwendung einer derselben entschließen will.

Jede Sache hat ihre Vor- und Nachteile und so ist es auch bei den Gleich- und Wechselstrommaschinen. Es sind Fälle, wo nur Gleichstrommaschinen zu benutzen sind und Fälle, wo nur die Anwendung der Wechselstrommaschine zu gutem Ergebnis führt. Zwischen diesen Grenzen wird man sich im gegebenen Falle immer danach richten, welches Stromsystem vorteilhafter und ökonomischer ist.

In allen Fällen, wo die chemische Wirkung des elektrischen Stromes ausgenutzt werden soll, können heute nur Gleichstrommaschinen verwendet werden. Es sind zwar auch schon mit Wechselstrom chemische Wirkungen erzielt worden, doch sind die bisher erreichten Resultate industriell

noch nicht ausnutzbar. Bei elektrischen Straßenbahnen benutzt man auch mit Vorliebe den Gleichstrom, trotzdem der Anwendung des Wechselstromes keine großen Hindernisse im Wege stehen.

Ein weiterer Nachteil des Wechselstromes besteht darin, daß Akkumulatoren in Wechselstromkreisen entweder gar nicht oder nur bei gleichzeitiger Anwendung anderer Hilfsapparate verwendet werden können. Diese Umformung der elektrischen Energie ist indessen außer der Kompliziertheit, auch mit beträchtlichen Verlusten verbunden.

Der Wechselstrom wurde anfangs nur zur Beleuchtung verwendet. In den ersten Zeiten benutzte man nur Glühlampen, später nach der Erfindung der Jablockoff-Kerze fand das Wechselstrombogenlicht ausgebreitete Verwendung, doch zu Arbeitsübertragungen taugte der Wechselstrom noch nicht, da die einphasigen Wechselstrommotoren schlechten Wirkungsgrad und ungünstige Betriebseigenschaften hatten. Die elektrische Arbeitsübertragung mittels Wechselstrom verbreitete sich erst dann, als Ferraris, Tesla u. a. die Mehrphasensysteme ausgebildet hatten und Wechselstrommotoren mit rotierendem Wechselfelde konstruierten. Von dieser Zeit gewann dieser Zweig der Wechselstromtechnik immer mehr an Bedeutung und erreichte eine große Vollkommenheit.

Die Phasenverschiebung ist für die Wechselstromleitungen ungünstig. Die Leiter müssen nämlich einen Strom führen, welcher die Resultierende des Arbeits- und des wattlosen Stromes ist, und nachdem dieser immer größer als einer der Komponentenströme ist, muß ein größerer Querschnitt verwendet werden, als welcher der Arbeitsleistung entsprechen würde. Die wattlosen Ströme bilden außerdem auch eine unnütze Belastung für die Wechselstrommaschinen, weshalb diese Generatoren

um 10 bis 15<sup>0</sup>/<sub>0</sub> größer gewählt werden müssen, als wenn die Phasenverschiebung Null wäre.

Dem gegenüber ist ein großer Vorteil des Wechselstromes seine leichte und ökonomische Transformierung. Während die Transformierung des Gleichstromes auf eine größere oder kleinere Spannung umständlich und teuer ist, läßt sich dies bei Wechselstrom mit ruhenden Apparaten, die keine Aufsicht erfordern, leicht bewerkstelligen. Der Wirkungsgrad der Transformatoren ist besser als der anderer Maschinen von derselben Leistung und die sorgfältig durchführbare Isolierung ermöglicht die direkte Zuführung von hohen Spannungen, welcher letzterer Umstand von Wichtigkeit ist. Dasselbe gilt für die Wechselstrommaschinen, bei welchen die Armatur zumeist feststehend ist. Die Bewicklung läßt sich gut durchführen, man kann die Armaturleiter sorgfältig von Eisenkern und voneinander isolieren, in welchem Umstände jene Ursache liegt, daß man mit Wechselstrommaschinen 20.000 Volt direkt erzeugen kann, während diese Grenze für Gleichstrommaschinen höchstens bei zirka 5000 Volt liegt.

Die leichte und ökonomische Transformierung brachte mit sich, daß man den hochgespannten Wechselstrom zu Arbeitsübertragungszwecken benutzte. Je höher die Spannung, um so kleiner kann die Stromstärke bei einer gegebenen zu übertragenden Energiemenge sein und um so dünnere Drähte lassen sich verwenden. In dieser Hinsicht liegt die Grenze nicht in der elektrischen Leitfähigkeit, sondern in der mechanischen Festigkeit der Leiter. Man kann mit Hilfe der Transformatoren die Spannung des Wechselstromes auf enorme Werte steigern und bei solchen würden ganz dünne Drähte genügen, um eine beträchtliche Energiemenge nach großen Entfernungen mit verhältnismäßig geringen Verlusten übertragen zu

können, wären die dünnen Drähte nicht zu schwach, ihr Eigengewicht und andere auf sie wirkende Belastungen zu ertragen, und wäre die Isolierungsfähigkeit der Isolatoren groß genug, um keine allzu großen Spannungsverluste zu verursachen. Auf der Sekundärstation läßt sich die Wechselstromspannung leicht herabtransformieren und der Wechselstrom für Arbeits- und Beleuchtungszwecke verwenden.

Die Wechselstrommotoren entbehren den Kommutator und besitzen höchstens Schleifringe. Eine Funkenbildung kann also nicht entstehen, außerdem spielt hier auch der Kostenpunkt eine wichtige Rolle. Kleinere Motoren haben überhaupt keine Schleifringe, hier sind also die immer unsicheren Schleifkontakte gänzlich entbehrlich.

### Einteilung der Wechselstrommaschinen.

Bei der Einteilung der verschiedenen Wechselstrommaschinen-Konstruktionen können verschiedene Standpunkte maßgebend sein.

Zieht man jene Weise in Betracht, in welcher die magnetischen Kraftlinien die Induktionswirkungen hervorrufen, dann unterscheidet man:

1. Maschinen mit feststehendem Anker und rotierenden Magneten. Diese zerfallen in zwei Gruppen, je nachdem die Magnetpole außerhalb der Armatur (Außenpolmaschinen) oder innerhalb derselben (Innenpolmaschinen) rotieren.

2. Maschinen mit rotierendem Anker und feststehenden Magnetpolen.

3. Induktormaschinen. Bei diesen stehen sowohl die Armatur, als auch die Magnetpole. Die Induktion wird dadurch bewirkt, daß rotierende Eisenklötze den magnetischen Widerstand des Magnetfeldes an gewissen Orten verändern.

4. Induktionsgeneratoren. Die Konstruktion derselben ist mit den Induktionsmotoren übereinstimmend. Die Induktionswirkung erscheint nur dann, wenn bei einem solchen in ein Wechselstromnetz geschalteten Generator die Tourenzahl durch mechanischen Antrieb über jene Grenze gebracht wird, welche dem vollkommen synchronen Gange entspricht.

Die unter 1 und 2 erwähnten Konstruktionen haben entweder Wechsel- oder Gleichpole.

Ein anderer Gesichtspunkt ist der, daß man die Gestalt der Armatur der Einteilung zugrunde legt:

- a) Maschinen mit Trommelanker,
  - b) Maschinen mit Ringanker,
- ferner als eine Abart der letzteren
- c) Maschinen mit Scheibenankern, und endlich
  - d) Maschinen mit Polankern.

Bei diesen letzteren sind die Armaturspulen auf polförmige Ansätze des Armaturkernes gesetzt.

Die beiden Einteilungsweisen in Betracht gezogen, sind die heute üblichen Konstruktionen: Wechselstrommaschinen mit feststehendem Anker in Trommelwicklung mit rotierenden inneren Wechselfolen.

Wie aus der historischen Entwicklung der Wechselstrommaschinen ersichtlich, baute man früher mit Vorliebe Wechselstrommaschinen mit Scheibenankern.

Nach Art der Erzeugung des magnetischen Feldes unterscheidet man:

A. Wechselstrommaschinen mit permanenten Magneten.

B. Wechselstrommaschinen mit Elektromagneten.

Die letzteren sind entweder

I. Maschinen mit Selbsterregung (Zipernowsky) oder

II. Maschinen mit Fremderregung.

Die Stromquelle kann hier eine separat oder von derselben Welle angetriebene Gleichstrommaschine oder eine Akkumulatorenbatterie sein.

Die schärfste Unterscheidung in den verschiedenen Maschinentypen ist bei der ersten, unter 1 bis 4 angeführten Einteilungsmethode zu finden, weil diese die Grunderscheinung, die Induktion, zum Ausgangspunkte hat. Induktion einer elektromotorischen Kraft kann nur dann stattfinden, wenn ein Leiter Kraftlinien schneidet oder umgekehrt, und wenn aus dem durch den Leiter umschlossenen Raume die Kraftlinien verschwinden oder darin entstehen. In folgendem wollen wir jene Fälle untersuchen, in welchen eine elektromotorische Kraft induziert wird, und jene Gesetze ermitteln, von welchen die Größe und die Veränderungen derselben abhängen.

Endlich unterscheidet man nach der Art des erzeugten Wechselstromes:

- α) Einphasengeneratoren.
- β) Mehrphasengeneratoren.

## III. Kapitel.

Die Erzeugung der wechselstrom-  
elektromotorischen Kraft.

Eine elektromotorische Kraft periodisch wechselnder Richtung kann erzeugt werden, indem man vor einer Windung Magnetpole wechselnder Polarität rotieren läßt, oder wenn man die Zahl der durch die Windungsfläche umschlossenen Kraftlinien periodisch ändert. Hierbei ist gleich, ob die Windung steht und die Kraftlinien sich bewegen oder umgekehrt, da zur Entstehung der Induktionswirkung nur die relative Bewegung zwischen Leiter und Magnetfeld nötig ist.

Die Gesetze der Induktion wurden im ersten Bande dieses Werkes (I. Kapitel) bereits ausführlich besprochen. Wir fanden dort, daß die in einem Leiter induzierte elektromotorische Kraft in ihrem absoluten Werte folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$e = \frac{dN}{dt}$$

wenn der Leiter im Zeitraume  $dt$  die Kraftlinienzahl  $dN$  schneidet, oder wenn bei rotierendem Felde der Leiter in diesem Zeitraume von der Kraftlinienzahl  $dN$  geschnitten wird.

Hat der Leiter die Länge  $l$  und ist die Intensität des magnetischen Feldes  $\mathfrak{B}$ , dann wird, gleich-

förmige Rotation vorausgesetzt, die Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien

$$N_1 = l \mathfrak{B} v$$

sein, wenn  $v$  die Geschwindigkeit bedeutet, mit welcher das magnetische Feld rotiert.

Wir können aber auch annehmen, daß der Leiter in einem stillstehenden magnetischen Felde mit der Geschwindigkeit  $v$  sich bewegt, alsdann wird

$$l \cdot v = S$$

jene Fläche sein, die vom Leiter in der Zeiteinheit bestrichen wird, und in diesem Falle können wir schreiben

$$N_1 = \mathfrak{B} \cdot S.$$

Ist diese Kraftlinienzahl eine Sinusfunktion der Zeit, dann kann die induzierte elektromotorische Kraft ebenfalls durch eine Sinusfunktion ausgedrückt werden. Nachdem aber die induzierte elektromotorische Kraft dann maximal wird, wenn die Veränderung der Kraftlinienzahl eine maximale ist, wird die Kurve der elektromotorischen Kraft dort ihren Scheitelpunkt haben, wo die Kurve der Kraftlinienzahländerung durch Null geht und umgekehrt. Als Ergebnis erhalten wir zwei Sinuskurven, von denen jene der elektromotorischen Kraft in der Phase hinter der Kurve der Kraftlinienzahl um  $90^\circ$  zurückbleibt (siehe I. Band, Seite 47).

Sind  $m$ -Leiter vorhanden, dann werden in der Zeiteinheit

$$N = m \mathfrak{B} S$$

Kraftlinien geschnitten.  $N$  kann aber auch als jene Kraftlinienzahl definiert werden, welche in der Zeiteinheit aus der Windungsfläche verschwindet, die durch zusammengehörige zwei Leiter gebildet wird, in diesem Falle ist also

$$N = \frac{m}{2} \mathfrak{B} S$$

da die Windungszahl die Hälfte der Leiterzahl beträgt.

Nun können wir auf die Bestimmung der Größe der induzierten elektromotorischen Kraft übergehen. Ihr Wert hängt außer der der Induktion unterworfenen Windungszahl und der Kraftlinienzahl noch von jener Geschwindigkeit  $\omega$  ab, mit welcher die Kraftlinien verschwinden, d. h.

$$E = \frac{m}{2} \mathfrak{B} S \omega.$$

$\omega$  kann mit Hilfe der Periodenzahl  $\infty$  folgendermaßen ausgedrückt werden (siehe I. Band, Seite 92):

$$\omega = 2 \pi \infty$$

daher

$$E = \frac{m}{2} \mathfrak{B} S 2 \pi \infty$$

oder

$$E = \pi \infty m \mathfrak{B} S.$$

In dieser Formel bedeutet  $\mathfrak{B}$  die maximale Feldintensität, weshalb auch  $E$  ein Maximalwert ist. Die effektive elektromotorische Kraft erhält man, wenn man die letzte Gleichung mit  $\sqrt{2}$  dividiert (I. Band, Seite 53), es wird also

$$e_{\text{eff}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \infty m \mathfrak{B} S$$

oder

$$e_{\text{eff}} = 2,22 \infty m \mathfrak{B} S$$

im absoluten Maßsystem. Will man die induzierte elektromotorische Kraft in der praktischen Einheit

in Volt haben, dann muß man noch mit  $10^8$  dividieren, so daß

$$e_{eff} = 2,22 \infty m \mathfrak{B} S 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Benutzt man zur Berechnung statt der Periodenzahl die Wechselzahl  $z$ , dann wird

$$e_{eff} = 4,44 z m \mathfrak{B} S 10^{-8}.$$

Wir dürfen aber nicht vergessen, daß diese Gleichung nur dann besteht, wenn die Änderung der Wechselgrößen nach dem Sinusgesetze erfolgt. Ist dies nicht der Fall, dann verändert sich nur der Zahlenfaktor in der Gleichung und es wird im allgemeinen

$$e_{eff} = c \infty m \mathfrak{B} S 10^{-8} \text{ Volt}$$

sein.

Bilden wir nun bei sinusförmiger Veränderung den Ausdruck der mittleren elektromotorischen Kraft (nach Seite 51, I. Band), dann wird:

$$e_m = \frac{2}{\pi} E = \frac{2}{\pi} \pi \infty m \mathfrak{B} S 10^{-8} \text{ Volt}$$

oder

$$e_m = 2 \infty m \mathfrak{B} S 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Das Verhältnis der effektiven und der mittleren elektromotorischen Kraft ergibt den Formfaktor

$$f = \frac{e_{eff}}{e_m} = \frac{2,22 \infty m \mathfrak{B} S 10^{-8}}{2 \infty m \mathfrak{B} S 10^{-8}} = 1,11.$$

Vergleichen wir den Formfaktor mit der Zahlenkonstante im Ausdrucke der effektiven elektromotorischen Kraft bei sinusförmiger Veränderung, dann sehen wir, daß

$$= \frac{2,22}{2} = 1,11$$

oder im allgemeinen

$$f = \frac{c}{2}$$

bei beliebiger Kurvenform. Kennt man also im gegebenen Falle den Formfaktor, dann kann man die induzierte elektromotorische Kraft vollständig bestimmen.

Wollen wir bei einer Maschine die Umdrehungszahl und die Polzahl in den Ausdruck der elektromotorischen Kraft einführen, dann wird, nachdem die Periodenzahl bei  $u$  Umdrehungen und  $p$  Polpaaren

$$\omega = \frac{u p}{60}$$

der gesuchte Ausdruck

$$e_{\text{eff}} = \frac{c u p}{60} m \mathfrak{B} S 10^{-8} \text{ Volt}$$

sein.

Ist nun für eine zu konstruierende Maschine die Periodenzahl und die Umdrehungszahl gegeben, dann berechnet man die Anzahl der nötigen Polpaare aus obiger Formel.

Vergleichen wir den Ausdruck der mittleren elektromotorischen Kraft einer Wechselstrommaschine, wonach

$$e_m = 2 \frac{u p}{60} m \mathfrak{B} S 10^{-8}$$

mit dem Ausdrucke der elektromotorischen Kraft einer Gleichstrommaschine, die dieselbe Polzahl und Windungszahl hat als die Wechselstrommaschine, und deren Armatur zwei parallel geschaltete Stromkreise besitzt:

$$e = \frac{u p}{60} m \mathfrak{B} S 10^{-8}$$

dann sehen wir, daß die mittlere elektromotorische Kraft der Wechselstrommaschine doppelt so groß ist, als diejenige des Gleichstromgenerators. Wenn aber auch die Spannung die doppelte ist, wird bei demselben Armaturwiderstande die Wechselstromstärke nur die Hälfte der Gleichstromstärke sein, da im ersten Falle alle Windungen nacheinander, im zweiten aber diese in zwei gleichen Teilen parallel geschaltet sind.

Für die effektive Spannung ist der Unterschied noch größer, da diese 2,22mal größeren Wert hat, als die Gleichstromspannung.

Auf den Wert der induzierten elektromotorischen Kraft haben bei konstantem Felde die Tourenzahl und die nacheinander geschaltete Leiterzahl Einfluß.

Die Periodenzahl darf nicht zu klein gewählt werden, da bei Verwendung des Wechselstromes zu Beleuchtungszwecken an den Lampen ein störendes Flimmern beobachtet werden kann. Aus diesem Gesichtspunkte ist die verwandte niedrigste Periodenzahl 40 in der Sekunde. Der höchste Wert, welchen man benutzt, sind 130 Perioden. Bei Arbeitsübertragungen mit Wechselstrom geht man aber bis 25 Perioden hinunter, um die Verluste in den Maschinen und die induktiven Spannungsverluste in den Leitungen möglichst gering halten zu können. In solchem Falle dient der Wechselstrom nur zum Motorenbetrieb, soll er auch zur Beleuchtung verwendet werden, dann muß ein rotierender Transformator oder ein Umformer aufgestellt werden, die den zur Beleuchtung benötigten Wechselstrom mit größerer Periodenzahl oder den Gleichstrom erzeugen.

Um eine solche Periodenzahl erzeugen zu können, müßten die zweipoligen Maschinen eine so hohe Tourenzahl besitzen, welche aus Rücksicht auf die Wirkung der Zentrifugalkraft und die auftre-

tenden Reibungsverluste nicht zugelassen werden könnte. Die Wechselstrommaschinen haben deshalb viele Magnetpole, außerdem besitzen sie große Durchmesser, welcher letzterer Umstand die Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Teile in erlaubten Grenzen zu halten ermöglicht.

Was die Leiterzahl betrifft, so ist zur Unterbringung derselben an der großen Peripherie der Armatur genügend Raum vorhanden. Die Isolierung kann sorgfältig durchgeführt werden und was von großem Vorteil ist, der hochgespannte Strom kann aus feststehenden Klemmen fortgeleitet werden.

Die Form der induzierten elektromotorischen Kraft hängt von mehreren Faktoren ab. Ob die Armatur Eisen enthält oder nicht, ist für die Kurvenform der elektromotorischen Kraft nicht ohne Einfluß, auch hängt diese vom Verhältnis der Polbreite zur Polteilung ab und die Belastung der Maschine spielt auch eine Rolle. Die sinusförmige Kurve der elektromotorischen Kraft eines Wechselstromgenerators wird durch Belastung desselben mit einem Motor wesentlich verzerrt.

#### Induktionsverhältnisse in einer Drahtschleife unter verschiedenen Bedingungen bei gleichmäßiger Geschwindigkeit.

In folgendem wollen wir jene Induktionsverhältnisse untersuchen, welche in einer Drahtschleife auftreten, vorausgesetzt, daß diese in magnetischen Feldern mit gleichmäßiger Geschwindigkeit sich bewegt. Die Dimensionen der Drahtschleife und die Ausbreitungen der magnetischen Felder seien in den verschiedenen Fällen verschieden, die Bedingungen aber, die in jedem Falle bestehen, sollen im nachfolgenden zusammengefaßt werden.

Die Intensität des magnetischen Feldes ist überall konstant, die Grenzen des Feldes sind

durch die Seitenkanten des Magnetpoles gegeben. Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft wird durch die den Leiter in der Zeiteinheit schneidenden Kraftlinienzahl gemessen und wird dieser Wert bei der graphischen Darstellung des Verlaufes der Spannungsänderung auf die Symmetrieachse der Windung aufgetragen. Hierbei sind die positiven Werte oberhalb der Abscissenachse aufzutragen und als positive Richtung jene Induktionsrichtung angesehen, bei welcher der entstehende Strom an der oberen Seite der Windung den Nordpol erzeugt.

In allen Fällen bedeutet  $a$  die Polbreite,  $b$  die Spulenbreite und  $c$  die Polteilung, d. h. die Entfernung von Polmitte zu Polmitte.

Da in den folgenden Darstellungen die Windung im Querschnitt erscheint, sind nur der hintere Verbindungsteil und die Querschnitte jener zwei Windungsteile ersichtlich, welche auf den Beschauer senkrecht stehen, welche also ihre Verlängerungen vor und hinter der Papierebene haben. Wir denken uns aber die Windung nicht aufgeschnitten, so daß in derselben die induzierte elektromotorische Kraft eine elektrische Strömung hervorbringen kann. Um nun die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft und bei Phasengleichheit auch jene des erzeugten Stromes ersichtlich machen zu können, werden wir die Stromrichtung im Drahtquerschnitt durch einen Punkt ( $\odot$ ) bezeichnen, wenn der Strom zum Beschauer fließt (Spitze eines Pfeiles) und mit einem liegenden Kreuz ( $\otimes$  Fiederung des Pfeiles), wenn der Strom vom Beschauer wegfließt.

In Fig. 80 ist eine Wechselstrommaschine schematisch dargestellt. Wir denken uns hier den Durchmesser der Maschine unendlich groß, nur um die Magnetpole und die Armatur samt Spulen in eine horizontale Ebene bringen zu können. Dies ändert an den Verhältnissen gar nichts und ist nur

darum benutzt, daß die Induktionswirkungen und die Diagramme übersichtlicher dargestellt werden können.

$M$  ist der als feststehend gedachte Magnetkranz der Maschine,  $A$  die Armatur, welche samt Spulen in der angedeuteten Richtung mit gleichmäßiger Geschwindigkeit sich bewegt. In die Figur ist nur die Spule  $m n$  in ihren verschiedenen charakteristischen Lagen eingezeichnet.

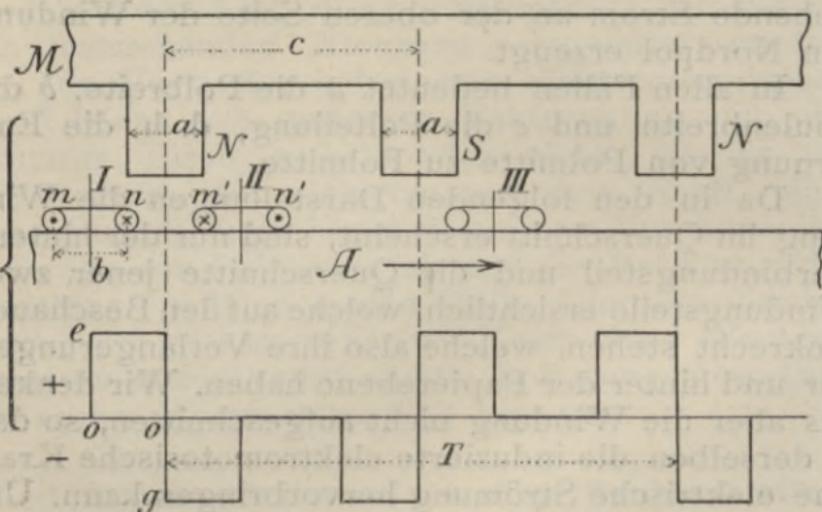


Fig. 80.

Bei dieser Disposition ist die Polbreite mit der Spulenbreite gleich, jedoch ist der freie Raum zwischen benachbarten Polen größer als die Breite eines Poles, d. h.

$$a = b$$

und

$$c > 2a.$$

Der Einfachheit halber nahmen wir eine glatte Armatur an, doch bleiben die Verhältnisse wesentlich dieselben, wenn die Windung im Eisenkerne der Armatur nahe zur Peripherie derselben liegt.

In der Lage I gehen keine Kraftlinien durch die Windungsfläche der Spule, es wird also keine elektromotorische Kraft induziert. Sobald aber der Windungsteil  $n$  in das nordmagnetische Feld eintritt, gelangen Kraftlinien in die Windungsfläche, welcher Umstand eine Induzierung der elektromotorischen Kraft verursacht.

Die Größe dieser elektromotorischen Kraft hängt bei konstantem Magnetfelde und Spulendimensionen von jener Geschwindigkeit ab, mit welcher die Spule sich bewegt, da im gegenwärtigen Fall nur dieser Umstand die Veränderungsgeschwindigkeit in der Anzahl der Kraftlinien beeinflusst. Da wir aber annehmen, daß die Geschwindigkeit der Armatur konstant ist, wird die induzierte elektromotorische Kraft solange konstant bleiben, bis die ganze Windungsfläche von Kraftlinien durchdrungen ist. Dies ist dann der Fall, wenn die Windung dem Magnetpole gerade gegenüber steht.

Wie läßt sich aber die Richtung dieser elektromotorischen Kraft für diese Bewegungsperiode bestimmen? Für diesen Zweck können mehrere Methoden benutzt werden, wir wollen Lenzs Gesetz der Induktion anwenden. Nach diesem Gesetz sucht die durch Bewegung hervorgerufene induzierte, elektromotorische Kraft im geschlossenen Leiterkreise einen Strom solcher Richtung zu erzeugen, der durch seine elektromagnetische oder elektrodynamische Wirkung diese Bewegung hemmt.

In unserem Falle nähert sich die in sich geschlossene Windung einem Nordpole, folglich muß der induzierte Strom ober der Windungsfläche ebenfalls einen Nordpol erzeugen. Hierdurch ist aber die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft bestimmt, sie ruft nämlich in der Windung einen Strom hervor, der im Leiterteile  $m$  gegen den Beschauer und in  $n$  vom Beschauer fließt.

Nach unseren eingangs erwähnten Bedingungen wollen wir den Wert der induzierten elektromotorischen Kraft im geeigneten Maßstabe auf die Symmetrieachse der Windung auftragen und in dieser Weise das Spannungsdiagramm zeichnen. Das Diagramm ist im unteren Teile der Figur ersichtlich.

$oe$  ist eine der Größe der induzierten Spannung proportionale Ordinate. Diese zeigt für den fraglichen Zeitpunkt den Wert und die Richtung der wirkenden elektromotorischen Kraft an. Nachdem diese solange konstant bleibt, bis die Windung dem Magnetpole gerade gegenüber steht, wird ein Teil des Spannungsdiagrammes dadurch gebildet, daß man von  $e$  aus eine, mit der Abscissenachse parallele Linie zieht

Bewegt sich die Windung weiter, dann wird die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft der früheren entgegengesetzt, da in diesem Falle eine Entfernung vom Nordpole stattfindet und demzufolge ober der Windung vom induzierten Strome ein Südpole erzeugt werden muß.

Im Spannungsdiagramm fällt nun die Linie senkrecht zur Abscissenachse und setzt sich unter derselben parallel mit ihr fort, so daß die negative Ordinate mit der früheren positiven gleich wird;

$$oe = og.$$

Die negativ gerichtete, elektromotorische Kraft wird solange induziert, bis alle Kraftlinien aus der Windungsfläche verschwinden, d. h. bis die Windung in die Lage II kommt. Hier fällt also der Wert der Spannung auf Null, was aus dem Diagramm ersichtlich ist.

Von nun an hat die Windung eine Strecke ohne Induktionswirkung zurückzulegen, da wir annehmen, daß Kraftlinien nur aus den Polflächen in auf dieselben senkrechte Richtungen austreten.

In dieser Bewegungsperiode bleibt die Spannungslinie in der Abscissenachse.

Bei weiterer Bewegung kommt der Windungsteil  $n'$  in ein südmagnetisches Feld, die Stromrichtung bleibt in der Windung dieselbe als sie in der zweiten Bewegungsperiode war, und die Spannungslinie bleibt unter der Abscissenachse. Sobald aber die Symmetrieachse der Windung mit der Mittellinie des Südpoles zusammenfällt, ändert sich diese Richtung und wird entgegengesetzt. Dies dauert solange, bis die Windung in die Lage III kommt. Von nun an folgt die zweite induktionslose Periode, nach welcher die der Lage I entsprechenden Verhältnisse sich wiederholen, da in diesem Falle die Windung sich wieder einem Nordpole nähert.

Eine volle Periode wird in der Veränderung der induzierten elektromotorischen Kraft während jenes Zeitraumes vollführt, unter welcher die Windung von einer Mittellinie des Nordpoles zur Mittellinie des nächstliegenden Nordpoles gelangt. Die Zeit einer Periode ist  $T$ .

Betrachten wir den Verlauf der Spannungslinie während einer Periode, so sehen wir, daß sie zwei negative und zwei positive Teile hat. Wollen wir den effektiven Wert der Spannung bilden, dann müssen wir die Quadratwurzel aus dem Mittelwerte der Quadrate der momentanen Werte bilden (siehe I. Band, Seite 51). Führen wir dies durch, dann ergibt sich, daß der effektive Wert klein ist, weshalb diese Anordnung zur Erzeugung von Wechselspannungen nicht geeignet ist.

Verlängern wir die Windung in der in Fig. 81 gezeichneten Weise, dann verändert sich das Spannungsdiagramm.

Nun ist

$$c = a + b$$

und

$$b > a.$$

Kommt bei der angegebenen Bewegungsrichtung der Windungsteil  $n$  in das nordmagnetische Feld, dann entsteht eine elektromotorische Kraft, deren Größe im Spannungsdiagramm durch die Ordinate  $oe$  dargestellt ist. Diese bleibt konstant bis  $n$  im Magnetfelde sich bewegt, denn während dieser Periode nimmt die Zahl der durch die Windungsebenen durchgehenden Kraftlinien gleichmäßig zu. Bewegt sich aber die Windung weiter, so daß  $n$  aus dem Felde austritt, dann fällt der Wert der induzierten elektromotorischen Kraft auf Null, da die Windung breiter als das magnetische Feld ist. In dieser Bewegungsperiode werden zwar durch die Windung Kraftlinien umschlossen, eine Induktionswirkung entsteht aber dennoch nicht, weil in der Zahl der Kraftlinien keine Änderung eintritt. Dies kann erst dann erfolgen, wenn der Windungsteil  $m$  zur Grenze des nordmagnetischen Feldes gelangt, wie dies auch aus der Figur ersichtlich ist. Während aber in der ersten Induktionsperiode die durch die Windungsebene durchgehende Kraftlinienzahl zunahm, nimmt sie jetzt immer mehr ab, solange bis  $m$  im magnetischen Felde sich befindet. Die Richtung der elektromotorischen Kraft wird also der ersteren entgegengesetzt und die Spannungslinie kommt unter der Abscissenachse zu liegen.

Erreicht  $m$  die rechts liegende Grenze des nordmagnetischen Feldes, dann gelangt  $n$  gerade zur linksseitigen Grenze des folgenden süd magnetischen Feldes, da wir annehmen, daß die Polteilung gleich mit der Summe der Polbreite und der Spulenbreite ist, so daß nun die Windung dem Raume zwischen zwei nebeneinander liegenden Polen eben gegenüber liegt. Die induzierte elektromotorische Kraft wird aber trotzdem nicht zu Null, denn in dem Augenblicke, als  $m$  aus dem nordmagnetischen Felde austritt, wenn also aus der

Windungsfläche alle Kraftlinien verschwinden, tritt auf der anderen Seite der Windungsteil  $n$  in ein süd magnetisches Feld ein. Die Zahl der Kraftlinien nimmt also zu, die Richtung der elektromotorischen Kraft bleibt aber die frühere, da jetzt das magnetische Feld einer der früheren entgegengesetzte Polarität besitzt.

Das Spannungsdiagramm verlängert sich demnach unter der Abscissenachse, d. h. die Spannungslinie bleibt mit der Abscissenachse parallel. Die elektromotorische Kraft wird erst dann Null, wenn  $n$  aus dem süd magnetischen Felde austritt und bleibt sie solange, bis  $m$  zur Grenze des Südpoles gelangt. Von diesem Zeitpunkte angefangen wird die Richtung der elektromotorischen Kraft entgegengesetzt, da jetzt in einem süd magnetischen Felde die Zahl der aus der Windungsebene verschwindenden Kraftlinien sich gleichmäßig verringert. Die Spannungslinie kommt deshalb wieder ober der Abscissenachse zu liegen.

Wir kommen nun zur Lage II. Diese ist mit der Ausgangslage identisch, da der Windungsteil  $n$  wieder in ein nord magnetisches Feld eintritt. Die bereits beschriebenen Erscheinungen wiederholen sich, das Spannungsdiagramm verläuft in der angedeuteten Weise.

Vergleichen wir die beiden Spannungsdiagramme der Fig. 80 und 81, so sehen wir, daß zwischen denselben kein großer Unterschied besteht. Der Effektivwert der Spannung ist gegen den Maximalwert in beiden Fällen gering, weshalb keine der beiden Anordnungen zur Spannungserzeugung in Wechselstromgeneratoren verwendbar ist.

Dadurch, daß man die Spulenbreite, gleich der Polbreite, beziehungsweise der Breite des Zwischenraumes zweier benachbarter Magnetpole nimmt, kann man den zur Verfügung stehenden Wicklungsraum nicht voll ausnutzen. Die Abmessungen der

Windungen und des Magnetsystems müssen daher in geeigneter Weise abgeändert werden.

In unseren Untersuchungen weitergehend, verlängern wir noch mehr unsere Windung, wie dies Fig. 82 zeigt. In diesem Falle ist die Breite der Spule gleich mit der Polteilung:

$$b = c$$

und

$$a < b.$$

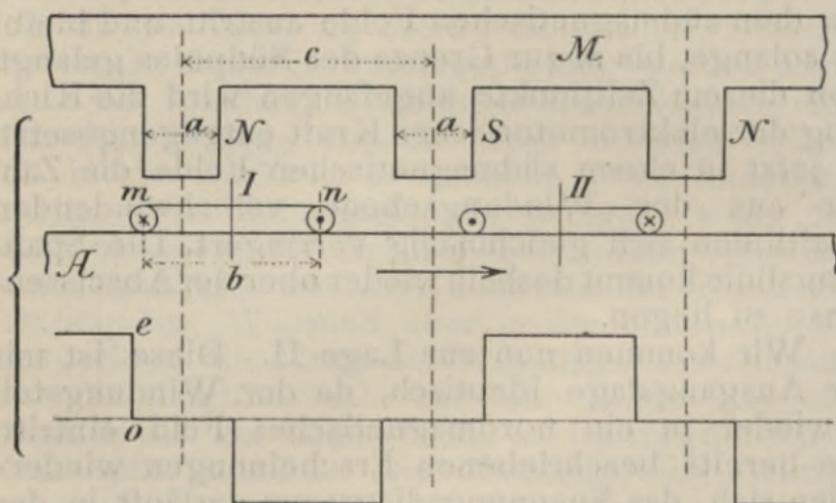


Fig. 81.

Die Armatur bewegt sich von links nach rechts. In der angedeuteten Lage ist  $m$  eben im Begriffe, in das nordmagnetische,  $n$  aber in das süd magnetische Feld einzudringen. Die Induktionswirkung wird eine doppelte sein, denn auf der einen Seite verschwinden bei nordmagnetischem Felde die Kraftlinien, auf der anderen Seite (bei dem Windungsteil  $n$ ) vermehren sie sich in demselben Maße, doch bei entgegengesetzter Polarität des Feldes. Das Spannungsdiagramm wird also Teile haben, wo die Ordinaten doppelt so hoch

sind, als bei den bisher behandelten Fällen, vorausgesetzt natürlich, daß die Intensität der magnetischen Felder und die Geschwindigkeit der Armatur in allen Fällen dieselben geblieben sind.

Die Induktionswirkung dauert aber nur solange, bis  $m$  und  $n$  in magnetischen Feldern sich bewegen. Verlassen sie diese, dann ändert sich die Zahl der durch die Windungsebene hindurch-

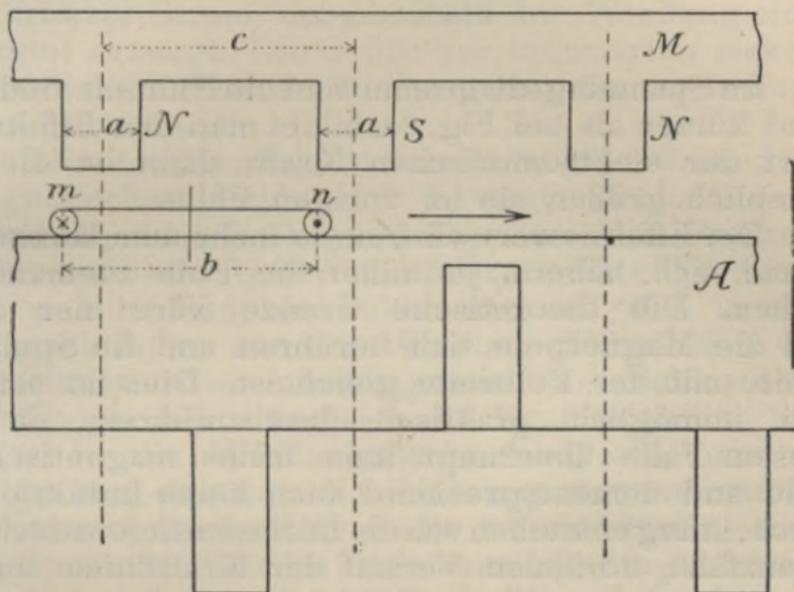


Fig. 82.

gehenden Kraftlinien nicht und nun kann keine elektromotorische Kraft induziert werden. Das Spannungsdiagramm wird dementsprechend soviel Nullteile haben, als Pole vorhanden sind, wie dies auch aus der Figur ersichtlich ist. Die effektive elektromotorische Kraft wird auch jetzt kleiner als die Maximale, eine bessere Ausnutzung des Wicklungsraumes bei dieser Disposition wäre nur dadurch zu erreichen, daß man die Zwischenräume der Magnetpole kleiner wählt. Hierdurch rücken

nämlich die oberhalb und unterhalb der Abscissenachse liegenden Teile des Spannungsdiagrammes näher einander, und so wäre auch bei demselben Maximalwert ein größerer Effektivwert zu erreichen.

Diese Anordnung ist aus Fig. 83 ersichtlich. Bei dieser sind die Zwischenräume der benachbarten Pole gleich der Polseite, daher

$$b = c = 2a.$$

Im Spannungsdiagramm sind die Nullteile bedeutend kürzer als bei Fig. 82, bildet man den Effektivwert der elektromotorischen Kraft, dann ist dieser erheblich größer, als im vorigen Falle.

Der Effektivwert wird um so mehr dem Maximalwerte sich nähern, je näher die Pole zueinander stehen. Die theoretische Grenze wäre hier die, daß die Magnetpole sich berühren und die Spulenbreite mit der Polbreite gleich ist. Dies ist natürlich unmöglich praktisch durchzuführen, da in diesem Falle überhaupt kein freies magnetisches Feld und dementsprechend auch keine Induktionserscheinung entstehen würde. In diesem theoretischen Grenzfalle, normalen Verlauf der Kraftlinien angenommen, wäre die effektive elektromotorische Kraft mit der maximalen gleich.

Es läßt sich aber auch eine praktische Anordnung durchführen, welche erreichen läßt, daß der Effektivwert mit dem Maximalwert gleich wird, bei welchem also das Spannungsdiagramm keine Nullteile aufweist. Diese Anordnung ist in Fig. 84 abgebildet.

Die Wechselfole sind voneinander um die Polbreite entfernt, so daß die Polteilung gleich mit der doppelten Polbreite ist

$$c = 2a$$

und die Spulenbreite für diesen Fall:

$$b = a.$$

In der Lage I ist die Zahl der durch die Windungsfläche der Spule gehenden Kraftlinien maximal. Bewegt sich die Armatur in der ange deuteten Richtung, dann nimmt die obengenannte Kraftlinienzahl gleichmäßig ab und es entsteht ein induzierter Strom, der oberhalb der Windung einen Südpol erzeugt. Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft ist im Spannungsdiagramm durch  $-c$  gegeben.

Diese Spannung ist konstant, bis  $m$  im nordmagnetischen Felde sich bewegt, d. h. bis die Windung dem Pole gegenüber um die Polbreite sich verschiebt. Unterdessen ist aber der Windungsteil  $n$  zum Südpole gekommen, so daß in dem Zeitpunkte, wo aus der Windungsfläche bei  $m$  alle Kraftlinien des nordmagnetischen Feldes verschwinden, bei  $n$  zugleich die Kraftlinien des Südpoles in die Windungsfläche eintreten, was zur Folge hat, daß nun die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft die frühere bleibt, d. h. die Spannungslinie im Diagramm mit der Abscissenachse weiter parallel läuft. In dieser Übergangsperiode der Windung wird also die elektromotorische Kraft nicht Null.

Verfolgen wir aber weiter die Induktionsverhältnisse in der Windung, nachdem diese bereits in das süd magnetische Feld eingetreten ist. Die elektromotorische Kraft bleibt konstant, bis die Windung die Lage II erreicht. Nun gehen alle Kraftlinien durch die Windungsfläche, sobald aber die Spule sich weiter bewegt, muß die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft entgegengesetzt werden, da in dieser Bewegungsperiode oberhalb der Windung ein Nordpol entstehen muß.

Nur bei entgegengesetzt gewordener elektromotorischer Kraft kann ein dementsprechender Strom entstehen und nur bei dieser Stromrichtung kann gegen die entstehenden dynamischen Wirkungen eine Arbeit geleistet werden, welche in elektrische Energie umgewandelt wird.

Betrachten wir Lage III, so ersehen wir, daß die Richtung der elektromotorischen Kraft sich

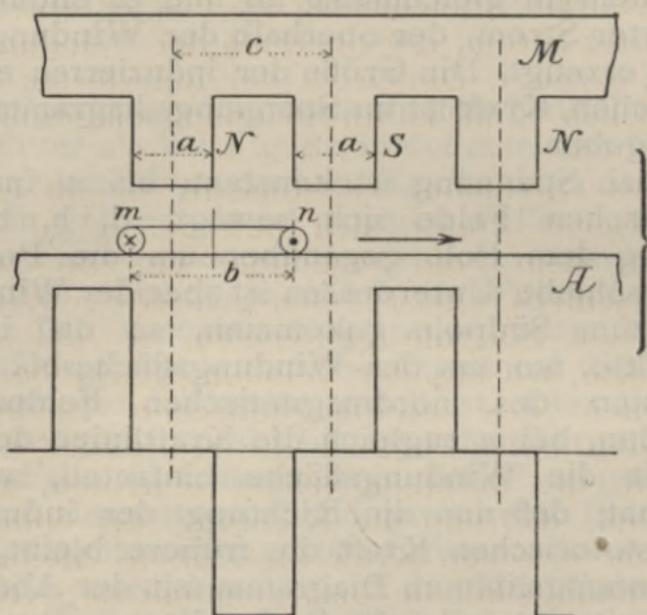


Fig. 83.

wieder ändern muß. Die Windung verläßt nämlich in dieser Lage ein nordmagnetisches Feld und da die Bewegungsrichtung dieselbe als früher blieb, muß sich die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft ändern.

Vergleichen wir das letzte Spannungsdiagramm mit den bisherigen. Alle hatten in einer Periode Nullteile, nur das letzte nicht. Während daher bei den ersteren die effektive elektromotorische Kraft bedeutend kleiner als der Maximalwert war, sind

diese bei der letzten Anordnung einander gleich. Immerhin ist die Maximalspannung nur die Hälfte jener in Fig. 83, doch ist der Wicklungsraum völlig ausgenutzt.

Die effektive elektromotorische Kraft kann durch die in Fig. 85 dargestellte Anordnung vergrößert werden. Hierbei ist

und

$$c = 2a$$

$$b = 1,5a.$$

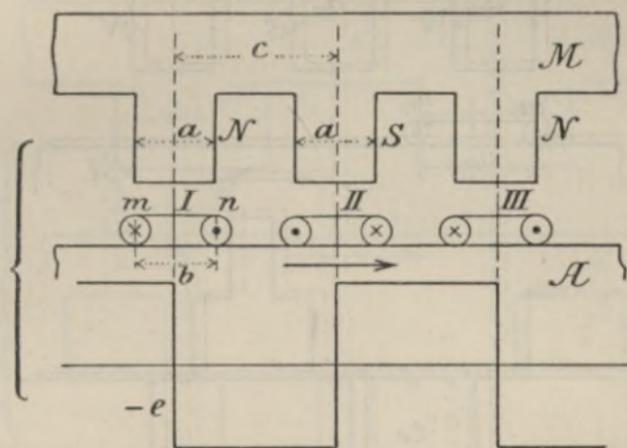


Fig. 84.

Die Spannungslinie wird immer Nullteile haben, wenn die Windung den Polen symmetrisch gegenübersteht, und zwar breitet sich der Nullwert der elektromotorischen Kraft in der Länge von  $\frac{a}{2}$  aus, wie dies aus der Zeichnung auch ersichtlich ist.

In der eingezeichneten Lage wird die Spannung  $e$  induziert. Diese wird doppelt groß, sobald  $n$  in den süd magnetischen Feld eindringt und hat den Wert  $2e$  längs einer Weglänge  $\frac{a}{2}$ . Sodann fällt sie wieder auf  $e$  herab, da  $m$  aus dem nord-

magnetischen Felde austritt, und wird zu Null, wenn  $n$  zur rechts liegenden Grenze des Magnetfeldes  $S$  gelangt. Nach dieser Bewegungsperiode wiederholen sich die Induktionserscheinungen, jedoch in entgegengesetztem Sinne.

Der Flächeninhalt dieses Spannungsdiagrammes für eine halbe Periode läßt sich auf ein Parallelo-

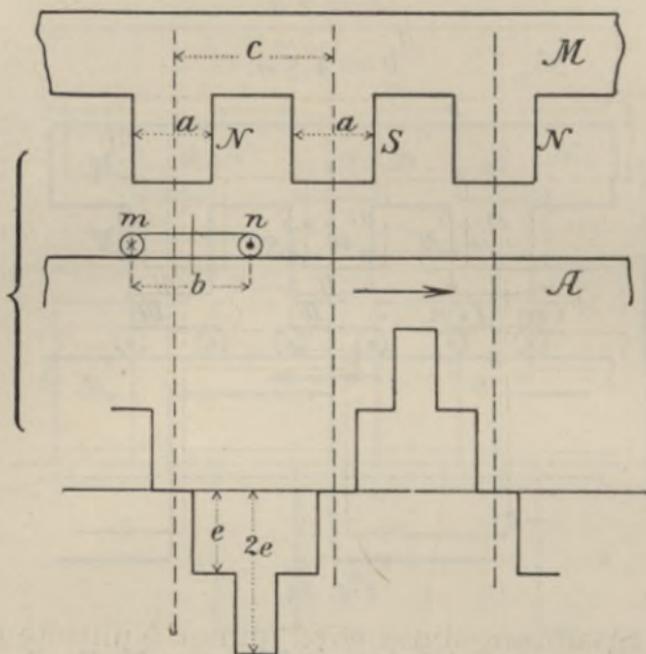


Fig. 85.

gramm verteilen, dessen Grundlinie die halbe Periode, Höhe aber die Spannung  $e$  ist. Letztere ist daher die mittlere Spannung. Die effektive Spannung läßt sich in bekannter Weise berechnen, sie ist größer als  $e$ .

Aus diesem ersehen wir, daß, trotzdem die Spannungslinie Nullteile hat, die erzeugte Effektivspannung doch größer ist als bei der Anordnung in Fig. 84, wo der Effektivwert der Spannung  $e$

ist. Die in Fig. 85 abgebildete Anordnung ist daher vorteilhafter.

Nun wollen wir einen anderen Fall untersuchen, in dem Pole wechselnder Polarität einander folgen und die Windungsbreite kleiner als die Polbreite ist. Aus Fig. 86 ist ersichtlich, daß

$$c = 2a$$

und

$$b < a.$$

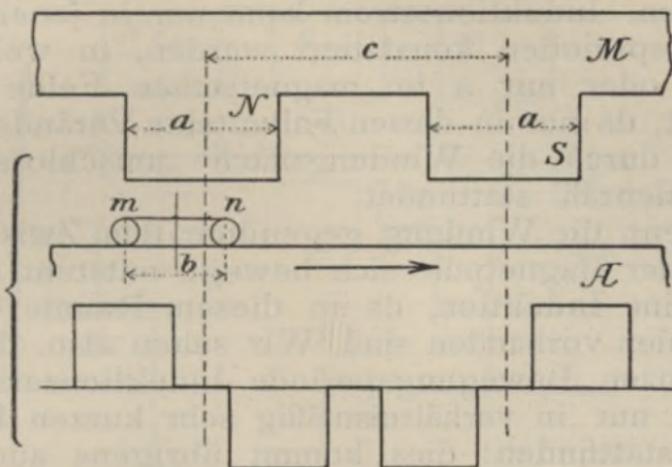


Fig. 86.

Dies ist eine günstige Disposition, denn, wie wir ersehen werden, kann nur eine geringe Spannung erzeugt werden, da während einer Periode die Windung öfter in solche Zonen zu liegen kommt, in denen entweder überhaupt keine Induktion stattfindet, oder, wenn auch zu Induktionswirkungen die Bedingungen vorhanden sind, infolge der unzweckmäßigen Form der Windung in verschiedenen Teilen derselben elektromotorische Kräfte induziert werden, die einander entgegengesetzt gerichtet sind und so ihre Wirkungen

gegenseitig vernichten. Alle diese Umstände verursachen, daß die effektive Spannung gering wird.

In der eingezeichneten Lage kann keine Induktionswirkung zur Geltung gelangen, da die durch die Windung umschlossene Kraftlinienzahl sich nicht verändert. Nehmen wir aber an, daß die elektromotorische Kraft dadurch erzeugt wird, daß die Leiterteile die Kraftlinien schneiden, so kann auch keine Induktionswirkung entstehen, da in den Windungsteilen  $m$  und  $n$  gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kräfte entstehen. Induktionsstrom kann nur in jenen Bewegungsperioden konstatiert werden, in welchen nur  $m$  oder nur  $n$  im magnetischen Felde sich befindet, da nur in diesen Fällen eine Veränderung in der durch die Windungsfläche umschlossenen Kraftlinienzahl stattfindet.

Wenn die Windung gegenüber dem Zwischenraume der Magnetpole sich bewegt, entsteht ebenfalls keine Induktion, da in diesem Raume keine Kraftlinien vorhanden sind. Wir sehen also, daß in der ganzen Bewegungsperiode Induktionserscheinungen nur in verhältnismäßig sehr kurzen Intervallen stattfinden; dies kommt übrigens auch in dem aus der Figur ersichtlichen Spannungsdiagramm zum Ausdruck. Es wechseln immer zwei gleichgerichtete Stromimpulse ab.

Nach alledem ist ratsam, bei Wechselstrom-generatorkonstruktionen solche Wicklungen nicht anzuwenden. Am Schlusse unserer Untersuchungen werden wir alle jene Bedingungen zusammenfassen, welche aus den behandelten Fällen sich ergeben und deren Befolgung zur Erreichung einer rationalen Spannungserzeugung bei den Generatoren unbedingt nötig ist.

Von den Anordnungen mit Wechselempolen wollen wir noch zwei Fälle unterscheiden, die durch die Fig. 87 und 88 dargestellt sind.

In Fig. 87 ist der Zwischenraum bei den Magnetpolen schmäler als ein Pol. Die Windungsbreite ist mit der Polbreite gleich. Unsere bisherigen Bezeichnungen benutzend, ist für diese Disposition

$$c = 1,5 a$$

und

$$b = a.$$

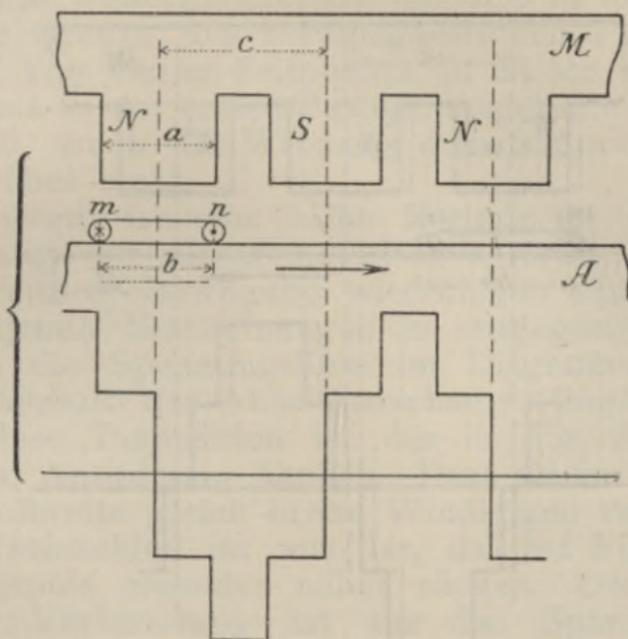


Fig. 87.

Befindet sich die Windung in der eingezeichneten Lage, dann findet eben die Umkehr der Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft statt, da bis zu dieser Lage die Kraftlinienzahl in der Windungsfläche stetig zunahm, von dieser Lage angefangen aber abnimmt. Die Notwendigkeit der Stromumkehr geht auch aus dem Umstande hervor, daß, während die Windung dem Nordpole sich näherte, oberhalb derselben ebenfalls ein Nordpol durch den induzierten Strom zu erzeugen war, bei

dem Entfernen derselben aber ein Südpol zu erzeugen ist, denn nur unter solchen Bedingungen ist es möglich, daß entgegen der magnetischen Wirkungen Arbeit geleistet wird, d. h. daß die mechanische Energie in elektrische umgewandelt werden kann.

Das Spannungsdiagramm hat hier also einen Nullpunkt. Bewegt sich die Spule weiter, dann

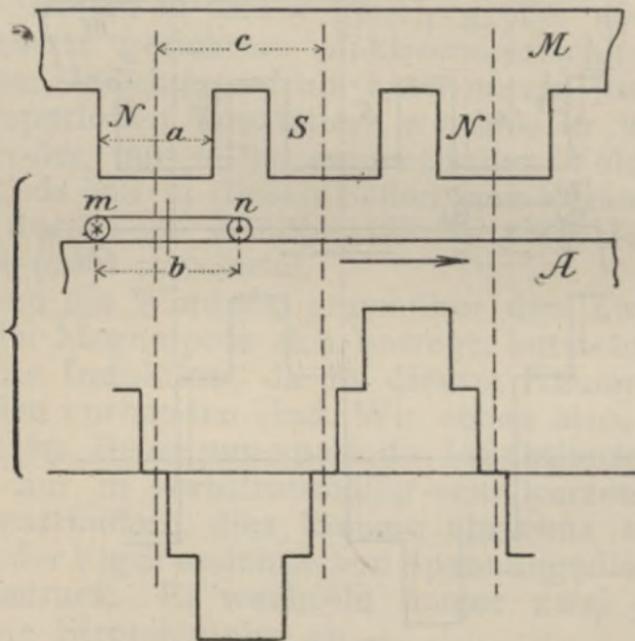


Fig. 88.

entsteht ein induzierter Strom, der den Nordpol des durch die Windung gebildeten Magneten unterhalb der Windung erzeugt. Infolge unserer eingangs angeführten Bedingungen wird die Spannungslinie unter die Abscissenachse zu liegen kommen.

Sobald die Windung von ihrer Anfangslage um die halbe Polbreite sich entfernt hat, kommt der Windungsteil  $n$  in ein süd magnetisches Feld. Nun wird in die Windungsfläche in der Zeit-

einheit die doppelte Zahl magnetischer Kraftlinien eintreten, nachdem aber die entstehenden zwei elektromotorischen Kräfte sich summieren, wird die resultierende Spannung eine der früheren doppelte sein, was auch im Spannungsdiagramm zum Ausdrucke kommt.

Die doppelte elektromotorische Kraft wird solange induziert, bis die Windung um die halbe Polbreite weitergerückt ist, bis also  $m$  die rechtsseitige Grenze des nordmagnetischen Feldes erreicht. Von diesem Zeitpunkte an ist sie wieder so groß, als in der ersten Bewegungsperiode und wird zu Null, wenn die Windung dem Südpole gerade gegenüber steht.

Hiermit ist eine halbe Periode in der Veränderung der elektromotorischen Kraft vollendet. Bei weiterer Bewegung wiederholen sich die beschriebenen Erscheinungen in entgegengesetztem Sinne, die Spannungslinie im Diagramm kommt nun oberhalb der Abscissenachse zu liegen.

Diese Disposition ist der in Fig. 84 dargestellten Anordnung ähnlich. Dort waren auch mit der Polbreite gleich breite Windungen verwendet, der Unterschied ist nur der, daß bei Fig. 87 die Magnetpole einander näher rücken. Der Einfluß dieser Veränderung ist aus den Spannungsdiagrammen ersichtlich. Keine derselben besitzt ausgedehnte Nullteile, die letztere hat aber größere Spannungswerte. Die letztbehandelte Disposition ist demnach vorteilhafter, die effektive elektromotorische Kraft wird zwar mit der maximalen nicht gleich sein, doch wird sie größer, als jene bei Fig. 84, welcher Umstand eine bessere Ausnutzung des Wicklungsraumes bedeutet.

Ziehen wir auch den in Fig. 80 dargestellten Fall mit den beiden oben genannten in Vergleich, dann ergibt sich die Tatsache, daß die erzeugte effektive Spannung um so größer wird, je näher die

Magnetpole zueinander stehen. Sie würde bei der angenommenen Windungsbreite ihre theoretische Grenze erreichen, wenn die Magnetpole einander berühren würden. In diesem Falle, der praktisch undurchführbar ist, wäre die effektive elektromotorische Kraft mit der maximalen gleich, ihr Wert wäre doppelt so groß, als bei der in Fig. 84 abgebildeten Anordnung.

Betrachten wir endlich für Wechselfpole noch den Fall, bei welchem die Verteilung der Magnetpole die frühere blieb, doch die Windungsbreite vergrößert wurde. Es sei (Fig. 88)

$$c = 1,5 a$$

$$b = a + \frac{a}{4}.$$

Bei dieser Disposition hat die Spannungslinie Nullteile, deren Länge aus dem Verhältnis der Pol- und der Windungsbreite sich ergibt. Befindet sich nämlich die Windung vor dem Magnetpole, dann ist die induzierte elektromotorische Kraft Null, da keine Veränderung in der umschlossenen Kraftlinienzahl eintritt. Dies nimmt bereits dann seinen Anfang, als z. B. der Windungsteil  $n$  zur rechtsseitigen Grenze des nordmagnetischen Feldes gelangt, und erreicht sein Ende, wenn der Windungsteil  $m$  eben im Begriffe ist, in dasselbe magnetische Feld einzutreten. Bei den angenommenen Dimensionen ist also die Länge des Nullteiles im Spannungsdiagramm  $\frac{a}{4}$ , denn um diese Länge ist die Windungsbreite größer als die Polbreite.

Im weiteren Verlaufe hat die Spannungslinie zwei konstante Spannungswerte. Die Spannung erhöht sich stufenweise, die erste Stufe wird durch die Spannung gebildet, welche induziert wird, bis nur der Windungsteil  $m$  im nordmagnetischen Felde

sich bewegt, die zweite ist die zweifache der ersteren und entspricht jener Bewegungsperiode, in welcher  $m$  und  $n$  in entgegengesetzt gerichteten magnetischen Feldern sich befinden.

Das Spannungsdiagramm ähnelt jenen in den Fig. 85 und 87. Der Unterschied zwischen diesen ist der, daß bei der Anordnung in Fig. 88 mehr größere Spannungswerte sich befinden, als in den anderen. Durch Ausbreiten der Windung haben wir erreicht, daß die effektive Spannung vergrößert wurde, auch ist die mittlere elektromotorische Kraft größer geworden als bei Fig. 87.

Durch Vergrößerung der Windungsbreite werden allerdings jene Teile des Spannungsdiagrammes verringert, in denen die elektromotorische Kraft nur die Hälfte der maximalen ist, doch kommt dies nicht alles jenem Teile des Diagrammes zu, in welchem die elektromotorische Kraft die doppelte ist, sondern es werden hierdurch auch die Nullteile der Spannungslinie verlängert, so daß im Grenzfalle, d. h. im Falle, wo die Spule so breit als die Polteilung ist, nur Maximalwerte und Nullteile vorhanden sind, deren jeder größer, als der in der Figur vorhandene ist.

Dieser Grenzfall führt die Anordnung auf die in den Fig. 82 und 83 dargestellten zurück, der Unterschied besteht nur darin, daß in den drei Fällen das Verhältnis der Ausbreitung der Maximalwerte und Nullwerte verschieden ist.

### Induktionsverhältnisse bei Gleichpolmaschinen.

Bisher befaßten wir uns mit den Induktionsverhältnissen bei solchen Generatoren, bei welchen die Polaritäten der aufeinander folgenden Magnetpole einander entgegengesetzt waren, nun wollen wir jene Fälle untersuchen, die sich ergeben, wenn eine Spule in Magnetfeldern sich bewegt, deren

Polarität immer dieselbe bleibt. Maschinen mit derartigem Magnetsysteme heißen Gleichpolmaschinen. Bei diesen sind zwei Polsysteme einander gegenübergestellt, wobei die Polarität der nebeneinander liegenden Pole dieselbe bleibt, während die gegenüber stehenden Pole immer einander entgegengesetzt polarisiert sind.

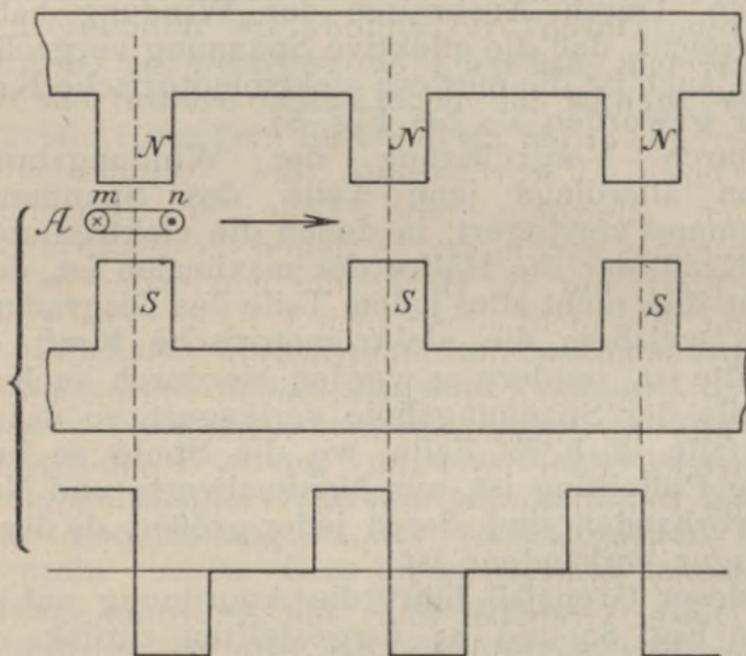


Fig. 89.

Die Armatur bewegt sich zwischen diesen Polen. Sie besitzt gewöhnlich kein Eisen, da die Spulen sehr flach ausgeführt werden. Auch kann die Armatur stehen und das Magnetsystem rotieren, wie dies auch zumeist der Fall ist. Die Magnetpole sind hierbei besonders geformt, in ihrem Hohlraum befindet sich die gemeinsame Erregerspule, die mitrotiert. Der Erregerstrom wird mit Hilfe zweier Schleifringe zugeführt, der erzeugte Wechselstrom dagegen von festen Klemmen abgeleitet. Diese

Anordnung ermöglicht eine sorgfältige Isolierung der Armaturspulen und hierdurch die Erzeugung von hohen Wechselspannungen.

Wir gehen von dem Falle aus, bei welchem die Polteilung größer als die doppelte Polbreite ist und bei dem Polbreite und Windungsbreite einander gleich sind. (Fig. 89):

$$c > 2a$$

$$b = a.$$

Nehmen wir an, daß das Magnetsystem ruht und die Armatur in der Pfeilrichtung mit konstanter Geschwindigkeit sich bewegt. In der Figur steht die Windung gerade einem Polpaare gegenüber, in dieser Lage ist daher die induzierte elektromotorische Kraft Null. Im Spannungsdiagramm schneidet demnach die Spannungslinie die Abscissenachse. Bewegt sich die Windung weiter, dann verschwinden die umschlossenen Kraftlinien gleichmäßig, es entsteht eine induzierte elektromotorische Kraft, die, die Windung von oben betrachtet, in der Richtung der Uhrzeigerbewegung verläuft. Im Sinne unserer Festsetzungen windet sich demzufolge die Spannungslinie unter die Abscissenachse, ist mit ihr parallel, solange  $m$  im magnetischen Felde sich befindet.

Unterdessen nähert sich der Windungsteil  $n$  dem benachbarten Nordpole, hat ihn aber noch nicht erreicht, wenn  $m$  bereits aus dem erwähnten ersteren Magnetfelde austritt. Die Folge davon wird sein, daß die elektromotorische Kraft Null wird, und zwar solange, bis  $n$  in das magnetische Feld eindringt. Sobald dies erfolgt, entsteht eine elektromotorische Kraft, jedoch der ersteren entgegengesetzt gerichtet, da nun die Kraftlinien stetig zunehmen, während im ersten Falle sie von einem Maximalwert bis Null abnehmen.

Die induzierte elektromotorische Kraft bleibt konstant, bis die Windung dem Nordpole gerade gegenüber zu liegen kommt. Von dieser Lage angefangen, wiederholen sich die bereits beschriebenen Induktionswirkungen.

Aus dem Spannungsdiagramm ist ersichtlich, daß diese Anordnung nicht am zweckmäßigsten ist.

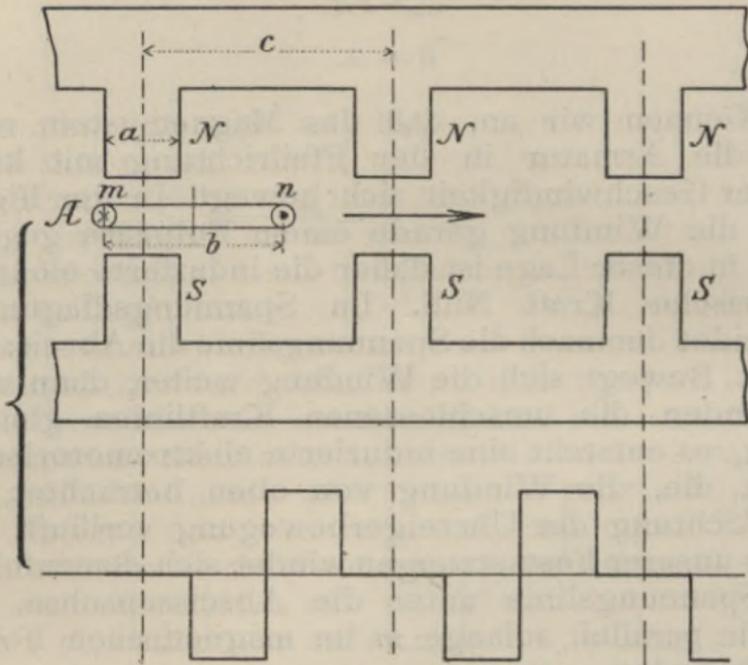


Fig. 90.

Hierbei ist die effektive elektromotorische Kraft kleiner als die maximale, wir müssen aber trachten, daß mit möglichst wenig Windungen die erwünschte Spannung erzeugbar ist. Deshalb sind die Dimensionen der Polteilung, Pol- und Windungsbreite entsprechend zu verändern.

Behalten wir zunächst die Anordnung, daß der Zwischenraum der Magnetpole größer als die Polbreite ist und nehmen wir eine größere Windungs-

breite an. Hierdurch ergibt sich eine Disposition, welche aus Fig. 90 ersichtlich ist und bei welcher:

$$c = a + b$$

$$b > a.$$

Bewegt sich die Spule in der angegebenen Richtung, dann ist nur der Windungsteil  $m$  im Magnetfelde und es wird eine elektromotorische Kraft induziert, wie bei Fig. 89 in derselben Lage.

Nach einer Weglänge, die gleich mit der Polbreite ist, befindet sich die Spule gerade dem kraftlinienlosen Raume zwischen den Polen gegenüber, hier findet also keine Induktion statt. Doch im nächsten Zeitmomente kommt der Windungsteil  $n$  in das benachbarte Magnetfeld, die Windungsfläche wird wieder durch Kraftlinien durchsetzt, es entsteht eine der früheren entgegengesetzt gerichtete, elektromotorische Kraft. Sobald  $n$  zur rechtseitigen Grenze des Magnetfeldes gelangt, hat die Kraftlinienzahl ihr Maximum erreicht, die induzierte elektromotorische Kraft wird zu Null und bleibt sie solange, bis  $m$  in das magnetische Feld eintritt. Von nun an wiederholen sich die Induktionserscheinungen.

Das Spannungsdiagramm wird also in diesem Falle auch Nullteile haben, und zwar beträgt die Länge eines solchen  $(b-a)$ . Die effektive Spannung wird wieder kleiner als die Maximale sein, wir erreichten also durch Vergrößerung der Spulenbreite nicht unser Ziel.

Dieses Ziel kann auch durch Verringerung der Spulenbreite nicht erreicht werden. Eine solche Anordnung ist noch unvorteilhafter als die beiden eben beschriebenen. Ist nämlich die Windungsbreite kleiner als die Polbreite, dann wird die Spannungslinie nicht nur verlängerte Nullteile an den bisherigen Orten haben, sondern auch an jenen,

bei welchen die beiden Windungsteile  $m$  und  $n$  dem Pole gegenüberstehen. In solchen Lagen kann die Windung sich bewegen, eine Veränderung der umschlossenen Kraftlinienzahl findet trotzdem nicht statt und es kann keine elektromotorische Kraft induziert werden.

Fig. 91 zeigt bereits eine zweckmäßigere Anordnung. Hierbei ist die Polteilung die doppelte

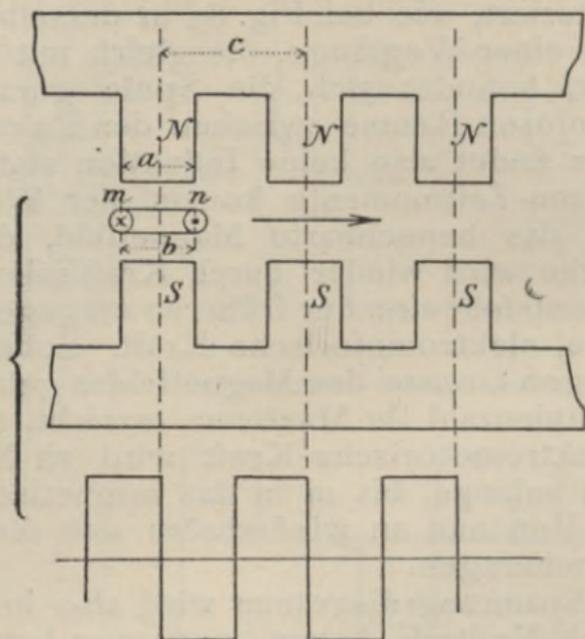


Fig. 91.

der Polbreite und ist die Windungsbreite mit der Polbreite gleich:

$$c = 2a$$

$$b = a.$$

Befindet sich die Windung dem Pole gegenüber, dann ist die induzierte elektromotorische Kraft Null. Bei weiterer Bewegung in der Pfeilrichtung befindet sich nur der Windungsteil  $m$  im

magnetischen Felde, es wird eine elektromotorische Kraft induziert, die im Spannungsdiagramm durch eine Linie unter der Abscissenachse dargestellt werden kann. Diese elektromotorische Kraft bleibt konstant, bis  $n$  zum benachbarten Magnetpole kommt. In diesem Zeitpunkte verläßt aber  $m$  das erste Magnetfeld, so daß die Induktionswirkung nicht aufhört. Die Spannungslinie hat nur Nullpunkte, aber keine Nullteile und durch diese Anordnung haben wir erreicht, daß die effektive elektromotorische Kraft mit der maximalen gleich wurde.

Dieses Spannungsdiagramm ist dem in Fig. 84 dargestellten ähnlich. Auch dort waren die Dimensionsverhältnisse der Windung und des Magnet-systemes dieselben, wie im letzten Falle. Betrachten wir aber die Ergebnisse genau, so finden wir den Unterschied, daß die Periodenzahl bei der Anordnung in Fig. 91 das doppelte derjenigen in Fig. 84 ist. Demgegenüber ist aber die Spannung nur die Hälfte jener der Anordnung Fig. 84, was aus den folgenden Überlegungen hervorgeht.

Ist die Anzahl der aus einem Pole austretenden Kraftlinien  $N$ , dann ist die veränderte Kraftlinienzahl während einer Periode bei Fig. 84  $4N$ , da die Kraftlinien zweimal verschwinden und zweimal entstehen. Bei Fig. 91 dagegen ist die Veränderung der Kraftlinienzahl nur die Hälfte, da während einer Periode die Kraftlinien einmal verschwinden und einmal entstehen. Nachdem in beiden Fällen dieselbe Feldintensität und dieselbe Rotationsgeschwindigkeit angenommen wurden, ist klar, daß im letzten Falle die induzierte elektromotorische Kraft nur halb so groß sein kann, als im ersten.

Ob die Disposition noch weiter vervollkommnet werden kann, wollen wir aus folgenden zwei Fällen ersehen.

In Fig. 92 sind die Dimensionsverhältnisse des Magnetsystemes dieselben als im vorher beschriebenen Falle, nur ist die Windungsbreite vergrößert worden. In unserem Falle ist

$$c = 2a$$

und

$$b = 1,5a.$$

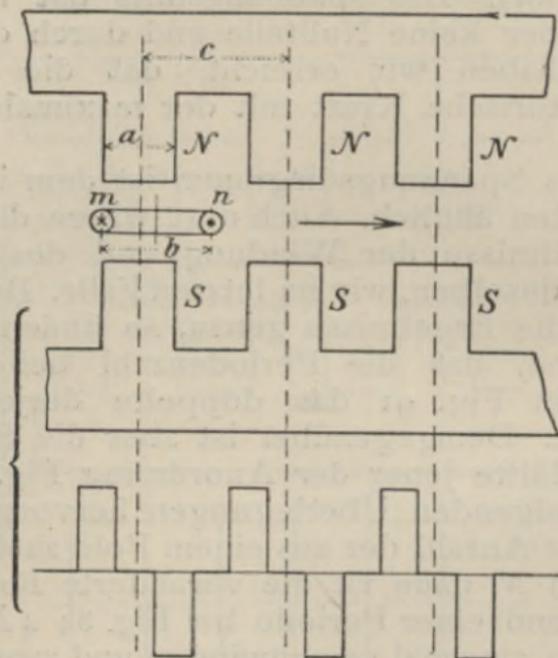


Fig. 92.

In der eingezeichneten Lage ist der Windungsteil  $m$  eben im Begriffe in das Magnetfeld einzudringen, während  $n$  in keinem magnetischen Felde sich befindet. Nach der Weglänge  $\frac{a}{2}$  gelangt  $n$  zum benachbarten Felde, unterdessen ist  $m$  bis zur Symmetrieachse des Magnetfeldes vorgedrungen. In diesem Zeitraume nahm also die durch die Windung umschlossene Kraftlinienzahl ab, die Folge davon ist, daß eine elektromotorische Kraft indu-

ziert wurde. Sobald  $n$  zum zweiten Magnetfeld  
 gekommen ist, findet bei  $m$  eine Abnahme der  
 Kraftlinien statt, dagegen bei  $n$  eine Zunahme der-  
 selben, und nachdem vorausgesetzt ist, daß die  
 Intensitäten der magnetischen Felder gleich sind,  
 folgt, daß von diesem Zeitpunkte angefangen keine  
 elektromotorische Kraft induziert werden kann.

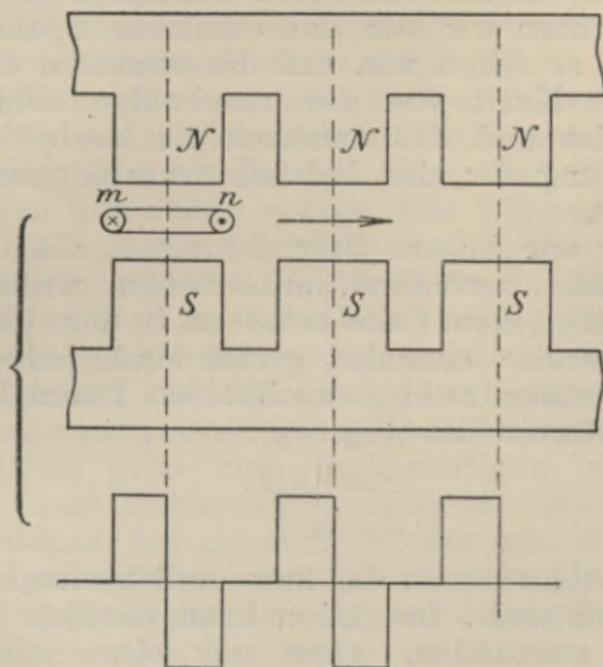


Fig. 93.

Der induktionslose Zustand dauert solange an,  
 bis beide Windungsteile in magnetischen Feldern  
 sich befinden. Sobald ein Windungsteil das Feld  
 verläßt und der andere noch in dem anderen sich  
 befindet, wird die elektromotorische Kraft induziert,  
 deren Richtung davon abhängt, ob im fraglichen  
 Zeitpunkte die Kraftlinienzahl in der Windungs-  
 ebene im Zu- oder Abnehmen begriffen ist.

Diesen Verhältnissen entsprechend wird das  
 Spannungsdiagramm Nullteile haben. Andere Null-

teile ergeben sich daraus, daß die Windung einem Pole gegenüber sich befindet, wobei keine der Teile  $m$  und  $n$  in Magnetfeldern sich bewegen. Dies ist der Fall, wenn  $m$  und  $n$  in den Zwischenräumen der Pole stehen, in diesem Falle kann sich die Zahl der durch die Windung umschlossenen Kraftlinien nicht verändern und somit wird auch keine elektromotorische Kraft induziert.

Betrachten wir nun das erhaltene Spannungsdiagramm, so sehen wir, daß die effektive elektromotorische Kraft von der maximalen sehr verschieden ist und daß demnach die Verbreiterung der Windung für die Induktionsverhältnisse ungünstig ist.

Bevor wir unsere Betrachtungen, die Gleichpolmaschinen betreffend, abschließen, wollen wir uns noch mit jenem Falle befassen, in dem Pol- und Windungsbreite einander gleich sind, jedoch der Raum zwischen zwei benachbarten Polen kleiner als die Polbreite ist (Fig. 93):

$$c = 1,5 a$$

$$b = a.$$

Wir sehen sofort, daß hier ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind. Induktion kann nämlich immer nur dann stattfinden, wenn nur eine Seite der Windung im Magnetfelde sich befindet; sind beide im Felde, dann ist die induzierte elektromotorische Kraft Null.

Das Spannungsdiagramm ergibt für die effektive Spannung denselben oder vielleicht noch ungünstigeren Wert als zuvor, es hat ausgedehnte Nullteile, weshalb auch mit dieser Anordnung keine Verbesserung der Disposition in Fig. 91 erreicht werden kann. Für Gleichpolmaschinen ist nur die letztgenannte Anordnung vorteilhaft, diese ist die einzige mögliche gute Ausnutzung des Wicklungsraumes.

## Wechselpolmaschinen mit gegenüberliegenden gleichnamigen Magnetpolen.

Außer den beschriebenen Maschinentypen baut man auch Wechselstrommaschinen, bei denen die aufeinander folgenden Pole entgegengesetzt polarisiert sind und die zwei Magnetsysteme besitzen, wobei die gegenüberliegenden Magnetpole gleiche Polarität haben. Eine Maschine dieser Art ist in Fig. 94 schematisch dargestellt.

*MM* sind die zwei einander gegenüberstehenden Magnetsysteme. Die Armatur besteht aus einem Eisenring, der mit der Wicklung versehen ist und zwischen den Polen rotiert. Der Verlauf der Kraftlinien ist aus der Figur ersichtlich. Sie treten bei den Nordpolen von beiden Seiten in die Armatur, vereinigen sich im Eisenkerne und treten bei den Südpolen beiderseits wieder heraus. Für die Kraftlinien stehen zwei Wege zur Verfügung. Aus dem Nordpole austretend teilen sie sich im Armaturkern, die Hälfte geht zum rechtsseitigen, die andere Hälfte zum linksseitigen Südpole, treten dann in den Südpol, wo sie sich mit den von der anderen Seite kommenden Kraftlinien vereinigen. Am Fuße des Südpoles teilen sie sich wieder und jede Hälfte kehrt zu seinem Nordpole zurück.

Naturgemäß kann die frühere Spulenanordnung nicht verwendet werden. Bisher war die Spulenebene mit den Polflächen parallel, d. h. sie war auf die Richtung der Kraftlinien senkrecht. Diese senkrechte Lage muß auch im vorliegenden Falle beibehalten werden, die Windung wird also auf die Polflächen senkrecht stehen. Hierdurch ist erreicht, daß die im Eisenkern der Armatur sich befindlichen Kraftlinien auf die Windungsfläche in jeder Lage der Armatur senkrecht stehen.

Die relative Lagenveränderung zwischen Windung und Pol ändert auch die Lage der Spannungs-

linie im Spannungsdiagramm. Bei den bisher behandelten Fällen sahen wir, daß die induzierte elektromotorische Kraft Null war, als die Windung der Polfläche gerade gegenüberstand. Nun ist gerade das Gegenteil der Fall, denn in dieser Lage wird die elektromotorische Kraft maximal, und sie ist Null, sobald die Windung in der Symmetrieebene zwischen zwei Magneten sich befindet.

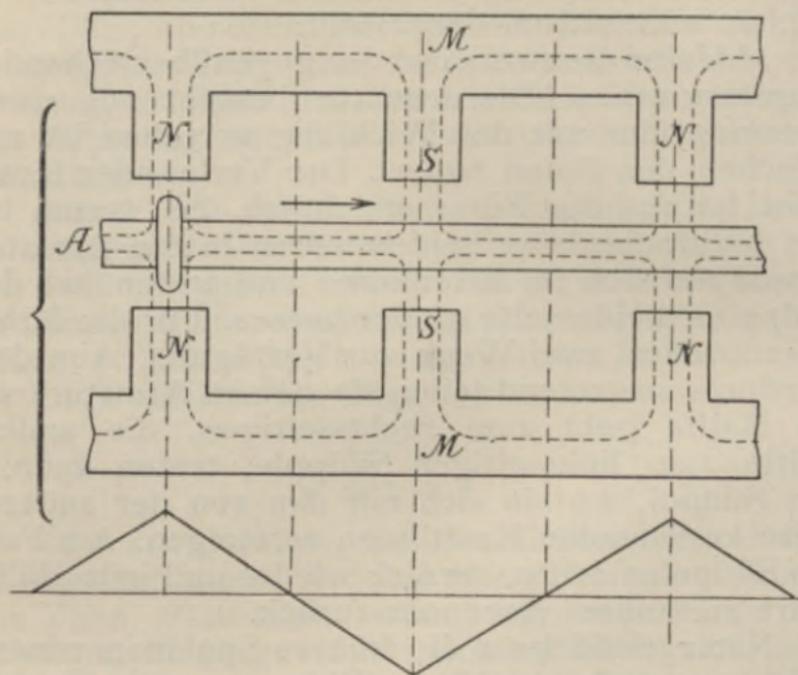


Fig. 94.

Dies ist leicht einzusehen. Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft hängt von der Anzahl der in der Zeiteinheit aus der Windungsebene verschwindenden Kraftlinien ab. Betrachten wir nun in Fig. 94 den Verlauf der Kraftlinien, so ersehen wir, daß in der eingezeichneten Windungslage durch die Windungsebene keine Kraftlinie durchgehen kann, daß also in dieser Lage die Zahl der umschlossenen Kraftlinien Null ist.

Bewegt sich die Windung in der Richtung des Pfeiles etwas weiter, dann treten aus dem Nordpole Kraftlinien in die Windungsfläche, es wird hierdurch eine elektromotorische Kraft induziert. Diese ist maximal, denn die Veränderung der Kraftlinienzahl in der Zeiteinheit ist auch maximal, da sie doch vom Nullwerte auf einen positiven Wert

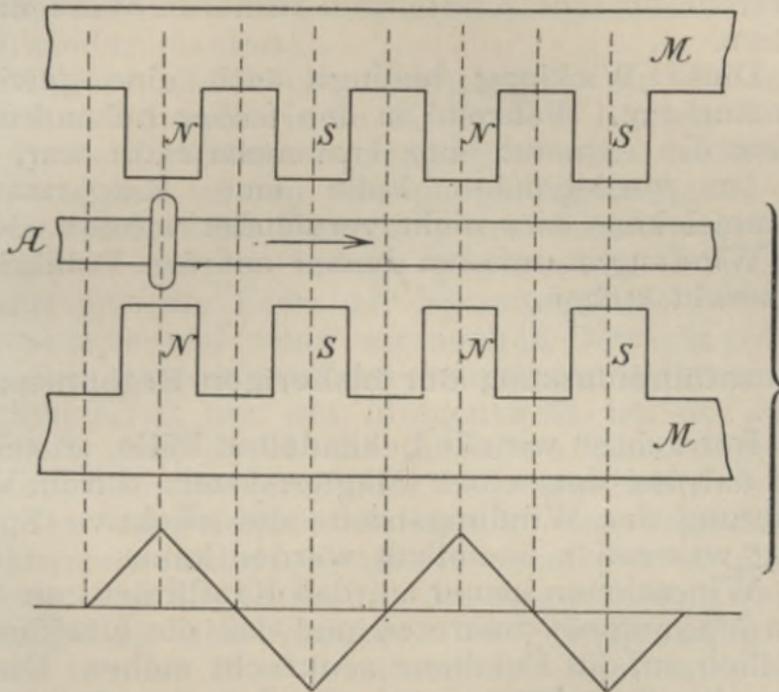


Fig. 95.

anstieg. Befindet sich dagegen die Windung in der Mitte zweier benachbarten Pole, dann bleibt während der Bewegung die umschlossene Kraftlinienzahl konstant, weshalb auch keine elektromotorische Kraft induziert werden kann. In dieser Symmetrieachse liegt demnach der Nullpunkt der Spannungslinie. Wir haben in der Figur das Spannungsdiagramm durch eine gebrochene Linie dargestellt.

Bringen wir die Magnetpole näher aneinander, so erreichen wir nur, daß die Spannungslinie steiler wird. Die Periodenzahl wächst also durch diese Veränderung, im Werte der elektromotorischen Kraft kann indessen keine Änderung beobachtet werden (Fig. 95). Die Kraftlinienzahl blieb dieselbe als zuvor, wenn also die Geschwindigkeit der Armatur unverändert bleibt, kann die induzierte elektromotorische Kraft ihren früheren Wert nicht ändern.

Diese Wicklung bedingt auch eine gewisse Armaturform. Während in den früher behandelten Fällen die Armatur eine Trommelarmatur war, ist sie im vorliegenden Falle eine Ringarmatur. Trommel kann hier nicht verwendet werden, denn die Windungen müssen immer auf die Polflächen senkrecht stehen.

#### Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse.

Betrachten wir alle behandelten Fälle, so sehen wir, daß bei demselben Magnetsystem durch Veränderung der Windungsbreite die effektive Spannung wesentlich beeinflußt werden kann.

Wir nahmen immer an, daß Kraftlinien nur aus dem Magnetpole austreten und daß die Kraftlinien sämtlich auf die Polebene senkrecht stehen. Durch diese Annahme konnten wir die Zwischenräume der Magnetpole als von Kraftlinien frei betrachten. Dem ist aber in der Wirklichkeit nicht so, denn die Kraftlinien treten nicht nur aus den Stirnflächen der Magnetpole aus, sondern auch von den Seitenflächen derselben, außerdem sind sie miteinander nicht parallel, sondern divergierend. Jede Kraftlinie sucht den Weg, an dem sie den kleinsten magnetischen Widerstand findet, weshalb auch schon von den Seitenflächen Kraftlinien durch einen größeren Luftzwischenraum in den Eisenkern

der Armatur eintreten. Die divergierende Tendenz ergibt sich daraus, daß die aus einem Pole austretenden gleichnamigen Kraftlinien einander abstoßen.

Die Dichte der Kraftlinien an der Armaturperipherie ist also verschieden. Dem Pole gegenüber ist sie maximal, dann nimmt sie gegen die Symmetrieebene der Magnetpole kontinuierlich ab, bis sie Null wird. Über diese Grenze nimmt sie wieder zu und wird bei dem nachfolgenden Magnetpol wieder maximal.

Dieser allmähliche Übergang ist auf die induzierte elektromotorische Kraft von Einfluß. Diese wird nämlich nicht sprunghaft sich verändern, wie wir dies in den Spannungsdiagrammen zeichneten, sondern der Übergang von einem Spannungswert zum anderen erfolgt gleichmäßig. Hierdurch nähert sich die Form der Spannungslinie mehr der Sinuskurve und wenn wir noch in Betracht ziehen, daß der Maximalwert der induzierten elektromotorischen Kraft nur ein Momentwert ist, so sehen wir ein, daß durch die Annahme einer Sinusänderung kein großer Fehler begangen wird.

Der abgeleitete Ausdruck der induzierten elektromotorischen Kraft ist unter der Annahme richtig, daß die Intensität des magnetischen Feldes am Umfang der Armatur eine Sinusfunktion des Ortes ist. Ist die Verteilung der Kraftlinien eine andere, dann wird auch dieser Ausdruck sich verändern. Der Einfluß der Verteilungsweise des magnetischen Feldes kommt durch den in der Formel sich befindenden Zahlenfaktor zur Geltung.

Bei Wechseelpolen fanden wir, daß die Wicklung am vorteilhaftesten durchgeführt ist, wenn die Spulenbreite gleich der Polbreite ist und die Polteilung den doppelten Wert der Polbreite beträgt. In diesem Falle sind die Wicklungsteile der Windung abwechselnd unter Induktion und die Spannungslinie hat keine ausgedehnten Nullteile.

Die Verminderung des Zwischenraumes der Magnetpole ist von Vorteil. Hier setzt die Streuung die Grenze, als auch der zur Anbringung der Magnetbewicklung benötigte minimale Wicklungsraum. Bei solchen Magnetdispositionen ist auch die Anwendung etwas breiterer Windungen zu empfehlen.

Bei Gleichpolmaschinen ist die Spulenbreite mit der Polbreite gleich zu nehmen. Die Polteilung ist die doppelte der Polbreite.

Nachdem nur jene Teile der Windung für die Induktion von Einfluß sind, welche auf die Bewegungsrichtung senkrecht stehen, kann, ohne die relative Lage dieser Windungsteile verändern zu müssen, die Windungsebene nur durch Verlängerung derselben vergrößert werden. Längliche Spulen können mehr Kraftlinien umfassen, auch ist bei solchen die Kraftlinienänderung verhältnismäßig groß, die Länge der Spulen soll deshalb möglichst vergrößert werden.

Diese Bedingungen lassen sich aber nicht immer einhalten, da verschiedene Umstände auf die Dimensionsverhältnisse der Maschine von Einfluß sind. Diese Verhältnisse sind so zu wählen, daß bei möglichst geringen Kosten der erreichbare beste Wirkungsgrad erzielt wird. Wir wollen nunmehr alle jene Faktoren näher untersuchen, die hierbei in Betracht kommen, und so uns ein klares Bild der Vorgänge im Wechselstromgenerator schaffen.

### Einfluß der Spulendimensionen bei Wechselstrommaschinen.

Bei unseren bisherigen Erörterungen nahmen wir die Breite der Spulenseiten nicht in Betracht, sondern konstruierten die Spannungsdiagramme unter der Bedingung, daß die Breite der Windung

von den Mittelpunkten der beiden parallelen Windungsteilen gerechnet wird. Bei dünnen Leitern und aus nur einer Windung bestehenden Spulen ist dies auch annähernd richtig, in den meisten Fällen ist aber die Seitenbreite der Spule nicht zu vernachlässigen, da sie infolge der angewandten mehreren und dickeren Leiter im Verhältnis zur Windungsbreite nicht verschwindend klein ist.

Die Windungen der Armatur liegen zumeist in Nuten des Armaturkernes, wobei in eine Nute ein oder mehrere Leiter untergebracht werden. Die in verschiedenen Nuten befindlichen Leiter werden nacheinander geschaltet, wodurch die elektromotorische Kraft eine resultierende Größe wird. Immerhin ist letztere nicht die algebraische Summe der Komponentenspannungen, man muß bei der Bestimmung derselben auch auf die Phasenverhältnisse bedacht sein und die Spannungen als Vektorgrößen unter den gegebenen Phasenwinkeln geometrisch summieren. Die algebraische Summation darf nur auf Momentwerte der Komponent- und resultierenden Spannung angewendet werden.

Man unterscheidet diese Wicklungen voneinander dadurch, daß man angibt, wieviel Nuten pro Pol auf eine Phase fallen. Es bedeutet also Einlochwicklung soviel, daß in diesem Falle pro Pol und Phase die Wicklung in einer Nute angebracht ist. Bei Zweilochwicklung ist die Nutenzahl pro Pol und Phase zwei, bei Dreilochwicklung drei etc. Die Windungen der zusammengehörigen Nuten werden nacheinander geschaltet und die resultierende elektromotorische Kraft in der oben genannten Weise bestimmt.

Mit der Einlochwicklung wollen wir uns nicht weiter befassen, da sie sich von den bisherigen Fällen nicht unterscheidet. Wir wollen nun die übrigen Fälle untersuchen.

Fig. 96 zeigt eine Zweilochwicklung. Unter jedem Pole befinden sich zwei Nuten, in denen die Wicklungen untergebracht sind. Die Spulen, welche die einzelnen Nuten ausfüllen, sind schematisch durch einen Bogen dargestellt. Die Entfernung der Nutenmittelpunkte voneinander sei  $a$ , die Breite des Polzwischenraumes  $\beta$ , die Polteilung  $c$ , die

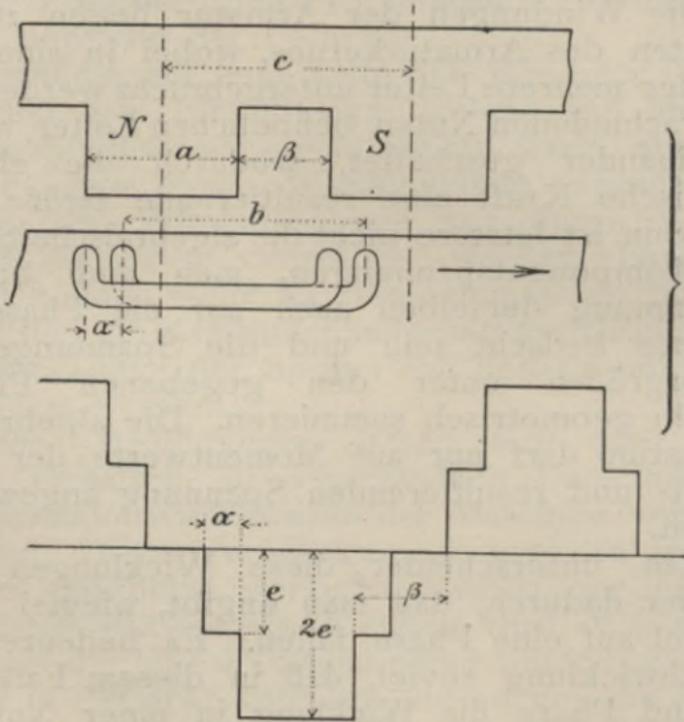


Fig. 96.

Spulenbreite zwischen den Nutenmittelpunkten  $b$  und die Polbreite  $a$ .

Bewegt sich die Armatur in der Richtung des Pfeiles, dann kommen die beiden Windungen nicht in derselben Zeit unter die induzierende Wirkung der Kraftlinien, welcher Umstand zur Folge hat, daß die elektromotorische Kraft nur einen Wert erreicht, welcher nur einer Spule entspricht. Sobald

aber auch die zweite Spule eine induzierende Wirkung erhält, steigt die elektromotorische Kraft nahe auf den doppelten Wert, Hintereinanderschaltung der Spulen vorausgesetzt.

Das Spannungsdiagramm besteht demnach aus zwei Teilen. Während des Zeitraumes, unter welchem die Armatur den Weg  $\alpha$  zurücklegt, ist die

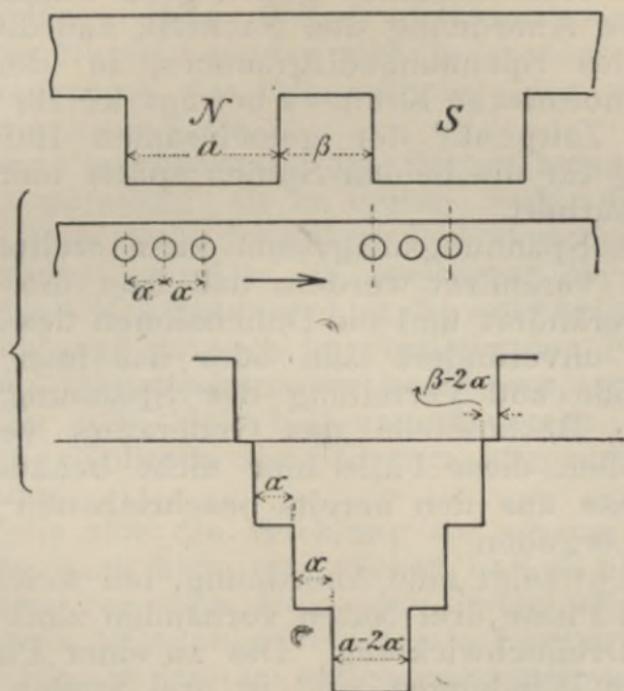


Fig. 97.

elektromotorische Kraft  $e$ , nach diesem Zeitraume verändern sich auch die durch die zweite Spule umschlossenen Kraftlinien, die resultierende Spannung wächst auf den Wert  $2e$ , den kleinen Phasenverschiebungswinkel zwischen den Komponentenspannungen vernachlässigend. Nach dem Wege  $\alpha - \alpha$  wirkt wieder nur eine Komponentenspannung, denn die erste Windung hat bereits das magne-

tische Feld des Nordpols verlassen und endlich nach einer weiteren Bewegung um  $\alpha$  wird auch diese zu Null. Beide Windungen befinden sich in dieser Lage dem Südpole gegenüber.

Das Spannungsdiagramm hat also einen Nullteil, dessen Ausdehnung von der Differenz  $\beta - \alpha$  abhängt. Dieser kann gänzlich beseitigt werden, man muß nur die Breite des Polzwischenraumes mit dem Nutenabstande gleich groß wählen, doch hat diese Anordnung den Nachteil, daß diejenigen Teile des Spannungsdiagrammes, in denen die elektromotorische Kraft  $z e$  beträgt, kürzer werden, da der Zeitpunkt der gemeinsamen Induktionswirkung für die beiden Spulen später eintritt und früher aufhört.

Das Spannungsdiagramm kann weiters noch dadurch verändert werden, daß man die Spulenbreite verändert und die Dimensionen des Magnetkranzes unverändert läßt, oder daß man alle auf die Größe und Verteilung der Spannung Einfluß habende Bestandteile des Generators verändert. Wir wollen diese Fälle hier nicht behandeln, da sich diese aus den bereits beschriebenen Anordnungen ergeben.

Fig. 97 zeigt eine Anordnung, bei welcher pro Pol und Phase drei Nuten vorhanden sind. Diese ist die Dreilochwicklung. Die zu einer Phase gehörenden Windungen sind in drei Spulen geteilt, von denen jede ein Nutenpaar in Anspruch nimmt.

Die Entfernung zwischen zwei benachbarten Nutenmittelpunkten sei wieder  $\alpha$ , die Polbreite  $\alpha$  und die Breite des Zwischenraumes der Magnetpole  $\beta$ .

Die Spannungslinie wird in diesem Falle dreimal stufenweise anwachsen, und zwar wird die Breite einer Stufe mit  $\alpha$  gleich sein, da die Armatur um diese Weglänge sich weiterbewegen muß, bis die benachbarte Spule auch induziert wird.

Die resultierende Spannung ergibt sich aus drei Komponentenspannungen, die verschiedene Phasen haben. Die maximale elektromotorische Kraft hält solange an, bis die Armatur um die Weglänge  $a - 2\alpha$  sich weiterbewegt, denn alle drei Spulen sind nur während jenes Zeitraumes unter gleichzeitiger Induktionswirkung, welcher zum Zurücklegen der obengenannten Weglänge erforderlich ist.

Die Länge des Nullteiles ist  $\beta - 2\alpha$ , da die Spulen längs dieses Weges nicht induziert werden. Die drei Nuten befinden sich in diesem Falle im Zwischenraume der Magnetpole, also an einem kraftlinienlosen Orte.

Die Vergrößerung des Nutenabstandes hilft hier ebensowenig, als im ersten Falle, denn hierdurch wird auch derjenige Teil des Spannungsdiagrammes schmaler, in welchem die elektromotorische Kraft maximal ist. Sowohl bei der Zweilochwicklung, als auch im vorliegenden Falle muß man den Polzwischenraum verringern, wenn man erreichen will, daß bei unveränderten Maximalteilen die Nullteile des Spannungsdiagrammes verschwinden.

Wenn sich die Wicklung auf glatter Armatur befindet, dann kann man diesen Fall so behandeln, als wenn vor dem Pole sich soviel Nuten befänden, als Windungen die Spule besitzt.

In Fig. 98 ist eine Anordnung dargestellt, bei welcher die Seitenbreite der Spule mit der Polbreite gleich ist.

Die Dimensionen des Leiters sind solche, daß vor einem Pole vier Windungsteile zu liegen kommen, so daß, wenn die Polbreite  $a$  ist, durch einen Leiter ein Armaturumfangsteil von der Größe  $\frac{a}{4}$  beansprucht wird.

Nehmen wir an, daß in diesem Falle die Breite des Zwischenraumes der Magnetpole gleich mit der

Seitenbreite einer Spule ist. Durch diese Annahme erreichen wir, daß im Spannungsdiagramm nur Nullpunkte, aber keine Nullteile sich befinden werden.

Betrachten wir zunächst jene Lage der Spule, in welcher die Seitenteile derselben den Zwischenräumen der Magnetpole gegenüberstehen. In dieser Lage ist die induzierte elektromotorische Kraft Null, da die Zahl der durch die Windung um-

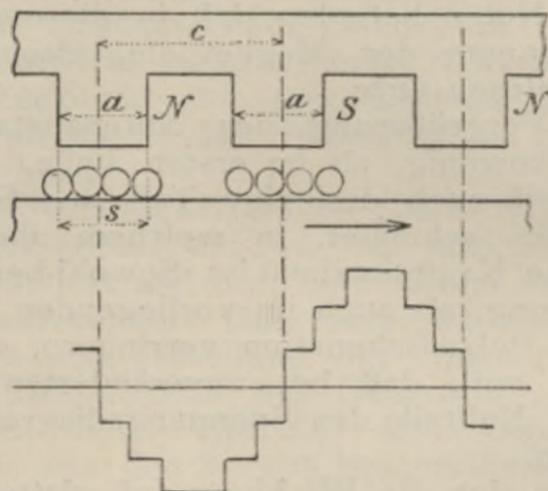


Fig. 98.

schlossenen Kraftlinien konstant bleibt. Bewegt sich aber die Spule um die Länge  $\frac{a}{4}$ , dann ist bereits eine induzierende Wirkung vorhanden, denn obzwar in den Windungsflächen dreier Windungen die Kraftlinienzahl konstant bleibt, verändert sich diese bei der vierten Windung, es entsteht somit in letzterer eine elektromotorische Kraft.

Diese elektromotorische Kraft bleibt konstant, bis auch die zweite Windung in eine Lage kommt, in welcher während der Bewegung die Zahl der umschlossenen Kraftlinien sich verändert. Es ist

leicht einzusehen, daß die erste Windung den Weg  $\frac{a}{4}$  zurücklegen muß, bis die zweite unter die induzierende Wirkung kommt. Die resultierende Spannung ergibt sich aus den zwei Komponentenspannungen, doch ist diese noch nicht der erreichbare Maximalwert, denn es müßten auch noch die Komponentenspannungen der dritten und vierten Windung in Betracht gezogen werden.

Was auf die zweite Windung gesagt wurde, steht auch für die dritte und vierte, so daß die maximal elektromotorische Kraft erzeugt wird, sobald die Armatur von der Anfangslage aus gerechnet um den Weg  $a$  sich weiterbewegt hat. In dieser Lage sind alle Windungsteile unter Magnetpolen und die Symmetrieachse der Spule fällt mit der neutralen Linie der Magnetpole zusammen.

Das Spannungsdiagramm ist nun zur Hälfte einer halben Periode bestimmt. In der anderen Hälfte sind die Verhältnisse dieselben, nur daß nun die Spannung eine abnehmende Tendenz hat. Die Spule bewegt sich jetzt vom Pole gegen die neutrale Zone und sobald sie diese erreicht, d. h. wenn die Symmetrieachse der Spule mit der Symmetrieachse des Magnetpols zusammenfällt, ist die resultierende elektromotorische Kraft Null.

Somit ist eine halbe Periode der Veränderung der elektromotorischen Kraft vollendet. Das Spannungsdiagramm hat den Windungen entsprechend drei Stufen, die Breite einer Stufe ist mit  $\frac{a}{4}$  gleich.

Die Verbreiterung der Spule hat also zur Folge, daß die Änderungen in der Spannung nicht mehr so jäh und sprungweise eintreten als bei einer Spule mit einer einzigen Windung oder bei einer Spule mit mehreren Windungen, aber sehr schmalen Seiten. Der Übergang ist um so gleich-

mäßiger, je mehr Windungen die Spule besitzt und je breiter eine Spulenseite ist.

Das zuletzt Gesagte ist aus der Anordnung in Fig. 99 einzusehen. Hier sind Spulen verwendet, deren Seitenbreite größer als die Polbreite ist. Die Folge daran wird sein, daß die Spulenteile immer in magnetischen Feldern sich befinden werden,

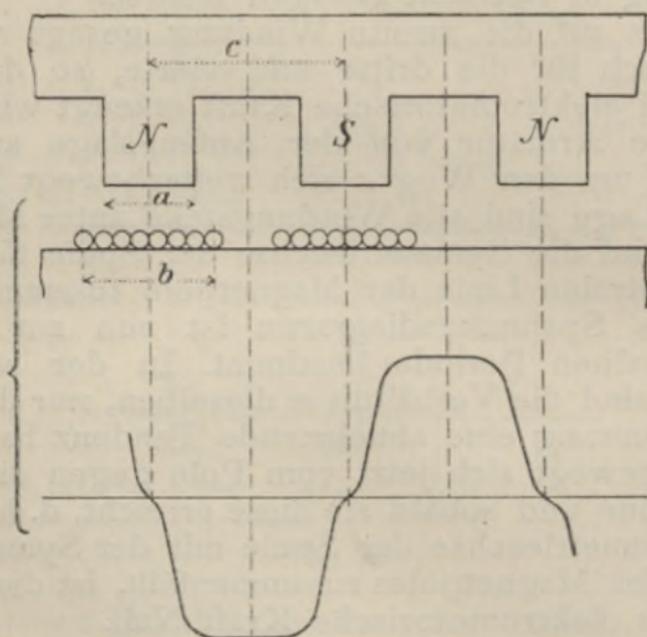


Fig. 99.

wobei aber ein Teil derselben auch in neutralen Zonen liegen wird. Lagen, bei welchen die Spulenseiten entweder nur im magnetischen Felde oder nur in der neutralen Zone sich befinden, sind ausgeschlossen, denn dies könnte nur dann eintreten, wenn die Breite der neutralen Zone mit der Spulenseitenbreite gleich wäre, eine solche Anordnung ist aber wegen ungünstiger Induktionsverhältnisse nicht zu empfehlen.

Nehmen wir an, die Spule befindet sich einem Magnetpole gegenüber, d. h. die Symmetrieachsen des Poles und der Spule fallen zusammen. In dieser Lage ist die resultierende elektromotorische Kraft Null, trotzdem die verschiedenen Windungen in verschiedenen magnetischen Feldern sich befinden. Bei der Bewegung werden in mehreren Windungen elektromotorische Kräfte induziert, doch sind nicht alle gleich gerichtet, weshalb die resultierende elektromotorische Kraft aus einer Differenz sich ergibt, wenn man die Komponentenspannungen mit entsprechenden Vorzeichen und unter den betreffenden Phasenwinkeln geometrisch summiert.

Die resultierende elektromotorische Kraft wird immer größer, sie erreicht ihren Maximalwert, sobald die entgegengesetzt gerichteten Komponentenspannungen verschwinden. Dies tritt ein, wenn die Windungen nur vor zwei entgegengesetzt polarisierten Polen liegen, und dauert solange an, bis die Spule zur Grenze des nachfolgenden Magnetpols gelangt.

Das Spannungsdiagramm hat demnach während eines längeren Zeitraumes einen konstanten, maximalen Wert, vor und nach diesem Zeitraume ist die elektromotorische Kraft veränderlich, sie nimmt kontinuierlich bis zum Maximalwert zu, beziehungsweise fällt von diesem ebenso kontinuierlich auf den Nullwert herab.

Die ansteigenden und abfallenden Teile des Spannungsdiagrammes sind eigentlich bei der angenommenen Verteilung der Kraftlinien stufenförmig, doch sind diese Stufen infolge der großen Anzahl der Windungen so klein, daß sie durch eine kontinuierliche Linie ersetzt werden können. Hierdurch kommen wir auch der tatsächlichen Form der Spannungskurve näher, denn wie bereits erwähnt, ist bei den Magnetfeldern kein jäher Über-

gang, sondern nimmt die Intensität des Feldes allmählich zu, beziehungsweise ab.

Wir müßten nun noch jenen Fall untersuchen, bei welchem die glatte Armatur Spulen besitzt, deren Seitenbreite kleiner als die Polbreite ist. Betrachten wir aber diese Anordnung eingehender, so sehen wir, daß diese nichts neues in sich birgt,

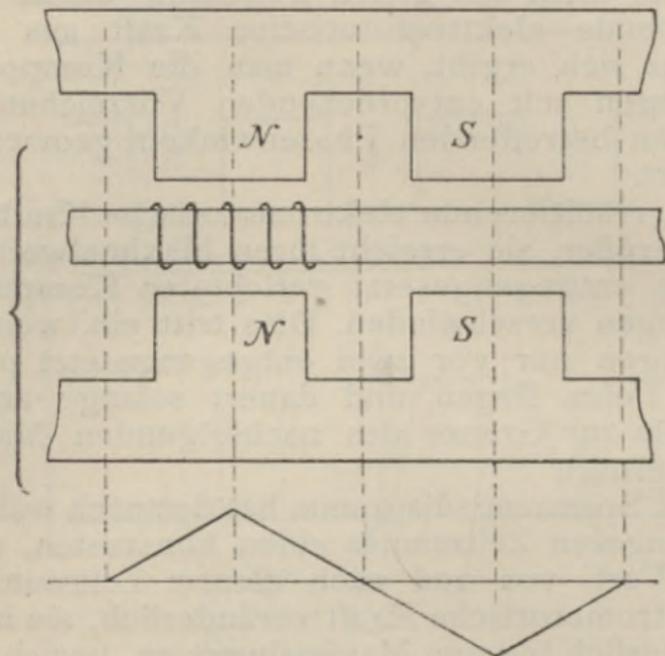


Fig. 100.

da sie mit den Ein-, Zwei- und Dreilochwicklungen identisch ist. Die Behandlung dieses Falles ist daher überflüssig.

Wir wollen uns noch kurz mit den Ringwicklungen befassen. Für eine einzelne Windung sind die Induktionsverhältnisse aus der Fig. 95 ersichtlich. Die Breitenverhältnisse der Spulen spielen auch hier eine Rolle, in folgendem sollen daher einige Anordnungen behandelt werden.

Fig. 100 zeigt eine Disposition, bei welcher die Breite der Spule mit der Polbreite gleich ist. In der Figur steht die Spule gerade vor dem Nordpol, in dieser Lage ist die induzierte elektromotorische Kraft maximal. Betrachten wir nämlich das Spannungsdiagramm in Fig. 95, so sehen wir, daß die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft unverändert dieselbe bleibt, bis die Windung von der neutralen Zone vor dem Nordpol zur neutralen Zone nach dem Nordpol kommt. Allerdings ist ihr Wert veränderlich, in der Symmetrieachse des Magnetpoles ist sie maximal, in den neutralen Zonen Null, zwischen diesen beiden Grenzwerten hat sie eine zu-, beziehungsweise abnehmende Tendenz.

Die Größe der resultierenden elektromotorischen Kraft bei mehreren Windungen hängt von der Richtung der in den einzelnen Windungen induzierten Spannungskomponenten ab, sind alle gleichgerichtet und können die Phasenwinkel vernachlässigt werden, dann ist die resultierende Spannung mit der algebraischen Summe der Komponentenspannungen gleich.

Wenn nun die Spulenbreite und die Polbreite übereinstimmen, dann kann das Spannungsdiagramm nur jener in Fig. 95 ähnlich sein, der Unterschied besteht nur darin, daß das Diagramm infolge der nacheinander geschalteten mehreren Windungen größere Spannungswerte aufweist.

Liegt die Spule mit ihrer Mittellinie in der neutralen Zone, dann ist die resultierende elektromotorische Kraft Null. Es werden zwar in dieser Lage in den einzelnen Windungen elektromotorische Kräfte induziert, doch haben diese entgegengesetzte Richtungen, weshalb sie sich in ihren Wirkungen gegenseitig aufheben.

Ist die Spulenbreite kleiner als die Polbreite, dann sind die Induktionsverhältnisse denen im

vorhergehenden Falle ähnliche. Diese Anordnung ist in Fig. 101 schematisch abgebildet. Die Spule hat hier nur drei Windungen, die resultierende elektromotorische Kraft ergibt sich in derselben Weise als zuvor. Das Spannungsdiagramm besteht aus gleichschenkeligen Dreiecken, die Nullpunkte

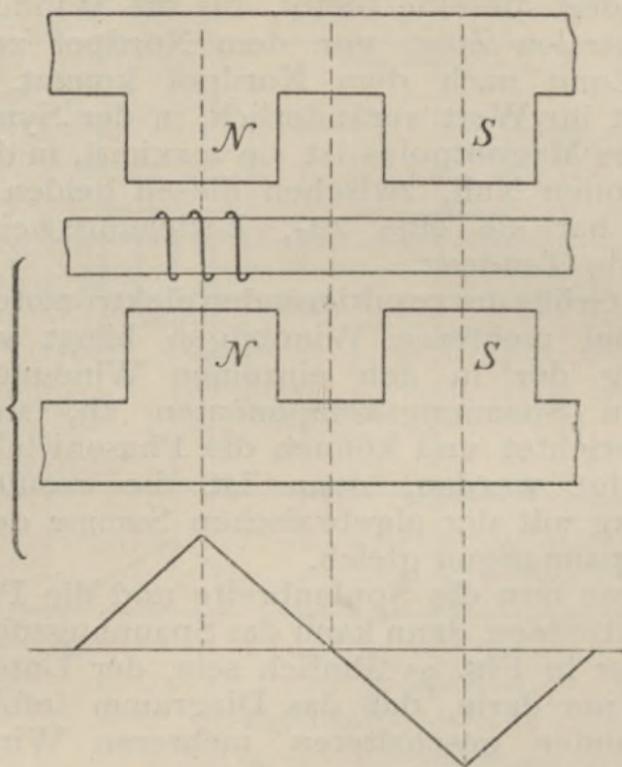


Fig. 101.

fallen mit den Lagen der neutralen Zonen zusammen.

Wesentlich anders sind die Verhältnisse, wenn die Spulbreite größer als die Polbreite ist (Fig. 102). Nehmen wir an, daß die Windungen nicht bis zu den neutralen Zonen reichen. In der eingezeichneten Lage ist die induzierte elektromotorische Kraft

maximal, und zwar ist sie, gleiche Dimensionsverhältnisse angenommen, gleich mit jener in Fig. 100, da wir voraussetzen, daß das magnetische Feld durch die Polkanten begrenzt ist. Tatsächlich ist die elektromotorische Kraft größer, da die Kraftlinien auch seitwärts aus den Polen in die Armatur

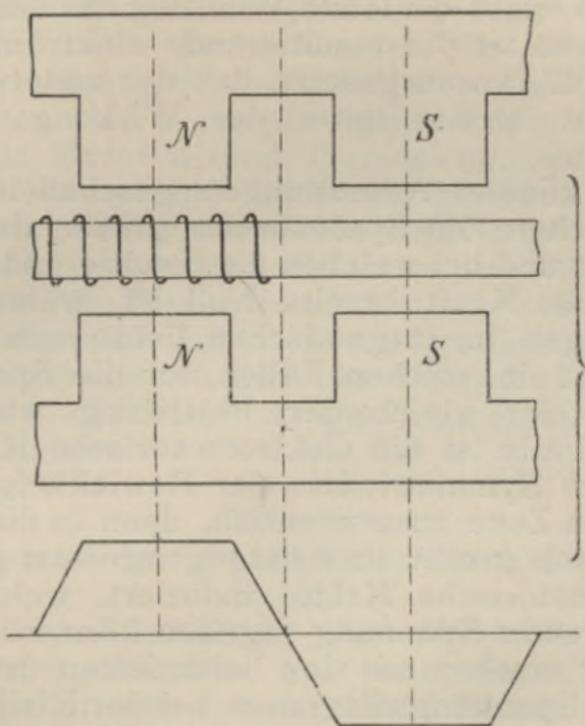


Fig. 102.

eintreten, d. h. die Maschine hat infolge der nützlichen Streuung günstigere Induktionsverhältnisse. Diese Streulinien induzieren in den nicht unter dem Pole liegenden Windungen Spannungen, die die resultierende Spannung vergrößern.

Das Spannungsdiagramm hat auch eine andere Form, als in den bisherigen Fällen. In den neutralen Zonen liegen die Nullpunkte, die resultierende

elektromotorische Kraft wächst erst an, erreicht ihren Maximalwert, sobald unter dem Pole Windungen in der Ausdehnung der Polbreite liegen, bleibt maximal, bis auch die letzte Windung in das magnetische Feld eintritt, und nimmt erst dann ab, wenn die dem Pole gegenüberliegenden Windungen aus dem Magnetfelde nach und nach austreten. Verläßt die letzte Windung das magnetische Feld, dann ist die resultierende elektromotorische Kraft Null, vorausgesetzt, daß der andere Spulenteil nicht bereits unter der Wirkung des Südpoles ist.

Es können Anordnungen geschaffen werden, bei welchen die Spulenbreite größer als die Polbreite ist und bei welchen die resultierende elektromotorische Kraft bereits Null ist, während noch Windungen im magnetischen Felde sich befinden. Man muß in solchen Fällen nur die Spulenbreite größer oder gleich der Polteilung wählen. In diesem Falle ist die elektromotorische Kraft Null, wenn die Symmetrielinie der Bewicklung mit der neutralen Zone zusammenfällt, denn in dieser Lage sind gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kräfte induziert, welche keine resultierende Spannung ergeben können.

Wir ersehen aus den behandelten drei Fällen, daß das Spannungsdiagramm bei der Ringwicklung zwei Formen annehmen kann. Entweder ist sie spitzig, welchem Falle eine Wicklung entspricht, bei der die Spulenbreite gleich oder kleiner als die Polbreite ist, oder ist sie abgeflacht, in diesem Falle ist die Spulenbreite größer als die Polbreite.

Alle behandelten Anordnungen geben nur annähernde Werte für die resultierende Spannung, denn bei allen nahmen wir die magnetischen Felder als scharf begrenzt an. Dies ist aber in Wirklichkeit nie der Fall. Der kontinuierliche Übergang in der Verteilung der Kraftlinien gleicht die eckigen

Übergänge in den Spannungsdiagrammen aus, die Spannungslinien werden aus gebrochenen Linien kontinuierliche Kurven, die mehr oder weniger der Sinuskurve ähneln. Die Kurvenform hängt von den Pol- und Spulendimensionen ab, es ist aber auch nicht unbedingt nötig, Sinusströme zu erzeugen, da in den verschiedenen Anwendungsfällen verschiedene Kurvenformen anzustreben sind.

So sind z. B. flache Kurven für Bogenlichterzeugung günstiger, da bei diesen die Lichtausbeute besser wird. Dagegen eignen sich die spitzen Kurven für Motoren- und Transformatorenbetrieb, da die Eisenverluste hierdurch kleiner werden. Spitze Kurven erheischen eine sorgfältigere Isolation, da die maximalen Spannungswerte größer sind. Auch die Resonanzerscheinung wird durch die Kurvenform beeinflußt. Diese Umstände müssen in den gegebenen Fällen in Betracht gezogen werden und die Einrichtungen dementsprechend getroffen werden.

### Wicklungen der Wechselstromgeneratoren.

Bei der Ausführung der Wicklung eines Wechselstromgenerators muß man darauf achten, daß sich die in den verschiedenen Windungen induzierten elektromotorischen Kräfte summieren. Besitzt die Maschine Wechselfpole und ist die Spulenzahl gleich mit der Polzahl, dann sind die aufeinander folgenden Spulen in entgegengesetztem Sinne zu verbinden. Man kann die Wicklung in diesem Falle auch so durchführen, daß man entgegengesetzt gewickelte Spulen verwendet und diese in gleichem Sinne nacheinander schaltet. Bei Maschinen, deren Spulenzahl die Hälfte der Polzahl ist, verwendet man gleichgewickelte Spulen und verbindet diese im gleichen Sinne miteinander.

Jede Gleichstromwicklung kann als Wechselstromwicklung benutzt werden. In diesem Falle unterscheidet man Wellen- und Schleifenwicklung (Fig. 103 und 104). Bei dieser schematischen Darstellung sind die Magnetpole auf die Armaturoberfläche projiziert und die Armatur samt ihren Windungen in eine Ebene ausgebreitet.  $N S N$  sind die Polprojektionen, die mit Pfeilen versehenen Linien die Leiter in den Nuten, die gebrochenen

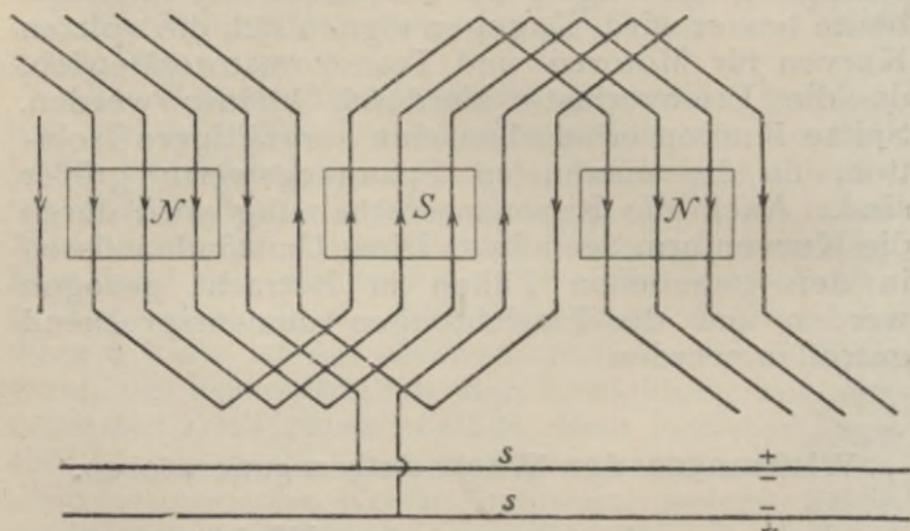


Fig. 103.

Linien ober und unter den Polen aber die Verbindungsteile der Leiter. Die Pfeile deuten an, in welcher Richtung die induzierte elektromotorische Kraft wirkt. Die Schleifringe sind ebenfalls in die Ebene ausgebreitet, sie erscheinen in der Figur als die parallelen Linien  $s s$ . Anfang und Ende der Wicklung sind mit diesen Schleifringen verbunden, verfolgt man die Richtungen der elektromotorischen Kräfte, so ersieht man, daß sich diese summieren und die resultierende elektromotorische Kraft, die zwischen den Schleifringen herrscht, ergeben.

Führt man alle Windungen in Wellenform, als ein zusammenhängendes Ganzes, dann erhält man die Schlangenumwicklung, welche aus Fig. 105 ersichtlich ist. Diese hat den Vorteil, daß die Leiter nirgends kreuzen, welcher Umstand besonders bei der Erzeugung von großen Spannungen wichtig ist.

Besitzt eine Ringwicklung Spulen, deren Anzahl gleich mit der Polzahl ist, dann sind diese nach Fig. 106 zusammen zu schalten.

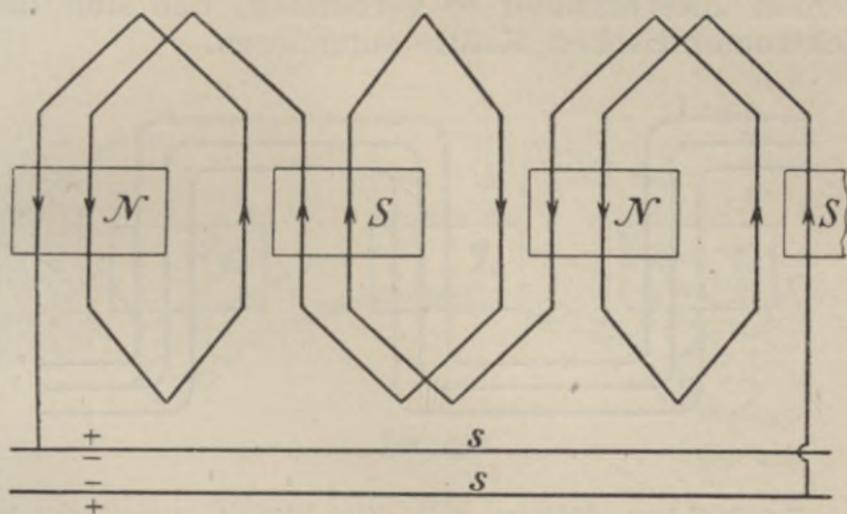


Fig. 104.

Die Verbindung der Leiter bei Stabwicklung erfolgt entweder mit Gittern oder mit Gabeln. Die ersteren liegen auf der Mantelfläche der Armatur, die letzteren befinden sich in einer Ebene, die auf die Achse der Maschine senkrecht steht.

Die Wechselstromgeneratoren werden zumeist als Innenpolmaschinen gebaut. Wir wollen daher diese ausführlicher behandeln.

Man unterscheidet in diesem Falle Polanker und Nutenanker. Bei den ersteren besitzt die Armatur Polstücke, die die Armaturbewicklung tragen. Die Bewicklung besteht aus Spulen, die

entweder entgegengesetzt oder gleich gewickelt sind. Im ersteren Falle erfolgt die Verbindung der aufeinander folgenden Spulen in gleichem, in letzterem Falle dagegen in entgegengesetztem Sinne. Anfang und Ende der Wicklung führen zu feststehenden Klemmen, von welchen der Strom in den äußeren Stromkreis geleitet wird.

Nutenanker besitzen ebenfalls Spulen, diese liegen aber auf der Armatur gleichmäßig verteilt in entsprechend angeordneten Nuten. Die Spulen werden untereinander so verbunden, daß sich die elektromotorischen Kräfte summieren.

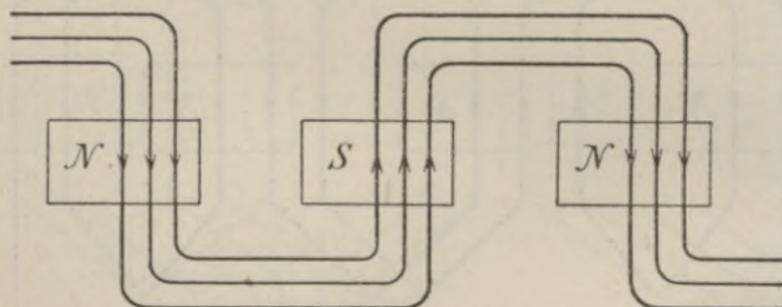


Fig. 105.

In beiden Fällen können die Spulen nacheinander oder parallel geschaltet werden. Auch kann man mehrere parallel geschaltete Gruppen bilden, die dann nacheinander geschaltet werden. Die Größe der resultierenden Spannung hängt von der Zahl der nacheinander geschalteten Spulen oder Spulengruppen ab, während die Zahl der parallel geschalteten Spulen auf den Wert der Stromstärke von Einfluß ist.

Die Nuten sind geschlossen, halb offen oder ganz offen. In der Praxis sind die halb offenen Nuten am verbreitetsten, bei diesen kommen die Nutenköpfe so nahe aneinander, daß zwischen ihnen nur der Raum zum Einlegen der Drähte freibleibt.

In Fig. 107 ist eine Nutenwicklung für Einphasenstrom dargestellt. Vor jedem Pole sind drei Nuten, von welchen aber nur zwei bewickelt sind, während die dritte frei bleibt. Kommt das rotierende Magnetrad in eine Lage, bei welcher die Symmetrieachse der Pole den freigebliebenen Nuten gegenübersteht, dann ist die induzierte elektromotorische Kraft in allen Spulen Null. Bei weiterer Verdrehung wächst die elektromotorische Kraft an, sie erreicht ihr Maximum, sobald die frei-

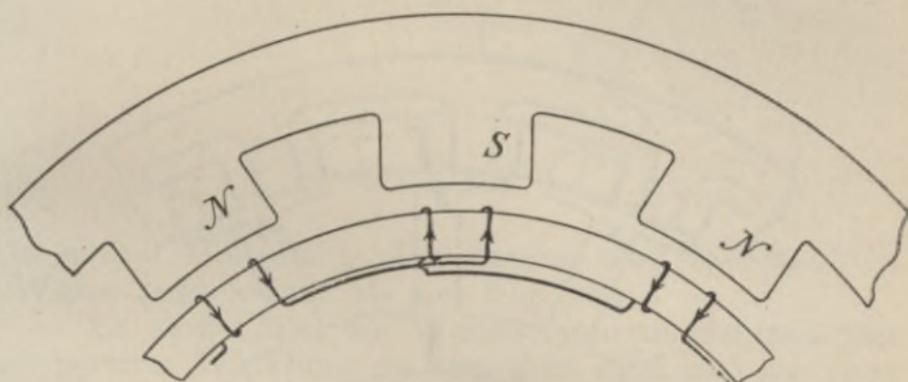


Fig. 106.

gebliebene Nute mit der neutralen Achse der Magnetpole zusammenfällt.

Wir ersehen aus diesem, daß der induzierte Strom Einphasenstrom ist. Eine volle Periode ist beendet, sobald vor einer Spule ein Nord- und ein Südpol vorüber gehen. Der Bogen zwischen zwei Symmetrieachsen aufeinander folgender zweier gleichnamigen Magnetpolen ist daher auf  $360^\circ$  einzuteilen, mit Hilfe dieser Einteilung wird es dann möglich sein, die Lage der Spulen zu ermitteln, wenn die Armatur zur Erzeugung mehrphasiger Ströme dienen soll.

Bei der Erzeugung des zweiphasigen Stromes muß die Armatur mit Nuten versehen werden, von

denen jedes zweite den Symmetrieachsen der Magnetpole gegenüberliegt, die anderen dagegen den Lagen der neutralen Zonen des Magnetsystemes entsprechend verteilt sind. Hierdurch ist erreicht, daß die elektromotorische Kraft in der einen Phase maximal ist, als sie in der zweiten zu Null wird.

Bei dreiphasigem Wechselstrom sind die Phasenwinkel der drei Phasen  $120^\circ$  oder eine Drittelperiode. Dementsprechend muß die Entfernung zwischen zwei aufeinander folgenden, gleichnamigen Magnet-

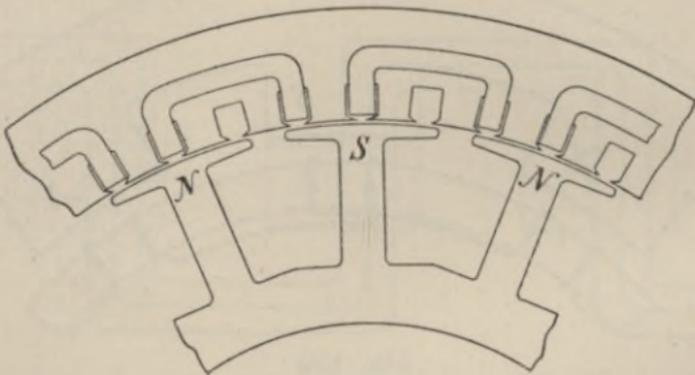


Fig. 107.

polen auf drei gleiche Teile geteilt werden. Die Spulen der drei Phasen sind in diesen drei Teilen untergebracht. Diese Wicklung ist aus der Fig. 108 ersichtlich. Wir ersehen daraus, daß bei dreiphasigem Stromerzeuger drei Spulensysteme entstehen, deren Stirnverbindungen übereinander liegen.

Man kann eine Dreiphasenwicklung auch dadurch herstellen, daß man sogenannte kurze Spulen verwendet. Bei diesen reicht die Stirnverbindung der Spulen nur über  $\frac{2}{3}$  der Polteilung, wie dies auch aus Fig. 109 ersichtlich. Es ist leicht einzusehen, daß die in den drei Spulen induzierten

elektromotorischen Kräfte eine Phasendifferenz von  $120^\circ$  haben.

Auch Zweiphasenstrom kann mit kurzen Spulen erzeugt werden. In diesem Falle liegen die Nuten

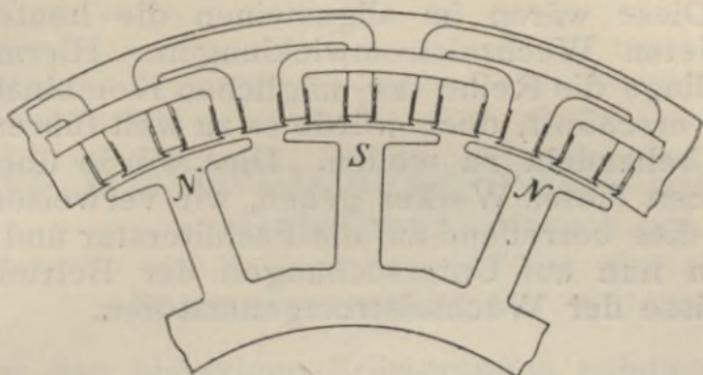


Fig. 108.

in halber Polteilung. Die Spulen sind in derselben Weise angeordnet als bei Fig. 109.

Es sind Fälle, wo Wechselstrommaschinen mit doppelter Wicklung zu versehen sind und aus dem

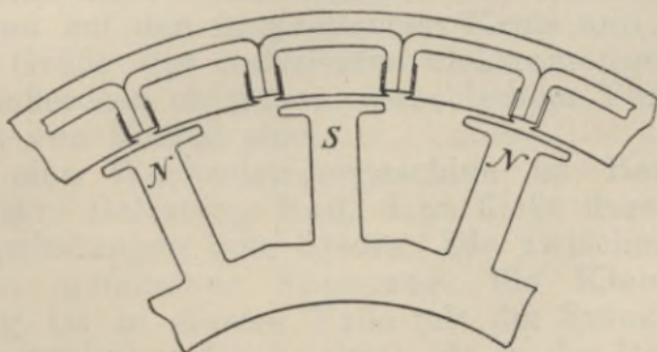


Fig. 109.

Grunde, daß man den Wechselstrom zu verschiedenen Zwecken benutzen kann. Ein Fall ist z. B. der, in welchem man denselben Generator zu Arbeitsleistungen im Maschinenhaus und in großer Ent-

fernung verwenden will. Man erzeugt dann durch eine Wicklung für die Fernleitung hochgespannten Strom, während zur Deckung des lokalen Stromkonsums eine zweite Wicklung verwendet wird, die eine entsprechende Spannung liefert.

Diese wären im allgemeinen die heute verwendeten Wechselstromwicklungen. Hiermit ist allerdings die Reihe der möglichen Kombinationen nicht erschöpft, doch würde es zu weit führen, alle hier behandeln zu wollen. Dies würde über den Rahmen dieses Werkes gehen, wir verweisen deshalb dies betreffend auf die Fachliteratur und übergehen nun auf Untersuchungen der Betriebsverhältnisse der Wechselstromgeneratoren.

## IV. Kapitel.

# Der Wechselstromgenerator im Betriebe.

### Spannungsverhältnisse.

Bei den bisherigen Erörterungen nahmen wir stillschweigend an, daß durch die Wicklung der Armatur kein Strom fließt und untersuchten unter dieser Voraussetzung die Bedingungen, welche auf den Wert und auf den Verlauf der induzierten elektromotorischen Kraft Einfluß haben. Fließt aber durch die Armaturwindungen ein Strom, dann verändern sich die Verhältnisse, der Strom hat Rückwirkungen auf den magnetischen Kreis und somit auf die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft, außerdem entstehen verschiedene Verluste, die auch von Einfluß sind.

Ist eine Wechselstrommaschine im Betriebe und ist ihre Belastung Null, dann fließt durch die Armaturwindungen kein Strom. Die zwischen den Klemmen gemessene Spannung, die Klemmenspannung ist in diesem Falle mit der induzierten elektromotorischen Kraft gleich, da in der Bewicklung keine Spannungsverluste auftreten.

Wird der äußere Widerstand des Stromkreises verringert, d. h. wird der äußere Stromkreis geschlossen, dann entsteht eine elektrische Strömung, die Intensität des Stromes nimmt einen Wert an,

der von der Größe des Ohmschen Widerstandes, von der Selbstinduktion und der Kapazität abhängt. Dieser Strom verursacht im Generator Spannungsverluste, die Folge wird sein, daß die Klemmenspannung von der induzierten elektromotorischen Kraft verschieden wird. Außerdem entsteht zwischen diesen beiden Spannungen ein Phasenunterschied.

Bei unseren nachfolgenden Untersuchungen nehmen wir an, daß die Veränderung der Wechselgrößen nach dem Sinusgesetze erfolgt und daß die Selbstinduktion der Armatur konstant ist.

Die Selbstinduktion der Wechselstrommaschine ist nur annähernd konstant. Ihr Wert hängt von der Intensität des magnetischen Feldes, von der relativen Lage der Armaturspulen im Magnetfelde, von der Windungszahl der Bewicklung und von der Periodenzahl des Wechselstromes ab. Der Selbstinduktionskoeffizient kann gemessen werden, indem man in die normal erregte Maschine einen Wechselstrom von der normalen Stärke und von jener Periodenzahl sendet, die dem durch den Generator erzeugten Strome entspricht. Man mißt die angewandte Spannung  $e$  an den Klemmen der Maschine, die Stromstärke  $i$  und den Ohmschen Widerstand  $r$ .

Beträgt die Periodenzahl des zugeführten Wechselstromes  $\omega$ , dann wird (siehe Band I)

$$i = \frac{e}{\sqrt{r^2 + l^2 \omega^2}}$$

wo

$$\omega = 2 \pi \nu.$$

Aus dieser Gleichung wird

$$l = \frac{\sqrt{e^2 - i^2 r^2}}{i 2 \pi \nu}.$$

Die Klemmenspannung ist die vektorielle Differenz der elektromotorischen Kraft und der in der Armatur entstehenden Spannungsverluste. Die letzteren ergeben sich aus dem induktiven und dem Ohmschen Spannungsabfall.

Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Spannungen ist aus dem Vektordiagramm, Fig. 110, ersichtlich.

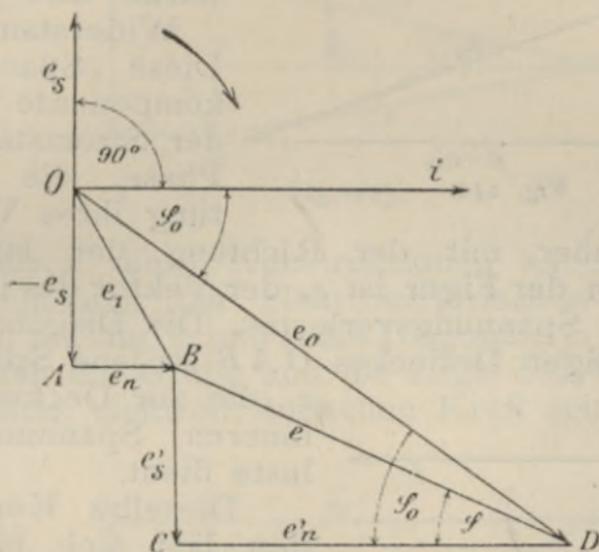


Fig. 110.

Sei der Vektor der Stromstärke  $i$ . Dieser Strom fließt durch den Armaturwindungen und erzeugt ein magnetisches Feld. Das magnetische Feld ist ein Wechselfeld, es wirkt auf die Bewicklung zurück und hierdurch entsteht die Erscheinung der Selbstinduktion. Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion bleibt in der Phase hinter der Stromstärke um  $90^\circ$  zurück. Ihr Vektor ist  $e_s$ . Die elektromotorische Kraft muß den inneren und den äußeren Ohmschen Spannungsverlust, sowie die Gegenkraft der inneren und der äußeren Selbst-





Ist im äußeren Stromkreis keine Selbstinduktion vorhanden, dann wird  $e_s' = 0$  und die Klemmspannung mit dem äußeren Ohmschen Spannungsverlust gleich sein:

$$e = e_n'.$$

Die Phasenverhältnisse sind aus Fig. 111 zu ersehen.  $e_1$  bleibt in allen Fällen konstant, wenn wir annehmen, daß der Selbstinduktionskoeffizient und die Stromstärke konstant bleiben. Hierdurch werden nur die Phasenverschiebungswinkel zwischen

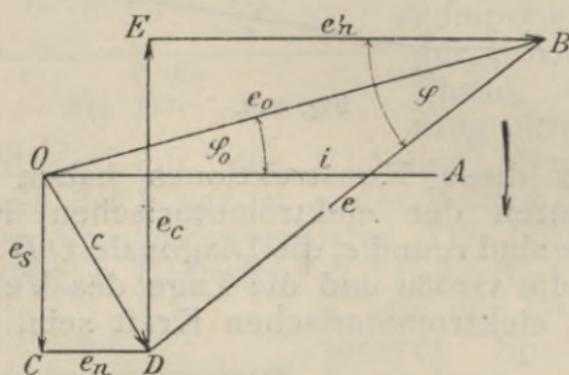


Fig. 115.

den Spannungen und der Stromstärke beeinflusst, auch wird die Klemmspannung veränderlich sein.

Ist im äußeren Stromkreise nur Selbstinduktion vorhanden, dann wird  $e_n' = 0$ , und die Klemmspannung ist mit dem induktiven Spannungsabfall im äußeren Stromkreise gleich (Fig. 112):

$$e = e_s'.$$

Die elektromotorische Kraft erreicht ihren maximalen Phasenverschiebungswinkel zur Stromstärke.

Wesentlich anders sind die Verhältnisse, wenn im äußeren Stromkreise Ohmscher Widerstand und Kapazität vorhanden sind. Seien die Selbstinduktion



Klemmenspannung, die mit dem Vektor der Stromstärke den Phasenwinkel  $\varphi$  bildet. Die elektromotorische Kraft  $e_0$  bildet den Phasenwinkel  $\varphi_0$  mit der Stromstärke, wobei der Fig. 110 entgegengesetzt  $\varphi_0 < \varphi$  ist.

Alle diese Verhältnisse lassen sich in einem Diagramm vereinigt darstellen. In Fig. 116 ist der Vektor der Stromstärke  $i$ , der um den Punkt  $O$  rotiert.  $OBC$  ist das Spannungsdreieck, welches die Spannungsverluste im Generator darstellt. Schlägt man nun mit der konstanten elektromotorischen Kraft  $e_0$  im geeigneten Maßstabe zwei Kreise, deren Mittelpunkte in  $O$  und  $B$  liegen, dann können mit Hilfe dieser Kreise nicht nur die Phasenverhältnisse dargestellt, sondern auch die Spannungsabfälle der Klemmenspannung bei verschiedenen Phasenverschiebungen im äußeren Stromkreise bestimmt werden.

Ist z. B. im äußeren Stromkreise eine Phasenverschiebung vorhanden, bei welcher die Spannung um den Winkel  $\varphi$  der Stromstärke voreilt, dann zieht man aus  $O$  eine Gerade, die mit  $i$  den Winkel  $\varphi$  bildet. Mit dieser Geraden aus  $B$  eine Parallele gezogen, schneidet letztere die Kreise in den Punkten  $D$  und  $F$ . Verbinden wir nun  $D$  mit  $O$  und vergleichen das so entstandene Diagramm mit der Fig. 110, so ersehen wir, daß

$$OB = e_1, \quad BD = e \quad \text{und} \quad OD = e_0.$$

Der Spannungsabfall der Klemmenspannung von dem Spannungswert bei Leerlauf ist die algebraische Differenz der elektromotorischen Kraft und der vorhandenen Spannung  $e$ . Nachdem  $BF = e_0$  und  $BD = e$ , wird bei dieser Belastung der Spannungsabfall

$$\Delta = BF - BD = e_0 - e$$

sein, in dem Maßstabe, in welchem die elektromotorische Kraft aufgetragen ist.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist der Spannungsabfall um so größer, je größer  $\varphi$  ist. Bei  $\varphi = 90^\circ$  wird  $\Delta$  maximal. Bei kleinerem  $\varphi$  wird auch  $\Delta$  kleiner, ist  $\varphi$  Null, dann entspricht dieser Fall dem in Fig. III dargestellten. In diesem Falle ist die Belastung der Maschine induktionslos.

Ist im äußeren Stromkreise Kapazität und Ohmscher Widerstand vorhanden, arbeitet z. B. die Maschine auf ein ausgedehntes Kabelnetz mit Glühlichtbetrieb, dann wird  $\varphi$  ein Phasenverspätungswinkel, die Klemmenspannung bleibt in der Phase hinter der Stromstärke. Während bei  $\varphi = 0$  noch ein, wenn auch kleiner Spannungsabfall konstatierbar war, kann  $\varphi$  als Phasenverspätungswinkel einen Wert annehmen, bei welchem die Klemmenspannung bei Leerlauf und Belastung konstant bleibt. Diesem Winkel entspricht Punkt  $D_1$ , bei welchem die elektromotorische Kraft mit der Klemmenspannung gleich ist, da  $OD_1B$  ein gleichschenkliges Dreieck darstellt. Ist die Kapazität noch größer, d. h. wird  $\varphi$  größer, dann tritt die auffällige Erscheinung ein, daß bei Belastung die Klemmenspannung größer ist als bei Leerlauf oder mit anderen Worten, die Klemmenspannung wird bei Belastung größer als die elektromotorische Kraft. Das Wachsen der Klemmenspannung mit der Belastung tritt in dem Fall ein, wenn in den Stromkreis übererregte Synchronmotoren eingeschaltet sind. Diese verhalten sich als Kapazitäten, da sie eine Voreilung der Stromstärke zur Spannung verursachen.

### Ankerrückwirkung.

Die Armatur mit ihrer Bewicklung bildet einen Elektromagneten, dessen Feldstärke in derselben Weise sich verändert, wie der erregende Armaturstrom. Dieser Strom erzeugt also ein Wechsel-

feld, das auf das vorhandene, durch die Elektromagnete erzeugte Feld zurückwirkt. Diese Wirkung des Armaturstromes nennt man Ankerrückwirkung.

Betrachten wir z. B. die Induktionsverhältnisse bei der Anordnung in Fig. 85, so ersehen wir, daß die induzierte elektromotorische Kraft maximal ist, wenn die Symmetrieachse der Spule mit der neutralen Achse des Magneten zusammenfällt. Ist im Stromkreise keine Phasenverschiebung, dann erreicht die Stromstärke mit der elektromotorischen Kraft gleichzeitig ihre Null- und Maximalwerte, die Folge wird sein, daß der Armaturstrom das Feld des vorhergehenden Magnetpoles verstärkt und jenes des nachfolgenden schwächt. Da die Verstärkung und die Schwächung der magnetischen Felder gleichmäßig erfolgt, ist die Ankerrückwirkung in diesem Falle auf das magnetische Feld nur verzerrend, aber nicht schwächend.

Bei phasenverspätetem Strome erreicht der Strom seinen Maximalwert, nachdem die Windung bereits in das nachfolgende Feld eingetreten ist. Dadurch kommt die schwächende Wirkung des Armaturstromes mehr als die stärkende zur Geltung, weshalb das magnetische Feld geschwächt wird.

Bei voreilendem Strome sind die Verhältnisse entgegengesetzt. In diesem Falle erreicht der Strom früher seinen Maximalwert als die elektromotorische Kraft, d. h. die Windung ist noch unter dem Einflusse des vorhergehenden Poles, weshalb die stärkende Wirkung die schwächende überwiegt. Phasenvoreilender Strom stärkt bei Wechselstromgeneratoren das magnetische Feld.

Diese Verhältnisse lassen sich in Vektordiagrammen übersichtlich darstellen.

In Fig. 117 ist  $e_0$  der Vektor der elektromotorischen Kraft. Die Stromstärke ist phasenverspätet, ihr Vektor  $i$  bildet also mit  $e_0$  den Winkel  $\varphi$ . Die Drehrichtung ist durch den Pfeil gegeben. Die

magnetischen Felder sind auch Wechselgrößen, sie lassen sich daher auch mit Hilfe von Vektoren darstellen. Das Armaturfeld ist wechselnd, da auch der Armaturstrom als Erregerstrom, Wechselstrom ist. Das induzierende Feld ist zwar konstant, doch wird es mit mechanischer Kraft mit konstanter Geschwindigkeit getrieben, es verhält sich also zur Armatur als ein Wechselfeld, dessen Periode mit den Perioden der anderen Wechselgrößen übereinstimmt.

$e_o$  wird durch ein magnetisches Feld induziert, dessen Vektor in der Phase um eine Viertelperiode, also um  $90^\circ$  voreilt. Dieser Vektor ist bei der angenommenen Lage des Vektors  $e_o$  die Gerade  $OB = m_o$ .

Das magnetische Feld der Armatur ist mit dem Armaturstrom in Phase, sein Vektor wird also mit dem des letzteren zusammenfallen.  $OA = m_a$  ist der Vektor des Armaturfeldes, dieser bildet mit  $m_o$  den Phasenwinkel  $90^\circ + \varphi$ .

Das resultierende Magnetfeld ergibt sich aus diesen beiden Komponentefeldern, wenn man beide unter den entsprechenden Phasenwinkeln geometrisch summiert. Der resultierende Vektor ist  $OC = m$ , der zu  $m_o$  phasenverspätet ist.

Für die Induktion sind nur jene Kraftlinien wirksam, die in die Richtung von  $m_o$  fallen, bei  $m$  darf man also nur jene Komponente in Betracht ziehen, die dieser Bedingung entspricht. Diese Komponente ergibt sich als  $OD$  und wie wir sehen, ist  $OD < m_o$ .

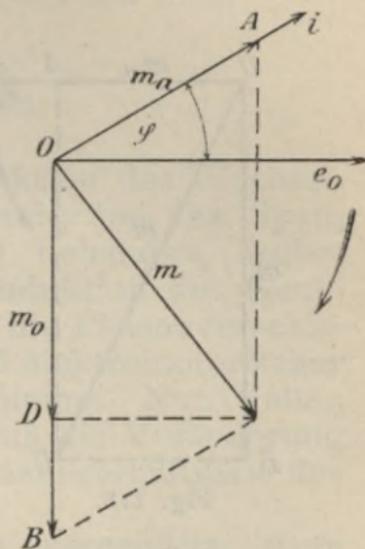


Fig. 117.

Die Ankerrückwirkung hat also bei phasenverspätetem Strome eine entmagnetisierende Wirkung, die induzierte elektromotorische Kraft wird kleiner, will man sie auf den ursprünglichen Wert bringen, dann muß man das induzierende magnetische Feld verstärken.

In Fig. 118 ist die Ankerrückwirkung für jenen Fall graphisch dargestellt, in welchem zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft keine

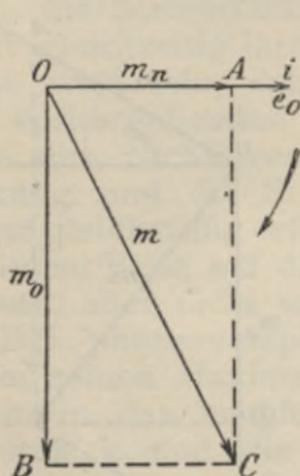


Fig. 118.

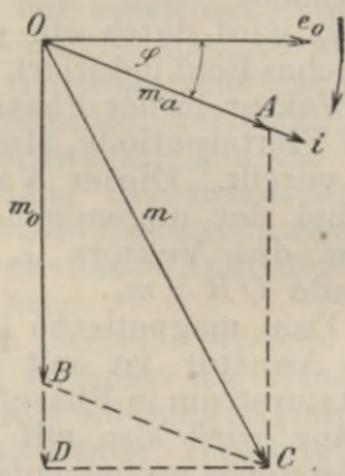


Fig. 119.

Phasenverschiebung vorhanden ist. In diesem Falle liegt  $m_a$  mit dem Vektor  $e_0$  in derselben Geraden und  $m_0$  ist auf  $m_n$  senkrecht. Das resultierende Magnetfeld  $m$  ergibt sich als die Diagonale des Parallelogrammes  $OACB$ , ihre Komponente in der Richtung von  $m_0$  ist mit letzterer gleich groß, die Ankerrückwirkung verursacht demnach in diesem Falle nur eine Verzerrung des vorhandenen magnetischen Feldes.

Ist die Stromstärke gegen die elektromotorische Kraft phasenverfrüht (Fig. 119), dann äußert sich die Ankerrückwirkung als eine Verstärkung des induzierenden magnetischen Feldes.

Sei  $m_o$  der Vektor dieses Feldes und  $m_a$  jener der Armaturrückwirkung entsprechende. Nun wird die Resultierende  $OC = m$ , ihre Komponente in der Richtung von  $m_o$  ist größer als letztere. Die Folge wird sein, daß bei konstanter Phasenvoreilung mit wachsendem Armaturstrom, also mit wachsender Belastung die elektromotorische Kraft größer wird, so daß, wenn man die ursprüngliche elektromotorische Kraft aufrecht erhalten will, die Intensität des Erregerstromes verringert werden muß.

### Selbstinduktion.

Den Einfluß der Selbstinduktion des Wechselstromgenerators haben wir bereits bei den Spannungsverhältnissen (Seite 163) behandelt, wobei wir annahmen, daß die Selbstinduktion des Generators konstant bleibt und daß die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft verschiedene Werte annimmt. Nun wollen wir untersuchen, welchen Einfluß die Veränderung der Selbstinduktion auf die Betriebsverhältnisse des Generators ausübt.

Wird die Selbstinduktion vergrößert, dann vergrößert sich der scheinbare Widerstand des Wechselstromkreises, die Stromstärke wird verringert und der Phasenverspätungswinkel zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft nimmt zu. Hierdurch wird aber die schwächende Wirkung des Armaturstromes auf das induzierende Feld größer, d. h. die Ankerrückwirkung demagnetisiert in größerem Maße das vorhandene Feld.

Große Selbstinduktion des Ankers verursacht großen Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollbelastung. Will man diesen Spannungsverlust verringern, dann muß man die Selbstinduktion des Ankers in entsprechender Weise verändern.

Der Spannungsabfall im Generator ist eine resultierende Größe, deren Komponenten der innere Ohmsche und induktive Spannungsverlust sind. Der Ohmsche Spannungsverlust läßt sich nur durch Vergrößerung der Drahtdimensionen verringern, dies ist aber nicht nötig, da der Ohmsche Widerstand elektrischer Maschinen ohnehin sehr klein ist.

Die Selbstinduktion der Armatur hängt von dem Quadrate der Windungszahl, von der Zahl der umschlossenen Kraftlinien und von jener Geschwindigkeit ab, mit welcher diese Kraftlinien verschwinden. Für letztere ist die Periodenzahl des Wechselstromes maßgebend.

Will man die Selbstinduktion verringern, dann muß man diese Faktoren verändern. Man kann allerdings unter eine gewisse Grenze nicht gehen, doch ist dies auch unnötig. Bei sehr kleiner Selbstinduktion wären die Maschinen zu teuer, außerdem sind Fälle, wo eine gewisse Selbstinduktion der Maschine nur von Vorteil ist.

Die Selbstinduktion der Armatur wird geringer, wenn wir schwache Felder und wenig Armaturwindungen benutzen. Auch läßt sich etwas durch Verringerung der Periodenzahl erreichen. Zu niedrige Periodenzahlen kann man aber nicht anwenden, denn dies würde die Verwendung des Wechselstromes sehr beschränken, unter 40 Perioden könnte man den Wechselstrom zu Beleuchtungszwecken nicht mehr benutzen. Was die schwächeren Felder und die verringerte Zahl der Armaturwindungen betrifft, setzt hier der Kostenpunkt der Maschine eine Grenze. Man müßte die Maschinen groß bauen, um bei den normalen Umdrehungszahlen die gewünschte Spannung erzeugen zu können.

Um den Spannungsabfall beim Wechselstromgenerator kompensieren zu können, verändert man die Erregerstromstärke. Dies geschieht dadurch,

daß man entweder durch Ausschaltung vorgeschalteter Widerstände den Widerstand des Erregerstromkreises verringert oder daß man die Spannung des Erregerstromes durch Veränderung der Erregung der Erregermaschine vergrößert.

Eine andere Methode besteht darin, daß man einen Teil des erzeugten Wechselstromes gleichrichtet und mit dem Erregerstrom zusammen in die Magnetbewicklung sendet. Dies hat den Vorteil, daß die Regulierung der Spannung selbsttätig erfolgt. Wird nämlich die Erregung entsprechend gewählt, dann kann man erreichen, daß die Spannung an den Klemmen der Maschine in demselben Maße erhöht wird, als sie infolge steigender Belastung durch die Armaturrückwirkung und die Selbstinduktion abnimmt. Solche Maschinen sind die Gleichspannungs- oder Compoundmaschinen. Bei diesen ist die Klemmenspannung bei verschiedenen Belastungen nahezu konstant.

### Charakteristische Kurven der Wechselstrommaschinen.

Die Betriebsverhältnisse der Wechselstrommaschine lassen sich am besten überblicken, wenn man die Veränderungen der einzelnen vorkommenden Wechselgrößen graphisch darstellt. In folgendem wollen wir daher kurz einige wichtige Betriebskurven des Wechselstromgenerators beschreiben.

Die Leerlaufcharakteristik gibt die Abhängigkeit der Leerlaufspannung, also der elektromotorischen Kraft, vom Erregerstrom bei konstanter Tourenzahl. Diese Kurve (Fig. 120) geht vom Nullpunkte der Ordinatenachse aus und verläuft ähnlich der Magnetisierungskurve. Auf die Abscissenachse wird die Erregerstromstärke, auf die Ordinatenachse

die induzierte elektromotorische Kraft aufgetragen. Diese Kurve nähert sich asymptotisch einer wagrechten Geraden.

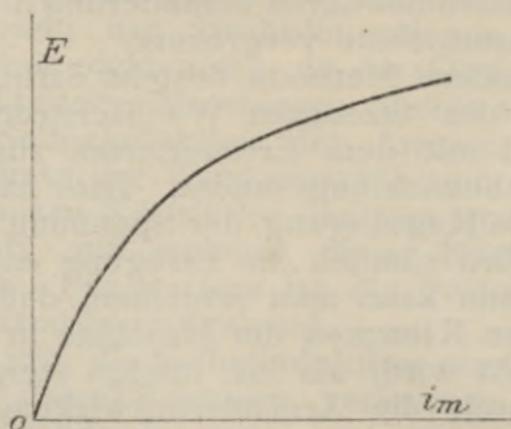


Fig. 120.

Man kann auch die Erregerkurven für konstante Stromstärken im äußeren Stromkreis aufnehmen. Diese Kurven geben also die Abhängig-

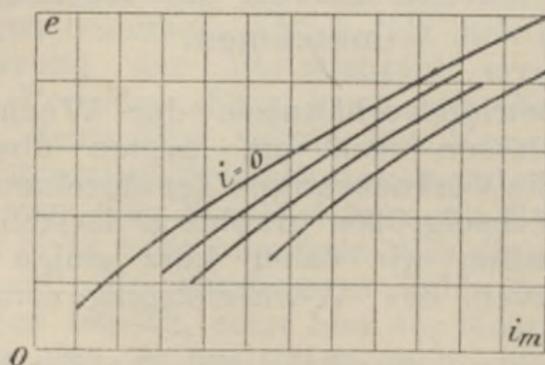


Fig. 121.

keit der Klemmenspannung von der Erregung bei konstanter Tourenzahl und konstantem Belastungsstrom. In Fig. 121 sind vier solche Kurven dargestellt, bei der obersten ist die Belastungsstrom-

stärke Null, die anderen Kurven beziehen sich für Belastungen von verschiedenen Stromstärken im

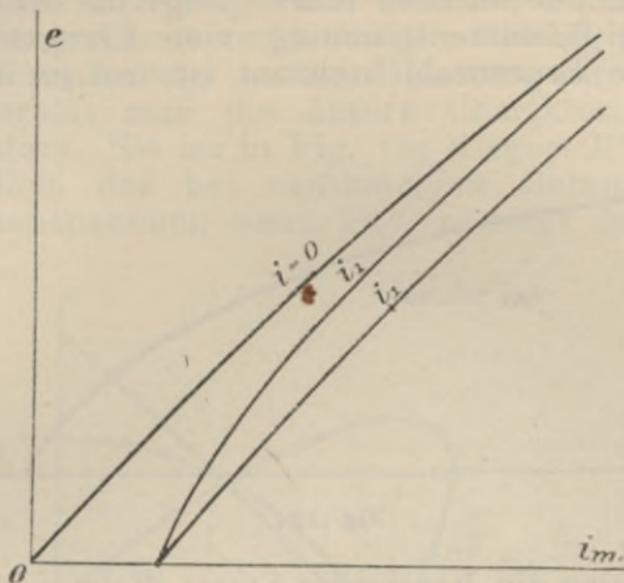


Fig. 122.

äußeren Stromkreise, und zwar bezieht sich die unterste Kurve auf die größte Belastung.

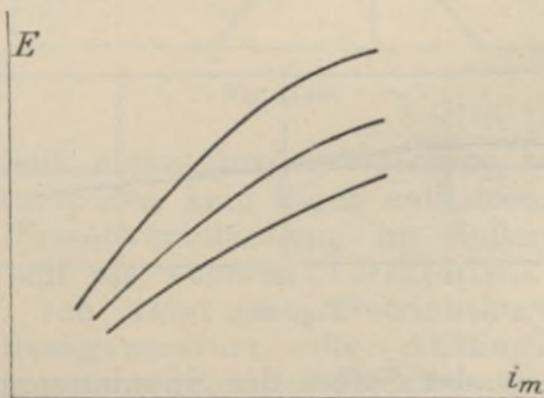


Fig. 123.

Die Phasenverschiebung hat auch Einfluß auf den Verlauf der Betriebskurven. In Fig. 122 sind

drei Kurven dargestellt, deren oberste die Leerlaufscharakteristik eines Wechselstromgenerators bedeutet. Die mittlere Kurve zeigt die Abhängigkeit der Klemmenspannung vom Erregerstrom, wenn die Tourenzahl konstant ist und im äußeren

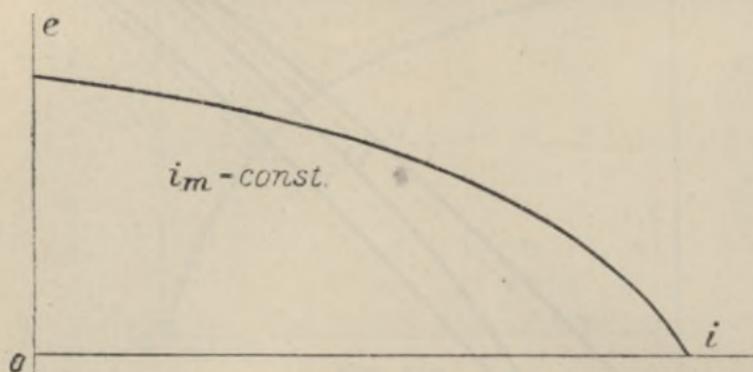


Fig. 124.

Stromkreise ein konstanter Strom fließt, wobei die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung Null beträgt. Die unterste Kurve bezieht sich auf dieselbe Belastungsstromstärke, doch ist der Leistungsfaktor im äußeren Stromkreise  $\cos \varphi < 1$ ,

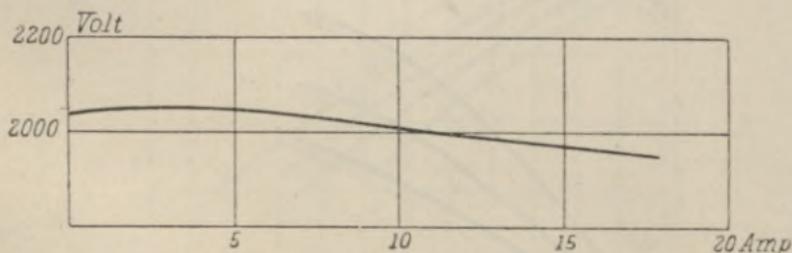


Fig. 125.

und zwar ist der Strom der Spannung gegenüber phasenverspätet.

Wenn man die Leerlaufscharakteristiken für verschiedene Tourenzahlen bestimmt, erhält man das Diagramm Fig. 123. Je größer die Tourenzahl,

um so höher liegt die Leerlaufcharakteristik der Wechselstrommaschine.

Ist die Erregung einer Wechselstrommaschine konstant und untersucht man die Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Belastungsstromstärke, dann erhält man die äußere Charakteristik des Generators. Sie ist in Fig. 124 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß bei zunehmender Belastung die Klemmenspannung sinkt. Fig. 125 zeigt die äußere

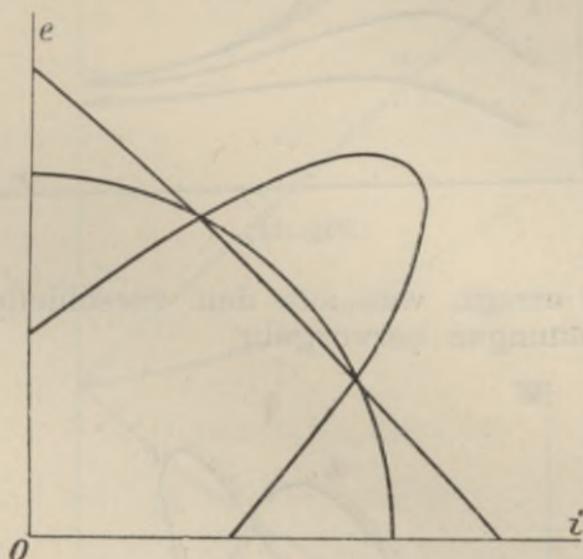


Fig. 126.

Charakteristik einer Mordey-Maschine, bei welcher die Armaturspulen kein Eisen enthalten.

Die Phasenverschiebung im äußeren Stromkreise ist auf die äußere Charakteristik von Einfluß. Fig. 126 zeigt die Betriebskurven eines Wechselstromgenerators, die Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Belastungsstromstärke bei konstanter Tourenzahl, wenn der Strom phasenverspätet, phasengleich, beziehungsweise phasenverfrüht zur Spannung ist. Die oberste Kurve (links bei der Ordinatenachse) bezieht sich auf die

Phasenverspätung, die unterste auf die Phasenver-  
eileung. Die Maschine ist in diesen drei Fällen ver-

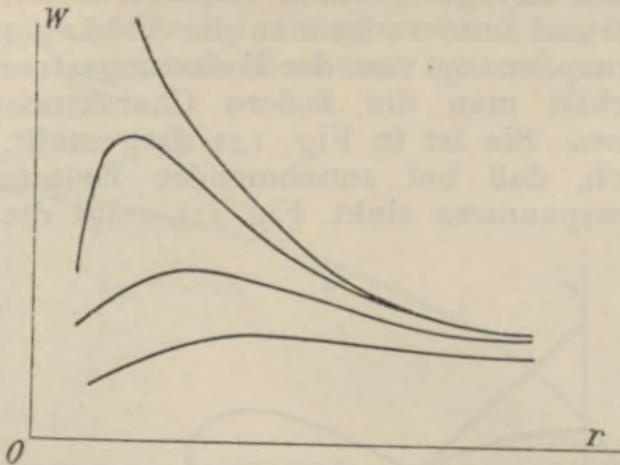


Fig. 127.

schieden erregt, was aus den verschiedenen An-  
fangsspannungen hervorgeht.

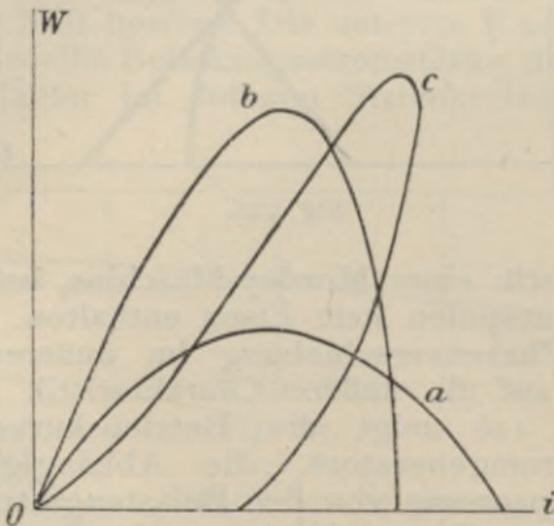


Fig. 128.

Die Leistung des Wechselstromgenerators  
hängt auch vom Selbstinduktionskoeffizienten ab.

Je größer der letztere, um so kleiner wird die Leistung der Maschine sein. In Fig. 127 ist die Abhängigkeit des Arbeitseffektes  $W$  vom äußeren Widerstande  $r$  bei veränderlichem Selbstinduktionskoeffizient dargestellt. Bei der oberen Kurve ist die Selbstinduktion Null, die Maschine leistet die maxi-

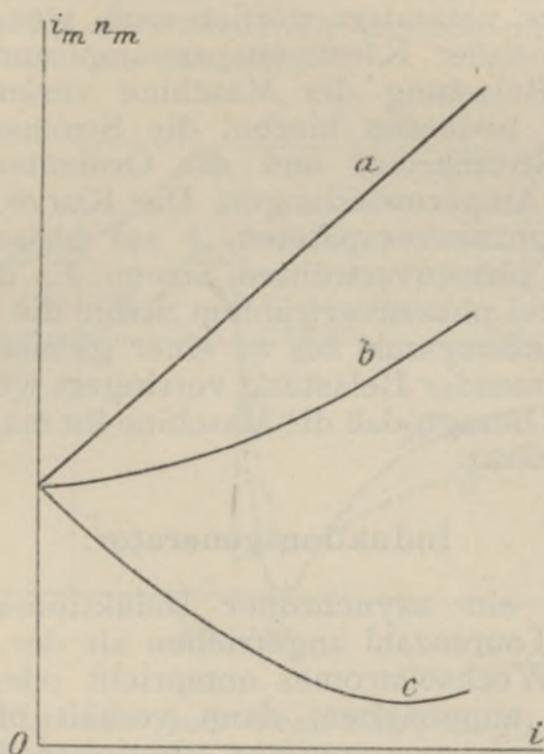


Fig. 129.

male Arbeit, wenn der äußere Widerstand Null wird. Bei anwachsender Selbstinduktion wird die Leistungskurve immer flacher.

Zeichnet man die Leistungskurven in Abhängigkeit der äußeren Stromstärke auf, dann erhält man Fig. 128, bei welcher  $a$  auf phasenverspäteten,  $b$  auf phasengleichen und  $c$  auf phasenverfrühten Strom sich bezieht.

Aus allen diesen Kurven ist die entgegengesetzte Wirkung der Kapazität der Selbstinduktion gegenüber ersichtlich.

In Fig. 129 sind noch drei charakteristische Kurven dargestellt, welche sich auf einen Generator mit konstanter Klemmspannung beziehen. Die Kurven geben an, in welcher Weise die Erregerstromstärke verändert werden muß, wenn man bei gleichbleibender Klemmenspannung und Tourenzahl die Belastung der Maschine verändert. Die Abscissen bedeuten hierbei die Stromstärken im äußeren Stromkreise und die Ordinaten die erregenden Ampèrewindungen. Die Kurve *a* bezieht sich auf phasenverspäteten, *b* auf phasengleichen und *c* auf phasenverfrühten Strom. Es ist ersichtlich, daß bei phasenverfrühtem Strom die erregende Ampèrewindungszahl bis zu einer gewissen Grenze mit zunehmender Belastung verringert werden muß, was soviel besagt, daß die Maschine ihr magnetisches Feld verstärkt.

### Induktionsgenerator.

Wird ein asynchroner Induktionsmotor mit größerer Tourenzahl angetrieben als der Periodenzahl des Wechselstromes entspricht oder wird er rückwärts angetrieben, dann verhält er sich als ein Wechselstromgenerator, beziehungsweise als eine Bremse. In letzterem Falle wird der gesamte Effekt in der Maschine verbraucht, im ersteren sendet der Induktionsgenerator Strom in den Wechselstromkreis.

Die Betriebskurven des Induktionsgenerators sind dieselben als die des Induktionsmotors. Der Induktionsmotor besteht aus zwei bewickelten Teilen, aus dem Ständer oder Lauf und aus dem Läufer. Der Wechselstrom wird gewöhnlich dem Ständer zugeführt, während der Läufer eine in sich

geschlossene oder mit Schleifringen versehene Wicklung hat, in der Wechselströme induziert werden, die mit den induzierenden Strömen zusammen ein Drehmoment ausüben.

Die mehrphasigen Induktionsmotoren sind im folgenden Bande dieses Werkes ausführlich beschrieben, hier sei nur auf ein Diagramm hingewiesen, das die verschiedenen Betriebsphasen der Induktionsmaschine darstellt.

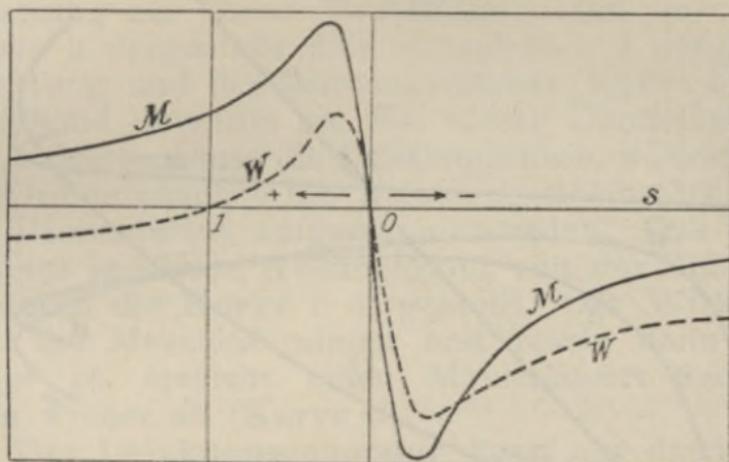


Fig. 130.

In der Fig. 130 sind zwei Kurven abgebildet, die das Drehmoment  $M$  und die Arbeit  $W$  der Induktionsmaschine für verschiedene Schlüpfungen darstellt. Müßte der Induktionsmotor keine mechanischen Hindernisse überwinden, wäre also in den Lagern keine Reibung bei Leerlauf und wäre kein Luftwiderstand vorhanden, dann würde seine Tourenzahl gleich mit der des rotierenden Feldes sein. In diesem Falle, der nie eintreten kann, wäre zwischen der Läuferbewicklung und dem magnetischen Felde keine relative Bewegung vorhanden, weshalb auch im Läufer keine elektromotorische

Kraft induziert werden könnte. Der Läuferstrom ist daher auch Null.

Wird aber der Motor durch Reibungswiderstände oder äußere Nutzwiderstände belastet, dann bleibt der Läufer hinter dem Magnetfelde etwas zurück, wodurch in der Läuferbewicklung eine elektromotorische Kraft induziert wird, die einen Wechselstrom erzeugt. Dieser Strom ruft dann im

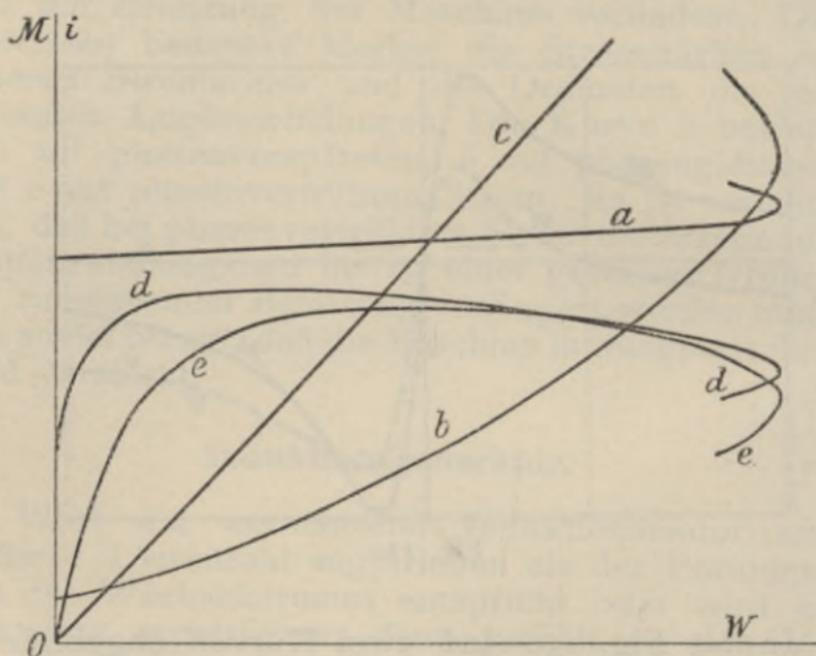


Fig. 131.

Vereine mit dem den Ständer durchfließenden Strome ein Drehmoment hervor.

Das eben beschriebene Zurückbleiben des Läufers hinter dem rotierenden Felde wird Schlüpfung genannt. Bei stillstehendem Motor ist im Augenblicke der Einschaltung die Schlüpfung am größten, bei Synchronismus Null. In Fig. 130 sind auf die Abscissenachse die Schlüpfungswerte  $s$  aufgetragen, wobei bei Stillstand die Schlüpfung

für Eins angenommen ist. Bei Rückwärtsdrehen des Läufers ist die Schlüpfung größer als Eins, über Synchronismus ist sie negativ.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, daß der Induktionsgenerator größeres Drehmoment und größeren Arbeitseffekt besitzt als bei der Verwendung als Motor.

In Fig. 131 sind die Betriebskurven eines Induktionsgenerators abgebildet.

Die Geschwindigkeit nimmt bei zunehmender Belastung zu. Diese Verhältnisse sind durch die Kurve *a* dargestellt. Die Stromkurve *b* steigt der Belastung und des Leistungsfaktors (Kurve *e*) entsprechend ebenfalls an. Bei dieser Darstellung ist die Abscissenachse die Leistungsachse, während auf die Ordinatenachse die Belastungsstromstärke und das Drehmoment aufgetragen werden. Das Drehmoment in seiner Abhängigkeit von der Belastung ist durch die Kurve *c* dargestellt. Der Wirkungsgrad der Maschine nimmt erst rasch, dann langsamer zu, erreicht einen Maximalwert und fällt dann wieder ab (Kurve *d*).

Der Induktionsgenerator kann nur dann elektrische Energie abgeben, wenn er auf einen Stromkreis mit bestimmter Periodenzahl arbeitet, wenn also auf den Stromkreis auch andere Wechselstromerzeuger arbeiten. Die Frequenz des Induktionsgenerators ist nicht bestimmt, derselbe ist immer Wechselstromerzeuger, wenn seine Tourenzahl über dem Synchronismus liegt.

Wird ein Induktionsgenerator mit konstanter Tourenzahl angetrieben, dann nimmt die Periodenzahl mit der Belastung von jenem Werte ab, der dem synchronen Gange entspricht. Wird eine solche Maschine mit einer gewöhnlichen Wechselstrommaschine parallel geschaltet, dann nimmt die erstere eine Tourenzahl über Synchronismus an, die der Belastung entspricht.

Nachdem die elektromotorische Kraft des Induktionsgenerators mit dem Strome nahezu proportional ist, läßt sich derselbe in Wechselstromkreisen als Zusatzmaschine verwenden. Er wird in diesem Falle mit dem anderen Generator in Serie geschaltet und bewirkt, daß die Spannung im Leiterkreise der angewachsenen Belastung entsprechend erhöht wird.

Die spannungsverändernde Wirkung des Induktionsgenerators als Zusatzmaschine hängt von der Tourenzahl ab. Sie kann sowohl zur Spannungserhöhung, als auch zur Spannungserniedrigung dienen, im ersten Fall wird sie übersynchron angetrieben, im letzteren ist die Tourenzahl kleiner, als bei Synchronismus.

Wird im Sekundärkreise eines Induktionsgenerators der Widerstand vergrößert, dann muß bei demselben Drehmoment die Tourenzahl erhöht werden. Die Leistung kann nur bei dieser erhöhten Tourenzahl dieselbe bleiben als zuvor, das Vergrößern des Widerstandes im Sekundärkreise des Induktionsgenerators vermindert also den Wirkungsgrad.

Im übrigen verhält sich der Induktionsgenerator als ein Induktionsmotor. Die Schlüpfung ist negativ zu nehmen, was bedeutet, daß die Maschine übersynchron angetrieben wird. Die Betriebseigenschaften ergeben sich aus denen des asynchronen Wechselstrommotors.

### Wirkungsgrad der Wechselstrommaschinen.

Die in einer Wechselstrommaschine auftretenden Verluste und die Nutzleistung der Maschine summiert, erhält man die Leistung, welche aufgewendet werden muß, um im Stromkreise die gewünschte Nutzleistung erzeugen zu können. Das Verhältnis der Nutzleistung zur gesamten aufge-

wendeten mechanischen Arbeit ist der Wirkungsgrad des Wechselstromgenerators.

Die Verluste sind verschieden und können im folgenden zusammengestellt werden:

1. Verluste im Anker der Maschine.

Hierher gehören: Die Erwärmung der Armaturbewicklung, Hysteresis und Wirbelstromverlust im Ankereisen, Wirbelstromverlust in den Ankerdrähten.

2. Verluste in den Feldmagneten.

Diese setzen sich zusammen aus der Drahtwärme in der Erregerwicklung und aus den Hysteresis- und Wirbelstromverlusten in dem Magnet Eisen.

3. Mechanische Verluste.

Hier fassen wir die auftretenden Reibungsverluste zusammen, als: Reibungsverlust in den Lagern, bei den vorhandenen Schleifkontakten und dem auftretenden Verlust durch den Luftwiderstand.

Die Drahtwärme ist mit dem Quadrate der effektiven Stromstärke und dem Widerstande der Bewicklung proportional. Dasselbe steht für die Feldwicklung. Bei dieser ist das Produkt des Quadrates der Erregerstromstärke mit dem Widerstande des Erregerkreises zu bilden, wodurch man die entstehende Wärmemenge in äquivalenter elektrischer Einheit erhält.

Der Hysteresisverlust ist mit der 1,6 Potenz der magnetischen Induktion proportional, während bei dem Wirbelstromverlust das Quadrat der Induktion in Rechnung zu setzen ist. Auf letztere ist auch die Dicke des verwendeten Eisenbleches von Einfluß.

Der Verlust durch Lagerreibung ist bei konstanter Tourenzahl konstant. Dettmar fand, daß dieser Verlust, sowie auch der Verlust durch Luftwiderstand mit der 1,5 Potenz der Tourenzahl zu-

nimmt. Die Reibungsverluste bei den Schleifkontakten sind zumeist so klein, daß sie zu vernachlässigen sind.

Die elektrischen Maschinen und Apparate besitzen so hohe Nutzeffekte, daß zuweilen sicherer ist, die Verluste für sich zu bestimmen und dann den Nutzeffekt indirekt zu ermitteln. Der Nutzeffekt ergibt sich dann als das Verhältnis der Nutz-

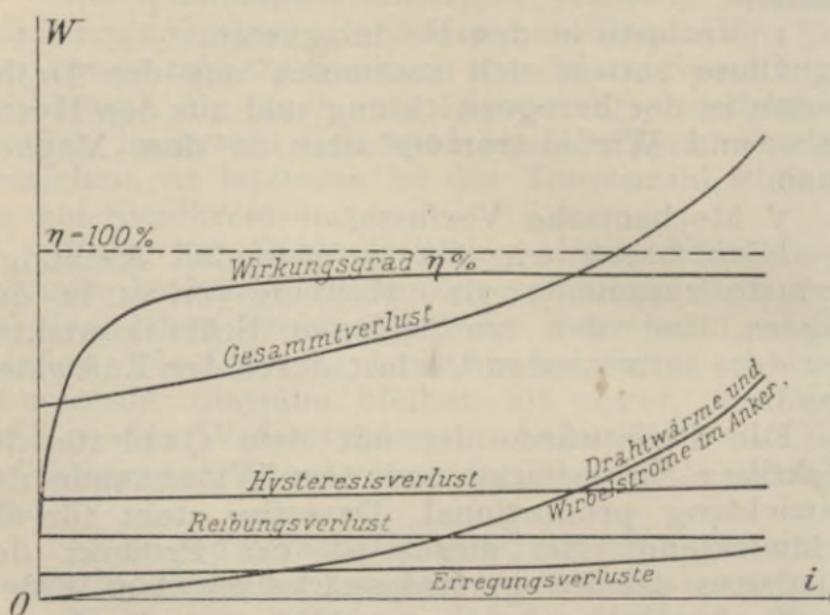


Fig. 132.

leistung zur Summe der Nutzleistung und der gesamten Verluste.

Der Wirkungsgrad der Wechselstrommaschine ist bei verschiedenen Belastungen verschieden. Bei normaler Belastung ist sie maximal, bei Überlastung nimmt sie wieder ab.

In Fig. 132 sind die Verluste und der Wirkungsgrad einer Wechselstrommaschine bei verschiedenen Belastungen graphisch dargestellt. Von den verschiedenen Verlusten ist nur der Reibungsverlust

konstant, alle anderen Verluste nehmen mit zunehmender Belastung zu. Die Kurve des Wirkungsgrades zeigt, daß der Nutzeffekt erst rasch, dann langsamer zunimmt, um über der Normalbelastung wieder langsamer abzunehmen.

### Parallelschalten von Wechselstrommaschinen.

Ist in einem Wechselstromkreise die Belastung veränderlich, dann stellt man mehrere Maschinensätze auf, die nach Bedarf miteinander parallel geschaltet werden. Durch diese Anordnung ist ermöglicht, daß die Maschinen immer vollbelastet arbeiten, d. h. daß sie immer mit dem besten Nutzeffekt im Betriebe sind.

Dies ist der Fall bei einer Wechselstromzentrale, wo die Belastung sehr variiert. Während nämlich in den Vormittags- und Mittagsstunden nur sehr wenig Energie verbraucht wird, ist in den Abendstunden der Konsum ein sehr großer. In der Zentralstation müssen den Belastungsänderungen entsprechend die Wechselstrommaschinen in Betrieb gesetzt werden, beziehungsweise muß ein Teil derselben außer Betrieb gesetzt werden.

Alle Generatoren arbeiten gemeinsam auf das ganze Verteilungsnetz, in der Weise, daß sie miteinander parallel geschaltet sind. Bei der Parallelschaltung müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

1. Die Spannung der zuzuschaltenden Maschine muß mit der Netzspannung gleich sein.
2. Die Phasen des Netzstromes und des zuzuschaltenden Stromes müssen übereinstimmen, d. h. die Maschine darf nur in dem Augenblicke parallel geschaltet werden, wenn beide Stromstärken gleichzeitig durch Null gehen und ihre Veränderungen denselben Sinn haben.

3. Die Periodenzahlen müssen auch gleich sein. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, dann lassen sich die Maschinen entweder nicht parallel schalten oder wenn dies auch erfolgt, fließen zwischen den Maschinen Ausgleichsströme, wodurch die Belastung der Generatoren größer wird, als dies der tatsächlichen Nutzleistung entspricht.

Die Klemmenspannung des zuzuschaltenden Generators läßt sich durch Veränderung des Erregerstromes verändern. Zu diesem Zwecke sind in dem Erregerstromkreis jedes Generators Vorschaltwiderstände einzuschalten, oder ist die Einrichtung so zu treffen, daß die Erregung der Erregermaschine verändert werden kann. Durch Abschwächen des Magnetfeldes der Erregermaschine wird die Erregerspannung kleiner, wodurch dann bei konstantem Widerstande des Erregerkreises des Wechselstromgenerators die Erregerstromstärke vermindert wird.

Ist die Klemmenspannung kleiner als benötigt, dann fließt zwischen den Maschinen ein wattloser Ausgleichsstrom. Dieser Strom ist in der schwach-erregten Maschine gegen die Spannung in der Phase voreilend, in der stark erregten dagegen nacheilend, wodurch eine Magnetisierung der ersten, beziehungsweise eine Demagnetisierung der zweiten Maschine bewirkt wird.

Wir sahen bei der Beschreibung der Ankerrückwirkung, daß die magnetisierende und demagnetisierende Wirkung des Stromes von dem Phasenwinkel desselben und von der Größe der Ankerrückwirkung abhängt. Bei gegebener Phasenverschiebung ist also eine gewisse Ankerrückwirkung erwünscht, daß die Maschinen bei der Parallelschaltung nicht zu empfindlich werden. Ist nämlich die Spannung der zugeschalteten Maschine nicht entsprechend, dann gleicht sich diese Verschiedenheit durch die Ankerrückwirkung aus.

Die Phasengleichheit läßt sich durch Phasenindikatoren erkennen. Diese sind Glühlampen, die Strom von beiden Stromkreisen erhalten oder Voltmeter, die die Differenz der Spannungen der beiden Stromkreise anzeigen. Sind die Maschinen phasengleich, d. h. sind die Spannungen gegeneinander geschaltet, dann leuchten die Glühlampen nicht, beziehungsweise zeigen die Spannungsmesser keine Spannung an.

Werden Glühlampen als Phasenindikatoren verwendet, dann ist darauf zu achten, daß die Lampen

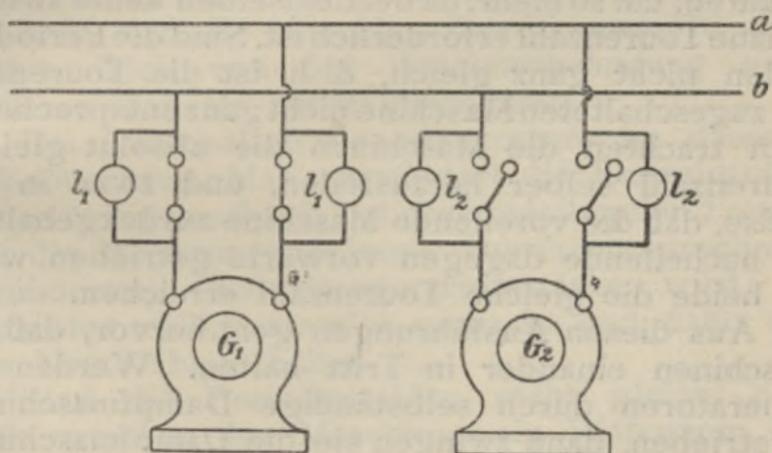


Fig. 133.

die auftretenden Spannungen aushalten. Nachdem zwei Spannungen wirken, wird die Lampe bald hell aufleuchten, bald verdunkeln, je nachdem die Spannungen gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind.

Die Schaltung ist im Prinzip für einen einfachen Fall in Fig. 133 dargestellt.  $G_1$  ist ein Wechselstromgenerator, der auf das Netz arbeitet. Nun soll auch der Generator  $G_2$  zugeschaltet werden. Dies erfolgt dadurch, daß man die Maschine auf die der Periodenzahl entsprechende Tourenzahl bringt und die Erregung solange variiert, bis die Spannungen nahezu gleich sind. Beobachtet man nun die Lampen  $L_1$   $L_2$  bei offenem Schalter,

dann bemerkt man, daß sie bald aufleuchten und bald verlöschen und daß die Dauer der einzelnen Glühperioden um so länger wird, je mehr die richtige Tourenzahl angenähert wird. Nun wartet man, bis die Lampen verlöschen und schließt im geeigneten Zeitpunkte den Doppelschalter. Hiermit ist die Maschine parallel geschaltet und arbeitet in richtiger Weise auf das gemeinsame Verteilungsnetz, dessen Hauptsammelschienen *a* und *b* sind.

Das Parallelschalten erheischt einige Übung, doch ist es mit etwas Geschicklichkeit leicht durchzuführen, um so mehr, da bei demselben keine absolut genaue Tourenzahl erforderlich ist. Sind die Periodenzahlen nicht ganz gleich, d. h. ist die Tourenzahl der zugeschalteten Maschine nicht ganz entsprechend, dann trachten die Maschinen die absolut gleiche Tourenzahl selber herzustellen, und zwar in der Weise, daß die voreilende Maschine zurückgehalten, die nacheilende dagegen vorwärts getrieben wird, bis beide die gleiche Tourenzahl erreichen.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, daß die Maschinen einander in Tritt halten. Werden die Generatoren durch selbständige Dampfmaschinen angetrieben, dann zwingen sie die Dampfmaschinen die gleichen Tourenzahlen einzuhalten. Hieraus folgt, daß bei verschieden empfindlicher Tourenregulierung die Maschinen die Belastung unter sich nicht gleich verteilen, sondern jene Maschine wird einen größeren Teil der Belastung aufnehmen, die die empfindlichere Tourenregulierung hat.

Um dies zu vermeiden, werden die Regulatoren durch entsprechende Vorrichtungen gemeinsam der Belastung entsprechend verstellt. Zu diesem Zwecke kann z. B. ein Elektromotor benutzt werden, der von der Schalttafel betätigt wird. Mit Hilfe dieses Motors werden die Regulatorgewichte solange verstellt, bis die Belastungen sich gleichmäßig verteilen.

Aus dem Umstande, daß die Tourenzahl der Maschinen gleich ist, geht hervor, daß die Leistung

einer Maschine nur durch die Vergrößerung der Energiezufuhr vergrößert werden kann. Dadurch, daß man die Erregung verstärkt, läßt sich die Leistung nicht vergrößern, denn dies verursacht zwar ein Ansteigen der elektromotorischen Kraft, doch wird der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ebenfalls vergrößert, was zur Folge hat, daß die Leistung der Maschine unverändert bleibt.

Wird hingegen durch Verstellen des Regulators die Energiezufuhr vergrößert, dann trachtet die Maschine schneller zu laufen, doch wird sie von den anderen im Takt gehalten. Die Folge wird nun sein, daß die Maschine ihre Tourenzahl nicht ändert, doch von der Gesamtbelastung einen größeren Teil als zuvor übernimmt.

Bei Ausschalten des Generators ist dasselbe zu beobachten. Man vermindert die Energiezufuhr immer mehr, wodurch bei gleichbleibender Tourenzahl die Belastung abnimmt. Durch entsprechende Veränderung der Erregerstromstärke wird der Generator völlig stromlos gemacht und dann von dem Netze abgeschaltet.

Sind die Periodenzahlen nicht gleich, dann fließt zwischen den Maschinen ein Wattstrom. Die schneller laufende Maschine treibt hierbei die langsamer laufende als Synchronmotor an, übernimmt also von der Gesamtbelastung den größeren Teil. Sobald die Periodenzahlen gleich geworden sind, hören diese Ausgleichsströme auf und die Belastung verteilt sich auf alle Maschinen.

Endlich sei noch auf eine Erscheinung hingewiesen, die bei parallel geschalteten Maschinen auftritt und die unangenehme Folgen haben kann. Diese Erscheinung ist das Pendeln der Wechselstrommaschinen. Sie tritt besonders bei Generatoren auf, die von Dampfmaschinen direkt angetrieben werden. Wir wissen, daß die wirkende Kraft bei der Dampfmaschine von der Kurbellage abhängt und zwischen zwei Grenzwerten variiert. Diese

Variation erzeugt im rotierenden Teile der Maschine eine pendelförmige Bewegung, wobei das Pendeln um jene Lage erfolgt, die der normalen Stellung des rotierenden Teiles entspricht. Bei besonders ungünstigen Verhältnissen können diese pendelförmigen Bewegungen durch die ungleichmäßige Bewegung der Dampfmaschine unterstützt werden, wodurch dann über einer gewissen Grenze die Maschine aus dem Tritt fällt und das ganze Stromverteilungssystem stört.

Wenn die Schwingung des rotierenden Teiles zu groß wird, dann entstehen starke Ausgleichsströme zwischen den Maschinen, die Maschine wirkt einmal als Generator, im nächsten Augenblicke wird sie als Synchronmotor angetrieben, befindet sich also in einem fortwährend wechselnden Zustand. Das Ergebnis bei solchen Verhältnissen ist eine fortwährende Schwankung in der Spannung und im ungünstigsten Falle das Außertrittfallen des Generators.

Das Pendeln kann in verschiedener Weise verringert werden. Man muß nur immer beachten, daß die Schwingungszeit des Ankers mit der Dauer der Geschwindigkeitsschwankungen der Antriebsmaschine nicht zusammenfällt, sondern daß diese Zeitdauer möglichst verschieden sein soll. Dies läßt sich dadurch erreichen, daß man die Schwungmassen der Dampfmaschine vergrößert oder bei gleichen Schwungmassen die synchronisierende Wirkung der Armatur verringert.

Eine andere Methode rührt von Leblanc her. Er verwendete kurzgeschlossene Windungen aus starken Kupferstäben, die in den Polschuhen eingelagert waren. Durch diese Anordnung werden die Schwingungen des rotierenden Teiles geschwächt, da in den Windungen bei der Schwingung Ströme induziert werden, welche hemmend wirken. Nachdem der Widerstand in den kurzgeschlossenen Windungen klein ist, genügt schon eine kleine induzierende Wirkung, um starke, dämpfende Ströme in denselben hervorzurufen.

---

## Namen- und Sachregister.

### A.

- Allgemeine Elektrizitäts - Gesellschaft 88, 89.  
 Allgemeines über Wechselstromgeneratoren 92.  
 Alliance 7.  
 Ankerrückwirkung 171, 192.  
 Arbeitsübertragung 79, 84, 93, 103.  
 Armaturfeld 173.  
 Ausgleichstrom 192.  
 Außenpolmaschinen 95.  
 Auto-Excitatrice 14, 27.  
 Äußere Charakteristik 181.

### B.

- Betriebskurven des Induktionsgenerators 184, 187.  
 — — Wechselstromgenerators 177.  
 Betriebsphasen der Induktionsmaschine 185.  
 Bradley 79.

### C.

- Chicagoer Weltausstellung 88.  
 Clarke 6.  
 Compagnie l'Alliance 7.  
 Compoundmaschinen 177.

### D.

- De Méritens 19.  
 Déri 28, 38.  
 Dettmar 189.  
 Doppel-T-Anker 8.

- Doppelte Wicklung 161.  
 Drahtwärme in der Armatur 189.  
 — — — Erregerwicklung 189.  
 Drehmoment des Induktionsgenerators 187.  
 Drehstrom 79.  
 Drehstrommaschine von Schuckert & Co. 81.  
 Dreilochwicklung 141, 144, 150.  
 Dreiphasenstrom 160.  
 Dreiphasenwicklung 160.

### E.

- Effektive elektromotorische Kraft 100.  
 — Spannung 109, 118.  
 Einfluß der Phasenverschiebung 179, 181.  
 — — Spulendimensionen 140.  
 Einlochwicklung 141, 150.  
 Einphasengeneratoren 97.  
 Einphasenstrom 159.  
 Einteilung der Wechselstrommaschinen 95.  
 Elektrische Arbeitsübertragung 84.  
 Elektromotorische Kraft, effektive 100.  
 — — mittlere 101.  
 Entmagnetisierende Wirkung 174.  
 Erregerkurven 178.  
 Erregerstromkreis, Schaltungsweise des 34.  
 Erwärmung der Armaturbewicklung 189.

## F.

- Faraday I.  
 Ferranti 47.  
 Ferraris 77, 93.  
 Flache Kurven 155.  
 Flachringarmatur 81.  
 Flächeninhalt des Spannungsdigrammes 118.  
 Form der induzierten elektromotorischen Kraft 104.  
 Formfaktor 101.  
 Frankfurter Ausstellung 1891 79.

## G.

- Gabelverbindung 157.  
 Gegenelektromotorische Kraft 166.  
 Geschichtliche Entwicklung der Wechselstromgeneratoren I.  
 Geschwindigkeitsverhältnisse des Induktionsgenerators 187.  
 Gesetze der Induktion 98, 107.  
 Gitterverbindung 157.  
 Glatte Armatur 145.  
 Gleichpolmaschinen 126, 140.  
 Gleichspannungsmaschinen 177.  
 Gleichstromwicklung 156.  
 Glühlichtbetrieb 171.  
 Gordon 53.  
 Gramme 11, 27.  
 Größe der elektromotorischen Kraft 100, 107.

## H.

- Historische Entwicklung der Mehrphasenmaschinen 79.  
 Holmes 61.  
 Hopkinson 44.  
 Hysteresisverlust 189.

## I.

- Induktionsgeneratoren 96, 184.  
 Induktionsmotor 184.  
 Induktionsverhältnisse bei Gleichpolmaschinen 125.  
 — in einer Drahtschleife 104.

- Induktiver Spannungsverlust 103, 176.  
 Induktormaschinen 58, 62, 95.  
 Induktortype 58.  
 Innenpolmaschinen 95, 157.  
 Isodynamische Schaltung 41, 43.  
 Isopotentiale Schaltung 41.

## J.

- Jablochkoff-Kerze 10, 93.

## K.

- Kapazität 168.  
 Kapp 76.  
 Kingdon-Wechselstrommaschine 66.  
 Klemmenspannung 164, 165.  
 Klimenko 62.  
 Knight 58.  
 Kollektor der selbsterregenden Wechselstrommaschine 31, 36, 39.  
 — Schaltungsweise des 34.  
 Komponentfelder 173.  
 Kurve des Wirkungsgrades 191.  
 Kurvenform des Wechselstromes 155.  
 Kurze Spulen 160, 161.

## L.

- Lagerreibung 189.  
 Leblanc 196.  
 Leerlaufcharakteristik 177, 180.  
 Leerlaufspannung 177.  
 Leistung des Wechselstromgenerators 182.  
 Leistungsfaktor des Induktionsgenerators 187.  
 Leistungskurven 183.  
 Lenz' Gesetz 3, 107.  
 Lontin 53.  
 Luftwiderstand 189.

## M.

- Magnetisierungskurve 177.  
 Martin 60.

- Maschine von Clarke 6.  
 — — Ferranti 49.  
 — — Gramme 11, 13.  
 — — De Méritens 19.  
 — — Mordey 64, 181.  
 — — Nollet 7.  
 — — Pixii 1, 3.  
 — — Saxton 6.  
 — — Siemens 9.  
 — — Siemens & Halske 15.  
 — — Stöhrer 7.  
 — — Westinghouse 58, 88.  
 — — Zipernowsky 21, 25, 81.  
 — — Zipernowsky & Déri 28, 38.

Maschinen mit feststehendem Anker 95.

- — Fremderregung 96.  
 — — Polanker 96.  
 — — Ringanker 96.  
 — — rotierendem Anker 95.  
 — — Scheibenanker 96.  
 — — Selbsterregung 96.  
 — — Trommelanker 96.

Maschinenfabrik Oerlikon 84.

Mechanische Verluste 189.

Mehrphasengeneratoren 97.

Mehrphasenmaschine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 88, 89, 90.

- von Bradley 79.  
 — — Schuckert & Co. 81.  
 — — Siemens 83.  
 — — Siemens & Halske 89.  
 — — Westinghouse 88.

Mehrphasenmotoren 78.

Mehrphasige Induktionsmotoren 185.

— Wechselströme 77.

Mittlere elektromotorische Kraft 101, 102.

Mordey 58, 64.

N.

- Nollet 7.  
 Nutenanker 157, 158.  
 Nutenwicklung 159.

O.

- Ohmscher Spannungsabfall 165, 166, 176.

P.

- Parallelschaltung 191, 194.  
 Parallelschaltung der Wechselstrommaschinen 191.  
 Pendeln der Wechselstrommaschinen 196.  
 Periodenzahl 102, 164.  
 Phasenindikatoren 193.  
 Phasenverschiebung 93.  
 Pixii I.  
 Polanker 96, 157.  
 Prinzip der Induktormaschinen 58.

R.

- Rawson 66.  
 Reibungsverluste 189, 190.  
 Resultierendes Feld 173, 174.  
 Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft 105, 107.  
 Ringwicklung 150, 157.  
 Rotierender Transformator 103.

S.

- Saxton 6.  
 Schaltung, isodynamische 41, 43.  
 — isopotentielle 41.  
 Schaltungsweise des Erregerstromkreises 35.  
 — — Kommutators 34.  
 Scheibenanker 16, 44.  
 Schlangenumwicklung 51, 157.  
 Schleifenwicklung 156.  
 Schlüpfung 186.  
 Schuckert & Co. 81.  
 Selbsterregende Wechselstrommaschine 31.  
 Selbstinduktion 164, 175.  
 Selbstinduktion des Ankers 175, 176.  
 Selbstinduktionskoeffizient 164, 168.

- Serienanker von Zipernowsky 81.  
 Siemens 8.  
 Siemens & Halske 15, 46.  
 Spannung, effektive 109, 118.  
 Spannungsabfall 170, 176.  
 Spannungsdiagramm 108.  
 Spannungsverhältnisse des Wechselstromgenerators 163.  
 Spannungsverlust, induktiver 103, 176.  
 — Ohmscher 176.  
 Spannungsverluste im Wechselstromgenerator 164, 165.  
 Spitze Kurven 155.  
 Spulwicklung 49, 52.  
 Stabwicklung 157.  
 Stöhrer 7.  
 Stromkurve des Induktionsgenerators 187.
- T.
- Tesla 77, 93.  
 Thompson 47.  
 Thomson 47.  
 Transformator, rotierender 103.  
 Transformieren des Wechselstromes 94.
- U.
- Umformer 83, 103.
- V.
- Varley 60.  
 Verluste in den Feldmagneten 189.  
 — — — Wechselstrommaschinen 189.  
 Verzerrung des magnetischen Feldes 174.  
 Viktoria-Maschine 64.
- W.
- Wechselfeldpole 96, 139.  
 Wechselfeldmaschinen 120, 135.  
 Wechselstrombogenlicht 93.
- Wechselstromgeneratoren 92.  
 — Geschichtliche Entwicklung der 1.  
 Wechselstrommaschine für konstante Spannung 41.  
 — — — Stromstärke 41.  
 — von Ferranti 47.  
 — — Ferranti, Thompson und Thomson 47.  
 — — Gordon 53.  
 — — Gramme 11.  
 — — Hopkinson 44.  
 — — Kapp 76.  
 — — Lontine 53.  
 — — Mordey 58.  
 — — Siemens & Halske 15, 46.  
 — — Westinghouse 55, 88.  
 — — Wheatstone 59.  
 — — Woodhouse & Rawson 66.  
 — — Zipernowsky 21, 25, 69.  
 — — Zipernowsky & Déri 28, 38.  
 Wechselstrommaschinen, Einteilung der 95.  
 — mit Elektromagneten 96.  
 — — Fremderregung 96.  
 — — permanenten Magneten 96.  
 — — Selbsterregung 96.  
 Wellenwicklung 156.  
 Westinghouse 54.  
 Wheatstone 59.  
 Wicklungen der Wechselstromgeneratoren 155.  
 Wiener Ausstellung 1883 62.  
 Wirbelstromverlust 189.  
 Wirkungsgrad des Induktionsgenerators 187.  
 — der Transformatoren 94.  
 — — Wechselstrommaschinen 188, 189, 190.  
 Woodhouse & Rawson 66.
- Z.
- Zipernowsky 21, 28, 38, 69, 81, 96.  
 Zusatzmaschine 188.  
 Zweilochwicklung 141, 142, 150.  
 Zweiphasenstrom 159, 161.







Biblioteka Politechniki Krakowskiej



I-301739

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000308532