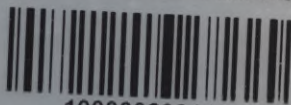




Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299111

x
1799

Mehrphasige
Elektrische Ströme
und
Wechselstrommotoren.

Von

Silvanus P. Thompson,

Direktor und Professor der Physik an der Technischen Hochschule der Stadt und Gilden
von London.

Zweite Auflage.

Übersetzt

von

K. Strecker und F. Vesper

Mit 395 in den Text gedruckten Abbildungen und 15 Tafeln.



Halle a. S.

Verlag von Wilhelm Knapp.

1904.

16.12.



II5467.

Akc. Nr. 5247/50

Aus den Vorworten des Verfassers.

Zur ersten Auflage.

Nach Beendigung einer Folge von vier Vorlesungen über Mehrphasenströme, welche der Verfasser an der Hochschule in Finsbury im Herbst 1894 abhielt, bemühten sich viele seiner Zuhörer und andere Personen, ihn zu einer Veröffentlichung dieser Vorträge zu veranlassen.

Bei der Vorbereitung des Gegenstandes für den Druck wurde Manches hinzugefügt. Es wurde indessen kein Versuch gemacht, die Gesprächsform des Vortrages beizubehalten oder in anderer Weise den literarischen Stil besonders zu berücksichtigen; die Vorträge sind in der gegenwärtigen Form für den Gebrauch von Studenten und Ingenieuren zusammengestellt; eine Einführung soll die Beziehungen der mehrphasigen Ströme zu den gewöhnlichen einphasigen klarstellen. Bei all diesen Arbeiten ist der Verfasser von Herrn Miles Walker unterstützt worden, dessen Hilfeleistung gerne anerkannt wird, und der sich auch der Mühe unterzogen hat, einen grossen Theil der Vorträge niederzuschreiben.

Zur zweiten Auflage.

Bei der Durchsicht des Werkes haben den Verfasser die Herren Miles Walker und A. C. Eborall auf's beste unterstützt; auch ist ihm dankenswerthe Hilfe zu Theil geworden von mehreren

Firmen und Ingenieuren, die ihm Zeichnungen und Angaben zu verschiedenen Maschinen geliefert haben.

Herr Walker insbesondere hat viel Zeit und Mühe auf die Entwicklung der Kapitel über die graphische Theorie verwandt; ihm ist es zu verdanken, dass diese Theorie nun in einer Form dargeboten wird, in der sie unmittelbar für praktische Berechnungen verwendet werden kann. Der Verfasser schuldet auch Herrn M. B. Field Dank, welcher ihm erlaubt hat, im Kapitel XIII Theile eines von ihm kürzlich verfassten Aufsatzes über Inductionsmotoren zu bringen.

Der Anhang über Wechselstromberechnungen rührt von Herrn Walker her.

S. P. T.

Vorwort der Uebersetzer.

Um das vorliegende Buch deutschen Verhältnissen besser anzupassen, sind zahlreiche Abbildungen und Beschreibungen deutscher — auch österreichischer und schweizer — Maschinenconstructions aufgenommen worden, wogegen eine Anzahl minder wichtiger ausländischer Maschinen weggelassen werden konnten.

Die Maschinenfabriken in Deutschland, Oesterreich-Ungarn und der Schweiz, die wir um Zeichnungen und Angaben baten, haben uns diese in der bereitwilligsten Weise zur Verfügung gestellt. Insbesondere sind wir den Firmen Siemens & Halske A.-G., Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, der früheren Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co., der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co., der Maschinenfabrik Oerlikon, Brown, Boveri & Co., Ganz & Co. und Kolben & Co. den verbindlichsten Dank schuldig. Der Verleger hat die Kosten nicht gescheut, dem Buche zahlreiche neue Tafeln und Textabbildungen beizugeben.

Als Anhang II ist ein eingehendes Verzeichniss der Patente auf dem Gebiete des Ein- und Mehrphasenstromes gegeben worden, welches alle wichtigeren deutschen und englischen Patente berücksichtigt.

Das in der ersten Auflage für slip gewählte Wort „Gang“ wurde fallen gelassen. Es findet sich dafür schon bei Reuleaux, Der Maschinenconstructeur, 3. Aufl. 1869/70, Seite 360, das Wort Schlipf, welches seiner Kürze wegen den Vorzug vor dem auch als Wortbildung minder guten „Schlүpfung“ verdient.

Berlin, December 1903.

Strecker. Vesper.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Kapitel I. Allgemeines über Wechselströme	1
„ II. Mehrphasige Ströme	38
„ III. Vereinigung mehrphasiger Ströme und Kupfergewicht der Leitungen	50
„ IV. Mehrphasenstromerzeuger	77
„ V. Beispiele ausgeführter Mehrphasenstromerzeuger	101
„ VI. Bau der mehrphasigen Motoren	153
„ VII. Graphische Theorie der mehrphasigen Motoren	202
„ VIII. Graphische Theorie der mehrphasigen Motoren, Fortsetzung	230
„ IX. Analytische Theorie der mehrphasigen Motoren	253
„ X. Einige Beispiele neuerer mehrphasiger Motoren	261
„ XI. Winke für das Entwerfen von Mehrphasenmotoren	286
„ XII. Mechanische Ausführung mehrphasiger Motoren	296
„ XIII. Einphasige Motoren	308
„ XIV. Mehrphasige Transformatoren	351
„ XV. Messung mehrphasiger Leistung	393
„ XVI. Mehrphasiger Betrieb von industriellen Anlagen	399
„ XVII. Vertheilung mehrphasiger Ströme aus Centralstationen	411
„ XVIII. Mehrphasige elektrische Bahnen	437
„ XIX. Eigenschaften der magnetischen Drehfelder	456
„ XX. Geschichtliche Entwicklung des mehrphasigen Motors	472
Anhang I. Die symbolische Methode der Wechselstromberechnungen	506
„ II. Deutsche und englische Patente auf dem Wechselstromgebiet	517
Namen- und Sachregister	537

Verzeichniss der Tafeln.

- Tafel I. Dreiphasen-Stromerzeuger für hohe Spannung der Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft. Modell R 260/20.
- „ II. Zweiphasiger Wechselstromerzeuger von Ganz & Co. Modell O 1960/12.
- „ III/IV. Mehrphasige Ankerwickelungen.
- „ V. Dreiphasen-Stromerzeuger der A. E. G. Modell GSD 83/650 (Spannwerksmaschine).
- „ VI. Dreiphasen-Stromerzeuger der E. A. G. vorm. Schuckert & Co. Modell WJd 2900/94.
- „ VII. Zweiphasen-Stromerzeuger von Brown, Boveri & Co. (Turbogenerator).
- „ VIII. Dreiphasenmotor der Siemens & Halske Aktien-Gesellschaft. Modell DM 20—1000.
- „ IX. Dreiphasenmotor der A. E. G. Modell HD 1000.
- „ X. Dreiphasenmotor der E. A. G. vorm. Schuckert & Co. Modell NAd 17.
- „ XI. Dreiphasenmotor von Brown, Boveri & Co.
- „ XII. Zweiphasenmotor von Brown, Boveri & Co.
- „ XIII. Dreiphasenmotor von Kolben & Co.
- „ XIV. Lokomotive der Jungfrau-Bahn von Brown, Boveri & Co.
- „ XV. Dreiphasenmotor der Maschinenfabrik Oerlikon.
-

Mehrphasige elektrische Ströme und Wechselstrommotoren.

Kapitel I.

Allgemeines über Wechselströme.

Es wird vorausgesetzt, dass der Leser mit den Grundlehren der elektrischen Ströme, sowohl der Gleichströme, wie auch der Wechselströme, und mit dem allgemeinen Verhalten¹⁾ der Wechselstrommaschinen bekannt ist. Nichtsdestoweniger mag eine Wiederholung der wichtigsten Punkte als Einleitung nützlich sein.

Faraday's Entdeckung der Induction elektrischer Ströme in Drähten, welche im magnetischen Felde so bewegt werden, dass sie die Kraftlinien schneiden, gab Veranlassung, magnetelektrische Maschinen zu bauen, mittels deren elektrische Ströme durch mechanische Arbeit erzeugt werden konnten.

Wenn eine Spule von passender Form, wie in Fig. 1, zwischen die Pole eines Magnetes gebracht und um die Längsachse gedreht wird, so werden darin Ströme erzeugt, welche nach jeder halben Umdrehung verschwinden und dann mit entgegengesetzter Richtung wiederkehren.

In der Figur ist die Drahtspule so gedacht, dass der obere Theil sich auf den Beschauer zu

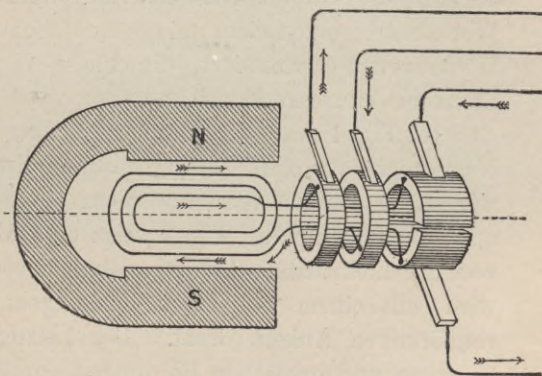


Fig. 1. Einfacher Wechselstromerzeuger (einphasig).

1) Ein einfacher Abriss des Gegenstandes findet sich in Kap. IX und X der „Elementary lessons in Electricity and Magnetism“ des Verfassers, Ausgabe 1894; etwas ausführlicher in des Verfassers Lehrbuch „Dynamoelektrische Maschinen“.

bewegt. Für diesen Fall zeigen die Pfeile die Richtung der inducirten Ströme an, welche dem Stromkreise durch zwei mit den Enden der Spule verbundenen Contact- oder Schleifringe zugeführt werden.

Die Figur zeigt die Stellung, wo der Strom beim linken Ringe in den äusseren Kreis tritt und von da beim rechten Ringe zurückkommt; eine halbe Umdrehung später wird der Strom beim rechten Ringe in den äusseren Kreis ein- und beim linken Ringe zurücktreten. Die dargestellte Maschine ist eine einfache Wechselstrommaschine, welche einen periodisch umkehrenden oder Wechselstrom erzeugt; sie ist bekannt als »Magnetinductor« und wird vielfach bei Läutewerken und zum Anruf im Fernsprechbetrieb verwendet.

Der Wechselstrom für Beleuchtungs- und Arbeitszwecke hat eine grosse Wechselgeschwindigkeit; die elektrischen Ströme werden dabei in der Leitung und durch den Stromkreis mit grosser Geschwindigkeit hin- und hergetrieben — dutzende und hunderte Mal in einer Secunde — unter dem Einflusse einer rasch wechselnden elektromotorischen Kraft. Wie bekannt, unterscheiden sich die Eigenschaften der Wechselströme in manchen Punkten von denen der Gleichströme. Sie werden nicht nur durch den Widerstand des Stromkreises beeinflusst, sondern auch durch dessen elektromagnetische Trägheit oder Selbstinduction (in anderen Worten durch das magnetische Feld, das sie in ihrer Nachbarschaft erzeugen); die Inductanz des Stromkreises hat die Wirkung einer Drosselung des Wechselstromes, indem sie seine Schwingungsweite (Amplitude, Höchstwerth) vermindert, die Phase verzögert und die heftigeren Stromschwellungen abgleicht.

In Fig. 1 war der drehbare Anker eine einfache Spule, der Magnet ein gewöhnliches zweipoliges Hufeisen. Aus Gründen, die wir später kennen lernen werden, sind die meisten Wechselstrommaschinen mehrpolig; Fig. 2 zeigt eine Maschine dieser Art, welche von der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. gebaut wird, mit einem vielpoligen Feldmagnet, der sich im Innern des ringförmigen Ankers dreht. Der Letztere besteht aus Eisenblechscheiben und enthält in Bohrungen der letzteren die inducirten stabförmigen Seiten.

Um die Anordnung der Drähte zu verstehen, müssen wir für einen Augenblick bei der Richtung der Ströme, die in den Drähten hervorgerufen werden, verweilen.

Betrachten wir zunächst Fig. 3, welche einen Theil einer vierpoligen Maschine darstellt; der Ankerkern, der später die Wickelung

erhalten soll, liegt zwischen vier Polen von wechselnder Polarität. Wenn wir den Kupferstab ab der Drehungsachse parallel anbringen und annehmen, dass er sich durch den Zwischenraum zwischen Anker und Polschuh rechts von dem Südpol wegbewegte, so wird er die magnetischen Kraftlinien, die bei jenem Pole eintreten, schneiden. Die inducirte elektromotorische Kraft wird aufwärts gerichtet sein.

In einem zweiten Leiter cd , der gerade am Nordpol vorübergeht, wird eine nach unten gerichtete elektromotorische Kraft inducirt.

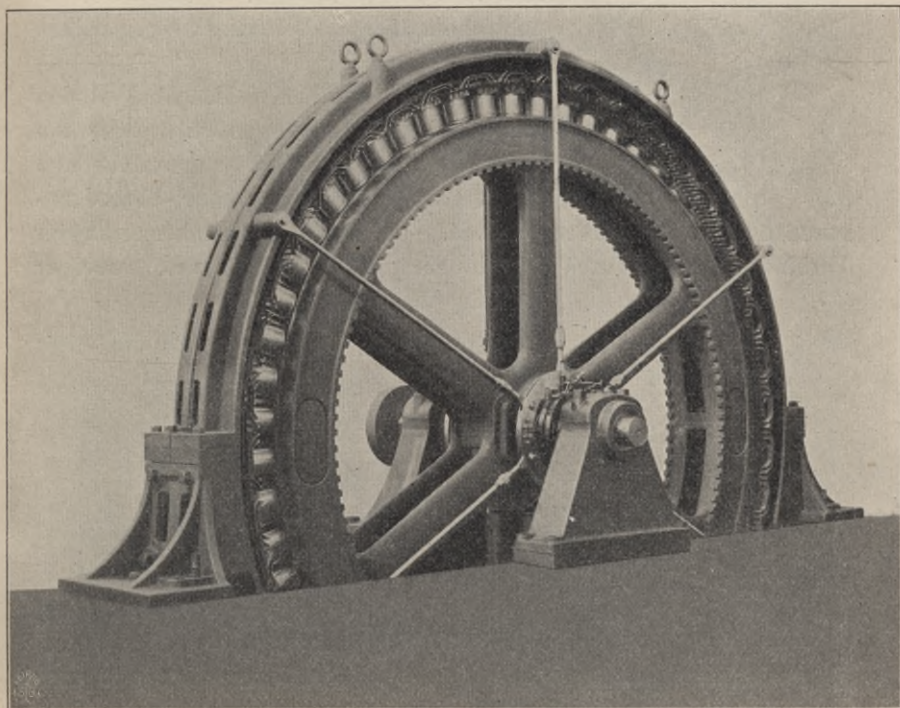


Fig. 2. Schuckert'scher Wechselstromerzeuger.

Wollte man versuchen, in einem Bilde wie Fig. 3 zwanzig oder mehr Leiter und ihre Verbindungen unter einander darzustellen, so würde dies sehr unübersichtlich werden; wir wollen uns deshalb vorstellen, wir ständen im Mittelpunkte des Kreises, und die vier Pole lägen wie im Panorama rings um uns; was wir dann um uns sehen, zeichnen wir auf eine ebene Fläche wie in Fig. 4. Dabei wollen wir zur bequemerer Unterscheidung Nord- und Südpole entgegengesetzt schräg schraffiren.

Der Zweck dieser schrägen Linien ist noch ein besonderer; wenn statt der Linie *ab* (welche einen Leiter darstellt) ein enger Schlitz in einem Stück Papier, das auf der Zeichnung liegt, in der Richtung der Pfeile nach rechts bewegt wird, so zeigen die Stücke der schrägen Linien, die man durch den Schlitz sieht, eine scheinbare Bewegung in derjenigen Richtung, in welcher der Strom in Wirklichkeit zu fließen bestrebt sein würde. Man kann leicht behalten, nach welcher Seite die Linien sich neigen müssen: die auf der Nordpolfläche laufen parallel zum schrägen Balken des Buchstaben *N*.

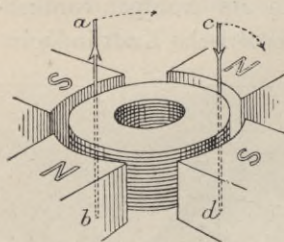


Fig. 3. Vierpoliges Feld.

In einer wirklichen Maschine werden viele Ankerdrähte verwendet, welche um den Anker symmetrisch angeordnet und durch Verbindungsdrähte oder -Stücke zusammengeschaltet werden müssen. Bei einem Ringanker geht der Verbindungsdraht durch den Innenraum des Ringkernes, wobei er

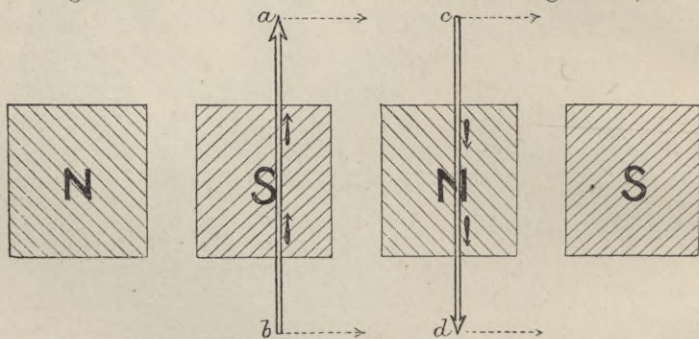


Fig. 4. Vierpoliges Feld, abgewickelt.

eine Spirale bildet. Bei Trommel- und Scheibenankern, bei denen die Wicklung gänzlich auf dem äusseren Mantel des Kernes liegt, giebt es zwei verschiedene Arten des Verfahrens, die wir als Schleifenwicklung und als Wellenwicklung bezeichnen.

Der Unterschied der beiden Arten ist folgender. Da in jedem der Leiter, die vor einem Nordpol vorübergehen, eine elektromotorische Kraft in der einen Richtung, in jedem der anderen Leiter, die vor einem Südpol vorübergehen, eine elektromotorische Kraft der entgegengesetzten Richtung inducirt wird, so ist klar, dass ein Leiter der einen Gruppe mit einem in einer nahezu correspondirenden Lage befindlichen Leiter der anderen Gruppe verbunden werden muss, so dass der Strom im einen Leiter herab, im anderen hinauf fliesst, je

nach der Richtung der elektromotorischen Kräfte. Also muss der Leiter, nachdem er vor einem Nordpol hinab geführt hat, mit einem zweiten verbunden werden, der vor einem Südpol hinaufführt; dies kann man offenbar in zweierlei Weise ausführen, indem die Wickelung entweder in Schleifen zurückgreift oder im Zickzack fortläuft.

Fig. 5 und 6 zeigen den Unterschied zwischen Schleifen- und Wellenwickelung bei Wechselstrommaschinen. Fig. 5 stellt einen achtpoligen Wechselstromerzeuger mit Schleifenwickelung dar, worin jedes »Element« oder Satz von Schleifen die Breite des Polabstandes, d. i. des Abstandes von Mitte zu Mitte zweier benachbarter Pole

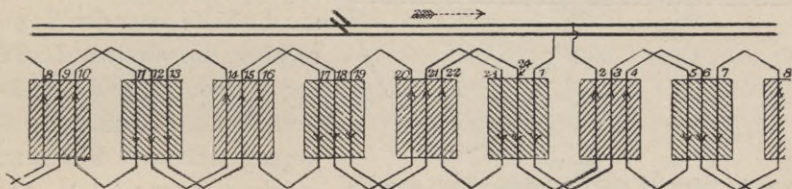


Fig. 5. Wechselstrommaschine, Schleifenwickelung.

einnimmt. Es sind nur 24 Leiter gezeichnet worden; zu bemerken ist, dass die aufeinanderfolgenden Schleifen abwechselnd links und rechts herum gewickelt sind. Fig. 6 zeigt denselben Wechselstromerzeuger mit Wellenwickelung.

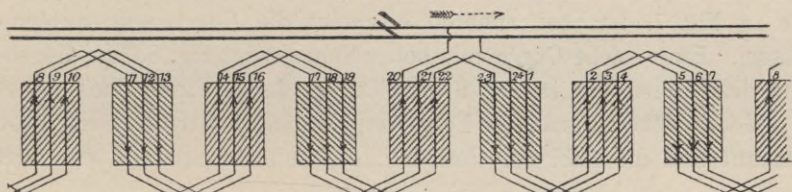


Fig. 6. Wechselstrommaschine, Wellenwickelung.

Die elektromotorische Kraft der beiden Maschinen würde genau dieselbe sein; die Wahl zwischen den beiden Arten der Drahtverbindung ist lediglich eine Frage der Bequemlichkeit in der mechanischen Herstellung und der Kosten. Bei Maschinen, deren Anker sich dreht, werden Anfang und Ende der Wickelung zu zwei Schleifringen geführt, die in der abgewickelten Zeichnung durch zwei parallele Linien dargestellt werden.

Kehren wir nun zu der einfachen drehbaren Spule der Fig. 1 zurück. Wir haben oben gesehen, wie die Spule elektromotorische Kräfte erzeugt, indem sie die Kraftlinien des magnetischen Feldes schneidet; diese Kräfte sind periodisch, wechseln die Richtung bei jeder halben Drehung und erzeugen Wechselströme. Während jeder

ganzen Drehung entsteht eine elektromotorische Kraft, die zu einem Höchstwerthe ansteigt und dann abnimmt und verschwindet, und die unmittelbar gefolgt wird von einer elektromotorischen Kraft der entgegengesetzten Richtung, welche gleichfalls bis zu einem Höchstwerthe zu-, dann wieder abnimmt und verschwindet. Die Wellenlinie in Fig. 7 soll dies darstellen. Die Höhe der Curve über der Wagerechten gibt den augenblicklichen Werth der elektromotorischen Kraft an; die Tiefe unter der Wagerechten, im zweiten Theile der Curve, zeigt die elektromotorische Kraft der entgegengesetzten Richtung, welche auf jene folgt. Die genaue Form dieser Curve

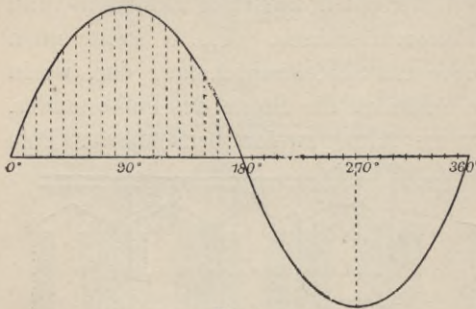


Fig. 7.

Curve der inducirten elektromotorischen Kraft eines gewöhnlichen oder einphasigen Wechselstromerzeugers.

hängt ab von der Anordnung des Eisens und der Wicklung des Stromerzeugers, und ausserdem von der Stärke des augenblicklich gebrauchten Stromes. Manche Maschinen sind so gebaut, dass die Curve ihrer elektromotorischen Kraft annähernd eine Sinuscurve, wie die in Fig. 7, ist; bei anderen erscheint die Curve sehr unregelmässig. Eine solche Curve mit hoher Spitze zeigt Fig. 8. Im Gegensatz dazu sehen wir in Fig. 9 eine Curve, deren Gipfel flach ist.¹⁾

Jede solche vollständige Folge von Vorgängen wird eine Periode genannt und die Zahl der Perioden, die in einer Secunde vollendet

1) Vgl. Rössler und Wedding, Spannungs- und Stromcurven verschiedener Formen von Wechselstrommaschinen, Vortrag auf dem Verbandstag Deutscher Elektrotechniker 1894, ETZ. 1894, S. 315.

Methoden zur Aufnahme von Wechselstromcurven findet man bei: Joubert, Journal de physique 1888, S. 297. — Ryan, American Inst. El. Eng. 1888 und 1889; Electrician (London) Bd. 24, S. 263, 1890. — Franke, ETZ. 1889, S. 802. — Bedell, Miller und Wagner, Amer. Inst. El. Eng. Bd. 10, S. 500. — Fleming, Electrician (London) Bd. 34, S. 460, 507; 1895. — Duncan, Electrician (London) Bd. 34, S. 617; 1895. — Hicks, Electrician (London) Bd. 34, S. 698; 1895. — Frish, Proc. Manchester Lit. and Phil. Soc. 1893/94, S. 151. — Crehore, Physical Review Bd. 2, S. 122 und Bd. 3, S. 63. — Blondel, Lum. él. Bd. 41, S. 401; Bd. 44, S. 135; Bd. 49, S. 501. — Vgl. auch eine Abhandlung von Barr, Burnie und Rodgus, Electrician (London) Bd. 35, S. 719. — Besondere Aufmerksamkeit verdient der Curvenzeichner von Rosa, Phys. Rev. Bd. 6, Jan. 1898 und der Periodencurven-Zeichner von Callendar, Electrician (London) Bd. 41, S. 582;

werden, heisst Wechselgeschwindigkeit (Frequenz) und wird durch den Buchstaben n dargestellt. In zweipoligen Maschinen stimmt n mit der Zahl der Umdrehungen in einer Secunde überein; in mehrpoligen dagegen ist n grösser, proportional der Zahl der Pol-

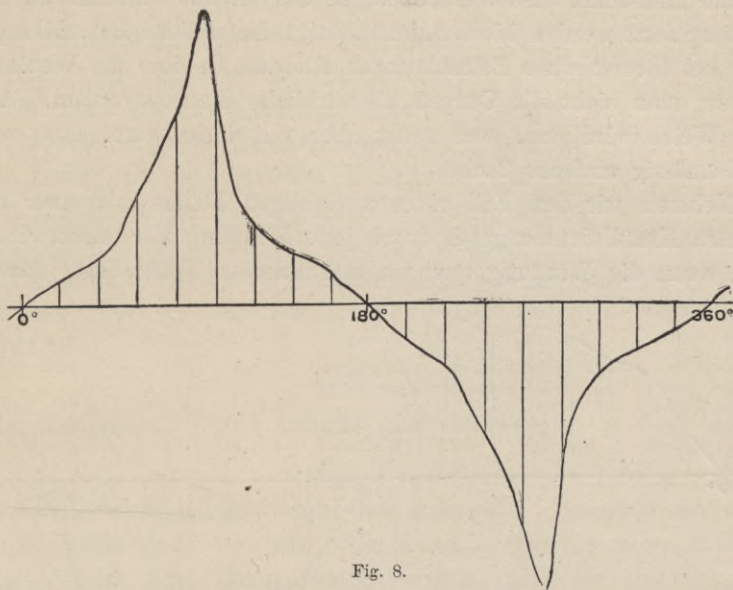


Fig. 8.

paare. So werden in einem achtpoligen Felde mit vier Nord- und vier Südpolen um einen Mittelpunkt bei jeder Umdrehung vier vollständige Perioden erzeugt. Wenn die Maschine 15 Drehungen in

1898. — Duddell und Marchant, Oscillographen, *Electrician* (London) Bd. 42, S. 857, 893; *Inst. El. Eng.* April 1899.

Ueber die Frage der Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Wellenform vgl. *Electrician* (London) Bd. 33, S. 497, 511, 523, 528, 580; 1894 und mehrere gleichzeitige Briefe in dieser Zeitschrift und in *El. World*. S. auch Rössler, *ETZ*. 1895, S. 488; auch wichtige Abhandlungen von Barr, Beeton und Taylor, *Electrician* (London) Bd. 35, S. 257, 286. — Feldmann, ebenda, S. 809. — Mordey, *Inst. El. Eng.* Bd. 18, S. 609; 1890. — Ayrton, ebenda, S. 664; 1890. — Fleming, *Inst. El. Eng.* Bd. 21, S. 594; 1892. — Sumpner, ebenda, S. 740. — Duddell, *Electrician* (London) Bd. 39, S. 637; 1897.

Der wesentliche Inhalt dieser Abhandlungen lässt sich folgendermassen zusammenfassen. Eine spitze Curve gibt einen etwas höheren Wirkungsgrad beim Arbeiten mit Transformatoren gegenüber einer flachen Curve vom gleichen Effectivwerth; aber für Arbeitsübertragung (wobei der höchste Punkt der Curve wegen der Isolation von Bedeutung ist) und beim Betrieb von Motoren ist die spitze Curve nicht vortheilhaft.

der Secunde (d. s. 900 in der Minute) ausführt, so gibt dies sechzig Perioden in der Secunde, oder die Wechselgeschwindigkeit beträgt 60. Die grosse Uebereinstimmung der Spannungscurve mit der Sinuscure, die man bei einer grossen Zahl Wechselstromerzeuger findet, und die Thatsache, dass alle beliebigen Curven aus Sinuscuren zusammengesetzt werden können, rechtfertigt die übliche Behandlungsweise bei theoretischen Betrachtungen auf dem Gebiete des Wechselstromes; man sieht die Curven als wirkliche Sinuscuren an. Auf diese Weise wird das, was sonst sehr schwierig wäre, eine verhältnissmässig einfache Sache.

Nehmen wir den Fall eines zweipoligen Feldes mit einer gesammten Kraftlinienmenge \mathcal{S} durch jede Windung der Ankerwicklung, wenn die Windung quer im magnetischen Felde liegt. Macht

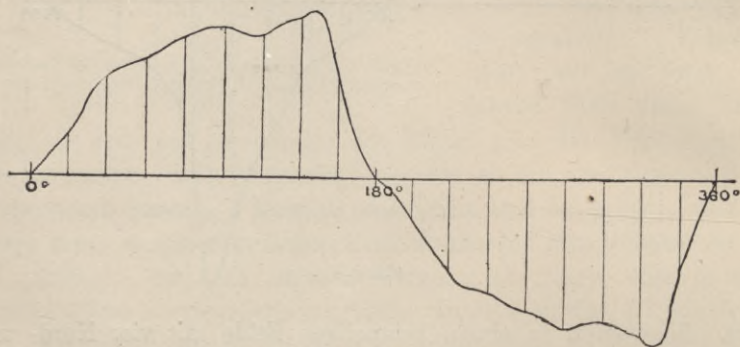


Fig. 9.

der Anker n Umdrehungen in der Secunde, so dreht er sich mit der Winkelgeschwindigkeit $2\pi n$ Radianen (zu $57,3^\circ$) in der Secunde; in t -Secunden dreht er sich demnach durch $2\pi nt$ Radianen. Es sei ϑ der Winkel von $2\pi nt$ Radianen, gemessen von der Stellung der Spule aus, wo ihre Ebene quer zum magnetischen Felde steht, und wo sie demnach die grösste Kraftlinienmenge einschliesst. Wenn die ganze Kraftlinienmenge \mathcal{S} durch alle Windungen der quer stehenden Spule geht, und die Zahl der Windungen N ist, und wenn die Spule sich um den Winkel ϑ gedreht hat, so hat sich die umschlossene Kraftlinienmenge geändert auf $\mathcal{S}N\cos\vartheta$ oder $\mathcal{S}N\cos 2\pi nt$. Nun ist nach einem Satze von Faraday die Induction (Spannung) proportional der Geschwindigkeit, mit der die umschlossene Kraftlinienmenge sich ändert; ferner ist die Geschwindigkeit, mit der der Cosinus sich ändert, gleich dem Sinus. Hieraus folgt, dass wir die inducirte elektromotorische Kraft ausdrücken können durch eine

Formel, welche sich zusammensetzt aus Factoren, die zum Sinus des Winkels, zur Winkelgeschwindigkeit, zur Windungszahl und zur grössten umschlossenen Kraftlinienmenge proportional sind. Diese Formel wird also lauten:

$$2\pi n \cdot \mathcal{E} N \cdot \sin 2\pi n t.$$

Das Vorzeichen hängt von unserer Festsetzung ab, wonach wir die positive oder negative Richtung des Stromes wählen, und lässt sich leicht nach der oben (Seite 4) gegebenen Regel ableiten. Und da 1 Volt die elektromotorische Kraft ist, welche erzeugt wird, wenn ein Leiter die magnetischen Kraftlinien mit der Geschwindigkeit 10^8 Kraftlinien in der Secunde schneidet, so ergibt sich für die elektromotorische Kraft (in Volt) des Ankers zur Zeit t (d. h. t Sekunden, nachdem die Spule quer zum Feld gestanden ist) oder in anderen Worten, nachdem die Spule sich um den Winkel ϑ gedreht hat.

$$E_{\vartheta} = 2\pi n \mathcal{E} N \sin \vartheta / 10^8,$$

oder, indem wir D für $2\pi n \mathcal{E} N / 10^8$ schreiben

$$E_{\vartheta} = D \sin \vartheta.$$

D ist hier der höchste Werth, den E erreicht. Diesen Werth nimmt E an, wenn $\sin \vartheta = 1$ wird, d. h. wenn ϑ ein ungerades Vielfaches von $\pi/2$ ist. Man nennt diesen Werth Amplitude oder Scheitelwerth. D ist der in Volt ausgedrückte Scheitelwerth, und der Werth von E in irgend einem Augenblick wird erhalten durch Multiplication von E mit $\sin \vartheta$. Den Werth von $\sin \vartheta$ in dem betrachteten Augenblick berechnet man, indem man die Zahl der Secunden oder Theile von Secunden in den Ausdruck $2\pi n t$ einsetzt und mit Hilfe einer Tafel der natürlichen Sinus ausrechnet. Im einfachen Fall eines zweipoligen Feldes, wie wir es voraussetzen, ist ϑ der Winkel selbst, um den sich der Anker gedreht hat; aber in mehrpoligen Maschinen, welche einen Strom nach der Formel $E = D \sin \vartheta$ liefern, bedeutet ϑ keinen physikalischen Winkel. Es ist vielmehr ein imaginärer Winkel, dessen Sinus wir zu nehmen haben, um den Augenblickswerth von E zu erhalten. Der Werth dieses Winkels wird folgendermassen erhalten. Die wechselnde EMK, von der wir sprechen, hat eine gleichbleibende Wechselgeschwindigkeit (Frequenz), welche wir mit n bezeichnen; d. h. sie hat n volle Perioden in einer Secunde. Jede Periode zwischen zwei Scheitelwerthen beansprucht einen kurzen Zeitraum $= 1/n$ einer Secunde. Dieser Zeitraum heisst die Periode und wird, in Secunden gemessen, durch T ausgedrückt. Nun wissen

wir, dass der Sinus eines Winkels seine vollständige Reihe von Werthen durchläuft, während der Winkel sich um 2π ändert. Wollen wir also die Werthe der elektromotorischen Kraft durch eine Sinusfunction der Zeit ausdrücken, so muss die Periode T dem Winkel 2π entsprechen. Wir nehmen für ϑ den Ausdruck $2\pi \cdot \frac{t}{T}$, so dass $\vartheta = 2\pi$ wird, wenn $t = T$; und so oft t ein ganzzahliges Vielfaches von T ist, wird auch ϑ ein ganzzahliges Vielfaches von 2π sein. In der That gibt uns $2\pi \cdot \frac{t}{T}$ einen Winkel an, der ein Theil von 2π ist, und dessen Sinus sich ändert, wie die elektromotorische Kraft. Da ausserdem $T = 1/n$, so haben wir den bequemeren Ausdruck $\vartheta = 2\pi nt$. Dieser Winkel ϑ heisst Phasenwinkel.

In mehrpoligen Maschinen lässt sich der Winkel, um den der Anker sich gedreht hat, in seiner Beziehung zu ϑ ausdrücken durch die Gleichung

$$p \cdot a = \vartheta,$$

worin p die Zahl der Polpaare ist.

Bei einer zweipoligen Maschine mit einem Nord- und einem Südpol vollführt die Spule eine Periode ihrer Wirksamkeit in einer vollen Umdrehung; sie bewegt sich an beiden Polen vorüber. Bei einer vierpoligen Maschine mit zwei Nord- und zwei Südpolen, welche in abwechselnder Folge *NSNS* den Anker umgeben, hat man zwei volle Perioden der Wirksamkeit bei jeder Umdrehung. Aehnlich besitzt eine zehnpolige Maschine mit fünf Nord- und fünf Südpolen fünf vollständige Perioden bei jeder Umdrehung des Ankers.

Wir müssen uns nun zunächst nach einem bequemen Hilfsmittel umsehen, um in einem Diagramme¹⁾ jede Periode von Wirkungen einzutragen, welche die Spule durchläuft, wenn sie an einem Nord- und einem Südpol vorbeigeführt wird.

Uhrdiagramme.

Betrachten wir einen Punkt P , der im Sinne des Uhrzeigers auf dem Kreise läuft, Fig. 10; nimmt man den Radius des Kreises zur Einheit, so ist PM der Sinus des Winkels ϑ , gemessen von 0^0

1) Wer mit der Behandlung einfacher harmonischer Bewegungen nicht vertraut ist, möge sich aus einem neueren Werk über theoretische Mechanik darüber belehren.

aus. Wir theilen den Kreis in irgend eine Zahl gleicher Winkel und zeichnen für jeden den Sinus; dann tragen wir diese Sinus in gleichen Abständen längs der Wagrechten auf, wie in Fig. 10, rechts, und erhalten so die Sinuscurve.

Dieses Diagramm benutzen wir folgendermassen. Wir wissen, dass die EMK sich von Augenblick zu Augenblick ändert; um ihren Werth in einem bestimmten Augenblick zu finden, behandeln wir die Zeit, als wäre sie ein stetig wachsender Winkel; wir nehmen die Zahl der Secunden oder die Bruchtheile der Secunde, die verstrichen sind seit einem bestimmten Anfangszeitpunkt (als die EMK Null war) und multipliciren sie mit $2\pi n$; dies Product betrachten wir nun als Winkel, der in Radianen ausgedrückt wird, und der Sinus dieses Winkels, multiplicirt mit D (s. S. 9) gibt uns die Spannung in dem fraglichen Augenblick in Volt an. Man sieht also,

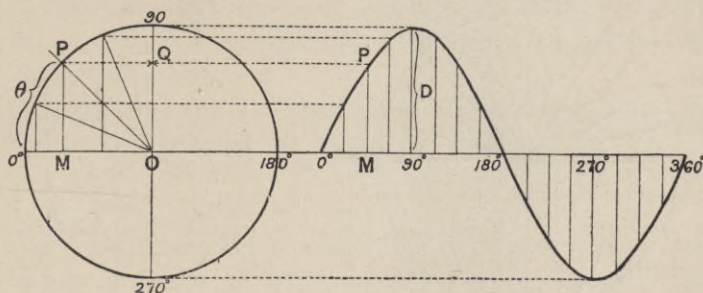


Fig. 10.

dass der Punkt P , welcher mit gleichmässiger Geschwindigkeit um den Kreis in Fig. 10 läuft, den Ablauf der Zeit darstellt. Lassen wir ihn so rasch laufen, dass er in der Secunde durch $2\pi n$ Radianen geht, so stellt das Loth PM (in einem beliebigen Massstabe) die EMK in einem gewünschten Augenblick dar. Stellen wir nun die Zeit auf der wagrechten Strecke durch 0° bis 360° dar, so ist klar, dass nach einer gewissen Zeit, die durch den Abstand von 0° bis M gemessen wird, die EMK den Werth MP besitzt. In derselben Weise wird in jedem beliebigen anderen Augenblicke die EMK dargestellt durch das Loth über dem Punkte der Wagrechten, welcher die Zeit angibt, bis zur Sinuslinie.

In Fig. 10 entspricht ein Umlauf von P um den Kreis einer vollständigen Periode oder einem Wechselcyklus. Der Werth der elektromotorischen Kraft (der zwischen $+E_0$ und $-E_0$ als äussersten Werthen sich ändert) kann in irgend einem Augenblicke entweder durch den Sinus PM oder durch die Länge OQ , die durch Projection

von P auf den senkrechten Durchmesser erhalten wird, dargestellt werden. Während P um den Kreis läuft, schwingt der Punkt Q auf dem Durchmesser auf und nieder.

Wir können also, ohne unsere Sinuscurve überhaupt zu zeichnen, einfach die Linie OP betrachten (in einem geeigneten Massstab, so dass sie D darstellt); wir lassen sie sich um O drehen und nehmen ihre Projection OQ in jedem Augenblick als die EMK. Ein solches Diagramm nennt man Uhrdiagramm, und es ist von grossem Nutzen, wenn wir mehrere EMKräfte zusammensetzen wollen (vgl. S. 17 u. 55).

Noch auf eine andere Art kann man periodische Aenderungen dieser Gattung darstellen, nämlich durch ein dem Zeuner'schen Schieberdiagramm nachgebildetes Diagramm. Der äussere Kreis in Fig. 11 sei der Kreis, auf dem sich P bewegt. Wir beschreiben um die beiden senkrechten Halbmesser je einen Kreis; dann sind die

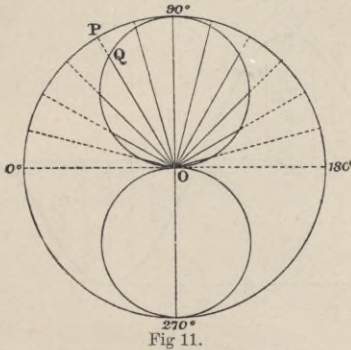


Fig. 11.

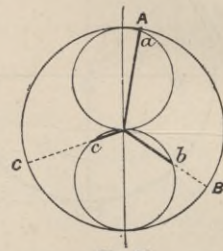


Fig. 12.

von den übrigen Halbmessern des äusseren Kreises abgeschnittenen Längen wie OQ die Sinuswerthe der zugehörigen Winkel. Lässt man eine Karte mit schmalen radialen Schlitz über der Zeichnung sich drehen, so zeigen die Schnittpunkte mit den beiden inneren Kreisen die veränderlichen elektromotorischen Kräfte in den verschiedenen Stellungen.

Die Anwendung dieser Construction auf ein dreiphasiges System zeigt Fig. 12. Es wird angenommen, dass drei Linien mit Abständen von 120 Grad hinter den beiden Kreisöffnungen umlaufen. Die Längen der drei Linien, welche in irgend einem Augenblicke sichtbar sind, stellen die Werthe der drei elektromotorischen Kräfte oder der drei Ströme dar.

Wer die graphische Behandlung dieses Gegenstandes eingehender kennen lernen will, möge das ausgezeichnete Buch von Fleming¹⁾

1) Fleming, The Alternate Current Transformer, London. 1889.

oder das von Blakesley¹⁾ und die Abhandlungen von Kapp²⁾ nachlesen.

Die gewöhnlichen Messinstrumente für Wechselstrom, als Elektrodynamometer, Cardew's Spannungsmesser, elektrostatische Spannungsmesser, geben nicht den arithmetischen Mittelwerth des Stromes oder der Spannung an, sondern die Quadratwurzeln der Mittelwerthe der Quadrate der Werthe. Sie werden mit Gleichstrom geaicht und messen den sogenannten effectiven Strom oder die effective Spannung³⁾. Dieser Mittelwerth ist (unter der Voraussetzung, dass Strom und Spannung dem Sinusgesetze folgen) gleich 0,707 des Höchstwerthes; denn der Mittelwerth der Quadrate der Sinus (über einen Quadranten oder um den ganzen Kreis genommen) ist $\frac{1}{2}$; also ist die Quadratwurzel des Mittelwerthes der Quadrate $1/\sqrt{2}$ des Höchstwerthes. Wenn ein Spannungsmesser auf einen Wechselstromkreis geschaltet wird, in dem die Spannung zwischen +100 und -100 Volt schwingt, so wird er 70,7 Volt anzeigen; und 70,7 Volt Gleichstrom würden dieselbe Ablesung ergeben.

Der Grund davon ist, dass diese Messinstrumente die Erwärmung eines Drahtes oder die Anziehung zwischen zwei Spulen oder zwischen zwei elektrisch geladenen Platten benutzen, und dass diese Wirkungen dem Quadrate der Spannung proportional sind.

Wenn ein Wechselstrommesser 100 Ampere anzeigt, so bedeutet dies, dass der Strom in Wirklichkeit auf +141,4 Ampere ansteigt und dann zu -141,4 Ampere umkehrt; aber die Wirkung ist gleich der von 100 Ampere Gleichstrom, und deshalb nennt man einen solchen Strom einen von 100 Ampere effectiv.

Wir müssen dabei stets bedenken, dass der Factor $1/\sqrt{2}$, den wir anwenden, um den Effectivwerth aus dem Scheitelwerth abzuleiten, nur bei Sinuscurven angewandt werden darf; bei Curven von anderer Gestalt kann der Effectivwerth auf graphischem Wege gefunden werden.

Fleming⁴⁾ hat eine sehr einfache graphische Construction angegeben, um die Quadratwurzel aus dem mittleren Werth der Quadrate, den sog. quadratischen Mittelwerth einer beliebigen periodischen

1) Blakesley, Alternating Currents of Electricity, London. 1889.

2) Kapp, Alternate Current Machinery, Proc. Inst. Civil Engineers, 1889 pt. III.

3) Auch virtueller Strom, virtuelle Spannung, ferner quadratischer Mittelwerth des Stromes oder der Spannung genannt (Anmerkung des Uebersetzers).

4) Electrician (London) Bd. 35, S. 43. — The Alternate Current Transformer (Ausg. 1896) Bd. 1, S. 190.

Function mit Hilfe eines Polardiagramms zu finden. Die Methode ein Polardiagramm einer periodischen Function zu zeichnen und ihren quadratischen Mittelwerth zu finden, wird von ihm folgendermassen beschrieben.

Eine Gerade OP (Fig. 13) möge sich um ihren einen Endpunkt O drehen; der Neigungswinkel ϑ , den die sich drehende Gerade mit einer anderen feststehenden und durch O hindurchgehenden Geraden OA einschliesst, möge der Drehungswinkel der sich drehenden Geraden genannt werden. Wir nehmen nun einen beliebigen Punkt P der sich drehenden Geraden und bezeichnen seine Entfernung vom Drehungsmittelpunkt mit r ; die Länge r nennen wir Radius vector. Nun mag r zu- oder abnehmen, während sich OP dreht, jedoch so, dass die Länge $OP = r$ sich nach einem Gesetze ändert, das sie mit dem Drehungswinkel AOP in Beziehung setzt. Der Punkt P auf OP beschreibt dann eine Curve, welche wir Polardiagramm nennen.

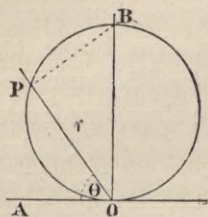


Fig. 13.

Nehmen wir an, OP durchlaufe eine Reihe von Werthen, die mit der Null beginnt, wenn $\vartheta = 0$ ist, dann ein Maximum erreicht und wieder Null wird, sobald die Gerade OP eine halbe Umdrehung ausgeführt hat, oder sobald $\vartheta = \pi$ ist, dann wird das Polardiagramm eine geschlossene, durch den Anfangspunkt O gehende Curve sein. Während der Radius vector OP bei einer Drehung um zwei rechte Winkel oder π eine Reihe von Werthen von Null zu einem Maximum und wieder zu Null durchläuft, kann der Radius r den Werth einer beliebigen periodischen Grösse darstellen, welche eine Reihe von Werthen in der Zeit einer halben Umdrehung des Radius vector vollendet. Setzen wir jetzt fest, dass $r = D \sin \vartheta$ (vgl. S. 9). Dann ergibt sich aus Fig. 11, dass die Polarcurve ein Kreis ist.

Wenn der Strom oder die Spannung keine Sinusfunction ist, so ist die Polarcurve kein Kreis, sondern eine unregelmässige geschlossene Figur, wie z. B. in Fig. 15.

Das Diagramm in Fig. 14 möge eine halbe Welle einer elektromotorischen Wechselkraft darstellen, die keine einfache Sinuscurve ist. Die durch die punktierten Linien angegebenen Ordinaten sind proportional den Augenblickswerthen der periodischen Grösse; die Figur zeigt sie von 10 zu 10 Bogengraden. Wenn wir den quadratischen Mittelwerth der Ordinaten dieser Curve finden wollen, so bleibt uns nur übrig, eine Anzahl gleichweit von einander entfernter

senkrechter Ordinaten zu ziehen, sie zu messen, zu quadriren und die Quadratwurzel aus dem mittleren Werthe der Quadrate zu ziehen. Das ist eine sehr langwierige Rechnungsoperation; je unregelmässiger und verwickelter die Form der Welle ist, desto mehr Ordinaten muss man in Rechnung ziehen, um den quadratischen Mittelwerth richtig zu ermitteln.

Viel leichter ist die geometrische Methode mit Hilfe des Polardiagramms. Es möge Fig. 15 dieselbe periodische Funktion wie in Fig. 14 sein, nur als Polardiagramm aufgetragen. Die punktirten Strahlen sind proportional den Augenblickswerthen der periodischen Grösse und sind von 10^0 zu 10^0 aufgetragen.

Die von dem Polardiagramm eingeschlossene Fläche wird nun mit einem Planimeter ausgemessen und in einer Tafel des Kreis-

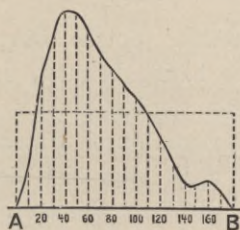


Fig. 14.

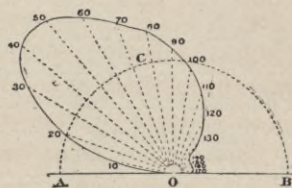


Fig. 15.

inhaltes derjenige Kreis aufgesucht, dessen Fläche doppelt so gross als die der Polarcurve ist; vgl. den punktirten Halbkreis in Fig. 15. Der Radius dieses Kreises ist der quadratische Mittelwerth des Radius vector der periodischen Grösse. Der Beweis hierfür wird nach Fleming unten mitgetheilt.¹⁾

Die Unterscheidung der effectiven und Scheitelwerthe ist von Bedeutung, weil gewisse Wirkungen, z. B. das Bestreben, die Isolation mittels eines Funkens zu durchbohren, vom Scheitel-, nicht vom Effectivwerth abhängt. Wenn ein elektrostatischer Spannungsmesser 10000 Volt anzeigt, so steigt der Scheitelwerth (Sinusgestalt vorausgesetzt) bis auf 14142 Volt. Wenn die Curve spitzer als eine Sinuscurve ist, so steigt der Scheitelwerth noch höher.

1) Ein beliebiger Radius vector OP in Fig. 13 werde mit r bezeichnet, der zugehörige Drehungs- oder Phasenwinkel mit ϑ . Wir lassen den Radius vector sich vorandrehen um einen kleinen Winkel $d\vartheta$, wobei sich seine Länge um einen kleinen Betrag dr ändert; dann ist klar, dass der kleine Zuwachs der Fläche dA , der von dem Radius vector r überstrichen wurde, gleich $\frac{1}{2}r^2 d\vartheta$ ist. Die ganze

Weitere Anwendung des Uhrdiagramms. Im Uhrdiagramm werden Strom und Spannung, welche periodischem Wechsel unterliegen, dargestellt durch die Projection einer Geraden, die sich um einen Centralpunkt dreht, auf eine gegebene Linie; hier wird die

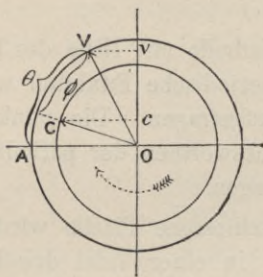


Fig. 16.

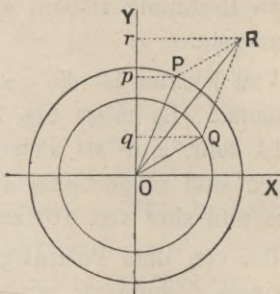


Fig. 17.

Projection auf eine senkrechte Linie gewählt. Solche Diagramme werden beim Studiren der Wechselströme so häufig benutzt, dass mit einigen weiteren Worten darauf eingegangen werden muss.

Phasenunterschiede werden im Uhrdiagramm durch Unterschiede in der Winkelstellung dargestellt. Wenn z. B. zwei sich drehende Zeiger, OV und OC (Fig. 16), mit der gleichen Geschwindigkeit umlaufen, aber stets einer um ein wenig hinter dem anderen, so erreichen sie nicht gleichzeitig ihren Scheitelwerth. Projiciren wir sie auf die Senkrechte, so sehen wir in dem Augenblick, wo OV sich so weit gedreht hat, dass der Drehungswinkel gleich ϑ ist, die Projection die Grösse Ov besitzt; der andere Zeiger, welcher um einen Winkel $\varphi = VOC$ zurückbleibt, besitzt als Projection die Länge Oc . Wenn Ov seinen Scheitelwerth erreicht (d. h. wenn V

Fläche der Polarcurve wird demnach durch Integration des Werthes $\frac{1}{2}r^2 d\vartheta$ zwischen den Grenzen 0 und π erhalten:

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} r^2 d\vartheta.$$

Beschreiben wir über der Wagrechten AB in Fig. 15 mit dem Radius R einen Halbkreis, dessen Fläche gleich der Fläche $OPQR$ ist, so erhalten wir

$$\frac{1}{2} \pi R^2 = A = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} r^2 d\vartheta$$

oder

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} r^2 d\vartheta}.$$

Die rechte Seite der letzten Gleichung stellt offenbar den quadratischen Mittelwerth der periodischen Grösse r vor.

an dem höchsten Punkt des Kreises ankommt), wird Oc noch immer zurück sein. Die Werthe der beiden Projectionen sind $Or = OV \sin \vartheta$ und $Oc = OC \sin (\vartheta - \varphi)$. Der Winkel φ ist der Phasenunterschied.

Um zwei verschiedene Wechselgrössen zu addiren, z. B. zwei elektromotorische Kräfte, welche die gleiche Periode haben, genügt es nicht, einfach ihre Zahlenwerthe zu addiren. Wenn z. B. in einem Stromkreis zwei Spulen in Reihe geschaltet sind, in deren einer eine elektromotorische Wechselkraft von 40 Volt, in deren anderer eine solche von 30 Volt erzeugt wird (während beide die gleiche Frequenz von beiläufig 100 Perioden in der Secunde besitzen), so ist die gesammte elektromotorische Kraft nur dann = 70 Volt, wenn die beiden elektromotorischen Kräfte zufällig genau gleiche Phase besitzen. Wenn irgend ein Phasenunterschied zwischen beiden besteht, so ist ihre Resultirende kleiner als 70 Volt, weil sie ihre Scheitelwerthe nicht zu gleicher Zeit erreichen. Um den Werth zu ermitteln, den ihre Summe erreicht, müssen wir sie nach Art der Vektoren addiren, ein Verfahren, womit jeder Ingenieur von der gewöhnlichen Zusammensetzung von Kräften nach einem Parallelogramm her vertraut ist.

OP und OQ (Fig. 17) mögen zwei elektromotorische Kräfte von gleicher Periode vorstellen, welche einen Phasenunterschied $POQ = \varphi$ besitzen. Vervollständigen wir das Parallelogramm durch die Linie PR (gleich und parallel zu OQ), so erhalten wir die Resultirende OR , welche die Grösse und Phase des resultirenden Radius vector darstellt. Die Projection Or dieser Linie wird stets gleich sein der Summe der Projectionen Op und Oq der beiden Componenten. Nun ist nach einem bekannten geometrischen Satz $OR = \sqrt{OP^2 + OQ^2 + 2OP \cdot OQ \cos \varphi}$. Dies ist offenbar ein Maximum, wenn $\varphi = 0$ ist. Wenn im obigen Beispiel $OP = 40$, $OQ = 30$ und $\varphi = 37$ Grad ist, so ergibt sich die Resultirende R zu 66,6. Wenn die beiden Componenten im Diagramm rechtwinklig zu einander stehen, so wird die eine ihren Scheitelwerth erzielen, wenn die andere durch Null geht; man sagt dann, sie stehen in Quadratur, oder sie halten eine Viertelperiode Phasenunterschied. Sind sie in diesem Falle an Grösse einander gleich, so ist die Resultirende $\sqrt{2}$ mal grösser als jede Componente. Z. B. beträgt die Resultirende von zwei elektromotorischen Wechselkräften gleicher Periode, die in Quadratur stehen und von denen jede 100 Volt beträgt, 141,4 Volt.

Producte periodischer Functionen. — Zwei periodische Functionen, z. B. zwei Ströme, oder ein Strom und eine Spannung,

welche die gleiche Periode, aber ungleiche Amplituden und einen Phasenunterschied besitzen, mögen durch $p = OP \cos \omega$ und $q = OQ \cos \beta$ (vergl. Fig. 18) dargestellt werden; OP und OQ sind ihre Scheitelwerthe, φ ist ihr Phasenunterschied $= \omega - \beta$. Es soll der mittlere Werth des Productes pq gesucht werden.

Dieses Product wird selbst veränderlich sein, aber nicht wie eine Sinusfunction, und deshalb lässt es sich nicht als drehende Linie darstellen. Es wird in bestimmten Augenblicken — viermal in jeder Periode — Null sein, denn p erreicht zweimal die Null, und q desgleichen. Auch wird es negative Werthe besitzen, wenn

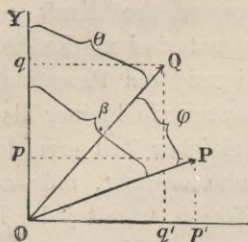


Fig. 18.

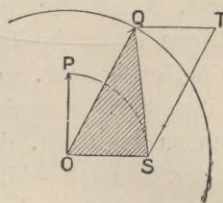


Fig. 19.

entweder p oder q negative Werthe hat. Sein mittlerer Werth wird der Mittelwerth aller Werthe des Productes während einer vollen Periode sein.

In dem Augenblick, den Fig. 18 zeigt, wird

$$pq = OP \cdot OQ \cdot \cos \omega \cdot \cos \beta$$

sein. Eine Viertelperiode später werden die beiden Geraden OP und OQ zur Achse OY gerade so stehen, wie in Fig. 18 zur Achse OX , und das (positive) Product wird alsdann sein

$$p'q' = OP \cdot OQ \cdot \sin \omega \cdot \sin \beta.$$

Der Mittelwerth aus beiden ist

$$\begin{aligned} \frac{pq + p'q'}{2} &= \frac{1}{2} OP \cdot OQ (\cos \omega \cdot \cos \beta + \sin \omega \cdot \sin \beta) \\ &= \frac{1}{2} OP \cdot OQ \cos (\omega - \beta) \\ &= \frac{1}{2} OP \cdot OQ \cos \varphi. \end{aligned}$$

Dieser Werth ist offenbar unabhängig von der augenblicklichen Grösse von β oder ω ; d. h. der Mittelwerth des Productes hat um den ganzen Kreisumfang herum, je für eine Lage und die dazu Senkrechte den gleichen Werth. Demnach ist dieser Werth der gesuchte mittlere Werth des Productes.

Eine geometrische Construction zur Erläuterung des Gesagten zeigt Fig. 19. OP und OQ sind die Scheitelwerthe der beiden periodischen

Functionen, deren Phasenunterschied $POQ = \varphi$ ist. Wir drehen eine von beiden Geraden, hier OP , durch einen rechten Winkel, so dass sie in die Lage OS kommt, vervollständigen das Parallelogramm $OQTS$ und zeichnen das Dreieck OQS . Die Fläche des Parallelogramms ist $OP \cdot OQ \cos \varphi$ und die des Dreiecks $\frac{1}{2} OP \cdot OQ \cos \varphi$ und stellt demnach den mittleren Werth des Productes dar.

Noch eine weitere Folgerung ist von Nutzen. Wenn p und q gleich gross sind und keinen Phasenunterschied haben, so erhalten wir den mittleren Werth des Quadrates einer periodischen Function, indem wir $OP = OQ$ und $\varphi = 0$ setzen, so dass $\cos \varphi = 1$ ist. Wir erhalten dann den mittleren Werth von $p^2 = \frac{1}{2} \overline{OP^2}$, oder in anderen Worten, der Mittelwerth des Quadrates des Sinus ist $\frac{1}{2}$.

Wirkungen der Selbstinduction. — Bei der Betrachtung eines Wechselstromkreises dürfen wir die Stromstärke nicht einfach der elektromotorischen Kraft direct und dem Widerstand des Stromkreises umgekehrt proportional setzen. Sie hängt auch von der Zahl der magnetischen Linien ab, welche vom Strom selbst erzeugt werden, und von der Wechselgeschwindigkeit (Frequenz). Denn es wird sich zeigen, dass diese Linien, welche von dem anwachsenden Strome erzeugt werden und sich durch den Stromkreis schlingen, in letzterem eine elektromotorische Kraft erzeugen, die der von aussen wirkenden Kraft entgegengesetzt ist, so lange die Menge der Kraftlinien wächst. Je grösser die magnetische Durchlässigkeit des Weges für die magnetischen Linien, welche sich durch irgend einen Theil des Stromkreises schlingen, und je häufiger der Stromkreis um diesen Kraftlinienweg herumführt, desto grösser ist die elektromotorische Gegenkraft. Diese Fähigkeit eines Stromkreises, wenn er von einem Strom durchflossen wird, magnetische Linien zu erzeugen, nennt man seine Inductanz oder seinen Selbstinductions-Coefficienten. Um uns auf bestimmte Einheiten zu beziehen, betrachten wir einen einfachen ringförmigen Stromkreis von solchen Abmessungen und solcher Anordnung der verwendeten Stoffe (Luft oder Eisen) in seiner Umgebung, dass die gesammte Kraftlinienmenge, die ihn durchdringt, wenn in ihm der Strom 1 Ampere fliesst, gleich 10^8 ist. Wir wissen, wenn die Kraftlinienmenge 10^8 in der Zeit von genau 1 Secunde gleichförmig von Null aus anwächst, dass dann eine elektromotorische Kraft von genau 1 Volt im Stromkreis inducirt wird.

Es ist nun klar, wenn in unserem Stromkreis zu Anfang kein Strom floss und der letztere nun gleichmässig anwächst, so dass er

am Ende der ersten Secunde den Werth 1 Ampere erreicht, dass dann während des Anwachsens des Stromes und der magnetischen Linien eine elektromotorische Gegenkraft von genau 1 Volt dem Strome entgegenwirkt, und dass man eine elektromotorische Kraft von mindestens 1 Volt in der Stromrichtung braucht, um den Strom gegen die elektromotorische Gegenkraft zu unterhalten.

Soll der Strom in der Secunde bis auf 2 Ampere gleichmässig anwachsen, so müssen wir 2 Volt aufwenden (und etwas mehr, um den Strom durch den Widerstand zu treiben), weil die Geschwindigkeit, mit der die magnetischen Linien wachsen, zweimal so gross ist.

Ein Stromkreis von solcher Beschaffenheit besitzt einen Selbstinductions-Coëfficienten von 1 Henry. Das Henry ist die Einheit der Inductanz; es ist die Inductanz eines Kreises, welcher im Ganzen 10^8 magnetische Linien umschliesst, wenn der Strom 1 Ampere hindurchfliesst. Gewöhnlich bezeichnet man mit dem Buchstaben L die Zahl der Henry in dem Selbstinductions-Coëfficienten eines Kreises.

Wenn der beschriebene Strom nicht mehr ein einfacher Ring, sondern zweimal um denselben magnetischen Weg gewunden ist, so wird L gleich 4; denn die Ampere-Windungen sind nun bei 1 Ampere gleich 2, also die magnetischen Linien $2 \cdot 10^8$; diese würden in jeder der beiden Windungen 2 Volt erzeugen, wenn sie in einer Secunde gleichmässig entstehen, also in beiden Windungen zusammen 4 Volt. Die Selbstinduction eines Stromkreises ist demnach proportional dem Quadrate der Windungszahl, und umgekehrt proportional der Reluctanz des magnetischen Weges, welcher durch den elektrischen Kreis hindurchtritt. Oder in Zeichen

$$L = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{N^2}{\varrho},$$

worin N die Windungszahl und ϱ die gesammte Reluctanz des magnetischen Pfades bedeuten.

Wenn wir L mit der Geschwindigkeit multipliciren, mit der sich der Strom ändert, so erhalten wir die elektromotorische Gegenkraft, welche von der Selbstinduction herrührt. Hierzu addiren wir das Product aus Strom und Widerstand und erhalten die gesammte äussere elektromotorische Kraft, oder in Zeichen

$$E = L \cdot \frac{dJ}{dt} + JR.$$

Diese Gleichung gilt für jede beliebige Aenderung von E . Um das Gesetz zu finden, nach dem sich der Strom mit der Zeit ändert, müssen wir den Werth von E als Function der Zeit einsetzen und die Differentialgleichung lösen; L und R sind constant.

Wenn z. B. $E = D \cdot \sin \omega t$ ist, so haben wir

$$D \sin \omega t = L \cdot \frac{dJ}{dt} + RJ$$

und die Lösung dieser Gleichung ergibt für J als Function von t :

$$J = \frac{D \sin \left(\omega t - \arctg \cdot \frac{\omega L}{R} \right)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Hieraus ersehen wir, dass auch der Strom, ebenso wie die elektromotorische Kraft, einem Sinusgesetz folgt, und wir erkennen, dass der Scheitelwerth des Stromes sein wird

$$\frac{D}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

gegenüber D/R , dem Werth, der beim Fehlen der Selbstinduction eintreten würde. Ferner sagt uns die Formel, dass die Zeitpunkte,

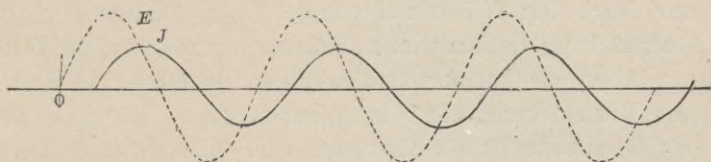


Fig. 20. Stromcurve, in der Phase etwas gegen die Spannungcurve verzögert.

zu denen der Strom seinen Scheitelwerth erreicht, später eintreten, als die Zeitpunkte, in denen die elektromotorische Kraft den Scheitelwerth annimmt. Wollen wir also die Curven E der elektromotorischen Kraft und J des Stromes zusammen aufzeichnen, so würden sie wie in Fig. 20 erscheinen. Die längs der Wagerechten von O aus gemessenen Entfernungen stellen die Zeit vor. Die Stromwellen, welche durch die ausgezogene Linie angegeben werden, sind in der Zeit hinter den Wellen der Spannung zurück. Vergleichen wir hiermit das auf Seite 11 unter Bezug auf Fig. 10 Gesagte, so kann die Wagerechte als die Darstellung eines fortwährend wachsenden Winkels dienen, und wenn wir ein Uhrdiagramm zeichnen, um die Beziehung zwischen Spannung und Strom darzustellen, so wird dies wie Fig. 16 aussehen, wo OV die Spannung, OC der Strom ist. Der Vector OC bleibt hinter OV zurück; der Winkel ihres Phasen-

unterschiedes ist φ . Dieser Winkel erscheint in unserer Formel als $\arctg \frac{\omega L}{R}$; in anderen Worten ist

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Die Beziehungen zwischen einer elektromotorischen Wechselkraft und dem von ihr im Stromkreis erzeugten Strome kann leichter verfolgt werden, wenn wir nicht mit der elektromotorischen Kraft beginnen und den Strom ableiten, sondern den Strom als gegeben ansehen und die elektromotorische Kraft suchen, die nothwendig ist, um jenen zu erzeugen. Dies lässt sich geometrisch leicht ausführen. Nehmen wir an, ein Wechselstrom von (effectiv) J Ampere fliesse mit einer Frequenz von n Perioden in der Secunde durch einen Stromkreis von der Inductanz L ; dann ist die elektromotorische Gegenkraft (d. i. die elektromotorische Kraft, welche durch Zu- und Abnahme der vom Strom erzeugten magnetischen Linien entsteht) $2\pi n L J$ Volt (effectiv)¹⁾.

Wenn z. B. $L = 0,002$ Henry, $n = 50$ Perioden in der Secunde und $J = 40$ Ampere ist, so haben wir eine rückwirkende elektromotorische Kraft von 25,1 Volt. Wenn wir nun 40 Ampere effectiv nicht nur durch den Widerstand von 1,5 Ohm, sondern auch gegen diese Rückwirkung treiben wollen, müssen wir mehr als 60 Volt aufwenden. Aber wir kommen mit weniger als $60 + 25,1$ Volt aus, wenn die Rückwirkung nicht in gleichem Tritte mit dem Strome ist. Das Ohm'sche Gesetz lässt sich hier nicht mehr anwenden. Um die erforderliche Spannung zu finden, müssen wir zur Geometrie unsere Zuflucht nehmen.

Wir zeichnen in Fig. 21 die Wellenlinie $Oabd$, welche der Spannung entspricht, die nöthig wäre, um den Strom durch den Widerstand zu treiben, wenn keine Inductanz vorhanden wäre. Wir nehmen an, dass diese Curve, welche mit dem Strome gleiche Phase hat, dem Gesetze $RJ \sin wt$ folgt. Nun zeichnen wir die Curve

1) Dies berechnet man wie folgt: Auf Seite 20 wurde gezeigt, dass die elektromotorische Gegenkraft erhalten wird, wenn wir L mit der Geschwindigkeit multipliciren, mit der sich der Strom ändert. Nun ändert sich hier der Strom nach dem Gesetze $J_0 \sin 2\pi nt$, worin J_0 der Scheitelwerth des Stromes ist. Die Geschwindigkeit der Aenderung dieses Ausdruckes ist $2\pi n J_0 \cos 2\pi nt$. Die elektromotorische Gegenkraft folgt daher dem Gesetze $2\pi n L J_0 \cos 2\pi nt$ und der effective Werth hiervon ist $2\pi n L J$. Es ist zu bemerken, dass die Gegenkraft einem Cosinusgesetze folgt, wenn der Strom nach dem Sinusgesetze verläuft, und dass in Folge dessen zwischen ihnen ein Phasenunterschied von 90 Grad herrscht.

$-wLJ$, welche die zur Ueberwindung der inductorischen Rückwirkung nöthige Spannung darstellt: diese Curve wird dem Gesetze $wLJ \cos wt$ folgen. Hierin steht w für $2\pi n$. Die Curve ist um $\frac{1}{4}$ Periode rückwärts verschoben: denn wenn der Strom am schnellsten ansteigt wie bei O , so ist die Wirkung der Selbstinduction am grössten. Nun setzen wir die beiden Curven zusammen, indem wir die Ordinaten addiren, und erhalten die punktirte Linie, deren Höchstwerth bei E liegt; dies ist die Curve der Spannung, die auf den Stromkreis wirken muss, um den Strom hervorzubringen. Man sieht, dass der Strom seinen Höchstwerth ein wenig später als die Spannung den ihrigen erreicht; der Strom ist in der Phase gegen die Spannung verzögert. Wenn Od die Zeit einer vollen Periode

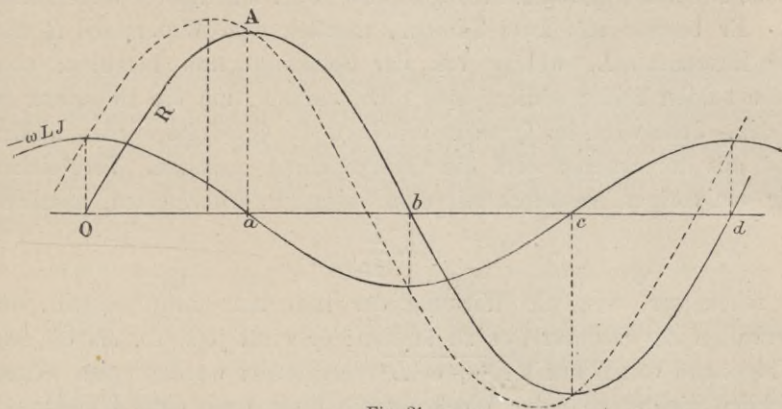


Fig. 21.

ist, so bedeutet die Länge ea die Zeit zwischen den Augenblicken, in denen Strom und Spannung ihre höchsten Werthe erreichen.

Fig. 22 stellt denselben Vorgang, wie in Fig. 16 im Polardiagramm dar. Die Länge OA bedeutet die Arbeitsspannung RJ ($R =$ Widerstand), während die Länge AD , die zu OA senkrecht steht, die elektromotorische Kraft der Selbstinduction wLJ darstellt. Indem wir diese nach dem Parallelogramm der Kräfte zusammensetzen, erhalten wir die Länge OD , welche die wirkende elektromotorische Kraft angiebt. Lässt man die Zeichnung um O als Mittelpunkt sich drehen und projecirt dabei die drei Strecken auf eine senkrechte Linie,

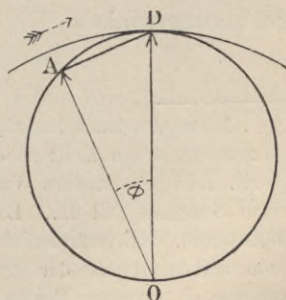


Fig. 22.

so erhält man die zusammengehörigen Augenblickswerthe der drei

Grössen. Der Winkel AOD oder φ , um den der Strom hinter der wirkenden Spannung zurückbleibt, heisst der Verzögerungswinkel. Wenn die Inductanz auch noch so gross wird, so kann doch der Winkel φ niemals grösser als 90 Grad werden. Wenn $OA = 60$ und $AD = 25,1$ ist, so wird $OD = 65$ Volt.

In Zeichen ausgedrückt muss die wirkende Spannung so gross sein, dass

$$E^2 = (RJ)^2 + (\omega LJ)^2,$$

woraus die Gleichung

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Der Nenner des Bruches auf der rechten Seite der letzten Gleichung heisst gewöhnlich Impedanz¹⁾ oder scheinbarer Widerstand.

Er besteht aus zwei Theilen, nämlich dem Widerstand R und der Reactanz ωL , welche von der Selbstinduction herrührt; aber diese beiden Theile addiren sich nicht einfach, um die Impedanz zu bilden. Jede wird ins Quadrat erhoben, die Quadrate werden addirt, und aus der Summe wird die Quadratwurzel gezogen. Vergleichen wir den vorigen Ausdruck mit dem Gesetz für Gleichstrom, nämlich:

$$J = \frac{E}{R},$$

so sehen wir, dass die Wirkung der Inductanz darin besteht, das Verhalten des Stromkreises zu ändern; er wirkt jetzt so, als ob sein Widerstand von R auf $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ vergrössert worden wäre. That-sächlich richtet sich der Wechselstrom nicht nach dem Widerstand, sondern nach der Impedanz des Stromkreises. Die Gleichung giebt uns die Stärke des Stromes, aber nicht seine Phase.

Aus den Fig. 23 und 24 sieht man, dass die Tangente des Vergrösserungswinkels

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega LJ}{RJ} = \frac{\omega L}{R}$$

1) Der Ausdruck Impedanz bedeutet allgemeiner das Verhältniss der wirkenden elektromotorischen Kraft zu dem Strome, welchen sie in einem Leiter hervorruft (vergl. Lodge's Modern Views, Seite 398); die obige Gleichung stellt also nur einen einzelnen Fall dar. Bei Gleichstrom ist demnach die Impedanz einfach der Widerstand. Bei veränderlichen Strömen setzt sie sich zusammen aus Widerstand, Inductanz und (wenn der Stromkreis elektrostatische Capacität hat) Permittanz in verschieden grossem Maasse, je nach der Form der Aenderung. Bei wirklichen periodischen Strömen, die dem Sinusgesetze folgen, ist die Impedanz gleich der Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate des Widerstandes und der Inductanz. Bei Strömen, welche sich rascher ändern, wird die Impedanz mehr von der Selbstinduction und weniger von dem Widerstande abhängen.

ist. Der Strom wird so verzögert, als wenn sein Phasenwinkel nicht Θ , sondern $\Theta - \varphi$ wäre, so dass die Gleichung der Augenblickswerte von J , wenn $E = D \sin \Theta$, lautet

$$J = \frac{D \sin (\Theta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Dies ist die Maxwell'sche Gleichung für periodische Ströme, die durch Inductanz verzögert werden. Da die Messinstrumente die

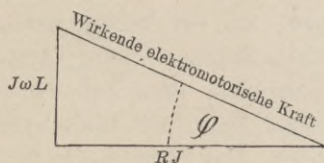


Fig. 23.

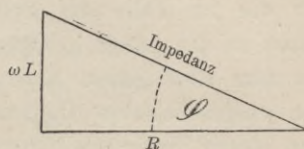


Fig. 24.

Phase nicht berücksichtigen, sondern die effective Werthe angeben, so ist die zuerst mitgetheilte einfachere Form gewöhnlich ausreichend.

Die Beziehung zwischen Widerstand und Impedanz wird leicht aus dem Dreieck, Fig. 24, erhalten; denn der Winkel φ giebt uns die Beziehungen:

$$\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Wenn wir es vorziehen, können wir für die Impedanz im Nenner der beiden ersten Ausdrücke ihren Werth $R/\cos \varphi$ einsetzen.

Die obigen Gleichungen gelten sowohl für Scheitel-, wie für effective Werthe. Z. B. können wir schreiben:

$$J_{\max} = \frac{E_{\max}}{\text{Impedanz}} \quad \text{oder} \quad J_{\max} = \frac{E_{\max}}{\text{Widerstand}} \cdot \cos \varphi$$

$$\text{und} \quad J_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\text{Impedanz}} \quad \text{oder} \quad J_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\text{Widerstand}} \cdot \cos \varphi.$$

Das Uhrdiagramm mit den sich drehenden Graden kann sowohl mit Scheitel-, wie mit effective Werthen gezeichnet werden.

Wirkung der Capacität. Wenn eine elektromotorische Kraft auf einen Condensator wirkt, so fließt der Strom ein und aus, indem er den Condensator in abwechselnder Richtung ladet. Während der Strom einerseits ein-, andererseits ausfließt, ladet sich das Dielektricum und sucht sich selbst zu entladen, indem es eine elektromotorische Gegenkraft entwickelt. Seine Gegenspannung wächst ebenso, wie die Ladung ansteigt. Eine mechanische Analogie bietet eine Feder, welche man spannt; während sie gespannt wird, äussert sie eine

Gegenkraft, welche proportional der Spannung ist, der die Feder unterworfen wird. Wird die Feder einer periodischen Kraft ausgesetzt, so sucht die Elasticität der Feder die Rückwärtsbewegung zu beschleunigen. In der gleichen Weise sucht die elektrische Elasticität eines Condensators den Rückfluss des Stromes zu beschleunigen.

Die Wirkung der Capacität im Wechselstromkreise besteht darin, dem Strome in der Phase eine Voreilung zu ertheilen; denn der Condensator wirkt auf den Strom zurück, indem er ihn zurücktreibt, nicht wie im Falle der Selbstinduction, wo der Strom gewissermaassen in die Länge gezogen wird. Beim Studium dieser Vorgänge muss man stets genau unterscheiden zwischen dem Fall einer in Reihe eingeschalteten Capacität und dem Fall, wo die Capacität neben einem Zweig des Stromkreises liegt. Das Obengesagte bezieht sich auf in Reihe geschaltete Capacität, d. h. der Leiter des Stromkreises ist thatsächlich durchgeschnitten und seine Enden sind an

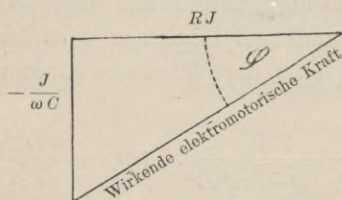


Fig. 25.

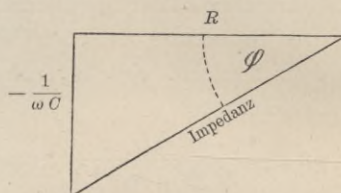


Fig. 26.

die Pole eines Condensators gelegt worden, so dass kein Strom fließen kann, ausser dem Ladungs- und Entladungsstrom des Condensators. Schalten wir die Capacität einem Theil des Stromkreises parallel, und betrachten wir nun die Vorgänge in diesem Theil, wenn an seinen Enden eine gegebene Wechselkraft wirkt, so hat die Capacität gar keine Wirkung. Wenn aber die Spannung an einem anderen Theil des Stromkreises gegeben ist, so wird die Aufgabe verwickelter und erfordert die Kenntniss der Impedanzen der verschiedenen Theile des Stromkreises. Kehren wir zum einfachen Stromkreise mit einem Condensator in Reihe zurück, so sehen wir, dass der Condensator um so stärker zurückwirkt, je kleiner er ist. Die Reactanz wird deshalb in der Form $-\frac{1}{\omega C}$ geschrieben; sie ist negativ und umgekehrt proportional zu C (der Capacität in Farad) und zu ω ; der Winkel φ wird dann aus der Gleichung

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{\omega} CR$$

bestimmt. Die Impedanz ist

$$\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}.$$

Fig. 25 und 26 zeigen die in diesem Falle anzuwendende Construction.

Wenn sowohl Inductanz als Capacität vorhanden sind, so ist

$$\operatorname{tg} \varphi = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) R;$$

die Reactanz ist

$$\omega L - \frac{1}{\omega C},$$

die Impedanz

$$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Dies wird durch Fig. 27 erläutert, wo das Dreieck zur Bestimmung von φ gezeichnet wird, indem man ωL rechtwinkelig an R ansetzt und dann $\frac{1}{\omega C}$ von ωL abzieht.

Dieselbe Construction lässt sich auf einen Stromkreis anwenden, der mehrere ωL Widerstände, Inductanzen und Capacitäten enthält.

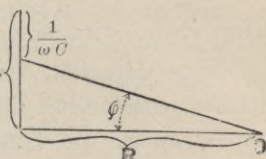


Fig. 27.

Da Capacität und Inductanz entgegengesetzte Wirkung haben, können sie zur gegenseitigen Ausgleichung benutzt werden. Sie heben sich genau auf, wenn $L = \frac{1}{\omega^2 C}$; in diesem Falle besitzt der Stromkreis scheinbar keine Inductanz, und die Ströme befolgen einfach das Ohm'sche Gesetz.

Man sieht, dass in einem Stromkreise von geringem Widerstande, aber grosser Reactanz der Strom fast allein von der letzteren abhängt. Denn wenn $\omega (= 2 \pi n)$ z. B. = 1000 und $L = 10$ Henry ist, während R nur 1 Ohm beträgt, so ist der Antheil des Widerstandes an der Impedanz zu vernachlässigen, und die Formel lautet:

$$J = \frac{E}{\omega L}.$$

Wenn der magnetische Weg, der sich durch den Stromkreis schlingt, kein Eisen enthielte, so würde der Strom um fast 90 Grad nacheilen. Besteht aber der magnetische Kreis hauptsächlich aus Eisen, so fliesst ausser dem Strom, den unsere Gleichung darstellt, noch ein anderer Strom, der mit der Spannung in Phase ist, und

der den Verlust im Eisen (durch Hysteresis und Wirbelströme) bestreitet. Praktisch finden wir also, dass der Gesamtstrom um weniger als 90 Grad nacheilt.

Selbstinductionsspulen mit grosser Inductanz und kleinem Widerstand werden manchmal zur Abschwächung eines Wechselstromes gebraucht und werden Drosselspulen oder Impedanzspulen genannt.

Die obige Formel wird zur Berechnung von Wechselstrom-Elektromagneten gebraucht; denn deren scheinbarer Widerstand rührt fast nur von der Inductanz her.

Wird der Strom in einen Condensator von kleiner Capacität (z. B. $C = 0,1$ Mikrofarad, $\frac{1}{\omega C} = 10\,000$) geleitet, so wird der Strom, der in den Condensator und herausfliesst, nur durch die Capacität desselben Condensators und durch die Wechselgeschwindigkeit bestimmt, aber nicht durch den Widerstand, und erhält den Werth:

$$J = E\omega C.$$

Seine Phase wird eine Voreilung von fast 90 Grad haben.

Eine Capacität, welche quer zum Stromkreis wirkt, z. B. wenn ein Condensator mit den beiden Hauptleitungen verbunden ist, hat die Wirkung, die Stromstärke in der Leitung von der Dynamomaschine bis zu den Punkten, wo der Condensator angelegt ist, zu erhöhen, und damit zugleich die effectiven Spannungen dieser Punkte. Auf diese Weise beeinflusst er zugleich die Spannung in der übrigen Anlage. Bei gegebenen Werthen der Frequenz, des Widerstandes und der Selbstinduction giebt es einen besonderen Werth der Capacität, welcher Strom und Spannung durch eine Art Resonanzwirkung ausserordentlich stark erhöht. Diese verschiedenen Condensatorwirkungen sind von verschiedenen Schriftstellern untersucht worden. Eine sehr klare Auseinandersetzung darüber giebt Fleming¹⁾, der auch die in der Deptforder Anlage an den Ferranti'schen Kabeln beobachteten Erscheinungen berücksichtigt.

Mittlere Leistung. — Die Leistung kann hier nicht, wie bei Gleichstrom, direct durch einfache Multiplication der Spannung mit dem Strom erhalten werden; denn wenn eine Phasendifferenz vorhanden ist, sind die so berechneten scheinbaren Watt immer grösser als die wirklichen Watt. Wir sahen auf Seite 19, dass der mittlere Werth des Products zweier periodischer Functionen gleich ist dem

1) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 20, S. 362. 1891.

halben Product ihrer Scheitelwerthe, multiplicirt mit dem Cosinus ihrer Phasendifferenz, oder

$$\begin{aligned} \text{Mittlere Leistung (wirkliche Watt)} &= \frac{1}{2} E_{\max} \cdot i_{\max} \cdot \cos \varphi \\ &= \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi \\ &= E_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi. \end{aligned}$$

Nun kann man das Product $E_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$ betrachten als denjenigen Theil der Spannung, der mit dem Strome gleiche Phase hat, also gleich $i_{\text{eff}} \cdot R$ ist. Daher können wir die mittlere Leistung (wirkliche Watt) auch ausdrücken durch $i_{\text{eff}}^2 \cdot R$. Das heisst: Wenn der Widerstand des Stromkreises inductionslos ist, wie ein Lampen- oder ein Wasserwiderstand, so werden die wirklich im Stromkreise verbrauchten Watt in der gewöhnlichen Weise durch $i^2 R$ ausgedrückt. Es giebt aber noch eine andere Art, den Vorgang zu betrachten, nämlich die folgende.

Arbeitsloser Strom.

Wenn eine grosse Phasendifferenz zwischen Spannung und Stromstärke (entweder eine Verzögerung infolge der Selbstinduction oder eine Voreilung infolge der Capacität) herrscht, so ist die Zahl der wirklichen Watt viel kleiner als der scheinbare Werth, den man durch Multiplication der effectiven Ampere mit den effectiven Volt erhalten würde. Wie wir erörtert haben, muss dies Product noch mit dem Cosinus des Verzögerungs- (oder Voreilungs-)Winkels multiplicirt werden. Man kann nun das Product $E_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$ entweder als das Product der effectiven Ampere mit dem wirksamen Theil der effectiven Volt, oder als das Product der effectiven Volt mit dem wirksamen Theil der effectiven Ampere ansehen. Ebenso wie man eine Kraft in zwei zu einander rechtwinkelig stehende Componenten zerlegen kann, so lässt sich jeder Wechselstrom in zwei Stromcomponenten zerlegen, die um 90 Grad in der Phase verschieden sind. i lässt sich in zwei Theile zerlegen; $i \cos \varphi$ stimmt in der Phase mit der Spannung überein, und $i \sin \varphi$ ist um 90 Grad verschieden, in Quadratur mit der Spannung. Diese zwei Stromtheile kann man als den Arbeitsstrom und den arbeitslosen Strom bezeichnen.

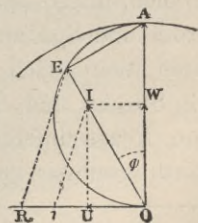


Fig. 28.

In der Fig. 28 stellt OE den wirksamen Theil der elektromotorischen Kraft OA dar. Ein Theil von OE , der durch Division von OE durch R (vergl. Seite 24) gefunden wird, stellt den Strom i

dar. Die eine Componente OW , die mit OA in der Phase übereinstimmt, ist der Arbeitsstrom, und der Theil OU (90 Grad von OA) ist der arbeitslose Strom.

Wenn nun aus irgend einer Ursache der Verzögerungswinkel φ gross ist, so wird der arbeitslose Theil des Stromes ebenfalls gross. Wenn z. B. Umsetzungsapparate mit offenem secundären Kreise eingeschaltet werden, so ist der Strom in der primären Wickelung unter dem Einfluss der Selbstinduction nahezu um 90 Grad von der Spannung verschieden und würde ganz arbeitslos sein, wenn nicht in den Eisenkernen Hysteresis oder Wirbelströme wirkten.

Wenn z. B. ein Strom von 100 Ampere effectiv um 14 Grad hinter der Spannung verzögert ist, kann derselbe zerlegt werden in einen Arbeitstrom von 97,03 Ampere effectiv und einen arbeitslosen Strom von 24,2 Ampere effectiv.

Leistungsfactor.

Hiernach können wir $\cos \varphi$ als den Leistungsfactor bezeichnen, da die scheinbare Leistung stets mit ihm multiplicirt werden muss, um die wirkliche Leistung zu erhalten. Ist z. B. ein Strom um 30 Grad hinter der Spannung verzögert, so würde ein Strom von 50 Ampere bei 1200 Volt Spannung nicht 60 Kilowatt, sondern nur $60 \times 0,866 = 52$ Kilowatt leisten, da $\cos \varphi = 0,866$ ist. Um 60 Kilowatt effectiv zu bekommen, müssten $50 : 0,866 = 57,7$ Ampere verfügbar sein. Es muss also überall, wo Selbstinduction vorhanden ist, den Motoren ein stärkerer Strom zugeführt werden, als sonst erforderlich wäre.

Messung von Wechselströmen.

Die obigen Darlegungen zeigen, dass die Messung von Wechselströmen mit grosser Sorgfalt ausgeführt werden muss. Wenn zwischen Strom und Spannung keine Phasendifferenz besteht, sind die scheinbaren Watt gleich den wirklichen; in diesem Falle kann die Messung mit Strom- und Spannungsmessern bewirkt werden¹⁾. Ist dagegen eine Phasendifferenz vorhanden, muss zur Messung ein passender Leistungsmesser gebraucht werden; die gewöhnliche Ausführungsform

1) Wer mit diesem Gegenstande nicht vertraut ist, sollte die Abhandlungen von Blakesley oder von Fleming durchsehen. Die Drei-Dynamometer-Methoden von Blakesley und von Ayrton und ähnliche sind alle brauchbar. Fleming hat auf Grund vieler Erfahrungen die einfache Wattmesser-Methode bevorzugt; vergl. Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 21, S. 594. 1892.

dieser Apparate ist ein Elektrodynamometer, welches so gebaut ist, dass der grosse Widerstand desselben selbstinductionslos ist.

Zahlenbeispiel. Es sei eine elektromotorische Kraft von 65 (effectiven) Volt und mit 50 Perioden in der Secunde gegeben. Der Widerstand des Kreises betrage 1,5 Ohm, der Coëfficient der Selbstinduction 0,002 Henry. Gesucht wird die Verzögerung, der Strom und die mittlere Leistung.

Um die Verzögerung zu finden, müssen wir zunächst die Inductanz $2\pi nL$ bestimmen und diese durch den Widerstand dividiren, dann ist:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi nL}{R} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 50 \cdot 0,002}{1,5} = 0,419.$$

Daraus $\varphi = 22$ Grad $44'$ und $\cos \varphi = 0,9223$. Wir können auch $\cos \varphi$ direct bestimmen aus der Formel

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}}$$

Multiplicirt man $\cos \varphi$ mit 65 Volt, so giebt dies 59,65 oder rund 60 als die wirksamen effectiven Volt, und dividirt durch den Widerstand 40 effective Ampere als Stromstärke. Die mittlere Leistung ist $65 \cdot 40 \cdot 0,9223 = 2400$ Watt.

Drehungsmoment von Wechselstrommaschinen.

Das Vorhandensein einer Phasenverzögerung bei dem Strome einer Wechselstrommaschine hat eine sehr eigenthümliche Folge. Wir wissen, dass elektrische Energie von der Maschine geliefert wird und man Kraft zum Betriebe aufzuwenden hat, wenn die Stromstärke im Stromkreise mit der Spannung in der Richtung übereinstimmt, dass aber bei der Wirkung einer elektromotorischen Gegenkraft elektrische Energie in mechanische umgesetzt wird und beim Umtriebe hilft. Das eine findet beim Stromerzeuger, das zweite bei der Triebmaschine statt.

Man erwäge nun, dass beim Betriebe einer Wechselstrommaschine der Strom hinter der Spannung zurückbleibt, wie aus der Fig. 29 zu ersehen ist. Es wird einleuchten, dass infolge dessen der Strom in einzelnen Zeitpunkten gegen die Spannung anstatt in derselben Richtung wirkt. Jede volle Periode OX können wir in vier Theile zerlegen; in den Abtheilungen II und IV stimmen Strom und Spannung in der Richtung überein, indem beide Grössen entweder positiv oder negativ sind, in den Abtheilungen I und III sind die Richtungen entgegengesetzt, der zurückgebliebene Strom hat sein

Vorzeichen noch nicht gewechselt. Während der Perioden II und IV, in denen Uebereinstimmung herrscht, verhält sich die Maschine wie ein Stromerzeuger und muss getrieben werden, da die Ströme im Anker ein Gegenmoment hervorbringen. Während der Perioden I und III dagegen wirkt die Maschine wie eine Triebmaschine, sie sucht selbst ihren Umlauf zu fördern und das Drehungsmoment zu vergrössern. Die Ankerleiter unterliegen daher einer Wirkung, die zwischen Ziehen und Gezogenwerden abwechselt; sie leisten Widerstand, während sie umgetrieben werden, und unterstützen dann wieder den Umtrieb. Jedes erfolgt je zweimal in jeder Periode.

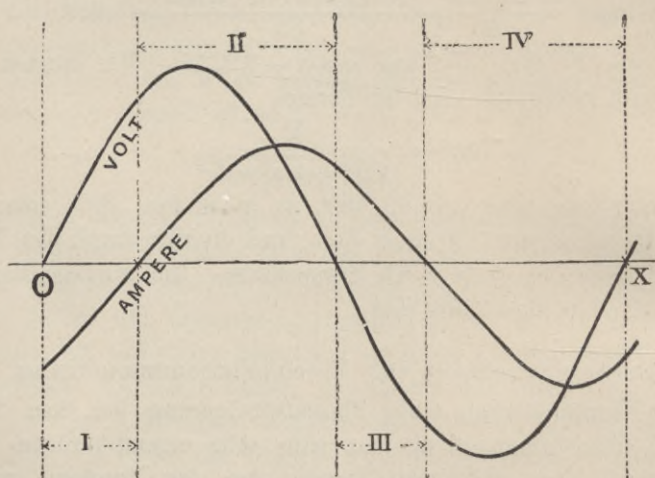


Fig. 29. Wirkung der Stromverzögerung.

Wenn nur eine geringe Verzögerung vorhanden ist, so wird auch nur eine geringe treibende Thätigkeit der Leiter entwickelt, bei grosser Verzögerung wächst aber diese Thätigkeit je nach der Dauer der Periodentheile I und III. Beträgt die Verzögerung genau ein Viertel einer Periode, so sind beide Wirkungen einander gleich. Wenn infolge von Capacität der Strom in der Phase verschoben wird, so herrscht ebenso in einzelnen Periodentheilen eine treibende Wirkung. Dies lässt sich noch in anderer Weise betrachten. Die elektromotorischen Kräfte wechseln das Zeichen, wenn die Leiter aus einem magnetischen Felde in das andere eintreten (vergl. Fig. 30) und in letzterem die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung verlaufen. Besitzt der Strom dieselbe Phase wie die elektromotorische Kraft, so sucht er die ihn erzeugende Bewegung zu hemmen, und kehrt sich um, wenn der Leiter in das Feld bei *aa* gelangt. Bleibt

er in der Phase zurück, so unterstützt er, nachdem die Leiter von einem Feld in das andere getreten sind, die Bewegung bis zu der Zeit, wo der Strom bei *bb* umgekehrt ist.

Hieraus folgt, wenn eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung vorhanden ist, dass die wirkliche Leistung im Stromkreise gleich ist dem Unterschiede zwischen der Leistung, welche während der Perioden II und IV verbraucht wird, und der Leistung, welche während I und III geleistet wird. Wenn die Phasendifferenz geringer als 90 Grad ist, wirkt die Maschine im Ganzen genommen als Stromerzeuger, wenn der Unterschied grösser als 90 Grad ist, wirkt sie als Triebmaschine. Wenn zwei Wechselstrommaschinen hintereinander verbunden sind, wobei die eine als Stromerzeuger, die andere als

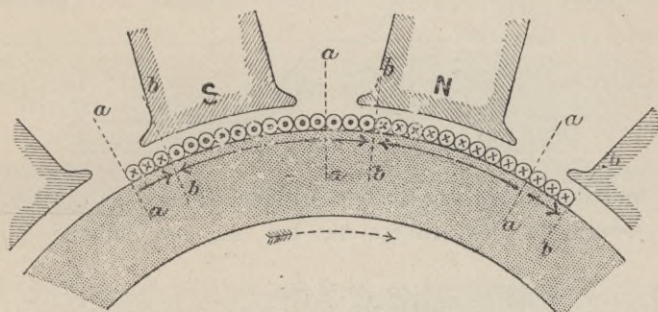


Fig. 30.

Triebmaschine wirkt, wird der Strom in der einen nahezu in Phase mit der elektromotorischen Kraft sein, bei der andern aber fast genau entgegengesetzt.

Gegenwirkung des Ankers eines Wechselstromerzeugers.

Wir wollen nun die Wirkung des Ankerstromes auf das magnetische Feld untersuchen und zunächst den Fall betrachten, dessen Theorie am einfachsten ist, nämlich einen Anker, dessen Leiter auf der Oberfläche des Ankerkernes liegen. Später werden wir dann die mehr der Praxis entsprechenden Fälle untersuchen, dass die Ankerleiter einzeln oder zu mehreren in Vertiefungen des Eisenkernes eingebettet sind.

Fig. 31 stellt die beiden Pole einer Wechselstrommaschine dar. Die Punkte in den Querschnitten der Feldwicklung sollen andeuten, dass in dem betreffenden Draht ein Strom aufwärts aus der Ebene des Papiers heraus fließt; durch die Kreuze wird die umgekehrte Richtung des Stromes angedeutet. Wenn kein Strom durch den Anker

fließt, ist das magnetische Feld gleichmässig über die Poloberflächen verteilt, wie es die untere Curve der Kraftliniendichte anzeigt.

Betrachten wir nun den in Fig. 32 dargestellten Fall. Der Ankerstrom ist hier als in Phase mit der Spannung befindlich voraus-

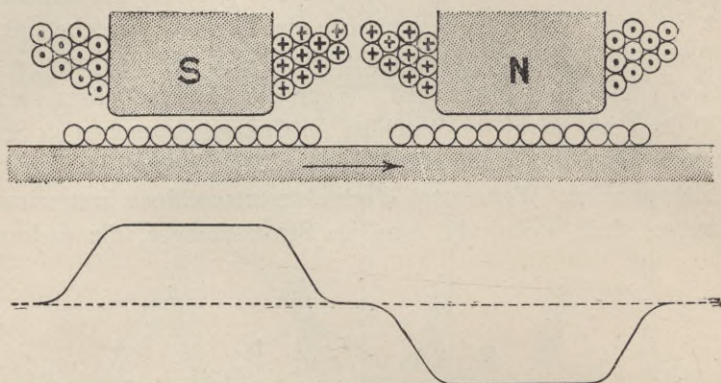


Fig. 31. Feldverteilung bei Leerlauf.

gesetzt, und die Wickelung in der Mittellage dargestellt. Der Strom auf der Oberfläche des Ankers hat bei der gezeichneten Richtung

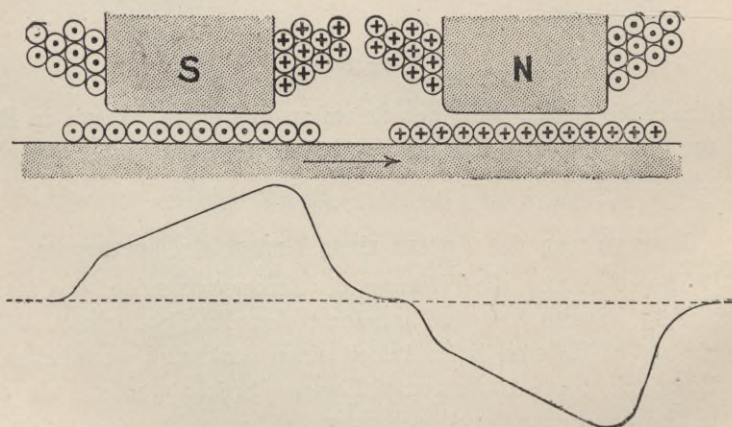


Fig. 32. Feldverteilung, wenn keine Phasenverschiebung vorhanden und die Spule in der Mittellage ist.

offenbar das Bestreben, das Feld links von den Polen zu schwächen, rechts zu verstärken, daraus ergibt sich die in der Curve gezeichnete Kraftlinienverteilung. So lange nun die Spule in der Mittellage sich befindet, wird die gesammte Dichte hierdurch nur wenig vermindert, nämlich nur insofern, als dadurch eine gewisse Neigung

zur Sättigung im Eisen entsteht. Sobald indessen die Spule ihre Mittelstellung verlassen hat, wird die Wirkung eines noch in ihr kreisenden Stromes die Wirkung haben, dass die Dichte sich vermindert, und diese Wirkung würde recht beträchtlich sein, wenn nicht in dem Maasse, in dem sich die Spule der Stellung nähert, wo ihre entmagnetisirende Wirkung am grössten ist (vorausgesetzt, dass sie in dieser Stellung unter Strom stände), der Strom in Wirklichkeit bis auf Null herabsinken würde. Man sieht hieran, dass die Wirkung der Spule, bevor sie ihre Mittellage erreicht und wo der Strom in ihr verhältnissmässig stark ist, in einer Vermehrung der Kraftlinien-dichte besteht, wobei gleichzeitig das Feld ein wenig verzerrt wird.

Dies trifft aber nur zu, wenn Strom und Spannung gleiche Phase haben. Ist indessen der Strom hinter der Spannung etwas

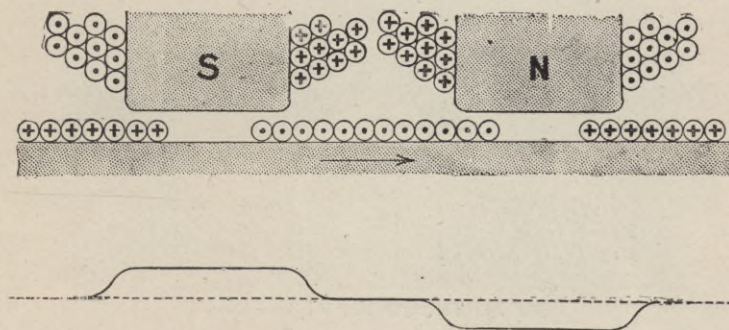


Fig. 33. Entmagnetisirende Wirkung bei 90° Phasenverzögerung.

verzögert, so dass sein Höchstwerth erst eintritt, wenn die Spule ihre Mittelstelle bereits überschritten hat, so wird die entmagnetisirende Wirkung stark sein. Würde zum Beispiel der Strom um nahezu 90° hinter der Spannung zurückbleiben, so dass sich die Spule in der in Fig. 33 dargestellten Lage befindet, wenn der Strom seinen Höchstwerth erreicht hat, so würde er dem Strom in den Feldspulen direkt entgegengerichtet sein, wie aus der Fig. zu ersehen ist.

Wenn umgekehrt der Strom vorseilt, so ist er am stärksten in denjenigen Lagen der Spule, wo er den Magnetismus vermehrt.

Ein verzögerter Strom vermindert demnach die Feldstärke, ein vorseilender Strom hat das Bestreben sie zu vermehren.

Diese Darlegungen gelten für einen Stromerzeuger. Bei einem Motor hat der Strom die umgekehrte Richtung, die Bedingungen sind also entgegengesetzte. Daher wird bei einem Motor durch einen ver-

zögerten Strom die Feldstärke vermehrt, durch einen vorauseilenden Strom vermindert.

Untersuchen wir nun den Fall, wo die Ankerleiter in Löcher oder Vertiefungen des Kernes versenkt sind, so werden wir finden, dass der verzerrende Einfluss des Ankerstromes in diesem Falle viel bedeutender ist. Zum Theil rührt dies davon her, dass bei einem Zahnanker der Luftzwischenraum gewöhnlich erheblich geringer ist, und daher eine viel geringere magnetisirende Kraft schon genügt, eine Verzerrung hervorzubringen; zum andern Theil kommt es daher, dass die gesammte magnetisirende Kraft der in ihrer Mittelstellung unter dem Pol zusammengedrängten Leiter dahin wirkt, dass die Kraftlinien nach dem vor ihnen liegenden Zahn hin vermehrt, nach dem zurück liegenden Zahn aber vermindert wird. Das hat zur Folge, dass die gesammte durch die Ankerspule tretende Kraftlinien-

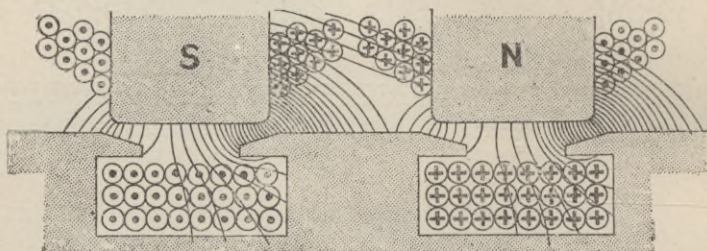


Fig. 34. Feldvertheilung bei Zahnankern.

zahl ziemlich constant bleibt, so lange noch ein nennenswerther Theil des Zahnes sich unter dem Pol befindet. In dem Augenblick jedoch, wo der Zahn im Begriff ist, den Pol zu verlassen, wird die Kraftlinienzahl ziemlich plötzlich vermindert, wodurch die Curve der elektromotorischen Kraft plötzlich zu einer hohen Spitze ansteigt. Diese Spitze ist mehr oder minder bei allen Wechselstrommaschinen mit Zahnankern erkennbar, wenn sie auch durch Abflachen der Zahn-ecken in ihrer Form geändert werden kann. In Fig. 34 ist der Fall dargestellt, wo nur ein Zahn für jeden Pol vorhanden ist. Kommen mehrere Zähne auf einen Pol, so nähert sich der Fall dem in Fig. 30 dargestellten und die Curve der elektromotorischen Kraft kann dann der Sinuscurve sehr ähnlich gestaltet werden. Bei der Untersuchung der mehrphasigen Wickelungen im nächsten Kapitel werden wir sehen, in welcher Weise die Ankergegenwirkung dadurch geändert wird. Bekanntlich kann jede gewöhnliche in sich zurücklaufende (geschlossene) Ring- oder Trommelwicklung, wie sie bei den Ankern

von Gleichstrom-Maschinen und Motoren angewendet werden, zur Erzeugung von Mehrphasenströmen dienen. In diesen Fällen werden aber die Wickelungen nicht wie bei Gleichstromankern zu einer grösseren Zahl von aufeinander folgenden Punkten mit einem Commutator verbunden, sondern sie werden in viel weniger häufigen Zwischenräumen an Schleifringe angelegt. Bei einer einphasigen Wechselstrommaschine mit 12 Polen würden z. B. nur 12 Punkte abwechselnd mit einem der beiden Schleifringe verbunden werden, so dass auf jeden Schleifring 6 Verbindungsstellen kämen. Derartige Wickelungen sind als Vertheilungs- oder mehrzahnige Wickelungen bekannt; und jede Wickelung ist so über dem Ankerumfang vertheilt, dass mehrere Zähne auf jeden Pol entfallen im Gegensatz zu der Anordnung nach Fig. 34, wo sie in breite Löcher mit nur einem Zahn auf jeden Pol zusammengedrängt ist.

Bei den mehrzahnigen Wickelungen ist die Ankergegenwirkung viel geringer als bei den einzahnigen, aber dafür ist die für die gleiche elektromotorische Kraft erforderliche Windungszahl viel grösser.

Ueber die Vektoreigenschaften von Wechselströmen und einfache Rechnungsmethoden wird der Leser auf nachstehende Werke verwiesen: Ferraris, G., „Vettori Rotanti“ Mem. Reale Accad. d. Sci. Torino, Serie II, Bd. 44, 3. Dez. 1893, unter dem Titel: „A Method for the Treatment of Rotating or Alternating Vectors“ im *Electrician*, Bd. 33, S. 110, 129, 152 und 184 erschienen. Ferner eine Abhandlung desselben Verfassers „Teoria Geometrica dei Campi Vettoriali“, Torino, 1877. Sumpner, W. E., „Vector Properties of Alternating Current and other Periodic Properties“, Proc. Roy. Soc. Bd. 60, S. 462. Rhodes, W. G., „Contributions to the Theory of Alternating Currents“, Proc. Roy. Soc. Jan. 1898; und „The Application of Vector Algebra to Alternating Currents“ *Electr. Rev.* Jan. 1898.

Kapitel II.

Mehrphasige Ströme.

Wir können nun die Frage der Erzeugung mehrphasiger Ströme in Angriff nehmen. Das Prinzip der Verwendung mehrphasiger Ströme besteht, in kurzen Worten, darin, den Anker des Stromerzeugers mit Spulen, die in zwei, drei oder mehr Gruppen zusammenschaltet sind, zu versehen und diese während jeder Periode eine nach der anderen in Thätigkeit treten zu lassen.

Bis jetzt haben wir angenommen, dass die Feldmagnete des Wechselstromerzeugers feststehen, während der Anker sich dreht. Aber dies ist nicht nothwendig; in der That wird bei den meisten Wechselstrommaschinen der neueren Zeit, einphasig oder mehrphasig, die umgekehrte Anordnung verwendet; der Feldmagnet dreht sich, während der Anker feststeht. Dass man dieser Bauart den Vorzug giebt, rührt daher, dass man die Wickelung auf einem feststehenden Anker weit leichter isoliren kann; und dies wird sehr wichtig, wenn hohe Spannungen erzeugt werden sollen, wie es bei Kraftübertragung auf grössere Entfernungen der Fall ist.

Betrachten wir nun den einfachsten Fall eines feststehenden Ankers — einen Ring mit zwei Spulen, die auf entgegengesetzten Seiten aufgewickelt sind — und einen sich drehenden Feldmagnet von einfacher zweipoliger Form.

In der untenstehenden Fig. 35 werden zwei solche elementare Maschinen dargestellt, die durch zwei Leitungen zum Zwecke der Kraftübertragung verbunden sind; die eine dient als Stromerzeuger und muss durch eine Kraftmaschine angetrieben werden, die andere läuft als ein synchroner Motor. Es ist bekannt, dass ein solcher Motor nicht von selbst angeht; er muss mit der Hand oder in anderer Weise angelassen und auf die richtige Geschwindigkeit gebracht werden, ehe man ihn in den Stromkreis einschaltet; dann läuft er in vollkommenem Synchronismus mit dem Stromerzeuger,

wobei seine eigene elektromotorische Kraft fast genau die entgegengesetzte Phase wie die des Stromerzeugers hat.

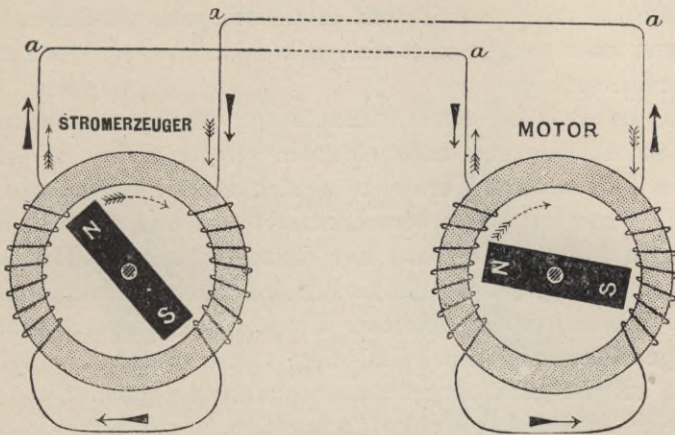


Fig. 35. Übertragung von einem einfachen Wechselstromerzeuger auf einen einfachen synchronen Motor.

Einige der allerältesten Wechselstromerzeuger — die von Lontin und Gramme — hatten umlaufende vielpolige Feldmagnete mit feststehenden äusseren Ankern.

Gramme's Wechselstrommaschinen wurden um 1877 für die Speisung der Jablochkoffschenschen Kerzen gebaut. Fig. 36 zeigt diese Maschine mit ihren acht umlaufenden Polen, abwechselnd Nord und Süd. Der Anker bestand aus einem untertheilten Eisenringe als Kern und einer Wicklung aus Kupfer, in der die Wechselströme inducirt werden sollten. Man fand bald (wie wir sogleich sehen werden), dass es von keinem Nutzen sei, die einzelnen Spulen besonders breit zu machen.

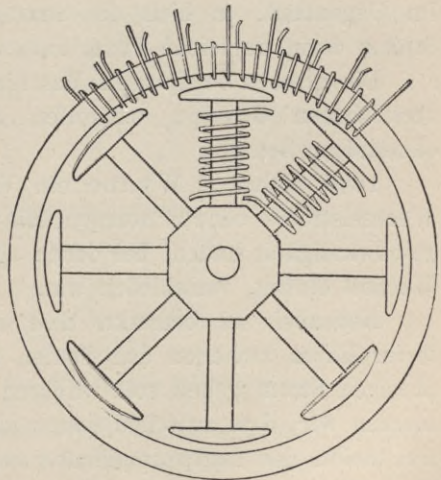


Fig. 36. Gramme'scher Wechselstromerzeuger.

Im Gegentheil, je näher die Windungen in irgend einer Gruppe zusammengedrängt werden können, um so wirksamer sind sie. Wenn man nun dieser Maschine nur acht schmale Spulen, jede einem Pole

gegenüber gegeben hätte, so würde viel Wickelungsraum auf der Maschine verloren worden sein.

Daher füllte Gramme diesen Raum mit anderen Spulen aus. Die Maschine erhielt so vier mal so viel Wickelungsabtheilungen als Pole, und hätte so geschaltet werden können, dass sie vier getrennte Stromkreise speiste.

Da die Pole bei ihrem Umlaufe vor den vier nebeneinanderliegenden Abtheilungen nach einander vorbeikommen, so ist klar, dass die vier erzeugten Wechselströme sich in der Phase unterscheiden müssen. Gramme wusste oder erkannte, dass man nicht alle Spulen vereinigen durfte; er verband nur diejenigen mit einander, die in irgend einem Augenblicke gleichzeitig den Polen gegenüberstanden.

So entstanden vier getrennte Kreise, jeder aus acht hintereinander geschalteten Spulen. Und diese vier getrennten Wickelungen wurden auf vier gänzlich getrennte Stromkreise geschaltet, von denen jeder eine Anzahl Jablochkoff'scher Kerzen mit Strom versorgte. Gramme's Wechselstrommaschine war ohne Frage ein mehrphasiger Stromerzeuger, aber es ist keinerlei Anzeichen dafür vorhanden, dass der Erbauer dieser Maschine irgend wann daran dachte, die Ströme verschiedener Phase zu irgend einer nützlichen Wirkung zu vereinigen, oder dass er nur wusste, dass sie vereinigt werden konnten. Im Gegentheil, er hielt die Stromkreise stets getrennt, weil die Ströme darin ungleiche Phase hatten.

Die grossen Zweiphasen-Maschinen in Paddington, die von dem verstorbenen Gordon entworfen wurden, stehen seit 1883 in dauerndem Betrieb.

1886 schlug F. Wynne ein Vertheilungssystem vor, in dem Wechselströme benutzt wurden, die zwar alle die gleiche Wechselgeschwindigkeit hatten, bei denen aber der Augenblick, in dem der Wechsel eintrat, verschieden war.

Nebenbei sei bemerkt, dass in jeder Wechselstrommaschine leerer Raum zwischen den Spulen bleibt, wenn die Maschine einphasigen Strom geben soll. Kehren wir zu Fig. 35 zurück, so bemerken wir, dass zwischen den beiden Spulen auf dem Ringe Raum frei bleibt, den man vortheilhaft ausnutzen kann, indem man ihn mit einer Wickelung ausfüllt. Nehmen wir also an, dass neben und zwischen den beiden Spulen AA' auf jeder Maschine noch zwei Spulen BB' angebracht werden, und dass diese wieder durch zwei Leitungen bb und $b'b'$ (Fig. 37) verbunden werden. Man sieht, dass in BB' ein zweiter Wechselstrom erzeugt wird, der genau um eine

Viertelperiode hinter dem in AA' zurückbleibt. Diese beiden Ströme werden durch die beiden Wellenzüge der Fig. 38 dargestellt. Die elektromotorische Kraft der Spule A ist genau dann am grössten, wenn der Pol des Magnetes ihrer Mitte gegenübersteht; denn in diesem Augenblick ist die Geschwindigkeit, mit der sich die

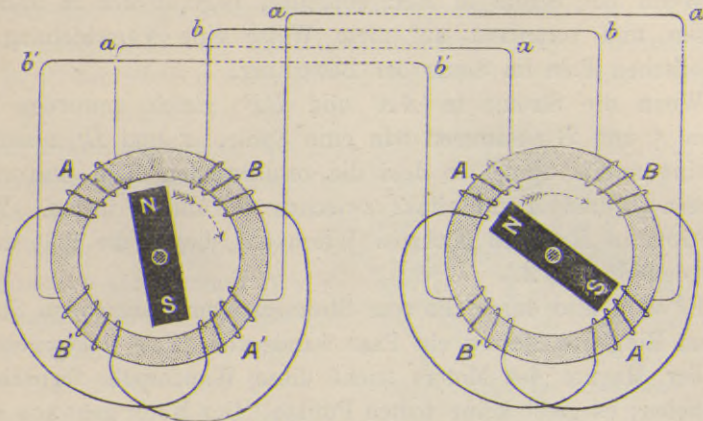


Fig. 37. Zweiphasige Uebertragung.

Magnetisierung ihres Kernes ändert, am grössten. Die Höchstwerthe für die Spulen B entsprechen den Nullwerthen für die Spulen A und umgekehrt. Zwei Wechselströme, welche in der beschriebenen

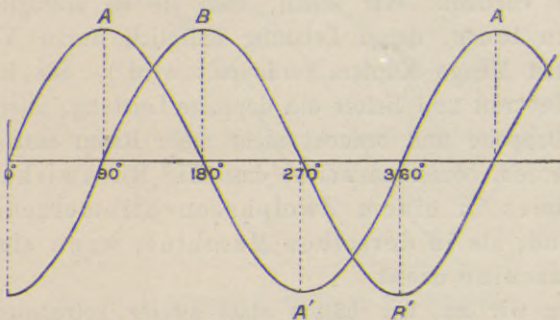


Fig. 38. Zwei Wechselströme mit einer Viertelperiode Phasenunterschied.

Art um eine Viertelperiode in der Phase verschieden sind, stehen in Quadratur.

Die Ströme in den Spulen A des Motors, welche den Pol des Feldmagnetes vorwärts zu treiben streben, sind noch nicht gänzlich verschwunden, wenn die Ströme in den Spulen B bereits begonnen haben; es kommt also kein todter Punkt zu Stande. Man sieht leicht, dass in dem Motor eine regelmässige Verschiebung der resultirenden

Pole um den Ring herum stattfindet. In dem Augenblick, wenn der Strom in AA' seinen höchsten Werth erreicht, ist der in BB' gerade Null, und die magnetisirende Wirkung AA' erzeugt zwei Folgepole im Ring an diametral gegenüberliegenden Punkten genau in der Mitte der Spulen BB' .

Wenn der Strom in AA' abnimmt, beginnt der in BB' zu wachsen und veranlasst auf diese Weise eine Verschiebung der magnetischen Pole im Sinne der Bewegung.

Wenn die Ströme in AA' und BB' gleich geworden sind, wirken A und B zusammen wie eine Spule, A' und B' zusammen wie eine zweite Spule, so dass die resultirenden Pole nun rechts zwischen B und A' und links zwischen B' und A liegen. Wenn der Strom in B seinen höchsten Werth hat, liegen die Pole mitten unter den Spulen A .

Es wird also durch die vom Stromerzeuger kommenden Ströme in dem Ring des Motors ein Paar wandernder Pole hervorgebracht und der Magnet des Motors sucht diese Wanderpole fortwährend einzuholen; es giebt keine todten Punkte. Der Motor geht von selbst an, wenn sein Magnet nicht zu mächtig ist, und läuft mit zunehmender Geschwindigkeit, bis der Synchronismus erreicht ist. Das ist der grosse Vortheil der Mehrphasen-Ströme: sie befähigen den Motor, von selbst anzugehen. Aber dies ist bei Weitem nicht der einzige Vortheil. Wir sehen, dass sie es ermöglichen, eine Maschine zu bauen, deren Leistung lediglich durch Verwendung der doppelten Menge Kupfers verdoppelt wird¹⁾. Sie braucht die doppelte Triebkraft und liefert die doppelte Leistung, aber sie kostet nicht das Doppelte und braucht nicht mehr Raum zum Aufstellen. Es ist ausserdem bemerkenswerth, dass die Rückwirkungen des Ankerstromes in einem Zweiphasen-Stromerzeuger nicht grösser sind, als in derselben Maschine, wenn sie als Einphasen-Maschine dient.

Nehmen wir an, wir hätten statt zweier getrennter Gruppen von Spulen deren drei verwendet, wie es thatsächlich Gramme in einigen seiner kleinen Maschinen that. Wir würden dann drei Ströme in drei aufeinanderfolgenden Phasen erhalten. Wenn wir

1) H. Görges, „Ueber die Ausgiebigkeit der Ankerwicklung bei Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom“. Elektrot. Zeitschr. Bd. 13, S. 236. 1892. v. Dobrowolsky erwähnte in der Discussion des citirten Vortrages eine vielpolige Gleichstrommaschine, welche 11000 Watt gab; derselbe Feldmagnet mit einem Dreiphasen-Anker gab 30000 Watt.

diese wie in Fig. 39 anordnen, können wir die Spulen *A* zusammen in einen Kreis schalten (die Spulen sind abwechselnd links und rechts gewickelt oder verbunden); die Spulen *B* werden ähnlich zu einem zweiten Kreis geschaltet, die Spulen *C* bilden den dritten Kreis. Es erhellt, dass in jedem dieser Kreise die elektromotorischen Kräfte in regelmässiger Folge steigen und fallen, und dass die elektromotorische Kraft in *B* erst dann ihren höchsten Werth erreicht, wenn die in *A* den ihrigen überschritten hat und im Abnehmen begriffen ist. Die Unterschiede in der Phase kann man durch die drei Curven der Fig. 40 darstellen.

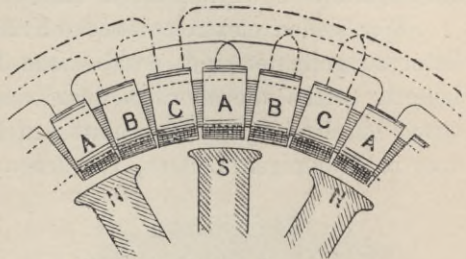


Fig. 39. Dreiphasiger Stromerzeuger.

Da der Winkelraum um die Maschine von einem Nordpol zum nächsten Nordpol einer ganzen Periode (vergl. S. 7) oder einem vollen Umlaufe von 360 Grad auf dem Kreise der Fig. 10 entspricht, so sehen wir, dass die drei Ströme sich um 60 Grad in der Phase unterscheiden. Wenn wir für jeden der drei Kreise eine besondere Hin- und Rückleitung brauchen, so

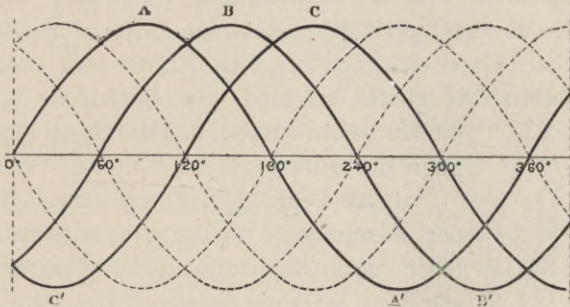


Fig. 40. Dreiphasenstrom mit 60 Grad Phasenunterschied.

müssen wir nicht weniger als sechs Drähte nach dem dreiphasigen Motor führen, den wir speisen wollen. Wenn wir aber die Spulen in geeigneter Weise, die wir noch kennen lernen werden, anordnen, so wird dieser Aufwand überflüssig und man kann die Zahl der Drähte auf vier und sogar auf drei vermindern. Lassen wir die Benutzung der Erde als Rückleitung zu, so können wir die Zahl der erforderlichen Leitungsdrähte noch weiter auf zwei vermindern.

Ehe wir zur Betrachtung der neuen Mehrphasen-Maschine übergehen, müssen wir noch der Wirkung der Breite der Ankerspulen ein wenig Aufmerksamkeit schenken.

Die Polstücke des vielpoligen drehbaren Feldmagnetes, den Fig. 41 zeigt, mögen so gestaltet sein, dass das magnetische Feld in dem Luftraum zwischen Pol und Anker in geeigneter Weise vertheilt sei, um eine regelmässige und glatte Welle als Curve der elektromotorischen Kraft zu geben, die in einem durch den Luftzwischenraum bewegten Leiter erzeugt wird.

Wir stellen elektromotorische Kräfte, die aufwärts oder auf den Leser zu gerichtet sind, durch einen Punkt in dem Querschnitt des Leiters, solche die abwärts oder vom Leser weg gerichtet sind, durch ein Kreuz im Querschnitt des Leiters dar. Es ist nun klar, dass in denjenigen Leitern, vor denen der Südpol nach rechts geht,

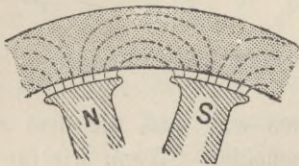


Fig. 41.

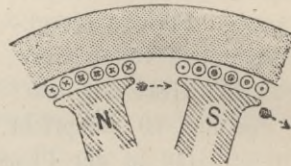


Fig. 42.

aufwärts gerichtete und in den Leitern, vor denen der Nordpol vorübergeht, abwärts gerichtete elektromotorische Kräfte erzeugt werden. Aber diese elektromotorischen Kräfte sind untereinander nicht zur selben Zeit gleich; sie sind am grössten in den Leitern, die am besten wirken, d. i. die durch den stärksten Theil des Feldes gehen.

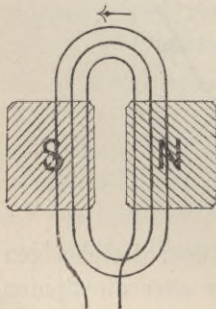


Fig. 43.

Jeder Leiter geht durch denselben Wechsel der inducirenden Wirkung; aber es ist klar, dass einer nach dem andern zu dem Punkte der stärksten Wirkung gelangt. Der Bequemlichkeit wegen wollen wir annehmen, dass diese stärkste Wirkung in jedem Leiter eintritt, wenn er vor der Mitte des Poles vorübergeht. Nun setzen wir den Fall (wie es beim Bau der Maschinen üblich ist), dass eine Anzahl dieser Leiter nach Fig. 43 zu einer Spule verbunden sei; ihre elektromotorischen Kräfte werden sich addiren. Wenn wir annehmen, wie bei Fig. 43, dass wir auf die Pole blicken, während sie von rechts nach links gehen, so werden wir dies ein wenig besser verstehen. Einen Augenblick später kommt der Nordpol

genau hinter die Spule, wie Fig. 44 zeigt; man sieht, dass es keinen Vortheil bringen kann, die inneren Windungen der Spule näher zusammenzubringen, als die Breite der Polfläche beträgt, weil in dem Augenblick, den Fig. 44 zeigt, ihre elektromotorischen Kräfte einander entgegenwirken. Einen gewissen Vortheil gewährt es, die Spule etwas schmaler zu wickeln, als die wirkliche Polfläche wegen der Gestaltung des magnetischen Feldes. Aber die durch eine Spule von bestimmter Windungszahl erzeugte elektromotorische Kraft würde grösser sein, wenn alle Windungen auf derselben Stelle lägen, so dass sie alle zur selben Zeit die wirksamste Lage durchschritten.

Um diesen Punkt noch etwas besser zu erläutern, wollen wir ein Polar- oder Uhrdiagramm verwenden. Wir nehmen an, der höchste Werth der elektromotorischen Kraft, der in einem Leiter

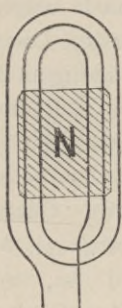


Fig. 44.

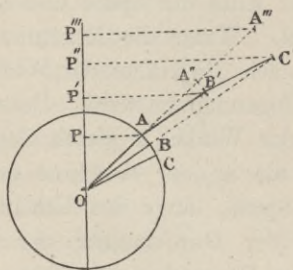


Fig. 45.

erzeugt wird, sei durch den Radius Vector OA dargestellt. Dann giebt die Projection von OA auf die senkrechte Linie OP den Werth der elektromotorischen Kraft in dem Augenblick, wann der Winkel AOP die Phase der Induction angeibt, die gerade stattfindet. Zwei andere Leiter mögen ein wenig über jenen hinaus liegen, so dass ihre elektromotorischen Kräfte durch OB und OC dargestellt werden.

Wir suchen, welche Wirkung hervorgebracht wird, wenn wir alle Leiter in Reihe schalten. Wenden wir die Regeln für die Zusammensetzung gerichteter Grössen an, so finden wir die Resultirende, indem wir von A aus die Linie AB' gleich und parallel zu OB und von B' die Linie $B'C'$ gleich und parallel OC ziehen. Dann ist OC' die Resultirende und ihre Projection OP'' auf die senkrechte Linie giebt den augenblicklichen Werth der vereinigten elektromotorischen Kräfte der drei Leiter. Lägen sie alle genau aufeinander in A , so dass kein Phasenunterschied zwischen den

elektromotorischen Kräften bestehen könnte, so würde die Resultirende OA'''' sein, und dies würde, auf die Senkrechte projectirt, OP'''' als den augenblicklichen Werth ergeben.

Eine zahlenmässige Behandlung der Aufgabe mag nützlich sein. Wir nehmen an, jeder Leiter erzeugte eine elektromotorische Kraft, deren effectiver Werth 1 Volt beträgt. Drei solcher Leiter, welche in Reihe geschaltet sind, können nur dann als gesammte elektromotorische Kraft 3 Volt liefern, wenn sie so genau übereinander liegen, dass in ihnen der höchste Werth der elektromotorischen Kraft zur gleichen Zeit erreicht wird. Jede Ausbreitung der Spulen muss den Werth der resultirenden elektromotorischen Kraft herabdrücken.

Es ist deshalb der Mühe werth, einen Breitencoefficient für eine Spule von bestimmter Winkelbreite zu berechnen.¹⁾

Wir wollen mit ψ den Phasenunterschied bezeichnen, der zwischen der Mitte der Spule und ihrem äussersten Leiter auf jeder Seite besteht. Wenn die Maschine einen zweipoligen Magnet hat, so ist ψ einfach die Hälfte der Winkelbreite (in Radianen), die von der Spule eingenommen wird. Bei vielpoligen Maschinen mit p Polpaaren ist der Winkel ψ gleich dem p -fachen der halben Winkelbreite (wie sie an der Maschine gemessen wird). Oder, wenn die Breite der Spule, längs des Umfanges gemessen, mit b bezeichnet wird, und der Durchmesser der Maschine d ist, so wird der Winkel ψ des Phasenunterschiedes, der der halben Spulenbreite entspricht $= bp/d$. Nun wird der Mittelwerth der effectiven elektromotorischen Kraft in allen Leitern innerhalb der Winkelbreite ψ durch die Formel

$$\frac{1}{\psi} \int_0^{\psi} e \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma$$

angegeben, worin e der effective Werth der elektromotorischen Kraft in einem beliebigen Leiter und γ der Winkel des Phasenunterschiedes zwischen der elektromotorischen Kraft dieses Leiters und derjenigen im mittleren Leiter der Spule ist.

Wenn wir denjenigen Theil dieses Ausdruckes, der von ψ abhängt, Breitencoefficient nennen und mit q bezeichnen, so erhalten wir durch Ausführung der Integration

$$q = \frac{\sin \psi}{\psi}.$$

1) Eine andere Methode der Behandlung ist von R. P. Brousson in *Electr. World*, Bd. 26, S. 236, 1895 angegeben. Vergl. auch Kap. IV.

Um einige Zahlenwerthe zu geben, mag aus der späteren Darstellung des Aufbaues der Maschinen etwas vorausgenommen werden. Es ist z. B. in einem Ring, der mit vier Spulen bewickelt ist, jede von einem Quadranten Breite (wie in einigen Zweiphasen-Motoren, vergl. Fig. 49),

$$\psi = 45 \text{ Grad} = 0,785 \text{ Radiant}; q = 0,90.$$

Für einen Ring mit drei Spulen, jede 120 Grad breit (vergl. Fig. 54), ist

$$\psi = 60 \text{ Grad} = 1,05 \text{ Radiant}; q = 0,82.$$

Für einen Ring mit sechs Spulen, jede 60 Grad breit (vergl. Fig. 57), ist

$$\psi = 30 \text{ Grad} = 0,523 \text{ Radiant}; q = 0,95.$$

Als Beispiel wollen wir einen vielpoligen Zweiphasen-Stromerzeuger betrachten, dessen Ankerdrähte durch Löcher in den Ankerscheiben geführt sind, und der von einem Nordpol zum nächsten Nordpol zwölf gleichmässig gebohrte Löcher besitzt. In diesem Falle gehören sechs Leiter zur einen, sechs zur anderen Phase und jede Gruppe besteht aus drei Leitern mit gleichgerichteter elektromotorischer Kraft und drei Leitern der entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft. Drei solche Leiter nehmen $\frac{1}{4}$ der ganzen Breite ein oder sind gleichwerthig mit 90 Grad auf dem Kreise. Da aber die Leiter in Bohrungen angebracht sind, so ist der effective Abstand zwischen den beiden äussersten Leitern 60 Grad, die Hälfte davon 30 Grad, also $q = 0,95$.

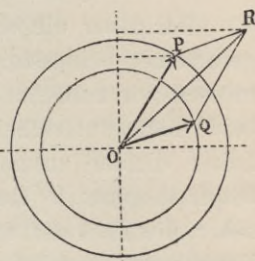


Fig. 46.

Hierbei haben wir die Annahme gemacht, dass die Curve der elektromotorischen Kraft für jeden Draht eine Sinuscurve sei, d. h. wir haben angenommen, dass die Kraftliniendichte nach einer Sinusfunction des Winkels um den Umfang des Ankers herum vertheilt sei. In der Praxis trifft dies nicht genau zu, da diese Vertheilung durch Verwendung von Polen verschiedener Breite und Form geändert wird. Wir sind hierdurch gezwungen, unsere Zuflucht zu willkürlichen Coëfficienten zu nehmen, mit denen wir uns später noch eingehender beschäftigen werden.

Ehe wir die Frage der Zusammensetzung zweier elektromotorischer Kräfte mit verschiedener Phase verlassen, wollen wir noch bemerken, dass das Prinzip der Summation gerichteter Grössen,

welches wir oben benutzt haben, zu einem sehr einfachen Ergebniss¹⁾ führt, wenn es sich um zwei elektromotorische Kräfte handelt.

Wenn OP eine dieser elektromotorischen Kräfte, OQ die andere ist (Fig. 46), so wird der Phasenunterschied zwischen ihnen durch den Winkel POQ oder φ angegeben. Setzen wir sie in der üblichen Weise zusammen, indem wir PR gleich und parallel zu OQ ziehen, so erhalten wir als Resultirende OR , welches die resultirende elektromagnetische Kraft nach Grösse und Phase darstellt. Hier ist nach dem bekannten geometrischen Satz

$$OR = \sqrt{OP^2 + OQ^2 + 2OP \cdot OQ \cos \varphi}.$$

Dies ist offenbar ein Maximum, wenn der Phasenunterschied Null ist.

Ankergegenwirkung bei Mehrphasen-Stromerzeugern.

Wenn wir die oben (S. 35) in Bezug auf einen Einphasenanker gefundenen Schlussfolgerungen auf einen Mehrphasenanker anwenden, müssen wir zunächst einige Punkte in's Auge fassen, in denen sich beide Fälle unterscheiden. Zunächst sind beim Mehrphasenanker die Leiter dichter zusammengedrängt; der Wickelungsraum ist daher besser ausgenutzt. Auf den ersten Blick sollte man meinen, es müsste daher die Zahl der entmagnetisirenden Amperewindungen bei einer Mehrphasenmaschine unter der Annahme gleicher Stromdichte in den Leitern grösser sein. Es kommen jedoch zu Gunsten der Mehrphasenmaschinen noch einige wichtige Punkte in Betracht, welche dies verhindern. Zunächst ist zu beachten, dass bei ungezahnten Ankern (Fig. 30) die in der Mitte der Spule liegenden Leiter nicht so schädlich wirken wie die nicht in der Mittellage befindlichen Leiter, denn da diese Letzteren mit den Ersteren in Reihe geschaltet sind, muss ihr Strom in gleicher Phase mit dem der ganzen Rolle sein, so dass sie in der Lage, in der sie eine das Feld stark verzerrende Wirkung ausüben, den vollen Strom führen. Nun ist die Zahl dieser nicht in günstigster Lage befindlichen Leiter bei Einphasenmaschinen, in denen der Raum für die Wickelung gut ausgenutzt ist, grösser als bei Mehrphasenmaschinen. Bei diesen entsprechen die Stromstärken in den einzelnen Leitern mehr deren jeweiligen Lage im Felde. Hiernach befindet sich die Mehrphasenmaschine, soweit die störende Gegenwirkung des Ankers in Betracht kommt, im Vortheil. Dies trifft nicht in demselben Maasse zu in dem Falle, dass die Leiter bündelweise in Kanälen gelagert sind,

1) Vergl. Thomson und Tait's Treatise on Natural Philosophy, Bd. 1, § 58.

wie in Fig. 34; jedoch ist die quer magnetisirende Wirkung viel grösser bei solchen Ankern, bei denen ein breiter Pol erzeugt wird mit starker magnetisirender Kraft, als wenn eine grössere Zahl kleiner Pole vorhanden ist, von denen jeder durch Ströme magnetisch beeinflusst wird, deren Phasen mit der jeweiligen Lage der Leiter im Felde mehr übereinstimmt. Die störende Wirkung erweist sich nach zwei Richtungen unvortheilhaft. Zunächst bringt sie eine Sättigung der Magnetpole an einer Seite hervor. Zweitens giebt sie Veranlassung zu Wirbelströmen in den Poloberflächen, da unter ihrem Einfluss die Kraftliniendichte in ihrer Lage wechselt. Die Wirkung der einseitigen Sättigung hängt ab von der grössten Magnetisirungsstärke, die zu irgend einer Zeit im Kreise herrscht, und diese ist zweifellos grösser bei Einphasenmaschinen. Die Veränderlichkeit der Verzerrung des Feldes ist bei Mehrphasenmaschinen in der That sehr gering, weil hier die vor den Polen vorbeigehenden Leiter nahezu stets ihren höchsten Stromwerth führen, während bei den Einphasenmaschinen zweimal in jeder Periode die Verzerrung zwischen ihrem Höchstwerth und Null schwankt.

Die entmagnetisirende Wirkung, welche eintritt, wenn der Strom in der Phase verzögert ist, und die im Wesentlichen von dem Verzögerungswinkel und der Gesamtsumme der auf dem Anker befindlichen Amperewindungen abhängt, ist nahezu proportional der Leistung des Ankers (bei gleicher Verzögerung), einerlei, ob die Maschine einphasig oder mehrphasig ist¹⁾.

1) Vergl. Chytraeus, *Electr. World* Bd. 25, S. 450, 1895; ferner eine Reihe von Aufsätzen in der *Elektrot. Zeitschr.*: von Korda, 8. Aug. 1895; von Behrend, 22. Aug. 1895; von Rothert, 10. Sept. 1896 (*Electrician* vom 6. Nov. 1896 enthält eine Uebersetzung des Rothert'schen Aufsatzes und mehrere Bemerkungen dazu); von Heyland, 1. Okt. 1896; von Ziehl, 8. Okt. 1896; von Braun und von Vogel-sang, 5. Nov. 1896; von Behrend, 12. Nov. 1896; nochmals von Heyland, 19. Nov. 1896; von Kando, 10. Dez. 1896.

Kapitel III.

Vereinigung mehrphasiger Ströme und Kupfergewicht der Leitungen.

Erst nachdem der Gedanke, Ströme von verschiedenen Phasen zum Betriebe von Motoren zu verwenden, entstanden war, suchte man nach Wegen, die verschiedenen Gruppen von Spulen, in denen Inductionen von verschiedenen Phasen wirkten, zu regelmässigen

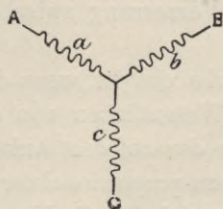


Fig. 47.

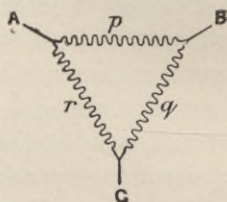


Fig. 48.

Systemen zu vereinigen. Die Verbindung von zwei- oder dreiphasigen Strömen ist bisher gewöhnlich in Bezug auf die Motoren behandelt worden; es wird indess ebenso nützlich sein, sie in Bezug auf die Stromerzeuger zu besprechen.

Es giebt im Allgemeinen zwei Wege zur Verbindung mehrphasiger Ströme, die man als Sternschaltung und Netzschaltung charakterisiren kann.

In der Sternschaltung werden die Spulen, in denen der Strom erzeugt oder verbraucht wird, mit einem gemeinsamen Punkte verbunden, von dem sie strahlenartig jede nach ihrem Stromkreise ausgehen. Zur Vergleichung eignet sich der besondere Fall eines dreiphasigen Systems. Fig. 47 zeigt schematisch die Sternschaltung von drei Spulen *a*, *b* und *c*, welche bestimmt sind, die Ströme in regelmässiger Reihenfolge zu empfangen; der Strom fliesst nach dem Mittelpunkte zunächst durch *a* (und strömt aus durch eine oder beide andere Spulen), darauf durch *b*, schliesslich durch *c*. Fig. 48 zeigt

drei Spulen, p , q und r , in Netzschaltung; hier bilden die Spulen eine geschlossene Netzmasche und sind an den Ecken mit den Stromkreisen verbunden¹⁾.

Es gibt noch einige, etwas verwickelte Schaltungen, welche aus beiden Hauptanordnungen gemischt sind. Fig. 60, Seite 55, zeigt eine solche Verbindung.

Ein weiteres Beispiel zur Erläuterung liefert ein einfaches zwei-phasiges System, in dem die verschiedenen möglichen Gruppierungen besonders betrachtet werden sollen.

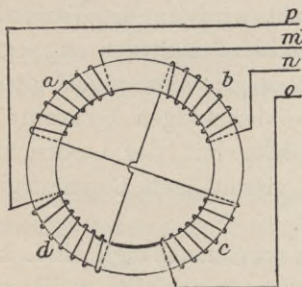


Fig. 49.

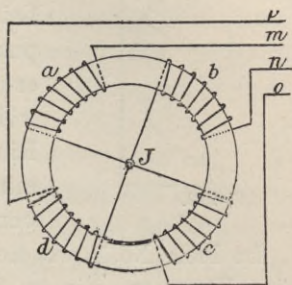


Fig. 50.

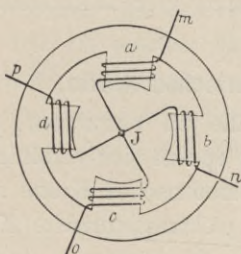


Fig. 51.

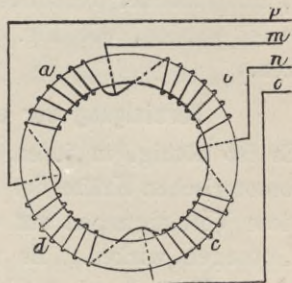


Fig. 52.

1. Unabhängige Spulen. Die Spulen des Stromerzeugers, welche in gleicher Phase sind, können wie in einphasigen Maschinen auf irgend eine Art verbunden werden, und die Spulen der anderen Phase können in ähnlicher Weise verbunden werden. So erhalten wir zwei völlig unabhängige Kreise, wie in Fig. 49 gezeigt wird; die Spulen a und c gehören zu dem einen Kreise und sind mit den Leitungen m und o verbunden, und die Spulen b und d bilden einen völlig getrennten Kreis, der zu der Leitung n und p geführt ist.

2. Sternschaltung. Die Spulen oder Spulengruppen werden mit dem einen Ende zu einem gemeinsamen Punkte J geführt, wodurch

1) Man nennt diese Schaltung auch Dreiecksschaltung. Die Uebersetzer.

ein Stern gebildet wird, und die freien Enden der Spulen werden mit den Leitungen verbunden; vergl. Fig. 50 und 51. In Fig. 50 werden die Gruppen dargestellt, als seien sie auf einen Ring gewickelt, während sie nach Fig. 51 auf Polansätzen angebracht sind. Sie unterscheiden sich in ihren magnetischen Beziehungen; betrachtet man sie aber einfach als Stromkreise, so sind sie identisch.

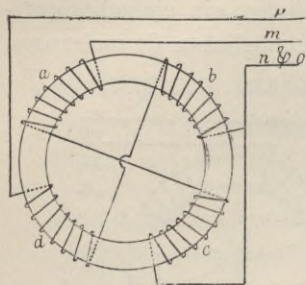


Fig. 53.

3. Netzschaltung. Die Spulen können so zusammengeschaltet werden, dass sie einen geschlossenen Kreis bilden, und der Leitungsdraht wird an die Verbindungspunkte zwischen den Spulen angelegt, wie es Fig. 52 zeigt; dies gibt einen gewöhnlichen viertheiligen Gramme'schen Ring, der aber mit vier Leitungen statt mit einem viertheiligen Commutator verbunden ist.

4. Im Falle No. 1, wo die Spulen sonst unabhängig sind, können zwei der Klemmen, die zu Spulen von verschiedenen Phasen gehören, mit einander verbunden und ein einziger Rückleitungsdraht verwendet werden, wie Fig. 53 zeigt, statt vier Leitungsdrähte zu benutzen.

Vereinigung der elektromotorischen Kräfte.

Es ist nöthig, in jedem dieser Fälle zu betrachten, wie die elektromotorischen Kräfte der getrennten Spulen sich vereinigen, und wie diese Vereinigungen auf die elektromotorischen Kräfte zwischen den Leitungen wirken. Es möge die elektromotorische Kraft der Spule *a* der Formel $e \sin \vartheta$ folgen, worin *e* der höchste in der Periode erreichte Werth ist, wie wir früher berechnet haben (Seite 8 und 9).

Zweiphasensysteme.

Wenn die Spulen unabhängig geschaltet sind, wie in Fig. 49, oder in Sternschaltung, wie in Fig. 50, so ist die elektromotorische Kraft zwischen den Klemmen *m* und *o* $2e \sin \vartheta$. Bei Sternschaltung beträgt die Spannung $\sqrt{2} \cdot e \sin(\vartheta + 45^\circ)$ ¹⁾ zwischen *m* und *n*, d. h. die Spannung zwischen den Leitungen verschiedener Phasen ist 1,4 mal so gross als die Spannung einer Spule und ist in der Phase um 45 Grad der vordersten Spule voraus.

1) $e \cdot [\sin \vartheta + \sin(90^\circ + \vartheta)] = e \sin(\vartheta + 45^\circ) \cos 45^\circ = \sqrt{2} \cdot e \sin(\vartheta + 45^\circ)$.

Die Uebersetzer.

Wenn die Spulen zur Netzmasche verbunden sind, wie in Fig. 52, so ist die Spannung zwischen m und p natürlich die elektromotorische Kraft, die in a erzeugt wird, nämlich $e \sin \vartheta$, während die Spannung zwischen n und p der Formel $\sqrt{2} \cdot \sin(\vartheta - 45^\circ)$ folgt, d. h. sie ist 1,4 mal so gross als die Klemmenspannung einer Spule und steht mit ihrer Phase in der Mitte zwischen den Spulen a und b .

Bei Benutzung einer gemeinsamen Rückleitung beträgt die elektromotorische Kraft zwischen jedem hinausführenden Draht und der Rückleitung das Doppelte der elektromotorischen Kraft einer Spule, während die elektromotorische Kraft zwischen den beiden hinausführenden Drähten 1,4 mal so gross oder $= 2\sqrt{2} \cdot e \cdot \sin(\vartheta + 45^\circ)$ ist.

Dreiphasensysteme.

Um zu finden, wie die Spannung zwischen den Leitungen eines Dreiphasensystems sich ändert, wenn die Spulen des Stromerzeugers in Sternschaltung verbunden werden, betrachten wir Fig. 54. Die Spule a mag als Ausgangspunkt für die Betrachtung dienen; die Spannung an den Klemmen sei $e \sin \vartheta$. Die elektromotorische Kraft in der Richtung von dem gemeinsamen Punkte der Spulen aus betrachten wir als positiv; dann ist die elektromotorische Kraft in b gleich $e \sin(\vartheta - 120^\circ)$.

Die Spannung zwischen m und n ist gleich dem Unterschiede der elektromotorischen Kräfte in a und b oder

$$= e \sin \vartheta - e \sin(\vartheta - 120^\circ) = \sqrt{3} \cdot e \sin(\vartheta + 30^\circ).$$

Beispiel: Wenn $e = 141$, so ist die effective Spannung in $a = 100$. Die Spannung zwischen den Leitungen m und n ist $= \sqrt{3} \cdot 100 = 173$ Volt effectiv.

Diese Spannung ist derjenigen in a in der Phase um 30 Grad voraus.

Das Uhrdiagramm der Fig. 55 zeigt die Sache deutlich. Die Linien a , b und c bedeuten die elektromotorischen Kräfte in den Spulen a , b und c . Um b abzuziehen, wird es rückwärts verlängert, wie gezeichnet, als $-b$ und dann mit a nach dem Parallelogramm vereinigt zu der resultirenden elektromotorischen Kraft, welche 30 Grad vor a liegt und $\sqrt{3}$ mal so gross ist.

Verbinden wir die Spulen eines Dreiphasensystems in Netzschaltung, wie in Fig. 56, so wird die elektromotorische Kraft zwischen o und m einfach die elektromotorische Kraft der Spule a .

Ein dreiphasiger Stromerzeuger oder Motor wird nicht allgemein mit der einfachen Anordnung von drei Spulen gebaut, wie es Fig. 54 zeigt. Es können sechs Spulen oder Spulensätze sein, wie Fig. 57 angiebt: hier werden diejenigen Paare, die einander in der Phase entgegengesetzt sind, in Reihe verbunden, so dass sie wie eine Spule von doppelter elektromotorischer Kraft wirken.

Fig. 57 ist eine schematische Darstellung der Spulenordnung der Fig. 22; nur sind die Spulen rund um den ganzen Kreis ver-

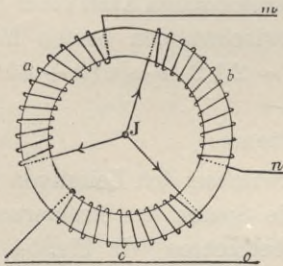


Fig. 54.

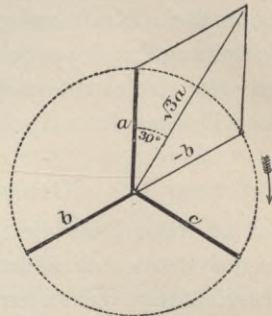


Fig. 55.

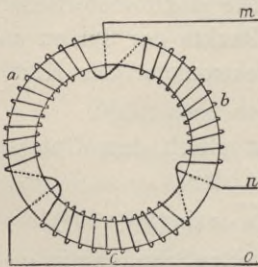


Fig. 56.

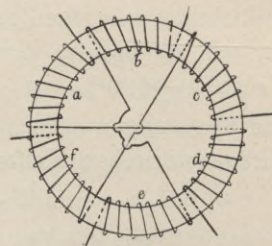


Fig. 57.

theilt, statt nur den Raum zwischen einem Nordpol und dem nächsten einzunehmen.

Die Spulen werden zu Paaren verbunden, und wir haben demnach nur drei Spulen zu betrachten; wir nehmen sie in der Reihenfolge:

$$\begin{aligned} a + d \\ c + f \\ e + b \end{aligned}$$

und sehen, dass die Paare um 120 Grad von einander entfernt sind und in derselben Weise wie die drei Spulen der Fig. 54 behandelt werden können, d. h. wir können sie in Sternschaltung verbinden, wie in Fig. 58; in diesem Falle beträgt die Spannung

zwischen m und $o = 2\sqrt{3} \cdot e \sin(\vartheta + 30^\circ)$; oder sie können in Netzschaltung verbunden werden, wie in Fig. 59, so dass die Spannung zwischen k und $s = 2e \sin \vartheta$ wird.

Eine Vereinigung von Stern- und Netzschaltung zeigt schematisch Fig. 60. In Fig. 61 wird dargestellt, wie sechs Spulen, die auf einen Ring rechts gewickelt sind, nach der Schaltung von Fig. 60 verbunden werden können. In diesem Falle würde die elektromotorische Kraft zwischen irgend zwei Klemmen, z. B. A und B , nach

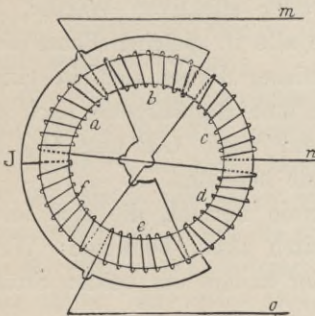


Fig. 58.

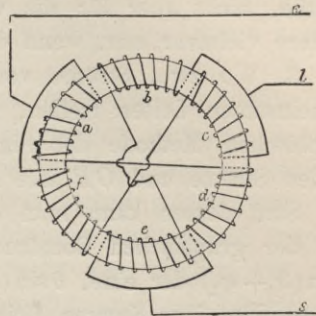


Fig. 59.

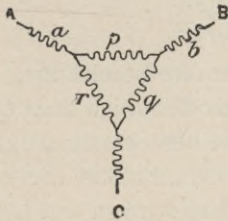


Fig. 60.

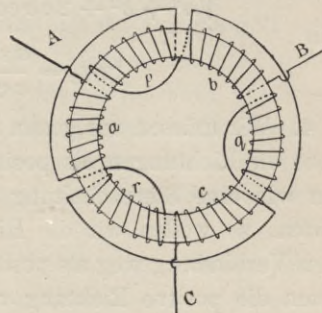


Fig. 61.

der Formel $2e \sin(\vartheta - 60^\circ)$ verlaufen, wobei die elektromotorische Kraft in a gleich $e \sin \vartheta$ ist.

Solche Schaltungen wurden zuerst von v. Dobrowolsky angegeben, als er sich bemühte, einen Motor zu erhalten, dessen Zugkraft in verschiedenen Zeitpunkten seiner Umdrehung gleichmässiger wäre, als mittels eines Satzes von Spulen in nur drei Phasen erhalten werden konnte.

Vereinigung der Ströme.

Wir müssen nun auch die Verhältnisse der Stromstärken in den verschiedenen Leitungen eines mehrphasigen Systems, welche zu einer Stern- oder einer Netzschaltung vereinigt sind, betrachten. Zuerst

lernen wir einige allgemeine Regeln kennen, welche von Werth sind, wenn die Ströme in irgend einer Leiteranordnung bestimmt werden sollen.

1. Wenn irgend eine Zahl Drähte in einem gemeinsamen Punkte zusammenstossen, so ist die algebraische Summe ihrer Augenblickswerthe gleich Null (die Richtung vom Verbindungspunkte weg wird als positiv gerechnet).

2. Für Wechselströme gilt diese Regel nur für die Augenblickswerthe, nicht aber für die virtuellen oder effektiven Werthe, für letztere vielmehr nur, wenn die Ströme alle in gleicher Phase sind.

3. Wo zwei Ströme von verschiedener Phase sich in einem gemeinsamen Leiter treffen, lässt sich ihre Resultirende nach der graphischen Methode der Fig. 29 finden, wenn OP und OQ die beiden Ströme und OR ihre Resultirende bedeuten.

Statt dessen kann man auch folgende Formel, die sich leicht aus der graphischen Construction ableiten lässt, benutzen: Wenn $a \sin(\vartheta + \varphi_1)$ der eine, $b \sin(\vartheta + \varphi_2)$ der andere der beiden Ströme ist, so wird ihre Summe gleich

$$\sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \cdot \sin(\vartheta + \varphi_3),$$

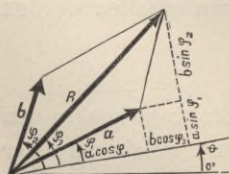
worin

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{a \sin \varphi_1 + b \sin \varphi_2}{a \cos \varphi_1 + b \cos \varphi_2} \quad 1)$$

4. Wir müssen uns genau an eine bestimmte Bezeichnung halten, welche die Richtungen als positiv und negativ kenntlich macht. Z. B. wenn wir eine Sternschaltung der Spulen eines Stromerzeugers betrachten, so wollen wir die Richtung von dem Punkte der gemeinsamen Verbindung weg als positiv rechnen; also wird in den Leitungsdrähten die positive Richtung vom Stromerzeuger nach den Lampen oder Motoren gehen. In einer Netzmasche rechnen wir die Richtung des Uhrzeigers um die Masche herum als positiv.

Bei der Anwendung dieser Regeln zur Bestimmung der Werthe und Phasen der Ströme in einem beliebigen System bemerken wir vor Allem, dass die Ströme von der Impedanz der verschiedenen Stromkreise abhängen.

Wir können allgemeine Regeln nur dann angeben, wenn es sich um ein symmetrisch gebautes und symmetrisch belastetes System handelt.



1) Zur Erleichterung für die Ableitung dieser Formel diene die nebenstehende Figur. Die Uebersetzer.

Wir nehmen einen zweiphasigen Stromerzeuger mit Netzschaltung der Spulen, dessen beide Stromkreise gleichmässig belastet sind; der Strom im Leiter m (Fig. 52) ist in jedem Augenblicke gleich der Summe der Ströme in den Spulen a und b . Ist der Strom in $a = i \sin \vartheta$, der in $b = i \sin (\vartheta - 90^\circ)$, rechnen wir die positive Richtung des Stromes in b vom Vereinigungspunkte weg, so haben wir zu schreiben:

$$\sqrt{2} \cdot \sin (\vartheta + 45^\circ).$$

Wenn es sich um Sternschaltung oder um getrennte Wickelungen handelt, so sind die Ströme in den Spulen nothwendig denen in den Leitungsdrähten gleich.

Wird in einem zweiphasigen Systeme ein Rückleitungsdraht benutzt, wie in Fig. 53, so wird auch bei gleicher Belastung beider Phasen der Phasenunterschied auf etwas mehr als 90 Grad erhöht, d. h. der Strom der einen Phase erreicht seinen Höchstwerth ein wenig früher, als wenn die Ströme unabhängig von einander wären, und der Strom der anderen Phase erreicht den Höchstwerth ein wenig später; aber diese Abweichung von 90 Grad Phasenunterschied können wir so gering machen, als wir wollen, durch Verminderung des Leitungswiderstandes. Selbst bei einer Leitung, welche 15 Procent der ganzen Leistung verschluckt, wird der Phasenunterschied nur um 6 Grad vergrössert¹⁾; wir dürfen also für praktische Fälle die Ströme ebenso zusammensetzen, wie eben für die Netzschaltung angegeben und sagen, dass der Strom im Rückleitungsdrahte $\sqrt{2}$ oder 1,4 mal so gross ist, als in den anderen Drähten, und dass er in der Phase in der Mitte zwischen jenen steht.

Die Ströme in den Spulen eines dreiphasigen Stromerzeugers in Netzschaltung lassen sich ebenso vereinigen, wie bei dem zweiphasigen System.

Fig. 55, S. 45 liefert uns die Gleichung:

$$\sin \vartheta - \sin (\vartheta - 120^\circ) = \sqrt{3} \cdot \sin (\vartheta + 30^\circ),$$

d. h. der Strom in der Leitung ist $\sqrt{3}$ oder 1,73 mal so gross als der Strom in den Spulen. Vergleichen wir dies Ergebniss mit demjenigen, das wir für die elektromotorische Kraft erhalten haben, so sehen wir, dass bei der Sternschaltung die elektromotorische Kraft zwischen den Leitungsdrähten grösser ist, als an den Klemmen der Spulen, während der Strom derselbe bleibt, dass dagegen in der Netzschaltung der Strom in den Leitungsdrähten grösser ist, als in den Spulen, aber die elektromotorische Kraft dieselbe bleibt.

1) Rodet et Busquet, Les courants polyphasés. S. 19.

Schaltung der Lampen in einem mehrphasigen System.

Die oben gewonnenen Vorstellungen mögen erläutert werden durch die Betrachtung der verschiedenen Arten, die Lampen in mehrphasigen Anlagen zu schalten.

Lampen in zweiphasigen Stromkreisen.

In Fig. 62 möge G einen Stromerzeuger vorstellen, der zwei Ströme in Quadratur liefert. Diese sollen benutzt werden, wie die Figur zeigt, um in zwei unabhängigen Anlagen die Lampen zu speisen, während für Motorenbetrieb die vier Drähte gleichzeitig benutzt werden können. Wie schon auseinandergesetzt, braucht man nur drei Drähte, indem ein mittlerer Draht, m , Fig. 63, als gemeinsame Rückleitung

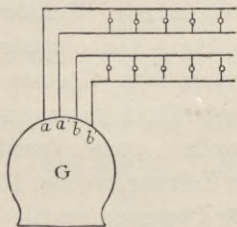


Fig. 62.

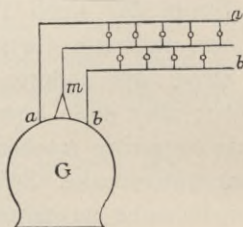


Fig. 63.

dient. Um in den beiden Stromkreisen gleichviel Lampen speisen zu können, muss der mittlere Draht dicker sein, als die beiden äusseren, aber nicht doppelt so stark, weil die Ströme verschiedene Phase haben.

Der Höchstwerth des Stromes im mittleren Draht ist $\sqrt{2}$ mal so gross als der in den beiden anderen Drähten. Die Spannung zwischen a und b ist nicht das Doppelte derjenigen zwischen a und m oder b und m , sondern sie ist nur 1,4 mal so gross. Wenn die Lampen in den beiden ersten Reihen für 70 Volt bestimmt sind, so kann man eine dritte Reihe von 100 Volt-Lampen zwischen a und b einschalten.

Eine Netzschaltung der Lampen lässt sich nach Fig. 64 mit vier Leitungsdrähten ausführen. Wenn in diesem Falle 100 Volt-Lampen benutzt werden, so beträgt die Spannung zwischen a und a' 141,4 Volt und die zwischen b und b' gleichfalls 141,4 Volt. Bei gleicher Vertheilung der Lampen wird der Strom in irgend einem der vier Drähte 1,41 mal so stark sein, als er für irgend eine Lampenreihe erforderlich ist.

Verbindet man die Lampen zu einer Sternschaltung, wie in Fig. 65, so bietet es einigen Vortheil, den Punkt *J* der gemeinsamen Verbindung an Erde zu legen (d. h. eine gemeinsame Rückleitung zu verwenden, die nicht isolirt sein muss), wenn gleichzeitig auch die Spulen des Stromerzeugers in Sternschaltung stehen, so dass man auch ihren Vereinigungspunkt an Erde legen kann. Dies ist gleichwerthig mit einem vierphasigen System, dessen Phasen paar-

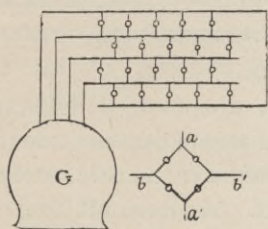


Fig. 64.

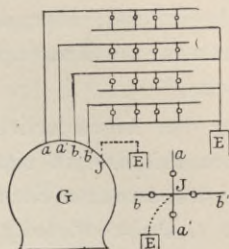


Fig. 65.

weise zusammenfallen. Wenn die Lampen für 100 Volt bestimmt sind, so hat man 200 Volt von *a* nach *a'* oder von *b* nach *b'*, und 141,4 Volt von *a* oder *a'* nach *b* oder *b'*.

Lampen in dreiphasigen Stromkreisen.

Fig. 66 und 67 zeigen dreiphasige Stromkreise nach Art der beiden zuletzt erwähnten. Fig. 66 stellt eine Netzschaltung dar. Bei

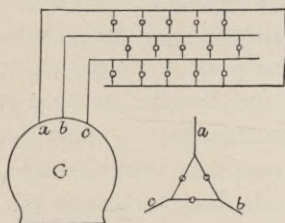


Fig. 66.

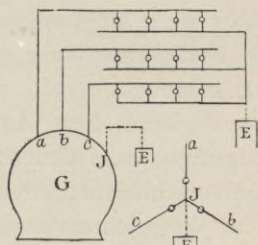


Fig. 67.

gleichviel Lampen in den drei Reihen wird der Strom in jedem der drei Leitungsdrähte 1,73 mal so stark als für eine Lampenreihe nöthig sein.

Werden die Lampen in Sternschaltung angeordnet, so kann der Knotenpunkt an Erde gelegt werden, wenn der entsprechende Punkt des Stromerzeugers (oder Transformators) auch an Erde liegt. Dies geschah bei der dreiphasigen Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt (Main) im Jahre 1891 mit den Lampen in Frankfurt und wird benutzt bei der dreiphasigen Stromvertheilung zu Heilbronn.

Wenn die Lampen 100 Volt erhalten sollen, so beträgt die Spannung zwischen irgend zweien der drei Drähte 173 Volt.

Weder die Stern- noch die Netzschaltung allein sichert völlige Unabhängigkeit der verschiedenen Parallelreihen von Lampen, wenn auch die Sternschaltung dies im Ganzen näher erreicht. Wenn Lampen in irgend einer Reihe ein- und ausgeschaltet werden, so wird die Spannung in den anderen Reihen mehr oder weniger dadurch beeinflusst; aber die Verwendung des gemeinsamen Rückleitungsdrahtes vom Knotenpunkte der Sternschaltung vermindert dies beträchtlich.

Unter den Absonderlichkeiten des dreiphasigen Systems mögen Glühlampen mit drei in einem Punkte zusammenstossenden Kohlenfäden und drei äusseren Klemmen erwähnt werden. Sie wurden zuerst 1891 von v. Dobrowolsky vorgeführt. Andere mit drei Spiralen wurden von der Edison-Swan-Gesellschaft im Februar 1894 für die Vorlesung des Verfassers an der Royal-Institution hergestellt. In derselben Vorlesung wurde ein dreiphasiger Lichtbogen gezeigt, welcher zwischen drei unter 120 Grad zusammenstossenden Kohlenstiften brannte und eine Drehungsbewegung zeigte.

Kupfergewicht der Leitungen.

Es ist behauptet worden, dass in den mehrphasigen Systemen gegenüber dem einphasigen im ganzen Gewicht des Kupfers, das für die Fortleitung einer gewissen Leistung auf eine gewisse Entfernung gebraucht wird, eine Ersparniss zu erzielen sei. In der Hauptsache kann diese Ansicht nicht in Zweifel gezogen werden; die Meinungsverschiedenheit, welche entstanden ist, rührt davon her, dass die verschiedenen streitenden Parteien von verschiedenen Grundlagen der Vergleichung ausgegangen sind. Der Verbrauch von Kupfer — welcher der bedeutendste Punkt in den Kosten einer Kraftübertragung auf weite Entfernung ist — hängt, wie jedem Elektrotechniker bekannt ist, von der Spannung ab, mit der der Strom fortgeleitet wird, so dass man bei der Vergleichung verschiedener Systeme, um gerecht zu sein, gleiche Spannung für alle zu Grunde legen muss. Aber die Frage entsteht: welches sind die Punkte, deren Spannung für den Vergleich massgebend ist?

Es ist hier zu bedenken, dass zwar in der Höhe der Spannung das Geheimniss der Ersparniss an Kupfer bei der Uebertragung und Vertheilung der Elektrizität liegt, dass aber eben die Höhe der

Spannung, mit der die Anlage betrieben werden kann, durch verschiedene Ueberlegungen in den verschiedenen Fällen bestimmt wird. Bei Vertheilungssystemen mit niedriger Spannung wird die letztere durch die Glühlampen bestimmt, welche sich nicht gut für höhere Spannungen als 100 bis 110 Volt herstellen lassen; dies bildet also die Grenze für Niederspannungssysteme. Auf der anderen Seite, wenn es sich nur um die Uebertragung von Betriebskraft, nicht um Beleuchtung handelt, oder wo Transformatoren verwandt werden können, wird die Grenze der Spannung durch die ganz andere Rücksicht auf die Isolation festgesetzt, auf die mit Sicherheit gerechnet werden kann.

Man hat also bei der Antwort auf die eben aufgeworfene Frage von vornherein einen Unterschied zu machen zwischen den beiden Klassen von Systemen und jedes nach seinen besonderen Vorzügen zu beurtheilen.

1. Hochspannungssysteme.

In einer Vertheilung mit hoher Spannung besteht die Schwierigkeit, eine genügend sichere Isolation zu finden; und diese begrenzt praktisch die Höhe der Spannung. Wir möchten deshalb bei Vergleichung mehr- und einphasiger Systeme solche Fälle auswählen, die von diesem Gesichtspunkte der Isolation aus einander gleichstehen. Gewöhnlich hält man bei einphasigem Wechselstrom (und auch bei Gleichstrom) einen Draht auf dem Potential der Erde und isolirt den anderen genügend im Hinblick auf die Spannung zwischen den beiden Drähten. In diesem Falle ist es offenbar die höchste Spannung zwischen den Drähten, welche wir hier die Spannung des Systems zu nennen haben. Wenn indessen beide Leitungen unabhängig von der Erde isolirt sind, so dass sie mit Sicherheit die höchste Spannung zwischen Leitung und Erde halten, so kann zwischen den Leitungen eine Spannung herrschen, die gleich dem Doppelten jener höchsten Spannung ist, ohne dass ein Durchschlagen der Isolation zu befürchten ist; nur müssen die Leitungen und die Stromkreise, zu denen sie gehören, so gut von einander isolirt sein, dass Gefahren dieser Art vermieden werden. Die Frage entsteht nun, ob wir bei der Vergleichung der Vortheile verschiedener Systeme zur Grundlage die Spannung zwischen zwei Leitungen oder die Spannung zwischen Leitung und Erde wählen.

Bildet die höchste Spannung zwischen irgend einem Punkte der Leitung und der Erde die Grundlage der Vergleichung, so ersparen

wir durch die Verwendung der mehrphasigen Ströme kein Kupfer; denn jede Leitung irgend eines Systems, die einen gewissen Strom bei der höchsten zulässigen Spannung über derjenigen der Erde führt, kann angesehen werden, als wenn sie einen bestimmten Theil der ganzen Leistung übertrüge; und deshalb ist die ganze Leistung einfach proportional der Zahl der Leitungsdrähte, welcher das ganze Kupfergewicht proportional ist.

So bietet z. B. ein dreiphasiges System in Sternschaltung mit dem Knotenpunkt an Erde und mit einer Spannung von 1000 Volt zwischen jeder Leitung und Erde (also 1732 Volt zwischen je zwei Leitungen), so weit als die Isolation der Leitung in Betracht kommt, keinen Vortheil vor einem einphasigen System mit einer Spannung von 1000 Volt zwischen Leitung und Erde (und also 2000 Volt zwischen den beiden Leitungen). Um gleiche Leistungen zu übertragen — bei gleichem Verlust in der Leitung —, muss jeder der beiden Drähte des einphasigen Systems 1,5 mal so stark sein, als jeder der drei Drähte der dreiphasigen Anordnung. Die beiden Anlagen brauchen im Ganzen gleichgrosse Kupfermengen.

Wenn wir andererseits die höchste Spannung zwischen zwei Leitungsdrähten zur Grundlage des Vergleiches wählen, so haben wir nicht mehr die Beschädigung der Leitungen, sondern die der Apparate, Maschinen, Transformatoren u. s. w. in Betracht zu ziehen, in denen die Güte der Isolation als gleich angesehen werden muss. Und bei dieser Grundlage der Vergleichung erhalten wir eine entschiedene Ersparniss an Kupfer durch die Verwendung dreiphasiger Ströme, wie folgende Betrachtung lehrt.

Zunächst nehmen wir eine Anlage in Netzschaltung (Fig. 48, S. 50); bei gleichmässiger Vertheilung ist der Strom a in dem einen Zweig der Netzmasche (vergl. Kap. XV) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ von dem Strom i in der Leitung (vergl. S. 57). Also wird in dem einen Zweig die Leistung $\frac{1}{\sqrt{3}} i E$ verbraucht, worin E die Spannung zwischen den Leitungen ist (i und E in effectiven Ampere und Volt gemessen). Die ganze Leistung ist demnach $\sqrt{3} \cdot i E$. Nehmen wir statt dessen die Sternschaltung, so ist die Spannung zwischen den Enden eines Zweiges $= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot E$, und der Strom in jedem Zweig ist derselbe wie in der Leitung. Also ist die ganze Leistung dieselbe wie vorher,

nämlich $\sqrt{3} \cdot i \cdot E$. Wenn der Widerstand einer Leitung $= r$ ist, so wird der ganze Verlust in allen drei Leitungen $3 i^2 \cdot r$. Nun betrachten wir eine einphasige Anordnung, in der dieselbe Leistung $\sqrt{3} \cdot i E$ übertragen werden soll. Der Widerstand eines Leitungsdrahtes möge so bestimmt werden, dass der Verlust auch hier $3 i^2 r$ beträgt. Der gesammte Widerstand der Leitungen ist $= 2x$; der Strom ist $= \sqrt{3} \cdot i$ und der Verlust $6 i^2 x$. Dies ergibt $6 i^2 x = 3 i^2 r$ oder $x = \frac{1}{2} r$. Der Widerstand eines der beiden zur einphasigen Anordnung gehörigen Drähte soll halb so gross sein als der von einem der Drähte der dreiphasigen Anordnung. Oder, in anderen Worten: das einphasige System erfordert zwei Drähte, deren jeder doppelt so grossen Querschnitt hat, als jeder der drei Drähte des dreiphasigen Systems.

Das Gewicht des Kupfers, welches für das Dreiphasensystem gebraucht wird, ist nur drei Viertel von dem, was von irgend einem einphasigen System erfordert wird.

Ein zweiphasiges System mit vier Drähten ist, was den Verbrauch von Kupfer betrifft, genau gleich mit einem einphasigen System.

Wenn in einem zweiphasigen System nur drei Drähte verwendet werden, von denen einer als gemeinsame Rückleitung dient, so ist die Spannung zwischen den beiden anderen Drähten etwa $\sqrt{2}$ mal so gross, wie die Spannung zwischen einem von ihnen und der Erde; wir müssen also die Spannung des Systems als $\sqrt{2} \cdot E$ ansehen. In diesem Falle wird mehr Kupfer gebraucht, als für ein einphasiges System mit der Spannung $\sqrt{2} \cdot E$.

2. Systeme mit niederer Spannung.

Hier wird die Spannung begrenzt durch die Erfordernisse der Glühlampen. Was wir zu erreichen wünschen, ist, die Spannung zwischen den Leitungen, die die Energie führen, so hoch als möglich wählen zu können, während die Spannung an den Klemmen der Lampen auf der richtigen Höhe bleibt. Lassen wir für einen Augenblick die sogenannten Drei- und Fünfleitersysteme bei Seite, in denen Ausgleichsleiter benutzt werden, und stellen wir ein Dreiphasensystem mit drei Drähten einem einphasigen System mit zwei Drähten gegenüber, so sehen wir nach den Betrachtungen auf Seite 48, dass bei Netzschtaltung der Lampen das Dreiphasensystem den Vortheil hat, nur 75 Procent der Kupfermenge zu erfordern,

die für das einphasige System gebraucht wird. Werden die Lampen in Sternschaltung verbunden, so ist die Spannung zwischen den Leitungen $\sqrt{3}$ mal so hoch als an den Lampen, und dies hat den Erfolg, dass die Kupfermenge nur ein Viertel von derjenigen beträgt, die für ein Einphasensystem mit zwei Drähten gebraucht wird; aber die Sternschaltungsanlage könnte nicht regulirt werden, ohne dass ein Rückleitungsdraht vom gemeinsamen Verbindungspunkt zurückführte, und es wäre so eher mit einem Dreileitersystem als mit einem einphasigen System mit zwei Drähten zu vergleichen.

In einem Vortrag vor dem Elektrotechnischen Verein, der in der Elektrotechnischen Zeitschrift vom 17. Januar 1895 abgedruckt ist, giebt Goerges folgende Zahlen für das Gewicht der Leitungen bei gleicher Leistung, gleicher Spannung und gleichem Verlust:

Einphasig, zwei Drähte	100,
einphasig, drei Drähte (wovon der dritte, neutrale, halb so stark als die anderen)	31,25,
zweiphasig, vier Drähte	100,
zweiphasig, drei Drähte (Spannung zwischen Leitung und gemeinsamer Rückleitung gemessen) . . .	72,8,
dreiphasig, drei Drähte (Netzschaltung)	75,
dreiphasig, vier Drähte (wovon der vierte, neutrale, halb so stark als die anderen)	29,2.

Ein anderes Mittel, die Sache klar zu stellen, besteht darin, die Spannung zu betrachten, die zwischen den Leitungen eines Systems herrschen müsste, damit gleiche Leistungen bei gleichem Kupfergewicht der Leitungen und mit gleichem Verluste übertragen werden. Wenn ein dreiphasiges System in Sternschaltung mit vier Drähten angeordnet ist, und wenn die Spannung zwischen einer der drei Leitungen und der Rückleitung zu 1000 Volt gerechnet wird, so muss die Spannung zwischen den Leitungen eines einphasigen Systems, das den gleichen Wirkungsgrad haben soll, 1850 Volt betragen. Dabei wird angenommen, das System sei so gut ausgeglichen, dass durch den vierten Draht kein Strom fließt.

Die höchste Spannung von Draht zu Draht in einer Dreiphasen-anlage wäre nur 1732 Volt. Wenn im Dreiphasensystem kein vierter Draht benutzt wird (was nicht nöthig ist, wo nur Motoren oder Transformatoren gespeist werden), so muss die Spannung im einphasigen System, wenn es den gleichen Wirkungsgrad haben soll, auf 2000 Volt erhöht werden.

Zusammensetzung magnetischer Felder.

Da der wichtigste Zweck des mehrphasigen Betriebes darin besteht, drehende magnetische Felder durch die Vereinigung mehrerer mittels Wechselstromes erzeugter magnetischer Felder herzustellen, so ist es jetzt an der Zeit, zu betrachten, wie Ströme von verschiedener Phase zur Erzeugung eines gemeinsamen magnetischen Feldes vereinigt werden können.

Wir dürfen annehmen, dass der Magnetismus eines Kernes, um den ein Wechselstrom mittels einer Spule herum geführt wird, ein wechselnder Magnetismus sei. Besteht der Kern nur aus Luft, so haben wir ein Wechselfeld. Besteht der Kern aus Eisen, so werden die Kraftlinien, die ihn durchziehen, Wechsellinien sein, d. h. sie werden ein Feld bilden, welches zu einem höchsten Werth ansteigt, abnimmt bis zu Null, die Richtung umkehrt, bis zum höchsten Werth in der neuen Richtung steigt und wieder zu Null abnimmt, um den Lauf von Neuem zu beginnen. Die Wechselgeschwindigkeit dieses Wechselfeldes ist dieselbe, wie die der äusseren magnetisirenden Kraft, d. h. des Stromes. Wenn das Eisen in geeigneter Weise geschlitzt ist, und keine secundären Kreise vorhanden sind, die durch ihre Rückwirkung stören könnten, so wird das Wechselfeld praktisch genau in der gleichen Phase schwingen, wie der erzeugende Strom.

Wirbelströme im Kern und secundäre Ströme, die von dem Kerne in benachbarten Leitern inducirt werden, haben immer den Erfolg, die Phase des Wechselfeldes zu verzögern. Solche Rückwirkungen inducirter Ströme, die in geschlossenen secundären Kreisen entstehen, spielen eine ganz wesentliche Rolle in den neuen mehrphasigen Motoren, wie wir später sehen werden.

Es leuchtet von selbst ein, dass (in Abwesenheit secundärer Rückwirkungen) eine magnetisirende Kraft, welche längs einer bestimmten Richtung schwingt, ein schwingendes magnetisches Feld, ein Wechselfeld, erzeugt; während eine magnetisirende Kraft von gleichbleibender Stärke, die aber fortwährend ihre Richtung ändert — die sich im Raume dreht —, bestrebt ist, ein magnetisches Drehfeld hervorzubringen. Ob dieses resultirende Drehfeld gleichbleibende Stärke oder gleichbleibende Drehgeschwindigkeit besitzt, hängt nicht nur von der Gleichmässigkeit der äusseren magnetischen Drehkraft und der Abwesenheit secundärer Stromkreise ab, sondern auch von der Gestalt der magnetischen Massen, insofern als es darauf ankommt,

ob diese auch in magnetischer Beziehung symmetrisch um die Drehungsachse der magnetischen Kräfte angeordnet sind.

Vorläufig wollen wir, um Einfachheit in der Darstellung des Gegenstandes zu gewinnen, die Aufgabe, magnetisirende Kräfte zu einer resultirenden magnetisirenden Kraft zusammzusetzen, in Angriff nehmen.

Betrachten wir zwei magnetisirende Kräfte, die durch zwei unter rechtem Winkel zu einander gestellte kurze Spulen von grossem Durchmesser hervorgerufen werden (Fig. 68). Diese zu einander senkrecht stehenden magnetisirenden Kräfte werden sich zu einer resultirenden magnetisirenden Kraft zusammensetzen, dessen Richtung und Stärke nicht nur von der Richtung der Spulenebenen abhängt, sondern auch von dem zeitlichen Werth, den der Strom in jeder Spule hat. Wir wollen annehmen, dass die Spulen im rechten Winkel zu einander bleiben und dass der Strom in beiden gleiche Frequenz hat.

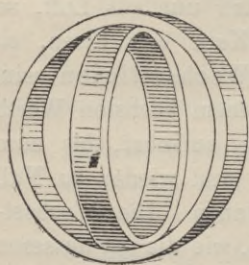


Fig. 68.

Wenn Richtung und Stärke eines magnetischen Feldes durch Richtung und Länge einer geraden Linie dargestellt werden, so können wir die gewöhnliche Parallelogrammregel für die Zusammensetzung gerichteter Grössen anwenden, und finden die Resultirende zweier magnetischer Felder, welche nach Richtung und Stärke sich unterscheiden, indem wir die Vektoren, welche jene darstellen, zusammensetzen und die Diagonale ziehen. Die magnetisirende Kraft der einen Spule werde durch die Linie A , die der anderen durch die im rechten Winkel zu A stehende Linie B dargestellt. Ist A gleich gross und von gleicher Phase wie B , so stellt die Linie R in Fig. 69 nach Richtung und Grösse die resultirende magnetisirende Kraft dar.

Wenn die Komponente A den kleinen Werth OA_1 und Komponente B den kleinen Werth OB_1 besitzen, so ist die Resultirende OR_1 . Wenn A auf OA_2 und B auf OB_2 wachsen, so ist die Resultirende OR_2 ; es leuchtet ein, wenn die Grössen OA und OB zugleich zunehmen und abnehmen, dass ihre Resultirende OR sich in derselben Phase verändern, aber in ihrer Richtung gleichbleiben wird. Kurz, zwei Wechselgrössen von gleicher Periode und in gleicher Phase haben zur Resultirenden eine andere Wechselgrösse von derselben Periode und Phase und von bestimmter gleichbleibender Richtung.

Wenn indessen, wie in Fig. 70, die beiden Componenten ihre periodischen Aenderungen mit einem Unterschiede ihrer Phasen ausführen, indem sie nicht genau gleichzeitig zu- und abnehmen, so hat ihre Resultirende keine feste Richtung mehr. Es sei der Phasenunterschied zwischen A und $B = 90^\circ$, so dass, wenn A seinen Höchstwerth hat, $B = \text{Null}$ ist, und umgekehrt. Dann erhellt, dass die Resultirende, wie die Figur zeigt, von OR_1 zu OR_2, OR_3 u. s. w. wandert.

Die genaue Form der Curve $R_1 R_2 R_3$ wird von dem Gesetze abhängen, nachdem sich der Strom in den Spulen ändert. Wenn A und B gleiche Höchstwerthe haben und dem Sinusgesetze folgen, so wird die Curve ein Kreis sein (wie weiter unten bewiesen wird);

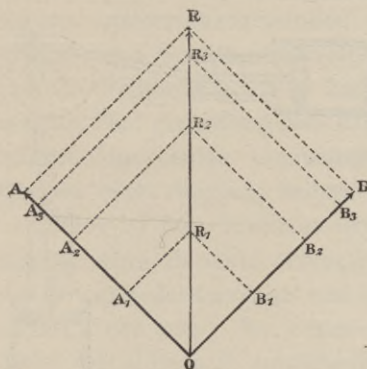


Fig. 69.

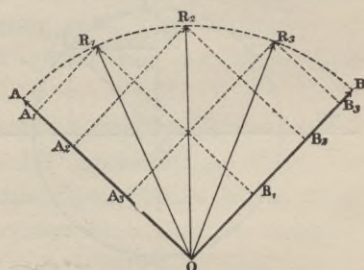


Fig. 70.

d. h. R wird seiner Grösse nach constant sein und seine Richtung wird sich um O drehen.

Marcel Deprez legte der Pariser Akademie der Wissenschaften im Jahre 1883¹⁾ eine bedeutsame Abhandlung vor über die Erzeugung eines wahren magnetischen Drehfeldes durch das Zusammenwirken von zwei magnetischen Wechselfeldern, deren Phasenunterschied eine Viertelperiode betrug.

Bekanntlich kann eine gleichförmige Kreisbewegung zerlegt werden in zwei rechtwinklig zu einander stehende geradlinige harmonische Bewegungen, welche gleiche Schwingungsweite, gleiche Periode und einen Phasenunterschied von einer Viertelperiode haben. Es sei P ein Punkt, der mit gleichmässiger Geschwindigkeit um einen Mittelpunkt O umläuft. Die Projectionen des Radius OP auf

1) Comptes Rendus. Bd. 97, S. 1193. 1883.

die zwei Achsen (Fig. 71) sind OM und ON . Wird der Radius OP mit r bezeichnet, so haben wir $ON = r \sin \vartheta$ und $OM = r \cos \vartheta$, $= r \sin (\vartheta + 90^\circ)$. Während P umläuft, schwingt der Punkt N auf der Geraden YY' auf und nieder; die Weite seiner Schwingung ist gleich dem Halbmesser des Kreises. Ebenso schwingt der Punkt M längs der Linie XX' mit derselben Schwingungsweite und in derselben Zeit; aber ON wird seinen grössten Werth erreichen, wenn OM gerade Null ist, und umgekehrt. Es folgt daraus, dass eine gleichmässige Kreisbewegung erzeugt werden kann durch Zusammensetzung zweier geradliniger Bewegungen, die im rechten Winkel zu einander stehen, vorausgesetzt, dass sie harmonisch, von gleicher Periode und gleicher Schwingungsweite sind und einen Phasenunterschied von genau einer Viertelperiode haben.

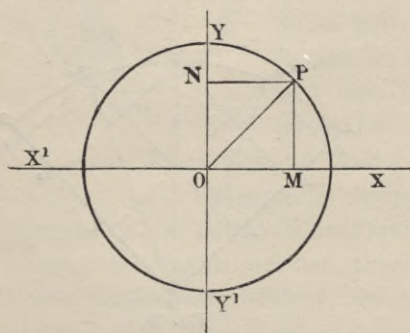


Fig. 71.

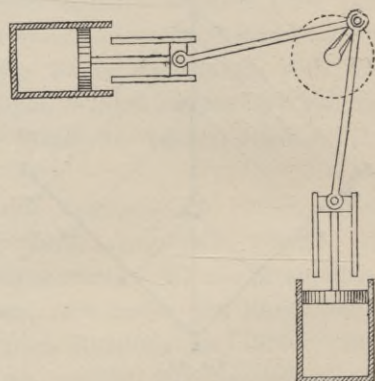


Fig. 72.

In mechanischer Beziehung ist diese Bewegung gleichwerthig derjenigen zweier Schieber von gleichem Wege, die mittels zweier Stangen auf dieselbe Kurbel arbeiten, während sie selbst im rechten Winkel zu einander stehen (Fig. 72). Wenn die Achse eine Drehbewegung erhält, so wird letztere in zwei geradlinige Bewegungen zerlegt; diese Verbindung wirkt dann wie eine Zweitactpumpe. Wenn man andererseits die beiden Cylinder geradlinige Bewegungen erzeugen lässt, von denen die eine der anderen um eine Viertelperiode voraneilt, so vereinigt der Apparat diese Bewegungen zu einer genauen Kreisbewegung und wird gleichwerthig einer Zweicylinder-Dampfmaschine.

Deprez sah, dass eine ähnliche Construction magnetisch ausgeführt werden konnte. Wenn ein Wechselstrom durch eine Spule geleitet wird, so dass er ein schwingendes magnetisches Feld oder

Die Phasenunterschiede der Bewegungen müssen dem Winkelabstand am Umfange der Vorrichtung, welche jene vereinigt, entsprechen.

Nach einem kinematischen Grundsatz muss bei der Zusammensetzung harmonischer Bewegungen zur Drehung der Winkelabstand in der Anordnung, welche die Vereinigung ausführt, das Supplement desjenigen Winkels sein, der die zeitliche Phase der Bewegung angiebt; andernfalls erhält man keine gleichmässige Drehung.

Das berühmte Dreiphasensystem (Drehstrom), welches ein Drehfeld zu erzeugen vermag, ist die elektrische Analogie des Dreikurbel-Mechanismus. Wenn es sich um derartige Zusammensetzungen magnetischer Felder handelt, können wir einen analytischen Weg einschlagen. Wir haben drei Spulen oder drei Spulenpaare, von denen jedes eine Componente des magnetischen Feldes liefert, welche längs einer bestimmten Richtung schwingt, und wir sollen das resultirende Feld finden, welches entsteht, wenn jene vereinigt werden. Werden die Spulen mit einem bestimmten gegenseitigen Winkelabstand angebracht, so müssen wir ausser der Stärke eines jeden der Einzelfelder, welche durch die Phase des Stromes bestimmt wird, auch seine Richtung beachten.

Dies geschieht sehr leicht, indem wir das Feld jeder Spule längs der beiden Achsen X und Y in Componenten zerlegen.

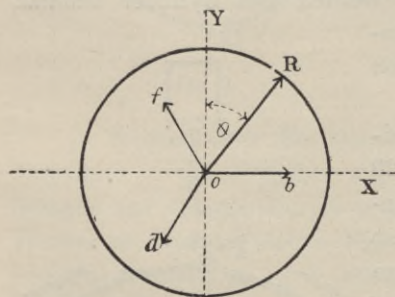


Fig. 74.

Nehmen wir z. B. die Spulen auf dem Ring in Fig. 58, so bringen b und e zusammen ein wagerechtes Kraftlinienbündel in der Richtung Ob längs der Achse X in Fig. 74 hervor, dessen Stärke sich nach der Formel $\mathfrak{H} \sin \vartheta$ ändert. Die Spulen d und a erzeugen ein Feld in der Richtung Od , dessen Stärke durch die Formel $\mathfrak{H} \sin (\vartheta - 120^\circ)$ angegeben wird. Aehnlich liefern

die Spulen f und e ein Feld in der Richtung Of nach der Formel $\mathfrak{H} \sin (\vartheta - 240^\circ)$. Indem wir die Componenten dieser drei Felder längs der X -Achse addiren, erhalten wir

$$\begin{aligned} \mathfrak{H} \sin \vartheta - \mathfrak{H} \sin (\vartheta - 120^\circ) \cos 60^\circ - \mathfrak{H} \sin (\vartheta - 240^\circ) \cos 60^\circ \\ = \frac{3}{2} \mathfrak{H} \sin \vartheta. \end{aligned}$$

Ebenso ergeben die Componenten nach der Y -Achse

$$\mathfrak{H} \sin(\vartheta - 240^\circ) \cos 30^\circ - \mathfrak{H} \sin(\vartheta - 120^\circ) \cos 30^\circ = \frac{3}{2} \mathfrak{H} \cos \vartheta.$$

Ziehen wir die Linie OR , welche die Grösse $\frac{3}{2} \mathfrak{H}$ darstellt und mit der Y -Achse den Winkel ϑ einschliesst, so sehen wir, während ϑ mit der Zeit wächst und R sich um O dreht, dass die Projection von OR auf die X -Achse $\frac{3}{2} \mathfrak{H} \sin \vartheta$ und auf die Y -Achse $\frac{3}{2} \mathfrak{H} \cos \vartheta$ ist.

Demnach giebt OR die Richtung des resultirenden Feldes zu irgend einer Zeit an. Das Feld hat also eine gleichbleibende Stärke gleich anderthalbmal der Stärke des Feldes, das von einem Spulenpaar hervorgebracht wird und dreht sich mit gleichbleibender Winkelgeschwindigkeit.

Allgemein können wir sagen, dass bei einer symmetrischen Anordnung der Spulen, und wenn die Zahl der Phasen m genannt wird, das Verhältniss der Stärke des resultirenden Feldes zu dem von einer Phase erzeugten gleich $\frac{m}{2}$ ist.

Wir sehen also, welches die Zeit- und Raumverhältnisse beim einfachen Zweiphasen- und Dreiphasenbetrieb sind. Soll ein gleichmässig sich drehendes magnetisches Feld erzeugt werden, so können wir als Componenten entweder zwei gleiche Felder mit einer Viertelperiode Phasenunterschied und senkrecht zu einander (d. i. um ein Viertel Kreisumfang gegen einander verschoben) anordnen; oder, statt dessen, drei gleiche Felder, die eine Drittelperiode Phasenunterschied von einander haben und unter 120 Grad gegeneinander (d. i. um ein Drittel Kreisumfang verschoben) angeordnet sind. Offenbar können auch andere Fälle vorkommen. Ein Blick auf Fig. 74, Seite 70, lehrt, wenn wir die beiden Cylinder in einen anderen als einen rechten Winkel zu einander stellen, dass die gleichförmige Kreisbewegung in zwei einfache harmonische Bewegungen aufgelöst werden kann, die nicht eine Viertelperiode Phasenunterschied aufweisen; und es folgt, dass eine gleichförmige Kreisbewegung erzeugt werden kann aus zwei Kolbenbewegungen, die einen Phasenunterschied von mehr oder weniger als eine Viertelperiode haben; es muss nur der Winkelabstand ihrer Richtungen gleich sein dem Supplement zu dem Unterschied ihrer zeitlichen Bewegungsphasen.

Wir wollen nun kurz diejenigen Fälle besprechen, wo der zeitliche Abstand der Componenten nicht dem räumlichen Winkelabstand entspricht.

In solchen Fällen ist das Ergebniss keine gleichmässige Kreisbewegung; sie wird vielmehr elliptisch. Die Resultirende läuft zwar um, aber nicht mit gleichmässiger Winkelgeschwindigkeit, und ihre Grösse bleibt nicht gleich.

Die Fälle, in denen sich eine elliptische Drehung ergibt, lassen sich in verschiedene Klassen eintheilen. Wenn die beiden einfachen harmonischen Bewegungen gleich an Schwingungsweite und Wechselgeschwindigkeit sind, aber nicht unter solchem Winkel zu einander stehen, dass ihr räumlicher Winkelabstand das Supplement ihres zeitlichen Phasenunterschiedes ist, so wird die resultirende Bewegung nicht kreisförmig, sondern elliptisch. Wenn die beiden Componenten, welche gleiche Periode haben und deren Winkelabstand das Supplement ihres zeitlichen Phasenunterschiedes ist, ungleiche Schwingungsweite besitzen, so entsteht eine elliptische Bewegung; die grössere Ellipsenachse fällt zusammen mit der Richtung der grösseren der beiden Schwingungen. Wenn die obige Bedingung für die Phasen nicht erfüllt ist, und zugleich die beiden Schwingungsweiten ungleich sind, so wird die entstehende Bewegung noch immer elliptisch sein, wenn die Perioden der harmonischen Componenten gleich sind. Hieraus folgt, dass die Resultirende von irgend welchen drei oder mehr einfachen harmonischen Bewegungen von gleicher Periode, ohne Rücksicht auf die Schwingungsweite und auf ihre gegenseitigen Winkel- und Phasenbeziehungen, stets eine elliptische Drehung ist (wobei in den allgemeinen Fall zwei besondere Fälle eingeschlossen werden, nämlich die geradlinige harmonische Bewegung, wenn die zeitlichen Phasen aller Componenten gleich sind und die gleichförmige Kreisbewegung, wenn die Componenten gleiche Schwingungsweite haben und ihre zeitlichen Phasenunterschiede den räumlichen Winkelabständen entsprechen). Daher kommt es, dass unsymmetrische mehrphasige Systeme, wie z. B. das sogenannte monocyclische System (welches ein verschobenes Dreiphasensystem ist) Motoren etwa eben so gut treiben können, als symmetrische Systeme.

Wir kehren nun zu dem Falle der eigentlichen zweiphasigen und dreiphasigen Vereinigungen zurück und bemerken, dass, auch wenn die Amplituden der Componenten gleich und ihre Phasenunterschiede genau geregelt sind, ihre Resultirende nur dann eine gleichmässige Kreisbewegung sein kann, wenn die Componenten wirklich

harmonisch sind, d. h. genau der Sinusformel folgen. Wir wissen nur, dass in vielen Fällen¹⁾ die Form der Curven der elektromotorischen Kräfte, der Ströme und der magnetisirenden Kräfte in den im Betriebe stehenden Wechselstromkreisen beträchtlich von der einer einfachen Sinuscurve abweicht. Man sieht leicht, was im Allgemeinen die Wirkung einer Abweichung von der einfachen Sinusgestalt ist. Nehmen wir eine zweiphasige Verbindung und Componenten, deren Curven spitzige Gestalt zeigen wie in Fig. 8, so wird die resultirende Curve im Allgemeinen die in Fig. 75 gezeichnete Gestalt besitzen, während bei Curven von der breiten, abgeflachten Art die Resultirende im Allgemeinen die in Fig. 76 dargestellte Form hat. Wenn eine oder beide Componenten in Folge der beigemischten Schwin-

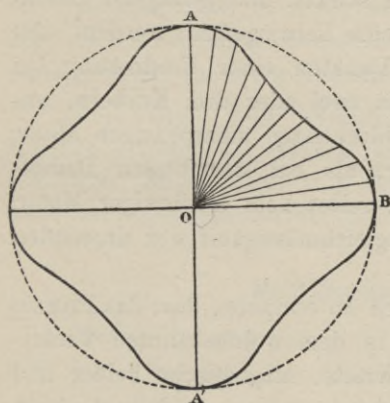


Fig. 75.

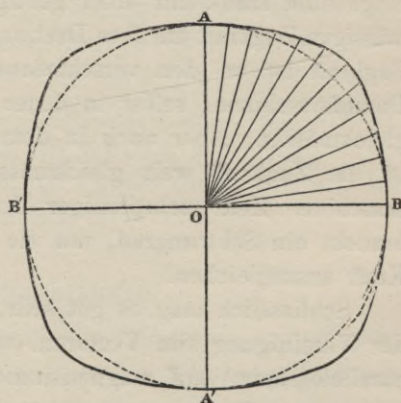


Fig. 76.

genen höherer Geschwindigkeit die Gestalt eines Wellen-Linienguges haben, so wird auch die das resultirende Feld darstellende Linie gewellt sein.

In den unmittelbar vorhergehenden Abschnitten ist die Zusammensetzung der Vektoren absichtlich mehr von dem abstracten, kinematischen Gesichtspunkt aus betrachtet worden. Die Drehercheinungen in mehrphasigen Motoren bilden bestimmte und nicht ganz einfache Fälle solcher Zusammensetzungen. Selten führt das vom äusseren Strom herrührende magnetische Feld eine einfache gleichmässige Kreisrotation aus. Meistens sind die Motoren mehrpolig; sie be-

1) Ein Beispiel aus der letzten Zeit findet sich in den Curven, welche Fleming in *The Electrician* vom 22. Februar 1895 für einige in der Londoner City in Betrieb stehende Wechselstrom-Maschinen giebt.

sitzen vorspringende Pole, Zähne und andere Stellen plötzlicher Aenderung ihrer Oberflächen, welche alle bewirken, dass das magnetische Feld während seiner Drehung grössere oder kleinere Sprünge macht und seine Stärke von Punkt zu Punkt ändert. Dies ist indessen von geringerer Bedeutung; denn, wie wir sehen werden, haben die Inductionswirkungen in den umlaufenden leitenden Massen das fortwährende Bestreben, allen Abweichungen von der einfachen und gleichmässigen Drehung entgegenzuwirken. Ferner ist im idealen Fall das Gesuchte nicht ein gleichmässig sich drehendes magnetisches Feld, sondern eine solche Vereinigung eines magnetischen Drehfeldes mit einer Anzahl inducirter Ströme, dass die Leiter, welche letztere führen (oder der eiserne Kern, in den die Leiter eingebettet sind), mit einer genügend starken und genügend gleichmässigen Zugkraft um ihre Drehungsachse herumgeführt werden. Die Zugkraft ist an den verschiedenen Punkten einer Umdrehung bei Dampfmaschinen, selbst in denen mit zwei oder drei Kurbeln, ungleichmässig. Aber auch in dem schlechtesten mehrphasigen Motor ist die Zugkraft weit gleichmässiger, als bei der besten Dampfmaschine. Kein mehrphasiger Motor, selbst kein einphasiger Motor, braucht ein Schwungrad, um die Ungleichmässigkeit der drehenden Kraft auszugleichen.

Schliesslich mag es gut sein, sich zu erinnern, dass das Prinzip der Vereinigung von Vektoren (wie in dem wohlbekannten Vectorparallelogramm) auf magnetisirende Kräfte, magnetische Felder und Ströme nur dann angewandt werden kann, wenn wir diese Grössen als Vektoren betrachten, d. h. wenn ihre thatsächliche räumliche Richtung in Betracht gezogen wird, und dass es demnach offenbar nicht angewandt werden kann, wenn es sich um Grössen handelt, die ihrer Natur nach im Raume geschlossen sind, wie die ganze magnetisirende Kraft oder die Gesamtheit der Kraftlinien in einem Kreise, oder, wenn es sich um die Vereinigung mehrerer in getrennten Drähten fliessenden Ströme zu einem Strom in einem Draht handelt. Dort haben die Grössen nur einen Scalarwerth; ihre Richtung ändert sich längs ihrer räumlichen Ausdehnung. Wenn wir die magnetische Kraft an einem Punkte betrachten, so haben wir eine Grösse von vollkommen bestimmter Richtung, und können sie also mit einer anderen magnetischen Kraft, die im selben Punkte wirkt, vereinigen. Aehnlich dürfen wir die Grundsätze der Vectorvereinigung anwenden, wenn wir magnetische Felder betrachten, deren Richtungen in einem bestimmten Augenblick gleichmässig sind

in dem Raume, den wir betrachten, wie z. B. im Fall der magnetischen Felder in dem Satze von Marcel Deprez auf Seite 68 und in dem darauffolgenden Satze über das resultirende magnetische Feld eines bestimmten dreiphasigen Motors. Aber in einem vielpoligen Motor, wo die Kraftlinien in gekrümmten Bahnen verlaufen, wie z. B. Fig. 41 und 163 zeigt, kann die Gesammtheit der Kraftlinien nicht als Vector angesehen werden, und aus diesem Grunde werden im VI. Kapitel, bei der Besprechung der Ausbreitung des magnetischen Feldes, Diagramme mitgetheilt, welche zeigen, wie die im Kreise geschlossenen magnetisirenden Kräfte sich längs des Läufers ausbreiten.

Der Leser muss scharf unterscheiden zwischen der Anwendung des Vectorpolygons in dem Falle, wo Vectorgrössen addirt werden, und der Anwendung derselben geometrischen Construction, wenn Scalargrössen, die einer Sinusfunction der Zeit folgen, addirt werden.

In letzterem Falle werden die Phasenunterschiede der Grössen angegeben durch die Winkel, welche die Geraden mit einander einschliessen; ob die Rechnung erlaubt ist, hängt einzig von den besonderen Eigenschaften der Sinusfunction ab.

Mehrphasige Condensatoren.

Werden in mehrphasigen Stromkreisen Condensatoren erforderlich, um etwa einem Transformator oder einem Motor den Leerlaufstrom zu liefern oder zu irgend einem anderen Zwecke, so kann man entweder mehrere gewöhnliche Condensatoren oder einen besonders gebauten Condensator verwenden, dessen einzelne Metallblätter abwechselnd mit einander verbunden und an soviel Klemmen geführt sind, als Phasen vorhanden sind. Diese letztere Bauart ergibt eine erhebliche Materialersparniss. Bradley baute in dieser Weise einen dreiphasigen Condensator auf, bei dem die Metallblätter in regelmässiger Reihenfolge mit den drei Hauptleitungen verbunden waren, wie dies Fig. 77 zeigt.

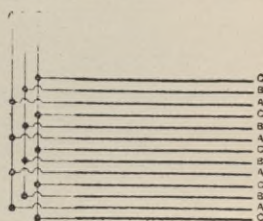


Fig. 77.
Dreiphasen - Condensator.

Da die Anordnung durchaus symmetrisch ist, ist auch die Capacität zwischen je zwei der Leitungen gleich gross, daher sind auch die in und aus dem Condensator fliessenden Ströme ebenso symmetrisch wie die Spannungen zwischen den Klemmen.

Wo ein solcher Condensator nicht verfügbar ist, aber eine Capacität bei einem Dreiphasensystem gebraucht wird, kann man drei gewöhnliche Condensatoren verwenden. Dieselben können entweder in Sternform eingeschaltet werden, indem man je eine Klemme der Condensatoren zusammen verbindet und die drei anderen Klemmen an die Hauptleitungen legt, oder aber man verbindet die sechs Klemmen in Netzform mit einander und legt die Hauptleitungen an die Ecken. Bei dieser letzteren Anordnung ist die Capacität grösser als bei der ersteren.

Kapitel IV.

Mehrphasenstromerzeuger.

Die Herstellung von Wechselstrommaschinen zur Erzeugung von Zwei- oder Dreiphasenströmen gestaltet sich für Diejenigen einfach, welche gewöhnliche Einphasen-Wechselstrommaschinen bauen können. Es wird hier nur vorausgesetzt, dass der Leser im Allgemeinen mit der Construction von Dynamomaschinen bekannt ist. Diejenigen aber, welche sich über die neuere Entwicklung und den Bau von (Einphasen-) Wechselstrommaschinen im Einzelnen unterrichten wollen, werden auf des Verfassers Werk über Dynamo-Elektrische Maschinen, 6. Auflage verwiesen.

Da die Ankerwickelungen aller Mehrphasenmaschinen angesehen werden können, als ob sie aus zwei, drei oder mehr Einzelphasenwickelungen beständen, die so gruppirt sind, dass jede von ihnen besondere Phasenverhältnisse aufweist, erscheint es angebracht, einige allgemeine Bemerkungen über Einphasenwickelungen einzuflechten. Es giebt Wechselstrommaschinen in verschiedener Ausbildung, solche mit feststehendem Feldmagnet und beweglichem Anker, und andere mit feststehendem Anker und beweglichen Feldmagneten. Einige nach dem Inductorotypus gebaute Wechselstrommaschinen haben keine beweglichen Kupfertheile, der sich drehende Inductor besteht nur aus Eisen oder Stahl. Einige Maschinen haben Eisenkerne in den Ankern, andere — gewöhnlich solche mit Scheibenankern — haben keine Eisenkerne. Diese letzteren Anker sind im Allgemeinen nicht besonders für Mehrphasenmaschinen geeignet. Bei einigen Maschinen sind die Leiter auf Ringkerne, bei anderen auf Trommeln gewickelt. Die Kerne sind bei einigen glatt, bei anderen mit Nuten versehen.

Man kann sagen, dass alle jetzt in Gebrauch befindlichen Anker mehrphasiger Ströme sich entwickelt haben aus einer von folgenden beiden Leitformen, und zwar entweder a) aus derjenigen, welche die Ankerwicklung in breiten Einbuchtungen auf Kernen zusammen-

gedrängt haben, die für jeden Pol einen starken Zahn besitzen; oder b) aus denjenigen, welche eine nahezu gleichmässig über die Oberfläche vertheilte Wickelung zeigen, wie in alten Grammeschen oder in manchen neueren Maschinen, bei denen die Wickelung zwischen kleinen eisernen Zähnen versenkt ist, deren Anzahl diejenige der Pole übertrifft. Fig. 78 zeigt an einer sechspoligen Maschine die zusammengedrängte Wickelung mit sechs starken Zähnen und sechs in

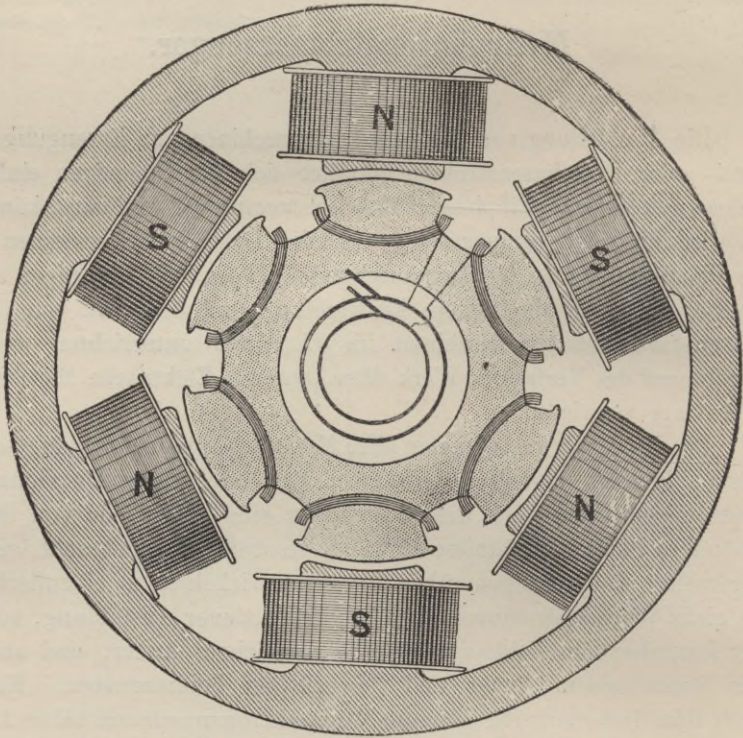


Fig. 78. Typus eines Einzahnankers für einen einphasigen Wechselstromerzeuger.

breiten Einbuchtungen (Nuten) steckenden Wickelungsspulen. Wenn diese sechs Spulen in Reihe hinter einander geschaltet sind, so dass sich ihre elektromotorischen Kräfte summiren, dann müssen sie derart verbunden sein, dass der Strom, welcher in einem bestimmten Sinne um irgend einen Zahn fliesst, im entgegengesetzten Sinne um den nächsten Zahn fliesst, indem sie ein um das andere Mal entgegengesetzt gewickelt oder verbunden werden (siehe S. 5). Für eine solche Maschine kann man die elektromotorische Kraft berechnen nach der Formel

$$E = k n N \mathcal{C} \cdot 10^{-8},$$

worin bedeutet \mathcal{S} : die Kraftlinienmenge oder die Menge der magnetischen Linien für den Pol, N die Gesamtanzahl der hintereinander geschalteten Leiter in den Nuten rund um den Anker herum gezählt, n die Periodenzahl (die Frequenz) = 60 mal die Umdrehungen in der Minute, multiplicirt mit der Anzahl der Polpaare, k den Kapp'schen Coefficienten und E die Zahl der inducirten maximalen Volt.

Der Kapp'sche Coefficient k ist der „Breiten-Coëfficient“ (siehe S. 46), multiplicirt mit π . Er ist eine Zahl, die abhängig ist von: 1. der Breite der Spulen als Theil der Länge; 2. der Breite der Magnetpole; 3. der Form der Pole; 4. der Art der Wickelung und davon, ob Eisentheile in der Nähe sind (z. B. ob sich die Wickelung in Vertiefungen oder auf der Oberfläche befindet. In der nachstehend gegebenen Tabelle sind alle diese Umstände berücksichtigt worden, soweit das in einer Tabelle überhaupt möglich ist.

Werth-Tabelle des Coëfficienten k für genutete und mit Vertiefungen versehene Trommelanker.

Maschinen- Type	—	Sechs Vertiefungen oder Nuten für eine Spule		Vier Vertiefungen oder Nuten für eine Spule		Zwei Vertief. oder Nuten für eine Spule	Nach Fig. 80	Nach Fig. W (Taf. IV)	
		1 Phase und 2 Phasen	1 Phase und 3 Phasen	1 Phase und 2 Phasen	1 Phase und 3 Phasen	1, 2 oder 3 Phasen	1 Phase	3 Phasen	
	Breite der Spule Polstand =	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	0	1	$\frac{2}{3}$	
Inductor- Type }	Polbreite Polstand	1	1,68	1,80	1,72	1,82	2,00	1,16	1,49
		$\frac{4}{5}$	1,98	2,10	2,02	2,12	2,23	1,29	1,66
Innen- u. Aussen- pol- Typen }	Polbreite Polstand	$\frac{2}{3}$	2,16	2,26	2,18	2,3	2,46	1,49	1,94
		$\frac{1}{2}$	2,36	2,54	2,45	2,59	2,83	1,64	2,12

In allen in diesen Tabellen berücksichtigten Fällen sind die Pole nahezu flach vorausgesetzt. Im Falle, dass ein Pol eine sinusoidale Vertheilung des Magnetismus bewirkt, wie es in einem rotirenden

Felde durch einen Dreiphasenständer geschieht, kann der Breitencoefficient q in folgender Weise berechnet werden.

Angenommen der Ständer eines Dreiphasenmotors gleich dem auf der Tafel XIII veranschaulichten Motor von Kolben & Co. habe

Werth-Tabelle des Coefficienten k für Oberflächenwicklung von Trommelankern mit glattem Kern, vgl. Fig. 30.

Breite der Spule Polstand =	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	1	
Polbreite Polstand =	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \\ \frac{2}{3} \end{array} \right.$	2,83	2,50	2,32	2,12	1,64
		2,46	2,23	2,13	1,94	1,49
Polbreite Polstand =	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{5} \\ 1 \end{array} \right.$	2,23	1,96	1,82	1,66	1,29
		2,00	1,76	1,64	1,49	1,16

sechs Vertiefungen auf den Pol mit einer Kraftliniendichte von \odot Linien auf jeden Pol, die sich nach einer ungefähr sinusoidalen Curve vertheilen. Die Kraftlinienmenge in der Spule erreicht, wie

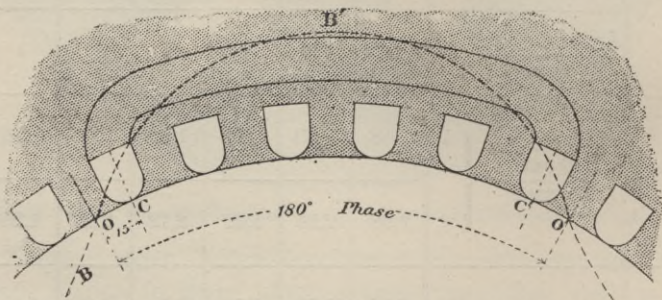


Fig. 79. Berechnung des Breitencoeffizienten für versenkte Windungen.

Fig. 79 zeigt, ihren höchsten Werth, wenn der Pol der Spule unmittelbar gegenüber steht. Der alsdann stattfindende Zustand möge dargestellt werden durch die Linie BB' , deren radiale Ordinaten die Kraftliniendichte an jedem Punkte entlang dem Ständer angeben. Die Dichte ist Null an den Punkten O und O' , deren Entfernung von einander einem Phasenunterschied von 180° entspricht. Die

Punkte C und C' , welche die Mitten der Löcher der fraglichen Spulen angeben, haben einen Phasenunterschied von 15° gegen die Punkte O und O_1 , der zwischen C und O liegende Theil der Kraftlinien ist wirkungslos. Der nutzbare Durchschnitt der Kraftlinienmenge wird daher erhalten durch Integration der Sinusfunktion $B_{\max} \sin \vartheta$ zwischen den Grenzen 15° und 165° , und Division durch die ganze Länge, oder nutzbarer Durchschnitt

$$B = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{1}{12}\pi}^{\frac{11}{12}\pi} B_{\max} \sin \vartheta d\vartheta.$$

Dies ist gleich $\frac{1,932}{\pi} B_{\max}$, während $\frac{2}{\pi} B_{\max}$ der durchschnittliche Werth über die ganze Polfläche ist. Somit beträgt die elektromotorische Kraft nur $\frac{1,932}{2} = 0,966$ derjenigen Grösse, die sie haben würde, wenn die Spule keine Breite hätte. Die ähnlichen Fällen entsprechenden Breitencoefficienten bei wechselnder Anzahl der Nuten sind in der nachstehenden Tabelle angegeben.

Breitencoefficienten¹⁾ für versenkte Leiter in sinusoidalem Felde.

Anzahl der Nuten auf den Pol	Dreiphasig	Zweiphasig	Einphasig
1	—	—	1,000
2	—	1,000	0,707
3	1,000	—	0,666
4	—	0,924	0,653
5	—	—	0,647
6	0,966	0,911	0,643
7	—	—	0,642
8	—	0,906	0,641
9	0,960	—	0,640
10	—	0,903	0,639
12	0,958	0,903	0,638
∞	0,953	0,900	0,637

1) Siehe A. Blondel in l'Industrie Électrique, Feb. 25, 1896; l'Éclairage Électrique, Mai 1895; ebenso in seiner Abhandlung La Traction Électrique sur Voies Ferrées, B. 2, S. 291.

Wenn die Wellenform eine Sinuscurve ist, ist für zusammengedrängte Wickelungen $k = 2,22$. Ist die Wellenform steil, so ist der Kapp'sche Coëfficient k grösser (siehe S. 79) und dürfte bei Einzahnwickelungen, wofern nicht die Köpfe der Zähne besonders gestaltet sind, gleich 2,8 sein.

Beispiel. Ein sechspoliger Einphasen-Wechselstromerzeuger, der mit 900 Umdrehungen in der Minute läuft, habe 3300000 Kraftlinien für jeden Pol, 720 Leiter (d. h. 120 in jeder der 6 Nuten) und den Coëfficienten 2,8. Bei dieser Geschwindigkeit finden in der Sekunde 45 Perioden statt. Daraus ergibt sich die inducirte elektromotorische Kraft:

$$2,8 \cdot 45 \cdot 720 \cdot 3300000 \cdot 10^{-8} = 3000 \text{ Volt.}$$

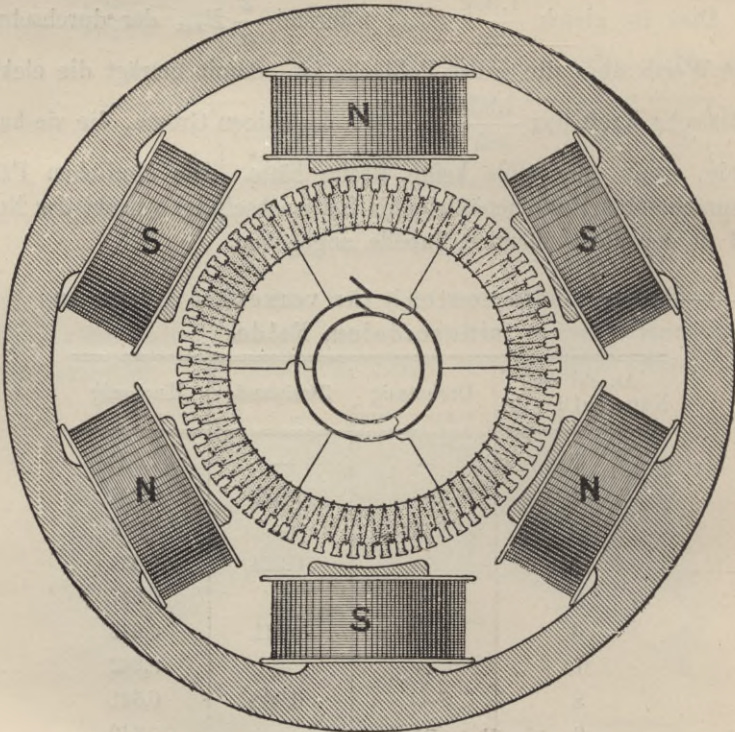


Fig. 80. Typus eines Vielzahnankers mit vertheilter Wickelung für einen Wechselstromerzeuger.

Der Fall einer Vertheilungswickelung ist in Fig. 80 bildlich dargestellt, welche eine einfache Ringwicklung zeigt, wie sie bei einer Gleichstrommaschine angewendet wird, die abwechselnd an sechs symmetrischen Punkten mit zwei Schleifringen verbunden ist, wodurch

sich sechs innere, einander parallele Wege ergeben. Wenn die Wickelung aus zahlreichen (in engen Nuten liegenden) Leitern besteht, wird der Coëfficient k niedrig sein, etwa 1,83, was daher rührt, dass die elektromotorischen Kräfte in den Leitern einer Vertheilungswickelung eine gewisse Phasenverschiebung gegen einander haben (siehe S. 46); die Zahl der hinter einander geschalteten Leiter wird dann ein Sechstel der Gesamtanzahl rund um den Anker herum sein.

Beispiel. Wenn wie oben die Geschwindigkeit zu 900 Umdrehungen in der Minute, die Kraftlinienmenge zu 3300000 Linien für den Pol und 720 Leiter in 180 engen Nuten, d. h. vier Stück in jeder Nute vertheilt angenommen werden, dann werden nur 120 Leiter hinter einander geschaltet sein (d. i. 720 : 6), und die Rechnung ergibt alsdann

$$1,83 \cdot 45 \cdot 120 \cdot 3300000 \cdot 10^{-8} = 340 \text{ Volt.}$$

Vergleichen wir dies mit dem vorigen Beispiel, so sehen wir, dass sich die viel geringere elektromotorische Kraft hauptsächlich durch die Parallelschaltung der sechs Wege erklärt, wodurch die Spannung bis auf $\frac{1}{6}$ ihres Betrages verringert wird, sowie gleichfalls durch die in Folge der Vertheilung der Wickelung über die Oberfläche sich ergebende Herabminderung des Coëfficienten von 2,8 auf 1,83. Würden wir aber durch Umgruppierung der Verbindungen alle sechs Theile in Reihen schalten, so würde die elektromotorische Kraft $340 \cdot 6 = 2040$ Volt betragen.

Der Nachtheil der Vertheilungswickelung besteht in der Verkleinerung des Coëfficienten, der Vortheil in der bedeutenden Verminderung der störenden und entmagnetisirenden Rückwirkungen des Ankerstromes auf das magnetische Feld.

Sodann empfiehlt es sich, auf eine andere Methode der Bewickelung von Polen hinzuweisen, welche in magnetischer wie auch elektrischer Beziehung in der Hauptsache der oben im Bilde gegebenen gleichwerthig ist, sich von letzterer aber dadurch unterscheidet, dass die Wickelungen anstatt um jeden Pol nur um die Hälfte derselben geführt sind. Die Anordnung ist so, dass jeder zweite Pol unbewickelt bleibt, dafür aber die mit Wickelung versehenen Pole die doppelte Anzahl von Leitern erhalten.¹⁾

1) Diese Methode ist in der Anwendung auf einfache hufeisenförmige Elektromagnete lange bekannt gewesen; nur ein Schenkel erhielt Wickelung. Siehe des Verfassers Abhandlung „Der Elektromagnet“.

Um einer derartigen Methode der Anordnung der Wickelung einen Namen zu geben, wird die Bezeichnung „hemitropisch“¹⁾ in Vorschlag gebracht. Fig. 81 zeigt denselben sechspoligen Feldmagnet wie Fig. 78. Hier aber sind alle S-Pole unbewickelt geblieben, dafür aber um jeden N-Pol die doppelte Anzahl von Windungen gelegt. Der Leser vergleiche dies mit den in den Figuren 100 und 102 dargestellten der Praxis entnommenen Anordnungen, die von Brown

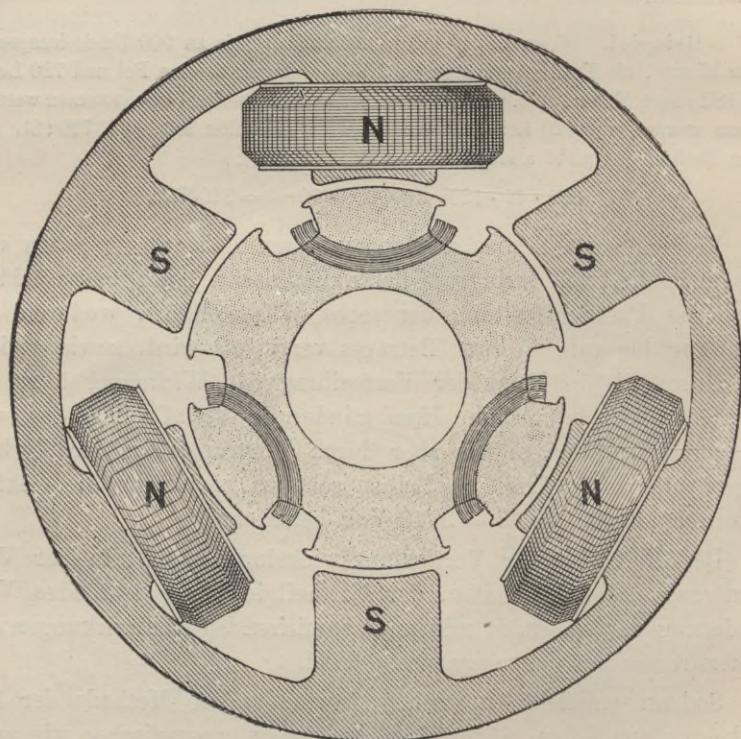


Fig. 81. Typus eines Einzahnankers mit hemitropischer Wickelung.

herrühren. Die Methode hat augenscheinlich den kleinen Nachtheil, dass sie in Folge der grösseren Länge der äusseren Windungen bei

1) In der Krystallographie ist das verwandte Adjektiv „hemiëdrisch“ seit langer Zeit in Gebrauch für solche Fälle, wo nur eine Hälfte der Flächen eines Krystalles sich entwickelt hatte, während die andere Hälfte zurückgeblieben war. Wäre die Gefahr der Irreführung ausgeschlossen, so würde dasselbe Adjektivum auch hier zu gebrauchen sein. Alles in allem erscheint die Bezeichnung „hemitropisch“ — wörtlich „halb gewendet“ oder „halb gespult“ — den Vorzug zu verdienen.

der gleichen Gesamtanzahl der magnetisirenden Windungen ein etwas grösseres Gewicht an Kupfer erfordert.

Aber die hemitropische Methode ist nicht auf Feldmagnete allein beschränkt, sie kann auch bei Ankerwickelungen Verwendung finden und hat in der That einen besonderen Werth bei Vielphasenankern, um das nicht wünschenswerthe Uebergreifen der Spulen an den Enden der Anker einzuschränken. In Fig. 81 ist der Anker mit den gleichen Ankerscheiben wie früher und den sechs grossen Zähnen hemitropisch gewickelt dargestellt, die Hälfte der Zähne ist ohne Wickelung geblieben. Die Nuten enthalten dieselbe Anzahl Leiter wie früher, 120 Stück in jeder Nute, aber die Endverbindungen sind

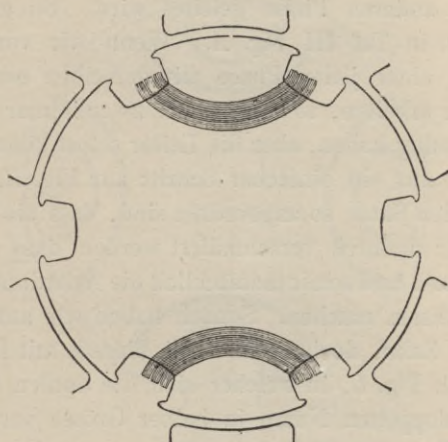


Fig. 82.

verschieden. In elektrischer und magnetischer Beziehung sind beide Constructionen identisch, wenn auch geometrisch und mechanisch von einander abweichend. Auf Einphasen-Wechselstrommaschinen diese Construction anzuwenden, würde keinen besonderen Vortheil bieten. In dem vorliegenden besonderen Falle einer sechspoligen Maschine dürfte der Grundsatz der Vereinfachung thatsächlich um einen Schritt vorwärts gebracht worden sein, indem die gesammte Ankerwickelung auf nur zwei von den sechs Zähnen, wie Fig. 82 zeigt, aufgebracht wurde. Hierbei bleibt indes zu beachten, dass die vier zur Verwendung kommenden Nuten etwas zu vergrössern sind, damit jede von ihnen die anderthalbfache Anzahl Leiter, nämlich 180 Stück, aufnehmen kann.

Anwendung auf Zweiphasenstrom-Wickelungen.

Um die einzahnige Construction mit ihrer zusammengedrängten Wickelung so abzuändern, dass ein Zweiphasenstromerzeuger entsteht, wollen wir zunächst die sechs Wickelungen aus Fig. 78 einfach als diejenigen eines Einphasenstromerzeugers ansehen und auf den um einen gewissen Winkel in eine Zwischenlage gedrehten Anker sechs gleichartige Spulen für die andere Phase legen. Dies erfordert die Herstellung von noch sechs Nuten, welche zwischen den ursprünglich vorhandenen sechs Stück einzuschalten sind. Jede der zwölf Nuten kann die halbe Grösse einer der ursprünglichen Nuten erhalten, da ja (bei gleicher totaler Leistung) die eine Hälfte des Stromes durch die Spulen der einen und die andere Hälfte des Stromes durch die Spulen der anderen Phase geleitet wird. So gelangen wir zu der Anordnung in Taf. III Fig. *A*. Wenn wir voraussetzen, dass die Stromkreise einer jeden Phase mit derselben elektromotorischen Kraft wie vorher arbeiten, so werden wir zwar immer noch 120 Leiter in jeder Nute nöthig haben, aber die Leiter selbst können dünner sein. Von hier ist es nur ein einfacher Schritt zur Fig. *B*, in welcher die Spulen der beiden Sätze so angeordnet sind, dass sie sich nicht überdecken, vielmehr dadurch verschmälert werden, dass sie nur eine geringe Höhe besitzen und somit thatsächlich die Anordnung enger stehender Feldpole rathsam machen. Sonach haben wir auf jede Phase und jeden Pol einen Zahn, doch ergibt sich hieraus mit Leichtigkeit auch die Lösung nach Fig. *C*, in welcher sich die Spulen überdecken und die an Zahl verdoppelten Nuten in halber Grösse dargestellt sind, so dass hier jede Nute nur 60 Leiter aufnimmt. Auf je eine Phase und einen Pol kommen hier zwei Zähne. In gleich zwangloser Weise gestaltet sich der Uebergang von hier nach Fig. *D*, wo die Anzahl der Nuten abermals verdoppelt wurde und die 60 Leiter jeder Phase in zwei Reihen von je 30 getheilt worden sind, um so eine bessere Vertheilung über die Oberfläche zu erzielen. Diese Lösung ist eine hervorragend günstige und in ausgedehntem Maasse zur Anwendung gekommen bei feststehenden Ankern mehrphasiger Stromerzeuger (siehe Beispiele Fig. 2, 387 und 335, sowie Taf. V und VI) und bei den Ständern mehrphasiger Motoren (siehe Fig. 160 und Taf. XI). Durch dieses Auseinanderziehen der Leiter wird indes der Coëfficient k in geringem Maasse etwa von seinem ursprünglichen Werthe 2,8 auf den Betrag 2,3 verkleinert.

Indem wir zur hemitropischen Anordnung nach Fig. 81 zurückkehren, sehen wir, dass sie sich anstandslos für Zweiphasenschaltung

verwenden lässt. Wenn wir zwei solcher Sätze von je drei Spulen, wie dort gezeigt, nehmen und drehen den einen Satz um den halben Polstand, so erhalten wir die in Tafel III Fig. *E* gezeigte Form mit zwölf Nuten. Verfolgen wir diesen Grundsatz in logischer Weise weiter, so können wir Fig. *F* aus Fig. 82 ableiten, und wir erhalten hierbei durch Drehung des zweiten Spulensatzes um die $1\frac{1}{2}$ fache (statt $\frac{1}{2}$ fache) Pollänge eine Form ohne Ueberdeckung. Dabei sind acht gleichweit von einander entfernte Nuten vorhanden. Fig. 83 giebt eine weitere Entwicklung an und zeigt 24 Nuten, von denen aber nur 16 mit Spulen versehen sind. Constructionen dieser Art eignen sich nur für Maschinen mit 6, 10, 14 u. s. f. Paare und sind nicht für Ma-

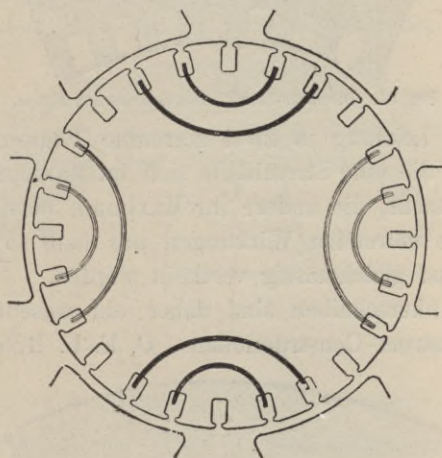


Fig. 83.

schinen mit 4, 8, 12 u. s. f. Polpaaren verwendbar. Man sieht, dass in allen Fällen die Entfernung zwischen den Mittellinien zweier aufeinander folgenden Spulen desselben Phasensatzes entweder dem einfachen oder aber dem mit 2 bzw. 3 multiplicirten Polstand gleich ist, und dass die Entfernung zwischen den Mittellinien der Spulen des einen und denjenigen des anderen Phasensatzes dem halben bzw. dem anderthalbfachen Polstand gleich ist.

In allen Fällen kann angenommen werden, dass die als Spulen oder Schleifen dargestellten Drahtwickelungen entsprechend der verlangten elektromotorischen Kraft aus jeder gewünschten Anzahl von in Reihen geschalteten Einzelspulen bestehen.

Es wurde oben darauf hingewiesen, dass, je mehr die Wickelungen auf nur wenige Nuten beschränkt werden, um so mehr Anker-

rückwirkungen auftreten und das magnetische Feld stören. So können beispielsweise die in den Fig. *E* und *D* auf Tafel III dargestellten Anordnungen in Bezug auf die Erzeugung der elektromotorischen Kraft praktisch als gleichwerthig angesehen werden, wenn die Gesamtanzahl der Windungen bei beiden dieselbe ist, aber die Anordnung in Fig. *D* wird das Feld weniger stören als die in Fig. *E*; und jede von beiden wird das magnetische Feld weniger beeinflussen als die in Fig. 78 dargestellte Einphasenstromwicklung, welche bei gleicher Spannung denselben Gesamtstrom ergibt. Der Grund hierfür liegt einfach

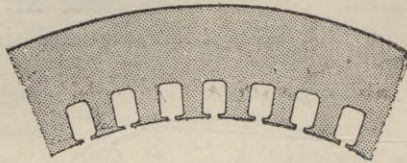


Fig. 84. Blechschnitt mit halbgeschlossenen Nuten.

darin, dass die Leistung in zwei getrennte Phasen geschieden ist und dass, wenn die eine Stromhälfte sich im Maximum befindet und Störungen verursacht, die andere ihr Maximum bereits überschritten hat, so dass die störenden Wirkungen nur halb so stark sind und der Zeit nach fast gleichmässig vertheilt werden.

Genutete Ankerscheiben sind daher ein wesentliches Merkmal von Mehrphasenstrom-Constructionen. C. E. L. Brown führte die

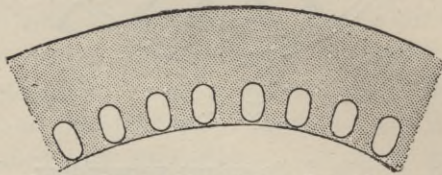


Fig. 85. Blechschnitt mit geschlossenen Nuten.

Praxis ein, die Leiter in Löcher einzubetten, welche durch die Ankerscheiben gebohrt sind. Es sind Nuten und Löcher von verschiedener Gestalt in Gebrauch. Die Fig. 84 zeigt eine Form, welche sowohl in Europa wie in Amerika viel Verwendung gefunden hat. Die Form Fig. 85 mit ovalen Löchern findet sich häufig bei Schweizer Firmen. Auch runde Löcher sind in gewissen Fällen viel in Gebrauch sowohl für Anker von Stromerzeugungsmaschinen als auch für die Läufer von Inductionsmotoren. Eine Zeit lang war die von Brown, Boveri & Co. angenommene Normalform ein längliches Loch von etwa 50 mm Länge und 20 mm Breite. Beide Formen finden bei grossen Maschinen mit äusserem feststehenden Anker An-

wendung. Ein Theil einer solchen (zweiphasigen) Maschine ist in Fig. 86 bildlich dargestellt, dabei sind die Wickelungen auf zwei Nuten für jede Phase und jeden Pol vertheilt und nach Brown's Angabe in zwei Lagen angeordnet.

Um die Leiter noch mehr auszubreiten, kann ihre Vertheilung in getrennte Nuten noch weiter geführt werden. So können z. B. bei der vorher betrachteten sechspoligen Maschine, wo jede aus 720 in Gruppen angeordneten Leitern besteht, diese letzteren auch auf 72 Nuten (d. h. 36 Nuten für jede Phase) vertheilt werden, so dass bei einer Gesamtanzahl von 1440 Leitern 20 Stück auf jede Nute kommen. Tafel III Fig. G zeigt für diesen Sonderfall ein vollständiges Schaltungsschema, in dem jedes Bündel von 20 Leitern durch eine dickere Linie angedeutet ist und drei solcher Bündel

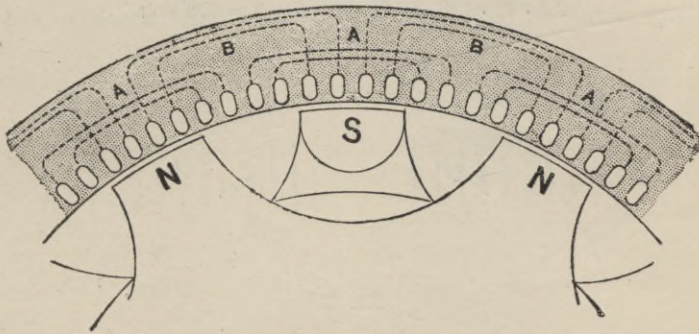


Fig. 86. Theil eines zweiphasigen Stromerzeugers.

eine Polgruppe darstellen. Tafel II zeigt einen zweiphasigen Stromerzeuger, dessen Anker von Mitte zu Mitte Pol 16 Nuten besitzt, für jede Phase also 8. Fig. 110—113 zeigen 3 Nuten für jede Phase, Fig. 117 deren 5.

Bislang ist aber die Art und Weise, wie die beiden Stromkreise mit einander verbunden werden, nicht gesagt worden, sie sind thatsächlich wie zwei getrennte Stromkreise behandelt worden. Nun können sie natürlich zunächst an den mittleren Punkten sternförmig mit einander verbunden werden, so dass die vier Enden in die vier Schleifringe auslaufen; oder aber sie können jeder in zwei getrennte Gruppen getheilt und netzartig so mit einander verbunden werden, dass die vier Linien an die Ecken der Maschen anschliessen.

Um die Angaben über Zweiphasenstromerzeuger zu vervollständigen, wollen wir zeigen, wie eine gewöhnliche in sich geschlossene Wickelung (ein Ring oder eine mit Schleifenwicklung versehene Trommel) zur Abgabe von Zweiphasenströmen eingerichtet werden

kann. Wir beziehen uns hierbei auf Fig. 80, welche einen als Einphasenstrommaschine geschalteten Ringanker zeigt; wir können denselben durch das einfache Mittel, noch nachträglich an zwischenliegenden Punkten Verbinders anzubringen, sofort in eine Zweiphasen-(Netz-)Wicklung umwandeln. Es geht daraus hervor, dass diese zwölf radialen Verbinders die Wicklungen thatsächlich in zwölf Theile scheidet, welche in besonderer Weise gruppirt sind, deren Unterschied sich aus dem Vergleich zwischen den Fig. *G* u. *I* (Tafel III) ergibt.

Beispiel. Wenn die Wicklung insgesamt aus 1440 Leitern bestände, so würden auf jeden Abschnitt in Reihen hinter einander geschaltet 120 Stück kommen. Da jeder Abschnitt etwa die halbe Pollänge zur Breite hat, kann jeder Coëfficient k zu ungefähr 2,1 angenommen werden, und die elektromotorische Kraft der zwischen zwei auf einander folgenden Schleifringen liegenden Wicklung ergibt sich zu

$$2,1 \cdot 45 \cdot 120 \cdot 3300000 \cdot 10^{-8} = 390 \text{ Volt.}$$

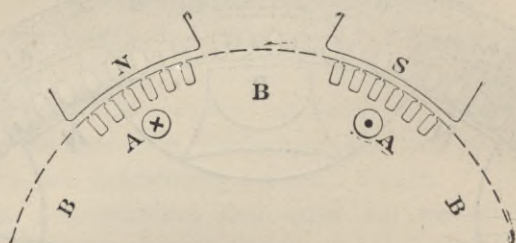


Fig. 87.

Eine weitere Umwandlung kann dadurch erreicht werden, dass man die zwölf Abtheilungen von einander trennt, alsdann aber wieder der Phase entsprechend, wie in Fig. *I* veranschaulicht, zu zwei gesonderten Reihen vereinigt. Die beiden so verbundenen Abtheilungen werden mit *A* bzw. *B* bezeichnet. Die elektromotorische Kraft eines jeden Stromkreises ist jetzt sechs Mal so gross, wie wenn die Abtheilungen parallel geschaltet wären. (Im Zahlenbeispiel = 2340 Volt. Es bleibt dies hinter den 3000 Volt zurück, die durch die gleiche Anzahl von in zusammengedrängter Wicklung nach Fig. *C* oben angeordneten Leitern erzielt werden, und zwar wegen des geringeren Coëfficienten für die Vertheilungsschaltung.)

Wir vermögen nunmehr mit Leichtigkeit die Beziehung zu ersehen, welche besteht zwischen dem in Fig. *I* gegebenen Falle, der von der reinen Vertheilungs-Ringwicklung abgeleitet wurde, und denjenigen anderen Fällen, die durch die folgenden Figuren dargestellt sind, welche sich aus der zusammengedrängten Wicklung ableiten lassen. Man betrachte — Fig. 87 — zwei aufeinander folgende Theile

eines jeden der beiden Stromkreise, z. B. zwei Stücke des *A*-Kreises. Geht der eine Theil am *N*-Pol vorbei, so befindet sich der andere am *S*-Pol, so dass die in ihnen hervorgerufenen Ströme entgegengesetzt gerichtet sind. Es wird daher auch in elektrischer Beziehung zwischen diesen hinter einander gelagerten Leitern kein Unterschied bestehen, mögen sie nun wie in Fig. 88 oder in Fig. 89 verbunden sein. Nun ist aber Fig. 88 die von der zusammengedrängten Wickelung abgeleitete Schaltungsform, während Fig. 89 einfach ein Stück einer Schleifenwicklung darstellt und der Ringwicklung gleichwerthig ist. Thatsächlich ist Fig. *K*, die eine Schleifenwicklung mit 72 Nuten und wie Fig. 89 gewickelt ist, in elektrischer Beziehung identisch mit Fig. *I*, die wie vorbeschrieben, eine Ringwicklung darstellt. Fig. *L* ist eine gleichwerthige Wellenwicklung mit dem einzigen Unterschiede, dass statt der 72 Nuten nur deren

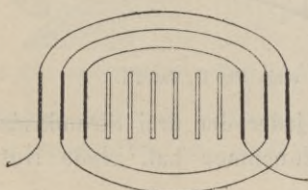


Fig. 88.

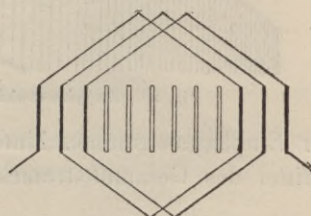


Fig. 89.

36 vorhanden sind, da von den 72 Leitern je zwei auf eine Nute kommen.

Wickelungen wie die Fig. *C* u. *D* mit zwei Spulensätzen wurden ursprünglich von C. E. L. Brown vorgeschlagen und sind seitdem in ausgedehntem Maasse zur Ausführung gelangt. In der praktischen Ausführung der Verbindungsstücke werden die beiden Sätze in zwei verschiedenen Ebenen so gebogen, dass sie von einander gut getrennt stehen. Die in den Fig. 90 u. 91 gegebenen Skizzen, an welchen gezeigt ist, wie die Brown'sche Methode auf feststehende Aussenanker Anwendung findet, sind mit den Fig. 102 u. 195 zu vergleichen, in denen ausgeführte und auf diese Weise gewickelte Maschinen zur Anschauung gebracht sind.

Anwendung auf Dreiphasenmaschinen.

Es ist in gleicher Weise leicht, dieselben allgemeinen Grundsätze auf Dreiphasenanlagen anzuwenden. Kehren wir zurück zu dem Einphasen-Einzahnanker in Fig. 78. Wenn drei solcher Wicke-

lungen aufgelegt und symmetrisch vertheilt werden, müssen die Ankerscheiben 18 Nuten erhalten oder je 6 Nuten für jede der drei Phasen, wie Fig. *M* (Taf. III) es andeutet. Bei gleicher Gesamtleistung brauchen diesen Nuten nur etwa ein Drittel so gross zu sein, wie

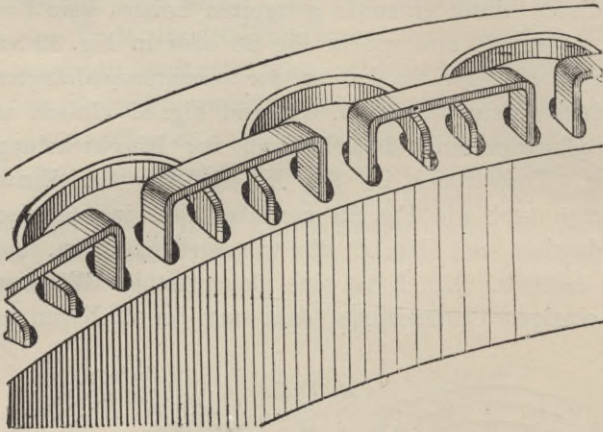


Fig. 90. Zweiphasenwicklung, vergl. Fig. *C*, Taf. III.

bei der Einphasenstrommaschine, da jeder der drei Stromkreise nur ein Drittel des Gesamtstromes aufzunehmen hat. Jede Nut wird

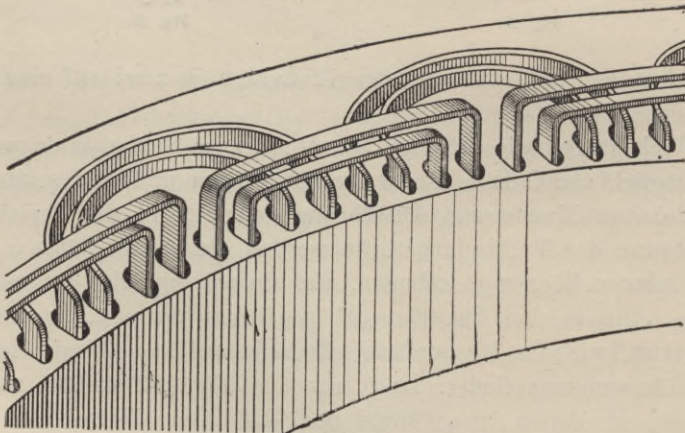


Fig. 91. Zweiphasenwicklung, vergl. Fig. *D*, Taf. III.

wie vorher 120 Leiter erhalten. Eine einfache Uebertragung der hemitropischen Wicklung auf den vorliegenden Fall, führt zu den Fig. *N* u. *O* (Taf. IV), deren letztere wegen ihrer einfachen Ueberdeckung den Vorzug verdient. In der That kann auch die dreiphasige Wicklung in der oben beschriebenen Weise zweireihig in

zwei Ebenen hergestellt werden. Durch Verdoppelung der Nutenzahl gelangen wir zu der noch mehr vertheilenden Anordnung der Fig. P. In Fig. Q haben wir noch eine andere Lösung, in der nur 9 Nuten zur Verwendung gelangt sind, von denen jede 240 Leiter enthält. Fig. R, in der die Zusammendrückung der

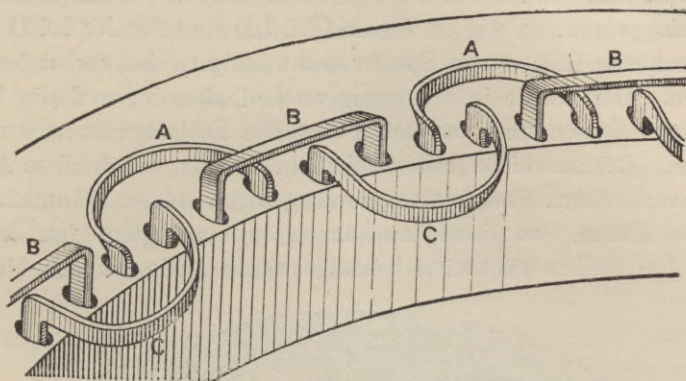


Fig. 92. Anordnung, bei welcher der Feldmagnet nicht zur Seite gezogen werden kann.

Anordnung bis zum Extrem getrieben ist, hat nur 6 Nuten. Sie ist nur anwendbar bei einer vierpoligen, oder durch Verdoppelung

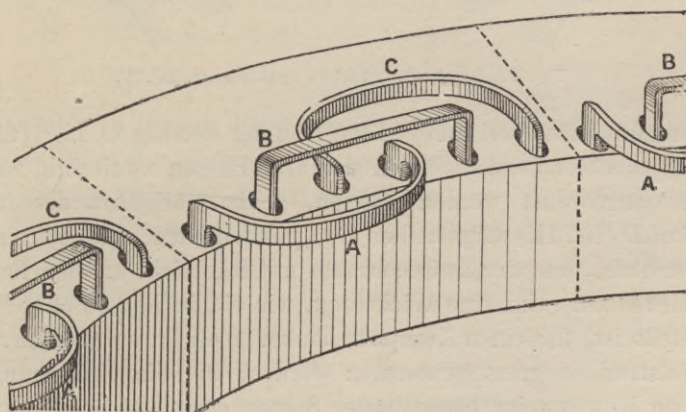


Fig. 93. Anordnung mit theilbarem Anker.

auch bei einer acht- bzw. zwölfpoligen Maschine, unanwendbar jedoch bei sechs-, zehn- bzw. vierzehnpoligen Maschinen. Fig. S (Taf. IV) zeigt eine in elektrischer Beziehung identische Wickelung, wo die Spulen in 12 Nuten in einem Kern mit 18 Nuten vertheilt sind. In allen diesen Dreiphasenfällen ist die Winkelentfernung von dem mittleren Theile einer Spule bis zu dem mittleren Theile der nächsten

Spule gleicher Phase gleich dem einfachen, doppelten oder dreifachen Polstande, während die Entfernung von der Mitte irgend einer Spule einer bestimmten Phase bis zur Mitte der angrenzenden Spule einer andern Phase gleich $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{4}{3}$ oder $\frac{5}{3}$ des Polstandes ist.

Bei Ausführung von Dreiphasenwickelungen könnte es zunächst scheinen, dass Endanordnungen in drei Ebenen wie in Fig. 92 erforderlich wären, da wie in Fig. *M* (Taf. III) und Fig. *N* (Taf. IV) drei überdeckende Reihen von Spulen nothwendigerweise vorhanden sein müssen. Dies würde jedoch wenig vortheilhaft sein, weil die Enden des einen Spulensatzes vor den Polen des Feldmagnets hervorragen würden. Bei Maschinen mit drehbaren Magneten würde diese Anordnung verhindern, dass letztere herausgezogen werden könnten.

In Fällen, wo diese Anordnung unumgänglich ist, können diese drei Reihen rückwärts befestigt werden, wie bei den Motoren

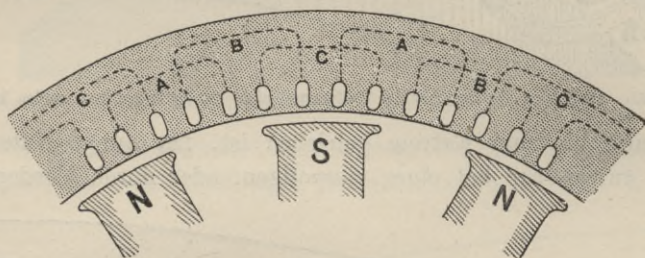


Fig. 94. Dreiphasenwicklung, vergl. Fig. *O*, Taf. IV.

der Jungfraubahn Tafel XIV. Eine Prüfung der Fig. *O* u. *P* (Taf. IV) ergibt jedoch, dass die Spulen der drei Phasen zweireihig in zwei Ebenen angeordnet werden können, genau nach Art der in den Fig. *C* u. *D* (Taf. III) dargestellten Zweiphasenreihen, mit dem einzigen Unterschiede, dass der Zwischenraum mit Rücksicht auf den Polstand verschieden ist. Um eine Wicklung, wie sie in Fig. 86 oder Fig. 90 dargestellt ist, für einen Zweiphasenanker geeignet zu machen, muss der Polstand so gross genommen werden, wie die Entfernung von Mitte zu Mitte zweier benachbarter Spulen derselben Reihe; und um als Dreiphasenanker Verwendung finden zu können, muss der Polstand gleich der Entfernung vom Mittelpunkt einer Spule bis zum Mittelpunkt der zweitnächsten Spule der andern Reihe gemacht werden. Hiernach müssen, wenn man den Spulen die Bezeichnung *A*, *B*, *C* u. s. w. beilegt, alle gleichnamigen mit Bezug auf die Pole gleiche Lagen einnehmen. Dies ist in den Fig. 94 u. 95 weiter dargestellt. Natürlich müssen alle *A*-Spulen hinter einander geschaltet werden,

sind durch Zwischenräume von einander getrennt oder aber zusammengedrängt, je nachdem die Zahl der Spulen grösser oder kleiner als die Zahl der Pole gewählt ist.

Was oben über die Vertheilung der Spulen über zahlreichere Nuten gesagt wurde, gilt natürlich auch von Dreiphasenwickelungen. Fig. *U* zeigt den gleichen sechspoligen Anker, nur mit der Abänderung, dass 72 Nuten vorhanden sind, dass also 24 Nuten auf die Phase und, da jede Phase in dem Zahlenbeispiel 720 Leiter besitzt, 30 Leiter auf die Nute kommen. Fig. *U* und *P* sind, abgesehen von der Untertheilung der Leiterbündel, einander gleich.

In elektrischer Beziehung ist Fig. *V* gleichbedeutend mit den zuletzt genannten und zeigt, wie an Stelle der Vertheilung der Bündel von geschlossenen Spulen auf mehrere benachbarte Nuten eine Schleifenwicklung angeordnet werden kann. Diese letztere ist für Wickelungen aus Stäben geeignet. Fig. *V* zeigt sie wie ein *Y* mit einem gemeinsamen Vereinigungspunkt *J* und mit drei Schleifringen verbunden.

Bei Zweiphasen- wie auch bei Dreiphasenankern kann eine geschlossene Vertheilungswicklung, wie z. B. eine Ring- oder eine geschlossene Schleifenwicklung als Dreiphasenanker verwendet werden, indem man radiale an drei Schleifringe geführte Verbindern anordnet. Diese Letzteren sind hierbei an aufeinander folgenden in der gleichen Entfernung von $\frac{1}{3}$ oder $\frac{2}{3}$ des Polstandes liegenden Punkten mit der Wicklung verbunden. Bei einer sechspoligen Maschine müssen daher entweder 18 oder 9 radiale Verbindern (das Letztere ist vorzuziehen) vorhanden sein, und die elektromotorische Kraft zwischen zwei Schleifringen ist dann ebenso gross wie diejenige, welche in der Leitung zwischen zwei beliebigen benachbarten Verbindern erzeugt wird. In dem vorstehenden Zahlenbeispiele kommen bei 72 Nuten je 30 Leiter auf die Nut, es sind also im Ganzen 2160 Leiter vorhanden, d. h. je 240 hinter einander geschaltete Leiter liegen zwischen je zwei Verbindern. Die drei in Fig. *W* mit *A* bezeichneten Theile gehören zu einer Phase und sind parallel mit einander geschaltet, ebenso die drei mit *B* bezeichneten Theile zur zweiten Phase und endlich die drei mit *C* bezeichneten zur dritten Phase. Die Schaltung ist natürlich diejenige der Netz- oder Δ -Schaltung.

Wenn die Wicklung statt geschlossen in zwölf Abschnitte getrennt und alsdann derart wieder vereinigt würde, dass alle *A*-Abschnitte einer Phase, alle *B*-Abschnitte einer zweiten Phase und alle *C*-Abschnitte einer dritten Phase hinter einander verbunden würden,

so würden wir zu einer Anordnung gelangen, bei welcher, wie in einigen der vorhergehenden Fälle, z. B. Fig. *U*, drei von einander unabhängige Stromläufe von je 720 hinter einander geschalteten Leitern vorhanden sind.

Es giebt noch eine andere ähnliche Art, eine geschlossene Wellenwicklung¹⁾ für dreiphasige Anker zu verwenden. Erforderlich ist einzig; drei symmetrisch in gleichen Abständen von einander liegende Punkte der geschlossenen Wicklung festzulegen und sie durch drei Verbindner an drei Schleifringe zu legen: wenn z. B. ein achtpoliger Anker mit 402 Leitern bewickelt ist (was eine einfache geschlossene Wellenwicklung ergibt), so kann er nach Anlegen von Verbindern an Nr. 1, 135 und 269 der Leiter als Dreiphasenanker gebraucht werden. In gleicher Weise kann durch Verbindung von vier gleich weit von einander entfernten Punkten mit vier Schleifringen eine Zweiphasenmaschine hergestellt werden: es würden z. B. bei einer sechspoligen Maschine mit 488 Leitern, welche an sich eine einfache geschlossene Wellenwicklung bilden würden, die Verbindungspunkte an den Leitern Nr. 1, 123, 245 und 367 liegen. Fig. *X* zeigt eine sechspolige geschlossene Wellenwicklung mit 68 Leitern, die als \triangle -Dreiphasenanker geschaltet ist. Die *Y*-Schaltung kann bei geschlossener Wicklung keine Verwendung finden. Fig. *Y* zeigt eine Wicklung in Sternschaltung mit dem gemeinsamen Punkt *J*, und zwar eine sechspolige Wellenwicklung mit 72 Leitern. Sie ist, wenigstens für die *Y*-Schaltung, in elektrischer Beziehung mit der Schleifenwicklung in Fig. *V* gleichwerthig.

Bei der Menge der möglichen Fälle entsteht naturgemäss die Frage, welche Wicklungsarten den Vorzug verdienen? In Fällen, wo mehrphasige Maschinen für Uebertragung auf weite Entfernungen verwendet werden, muss die elektrische Spannung hoch sein, häufig 3000—5000 Volt und gelegentlich auch 10000—15000 Volt betragen. Die Zweiphasenmaschinen in Chèvres arbeiten bei 2500 Volt, die Dreiphasenmaschinen in Paderno bei 15000 Volt (siehe Kap. XVII). In solchen Fällen sind zahlreiche Leiter und sehr starke Isolirung Erforderniss, und die Leiter bestehen aus in vielen Windungen gewickeltem Draht. Andererseits braucht die elektromotorische Kraft zum Antrieb von Motoren in Fabriken, wenn die Entfernung von der

1) Sie wird so genannt zum Unterschied von der Schleifenwicklung und ist auch gelegentlich als vielpolige Reihenwicklung bezeichnet worden. Zu vergleichen des Verfassers Buch über dynamoelektrische Maschinen.

Dynamomaschine nur gering ist, den Betrag von etwa 200—300 Volt nicht zu überschreiten, und in solchen Fällen werden auch vergleichsweise wenige Leiter aus Kupferbarren hinreichen, aber sie müssen immerhin doch beträchtlich zahlreicher als die Pole sein. Für Drahtwickelungen wird die Isolirung gegenwärtig am besten dadurch gewährleistet, dass man die vielen Windungen des isolirten Drahtes in wenige Gruppen zusammenfasst und diese dann durch einige weite Nuten führt, die ihrerseits durch Rohre aus Glimmer so stark wie möglich isolirt sind. Der am häufigsten vorkommende Fall für der-

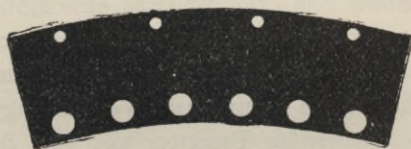


Fig. 96.

artige überaus hohe Spannung erzeugende Maschinen ist der, dass man eine Nute pro Phase und Pol rechnet. Das ergibt bei einer Sechspolmaschine 12 Nuten für eine Zweiphasenwicklung (Fig. *A* und Fig. *E*, Taf. III) oder 18 Nuten für eine Dreiphasenwicklung (Fig. *M*, Taf. III und Fig. *O*, Taf. IV).

Für Maschinen von geringerer elektromotorischer Kraft mit Stabwickelungen zieht man die Anordnung vieler Nuten und daher auch

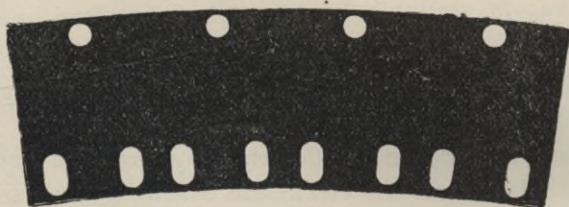


Fig. 97.

einer grossen Zahl von Zähnen auf den Pol nach einer mehr vertheilenden Methode vor.

Fig. 96 zeigt ein Stanzstück der Ankerscheibe der dreiphasigen mit 15000 Volt arbeitenden Maschinen in Paderno, wobei 1 Nut auf je eine Phase und einen Pol kommt. Fig. 97 zeigt ein Stanzstück der zweiphasigen Maschine in Chèvres, die bei 2 Nuten auf je eine Phase und jeden Pol 2500 Volt leistet. Im Gegensatze hierzu zeigt Fig. 98 eines der für die Stabankerwicklung der zweiphasigen Maschinen am Niagara verwendeten Stanzstücke. Diese Maschinen

arbeiten mit 2250 Volt und haben 187 Nuten auf zwölf Pole oder $15\frac{7}{12}$ Nuten auf einen Pol. Die Wickelung ist eine Vertheilungswickelung mit zwei Stäben für jede Nute.

Kernringe mit sechs Löchern auf den Pol können mit Ein-, Zwei- oder Dreiphasenwicklung versehen werden, so dass bei Dreiphasenwicklung zwei Löcher, bei Zweiphasenwicklung drei Löcher auf die Phase kommen. Bei der Einphasenwicklung werden vier Löcher für zwei Spulensätze verwendet und die beiden mittleren von sechs Löchern frei gelassen. Da synchrone Motoren praktisch als mit Stromerzeugern identisch anzusehen sind, so verfährt man bei Herstellung ihrer Anker unter Verwendung derselben Wickelungs-

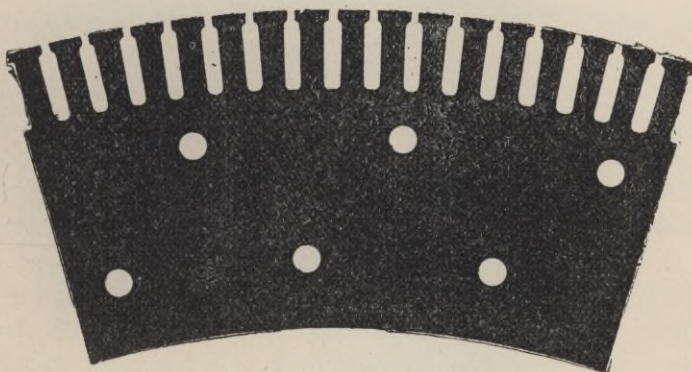


Fig. 98.

arten und Beobachtung der gleichen Rücksichten wie bei den Stromerzeugern.

Demgegenüber zeigen Inductionsmotoren besondere Eigenthümlichkeiten, die es wünschenswerth machen, soweit wie möglich alle Gegenwirkungen zu verhindern, welche aus der ungleichen Vertheilung der Leiter um den Umfang herum entstehen können. Und das ist auch der Grund, dass bei dem Ständer eines Inductionsmotors nur sehr selten eine derjenigen Formen angewendet wird, bei welchen die Wickelung auf wenige Nuten zusammengedrängt ist. Es scheint im Gegentheil alles Bestreben darauf hinauszulaufen, die Wickelungen auseinander zu ziehen. Da diese aber im Stande sein müssen, hohe Spannungen auszuhalten, so sind Wickelungsarten wie die in den Fig. *H* (Taf. III) und *W* (Taf. IV) dargestellten, die in jeder Phase mehrere parallele Stromläufe ergeben, nicht üblich. Man hat die Wahl zwischen drei Methoden, die Windungen zu vertheilen:

- a) derjenigen, die in den Figuren G , I , K und U angegeben sind;
- b) der Benutzung einer, wie oben beschrieben, geschlossenen Wellenwicklung mit Verbindungen, die von drei (oder vier) symmetrischen Punkten ausgehen, vergl. Fig. X und
- c) derjenigen, drei (oder zwei) unabhängige Wellenwickelungen zu verwenden, die wie in Fig. V so angeordnet sind, dass sie die erforderlichen Phasenunterschiede gewährleisten. Entsprechende Beispiele jeder dieser Methoden werden später an passender Stelle gegeben werden.

Kapitel V.

Beispiele ausgeführter Mehrphasenstromerzeuger.

Zu den frühesten Ausführungen gehören die von Brown herrührenden dreiphasigen Stromerzeuger, die 1891 bei der bekannten Lauffener Kraftübertragung verwendet wurden, und später im Kapitel XX beschrieben werden. Sie waren von der Oerlikon-Gesellschaft erbaut. Eine 1894 von derselben Gesellschaft gebaute Form war in der ersten Auflage dieses Werkes beschrieben. Der Feldmagnet war von derselben Bauart wie der der in Fig. 382 dargestellten Lauffener Maschinen, der Anker besass breite Zähne und hatte $1\frac{1}{2}$ Schlitze für jeden Pol und jede Phase.

Brown hat auch zuerst die Form mit senkrechter Welle eingeführt, die so besonders für Turbinenbetrieb geeignet ist. Zahlreiche Maschinen dieser Art sind noch jetzt im Betrieb, z. B. in dem Elektrizitätswerke zu Rathausen, welches die 7 km entfernte Stadt Luzern mit Strom versorgt, ferner in dem Elektrizitätswerke der Stadt Aarau, welches die Wasserkraft des Aarflusses nutzbar macht. Die Figuren 99—101 stellen eine gleiche Maschine dar, die vor mehreren Jahren in der Schuhfabrik von Bally in Schönenwerth bei Aarau aufgestellt wurde. Diese „Schirm“form eignet sich besonders für alle Fälle, wo nur eine Wasserkraft mit geringem Gefälle zur Verfügung steht und demnach langsam laufende Turbinen von grossem Durchmesser unvermeidlich sind. Bei der dargestellten Maschine beträgt die Umlaufzahl in der Minute nur 30. Die Maschine wurde nicht nur für geringe Geschwindigkeit und geringe Frequenz (20 Perioden in der Secunde), sondern auch für niedrige Spannung entworfen, so dass sie für Licht- und Kraftanlagen passenden Strom ohne Umformung liefern konnte. Sie besteht aus einem äusseren cylindrischen Rahmen aus Rothguss von 3,17 m Durchmesser, der die feststehende Ankerwicklung aufnimmt und einem inneren drehbaren Kranz von Magneten, deren Kerne radial am Umfange einer Art Schwungrad sitzen. Dieser in der

Figur 100 besonders dargestellte Feldmagnet, dessen äusserer Durchmesser 2,71 m beträgt, hat 80 Pole von schmaler rechteckiger Form; davon sind 40 mit Magnetwickelungen versehen, die auf Papierformen gewickelt und über jeden zweiten Polkern geschoben sind. Auf die

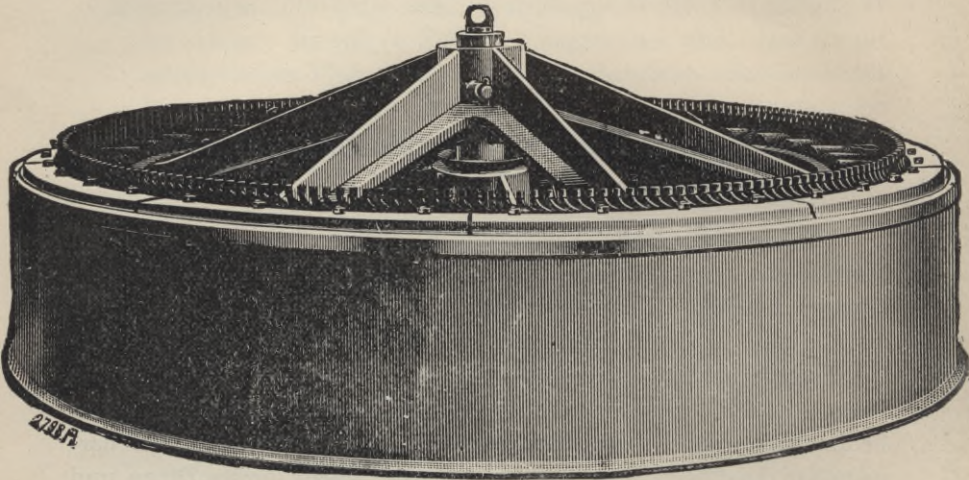


Fig. 99. Anker einer Drehstrommaschine mit senkrechter Welle.

unbewickelten Pole geschraubte Schutzrahmen aus Messing sichern die Wickelungen gegen die Wirkung der Centrifugalkraft. Den Erregerstrom liefert eine kleine Gleichstrommaschine. Die Anker-

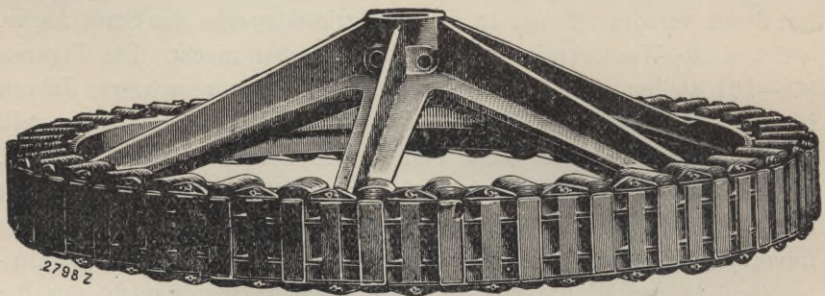


Fig. 100. Feldmagnet einer Drehstrommaschine mit senkrechter Welle.

kernscheiben sind nahe der inneren Peripherie mit einem doppelten Kranz gleich weit von einander abstehender kreisrunder Löcher versehen, in welche die aus zwei Reihen von je 240 Schienen bestehende Ankerwicklung eingelassen ist. Diese Schienen sind an ihren Enden umgebogen und mit einander in ähnlicher Weise verlöthet wie bei einer Trommel mit zweireihiger Schleifenwicklung. Das Wicke-

lungsschema wird an der Hand der Fig. 101 leicht verständlich sein, welche die Methode in Anwendung auf einen achtpoligen Anker darstellt. Aus der Geschwindigkeit von 30 Umdrehungen in der Minute ergibt sich bei 80 Polen eine Periodenzahl von 20 in der Secunde. Die Maschine liefert 250 Ampere bei 100 Volt in jeder Phase, demnach beträgt die Klemmenspannung bei Sternschaltung 173 Volt. Die Leistung ist daher bei normaler Belastung 25 KW für jede Phase oder ungefähr 100 Pferd im Ganzen.

Die Oerlikon-Gesellschaft hat ähnliche Maschinen der Schirmgattung auch für die Kraftwerke in Bellegarde, Bremgarten und Hochfelden erbaut. Bei der letztgenannten Anlage sind die Magneträder unmittelbar auf die Turbinenachse gekeilt, im Uebrigen ist die Bauart dieselbe wie bei der Lauffener Anlage. Die Klemmenspannung beträgt hier 86 Volt, sie wird durch Dreiphasentransformatoren auf 15000 Volt gebracht und durch 3 je 4 mm starke Drähte auf eine Entfernung von 22 km den Oerlikonwerken zugeführt, wo sie wieder auf die Gebrauchsspannung von 100 Volt umgeformt wird.

Ein neueres Beispiel dieser Art sind die von Brown, Boveri & Co.

für das Kraftwerk von Chèvres erbauten zweiphasigen Stromerzeuger, durch welche die Wasserkraft der Rhone für die Stromversorgung von Genf nutzbar gemacht wird. Tafel VII zeigt eine der dort aufgestellten Maschinen. Die Anlage wird in Kap. XVII näher beschrieben werden.

Später wählten Brown, Boveri & Co. für den Feldmagnet eine Form, bei welcher die unbewickelten Zwischenpole einen grösseren Querschnitt besaßen als die cylindrischen Kerne der bewickelten Pole. Aus der Fig. 102, welche einen zweiphasigen Wechselstromerzeuger von 300 Pferd darstellt, ist diese Magnetform deutlich zu ersehen. Die Wickelung des Ankers ist die gleiche wie in der Fig. 167.

Die Figuren 103 u. 104 zeigen einen Drehstromerzeuger neuester Bauart von 425 KW für die Centrale Sofia, welcher bei 400 Umdrehungen in der Minute Drehstrom von 8000 Volt verketteter

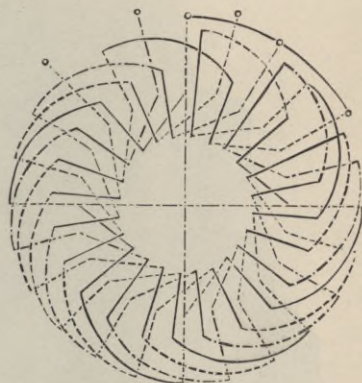


Fig. 101.

Dreiphasenwicklung für einen 8poligen Anker.

Spannung und 53 Perioden in der Secunde erzeugt. Die in 48 offenen Nuten liegenden auf Schablonen gewickelten Ankerspulen bestehen je aus 65 Windungen von 3,4 mm Kupferdraht. Das Magnetrad ist 16polig; die Magnetspulen bestehen aus 110 Windungen von 7 mm Kupferdraht. Die Art und Weise, wie die Magnete auf dem Magnetrade befestigt sind, ist noch deutlicher aus der Fig. 118 zu erkennen, welche einen Theil eines Magnetrades

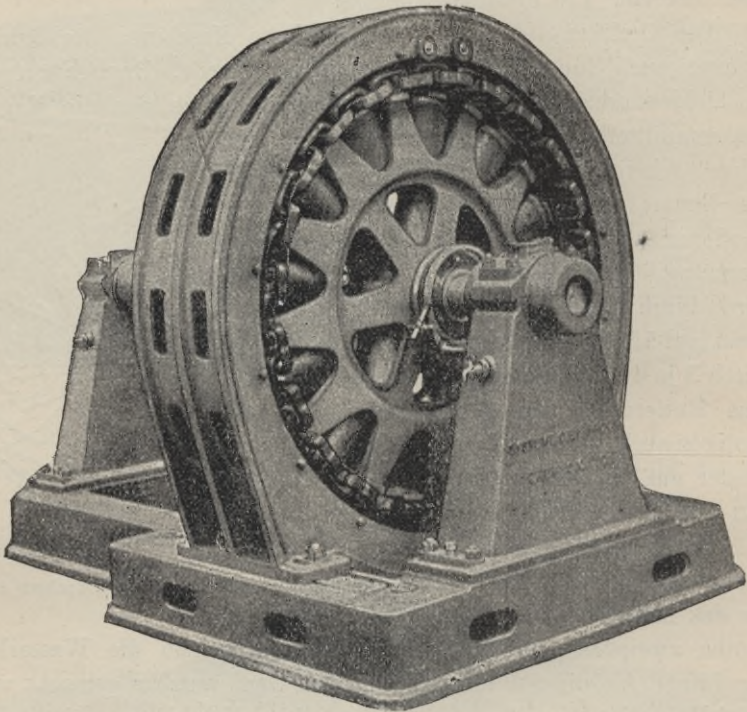


Fig. 102. Zweiphasige Wechselstrommaschine von Brown (225 KW).

einer auf der Pariser Weltausstellung 1900 ausgestellten Maschine von 1300 KW gleicher Bauart darstellt. Die Erregung erfolgt durch eine 4polige Gleichstrommaschine von 9 KW Leistung bei 50 Volt Spannung, deren Anker auf der Generatorwelle aufgekeilt ist. Der Generator ist durch eine isolirende und nachgiebige Kupplung mit einer liegenden Jonvalturbine verbunden.

Eine etwas andere Bauart hat der in Fig. 105/106 dargestellte Turbo-Generator. Er leistet 1200 scheinbare KW bei einer Phasenverschiebung entsprechend einem $\cos \varphi = 0,8$, für eine Spannung von 3180 Volt einfach, und 5500 Volt verkettet bei 1500 Umdrehungen

in der Minute und 50 Perioden in der Secunde. Die Zahl der Pole beträgt 4, die Stromstärke 126 Ampere in jeder Phase.

Der feststehende Anker hat eine Bohrung von 860 mm, das Polfeld einen Durchmesser von 850 mm. Das Polfeld wird durch eine Art Grammwicklung erzeugt, welche je nach 90° die Wicklungsrichtung ändert, so dass eigentlich vier Spitzfelder entstehen.

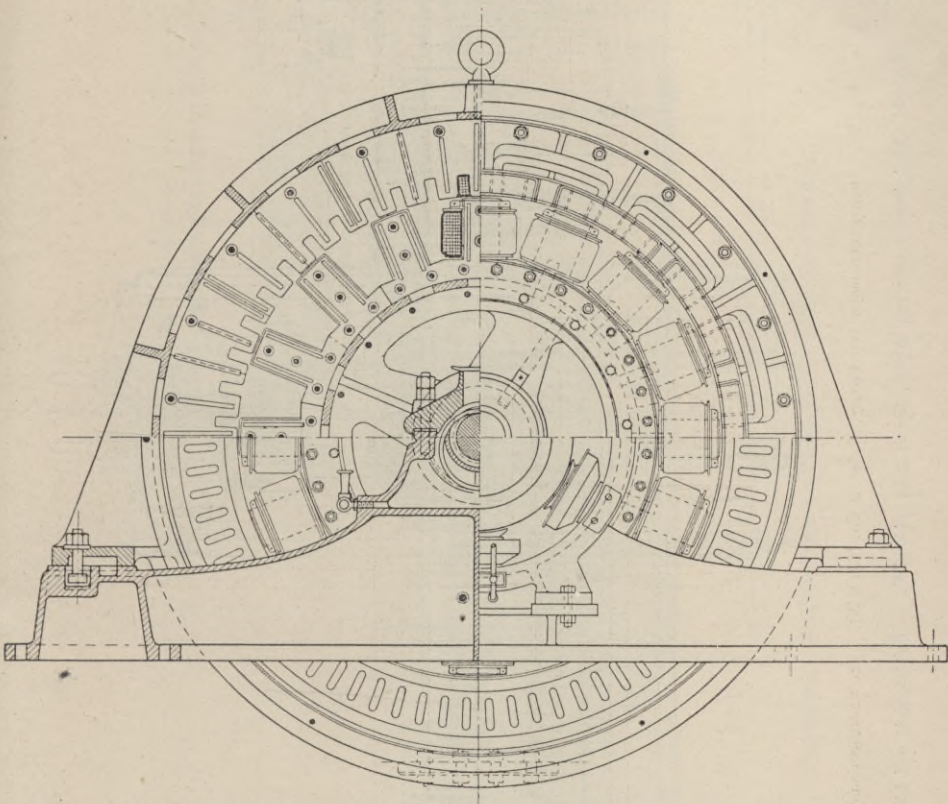


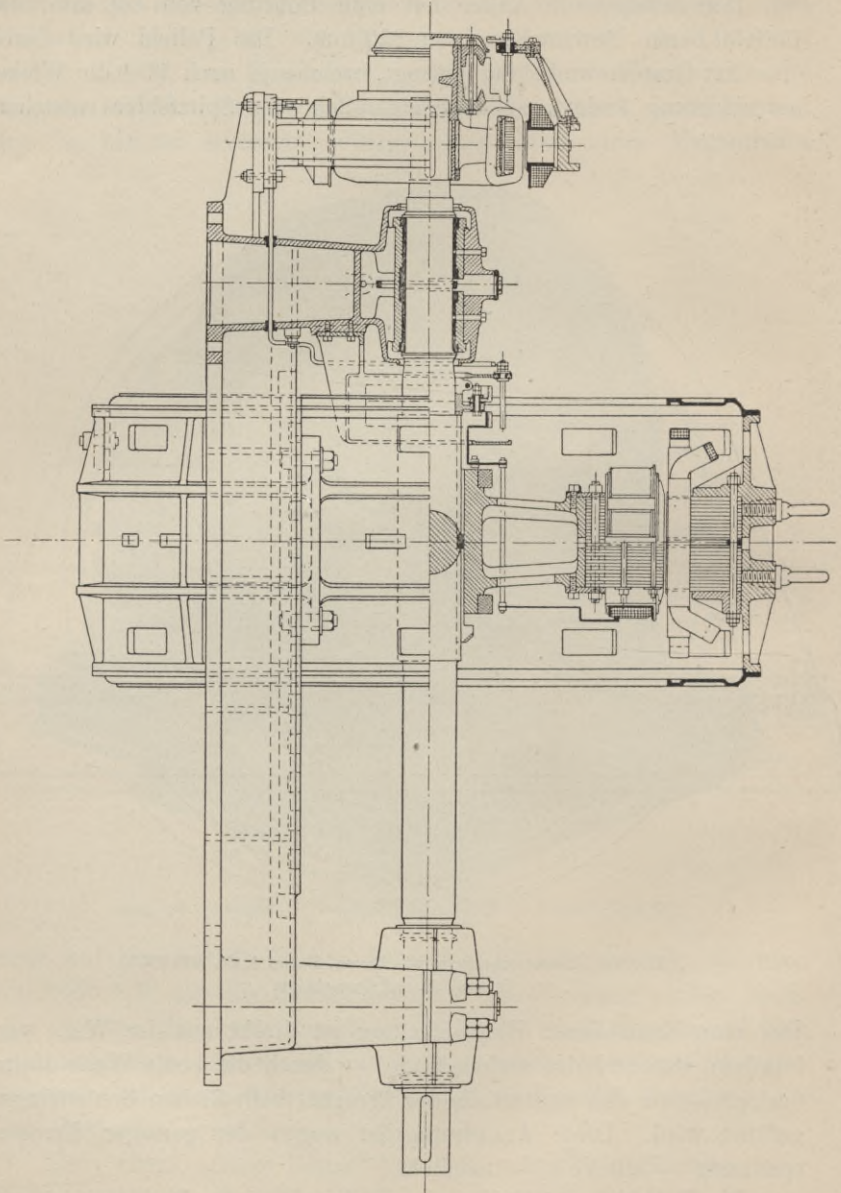
Fig. 103. Drehstromerzeuger von Brown, Boveri & Co. (425 KW).
Stirnansicht und Querschnitte.

Das eine Ende dieser Ringwicklung ist direkt mit der Welle verbunden, während das andere Ende — durch die hohle Welle isolirt verlegt — zu den ausserhalb des Erregers befindlichen Schleifringen geführt wird. Diese Anordnung ist wegen der geringen Erreger-spannung — 20 Volt — möglich.

Das Polfeld hat 120 Nuten, von denen bei der Drehungsrichtung der Wicklung zwei Nuten leer bleiben. In jeder Nut befindet sich ein nackter Kupferstab von 55×6 mm.

Das umlaufende Feld wird von zwei, als Schilder ausgebildeten Lagern getragen, welchen das Schmieröl von unten aus unter Druck

Fig. 104. Drehstromerzeuger von Brown, Boveri & Co. (425 K W). — Seitenansicht und Längsschnitte.



zugeführt wird. Der Druck, unter welchem das Oel in die Lager gepresst wird, beträgt ungefähr 4 Atm. In der Minute werden für

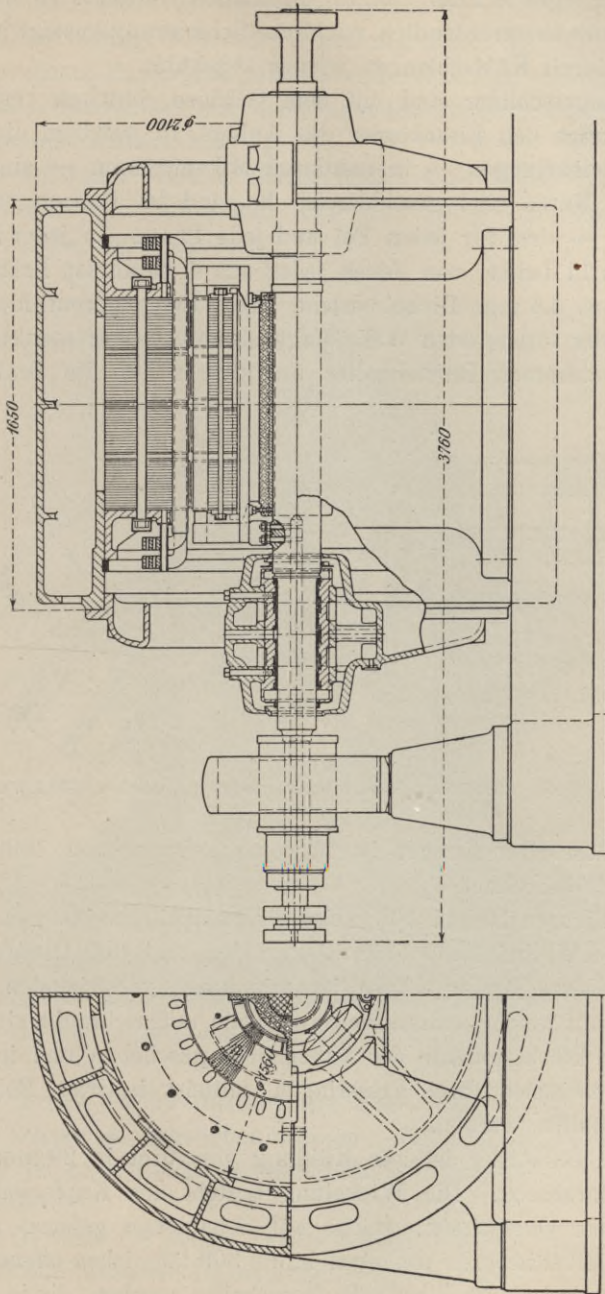


Fig. 105/106. Turbo-Generator mit umlaufendem Magnetfeld von 1200 KW.

jedes Lager etwa 8 Liter Oel in Circulation versetzt, so dass also für eine ganz ausserordentlich reichliche Schmierung gesorgt ist. Das Oel wird durch Kühlschlangen wieder abgekühlt.

Die Lagerschilder sind mit dem Gehäuse centrisch verbunden. Letzteres trägt den Eisenkörper des Ankers, in welchem die Hochspannungswicklungen — in nahtlosen Mikanitröhren — eingebettet sind. Die Nuten sind geschlossen. Es sind im Ganzen 36 Nuten vorhanden — drei für jeden Pol und jede Phase. In jeder Nut befinden sich 11 Leiter, von denen jeder aus 4 parallelen Drähten von je 4,2 bzw. 4,6 mm Dicke besteht. Der Erregerstrom fliesst von einem auf der verlängerten Welle aufgekeilten Gleichstromanker durch einen gemeinsamen Bürstenhalter unmittelbar auf die Schleifringe

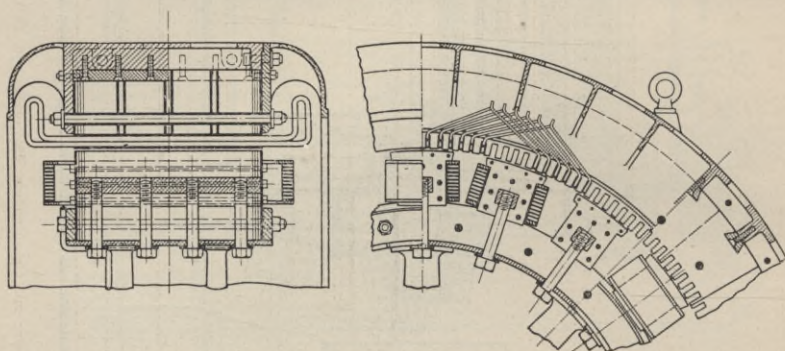


Fig. 107/108. Einzelheiten eines Drehstromerzeugers von Oerlikon (3750 KW).

des Polfeldes. Der Erreger ist für eine Leistung von 700 Ampere bei 20 Volt berechnet.

Die Figuren 107 u. 108 zeigen Einzelheiten eines Generators von 3750 KW, bei 3500 Volt 50 Perioden und 300 Umdrehungen. Das gusseiserne Ankergehäuse ist mit innen vorstehenden Rippen versehen, auf welche schmiedeeiserne Keile aufgeschraubt sind, über welche die Blechsegmente des Ankereisens geschoben und in axialer Richtung zwischen zwei Pressringen mittelst isolirter Bolzen zusammengehalten werden.

Der Blechkörper ist zur Kühlung von drei je 20 mm weiten Canälen durchsetzt. Die Wicklung besteht aus Kupferstäben von rechteckigem Querschnitt, welche auf Schablonen geformt und mit nahtlosen Mikanitröhren umgeben in die 309 länglichen offenen Nuten eingebettet und durch Fiberkeile festgehalten werden, die in seitliche Einschnitte der Nutenöffnungen eingepresst werden. Die einzelnen

Windungen sind wie bei Gleichstromankern hintereinander geschaltet. Die Stabzahl beträgt 618, der Wicklungsschritt 31. Je zwei Leiter sind aus einem Kupferstab geformt und werden auf der einen Ankerseite durch Schrauben mit den folgenden Stäben verbunden. Das Kupfergewicht beträgt 1200 kg.

Die 0,33 mm starken Bleche haben eine Breite von 750 mm einschliesslich der Luftspalten und eine Höhe von 320 mm. Die Bleche wiegen 16000 kg.

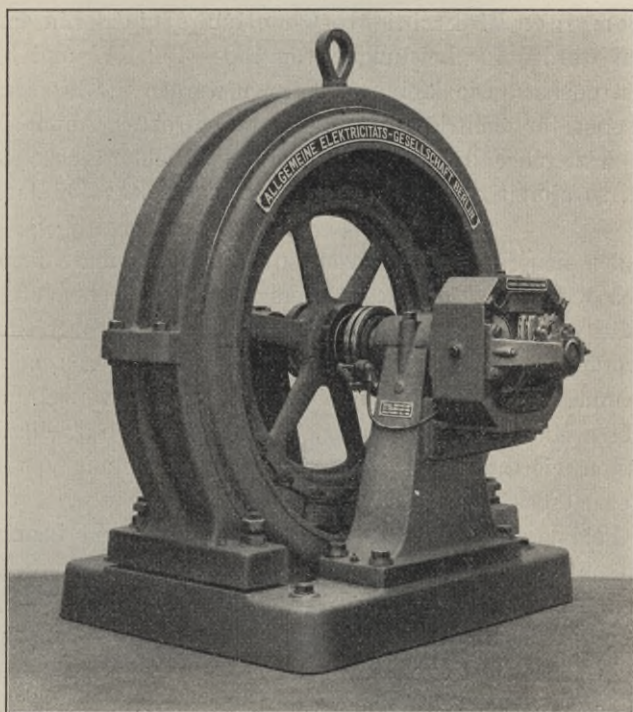


Fig. 109. Drehstromerzeuger der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Der Anker ist zweitheilig, der obere Theil kann nach Lösen weniger Schrauben abgehoben werden. Ebenso kann jede einzelne Windung leicht von den andern gelöst und aus der Maschine entfernt werden.

Das Gewicht des ganzen Ankers beträgt 26000 kg. Das Magnetrad von 2480 mm äusserem Durchmesser wiegt mit Welle 23000 kg. Es besteht aus einem aus Blechsegmenten zusammengesetzten Ring. Jedes Segment wird von vier Bolzen gehalten. Der Ring wird durch

eine Scheibe aus Eisenblech geführt, welche als Unterlage für die Schraubenköpfe der die Polkerne haltenden Bolzen dient. Diese Kerne sind ebenfalls aus Eisenblech zusammengesetzt und durch je vier Schraubenbolzen zusammengehalten. Letztere sind in einen kräftigen Eisenbalken, der quer durch den Polkern gelegt ist, eingeschraubt. Die Polkerne sind in Vertiefungen des Eisenringes eingelassen. Die Spulen bestehen aus 32 Windungen von hochkantig abgebogenem Kupferband von 4×45 mm.

Fig. 109 stellt einen Drehstromerzeuger Modell NDM 300/125 der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin dar. Diese Maschinen werden für Leistungen von 100—450 KW und 375 Umdrehungen gebaut. Die kleineren Formen werden für Riemenbetrieb, die grösseren für Seiltrieb oder auch für direkten Antrieb gebaut. Dient im letzteren Fall eine Turbine mit senkrechter Achse als Kraftmaschine, so nimmt die Dynamomaschine die in Fig. 337 dargestellte Form an.

Bei den neueren Wechselstrom- und Drehstrommaschinen ist der magnetisch wirksame Theil des Ankers aus Eisenblechen zusammengesetzt, die von einander durch Papier sorgfältig isolirt sind. Die Bleche werden durch eine Anzahl von isolirten Bolzen zusammengehalten und fest mit dem gusseisernen Gehäuse verschraubt, das bei kleineren Maschinen ungetheilt, bei den grösseren zweitheilig, bei den grössten viertheilig gegossen ist. Zur Erzielung einer guten Lüftung erhält das Eisen Ventilationsschlitze.

Die Feldmagnete werden zur Verhütung von Verlusten durch Wirbelströme und zur Vermeidung von hoher Erwärmung der Polköpfe ebenfalls aus Blechstücken hergestellt. Die Polstücke hängen entweder mit dem Kranz zusammen, indem geeignete Bleche nach Art einer Gall'schen Kette zu einem zusammenhängenden Ganzen von grosser Festigkeit zusammengesetzt werden, oder sie sind wie bei dem Drehstromerzeuger auf Tafel I an einem gusseisernen Ring, der das Joch darstellt, angeschraubt, wie die Nebenfiguren deutlich erkennen lassen. Das Schenkelkreuz ist durch Keile auf der sehr kräftigen Welle befestigt. Die Schleifringe, über welche der Erregerstrom zugeführt wird, sind zweitheilig ausgeführt, so dass, ohne die Maschine auseinanderzunehmen, ein etwaiger Fehler schnell beseitigt werden kann.

Die Ankerwicklung besteht je nach Grösse und Spannung der Maschine aus Kupferstäben, Kupferlitze und Kupferdraht. Sie ist vom Eisenkörper durch Mikanitrohre sorgfältig isolirt. Die drei

Wicklungsabteilungen für die drei Phasen von Drehstrommaschinen werden gewöhnlich in Sternschaltung verkettet.

Die offenen Nuten ermöglichen es, die Ankerwicklung in Schablonen herzustellen und als fertige Spulen in die Nuten einzulegen.

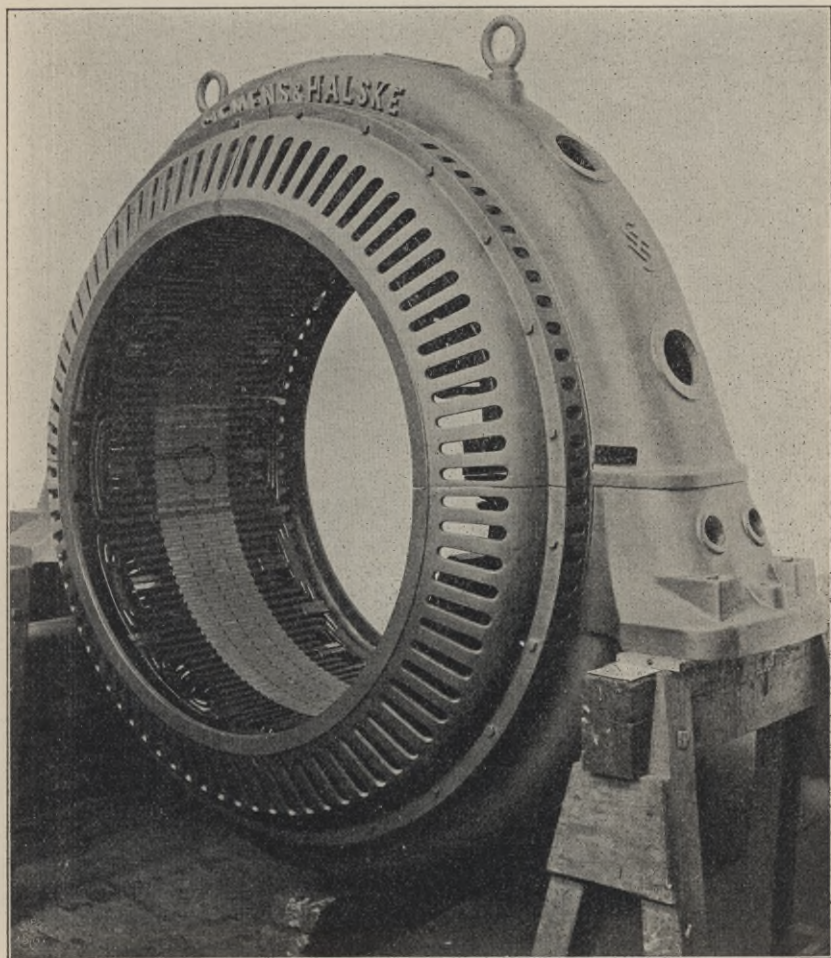


Fig. 110. Induktionsmantel eines Drehstromerzeugers von 13500 Volt (Siemens & Halske).

Etwa schadhaft gewordene Wicklungsabteilungen können somit schnell ausgewechselt werden. Die Fig. 111—113 zeigen verschiedene Formen der Schablonenwicklung, z. Th. in den verschiedenen Stadien der Herstellung; Fig. 114 eine Gitterwicklung für einen Induktionsmantel.

Das Ankereisen ist in Abständen mit Schlitzkanälen versehen, durch die beim Umlauf ein kräftiger Luftstrom geht, wodurch die Maschine gut gelüftet wird. Die Lager sind selbstölend mit Ringschmierung versehen. Die kleineren Maschinen erhalten zwei Lager

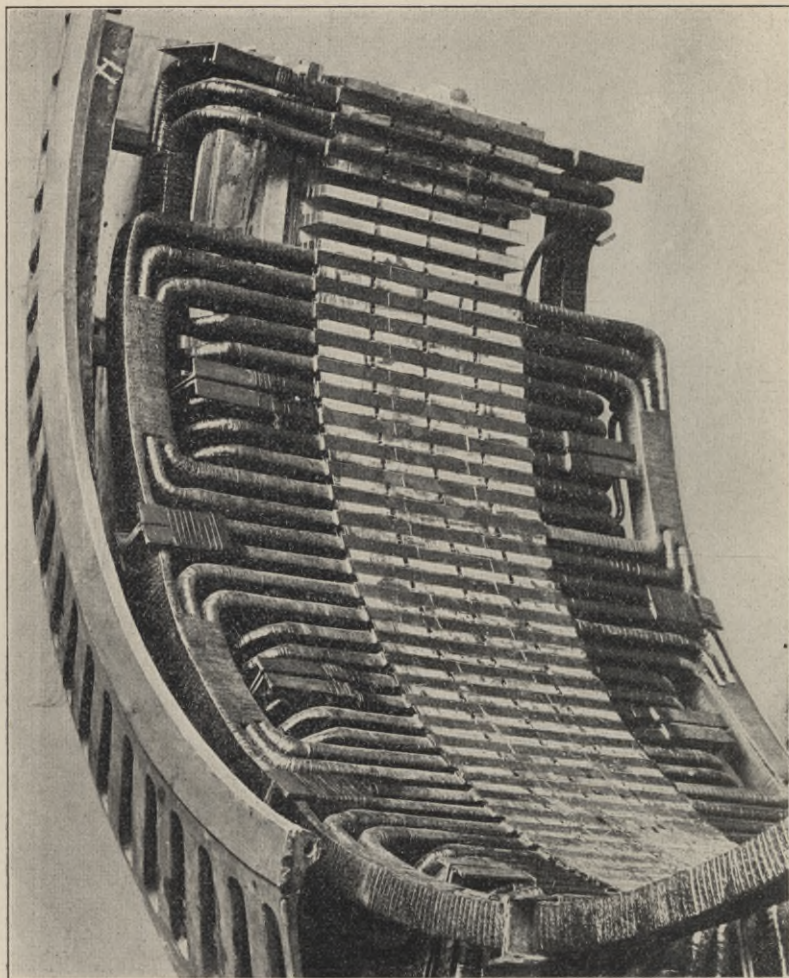


Fig. 111. Schablonenwicklung des Drehstromerzeugers von 13500 Volt.

und eine fliegend angeordnete Riemenscheibe für 20—28 m Riemen-
geschwindigkeit, grössere Maschinen für Riemen- oder Seilantrieb
werden mit drei Lagern hergestellt. Grosse Maschinen für directe
Kupplung mit der Antriebsmaschine erhalten keine Grundplatte,
sondern werden mit zwei am Gehäuse angebrachten Ansätzen auf

seitlich angeordneten und in das Fundament angelassenen gusseisernen Wangen aufgeschraubt. Der äussere Lagerbock wird direkt mit dem Fundament verankert, während als zweites Lager das entsprechende der Antriebsmaschine dient.

Die Polklemmen der Maschinen werden bei höheren Spannungen in isolirende Buchsen eingeschlossen und mit Kappen versehen, so dass jede Berührung blanker Leitungstheile unmöglich gemacht wird.

Die Erregermaschine wird vielfach, besonders bei grossen Maschinen, mit der Hauptmaschine auf gleiche Welle gesetzt. Sie ist

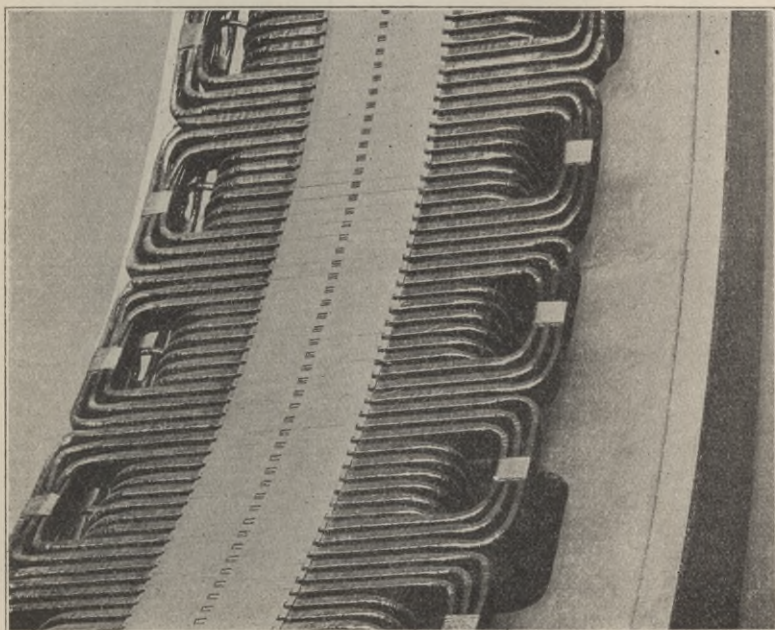


Fig. 112. Schablonenwicklung für Drehstromerzeuger (Siemens & Halske).

gewöhnlich eine Reihenschlussmaschine, in deren Stromkreis der Regulirwiderstand für die Schenkelerregung der Drehstrommaschine gelegt wird.

Die Drehstrommaschinen von Siemens & Halske werden gewöhnlich für 50 Perioden in der Secunde gebaut. Selbstinduction und Trägheitsmoment der Maschinen werden so gewählt, dass die Maschinen ohne Anstand parallel arbeiten.

Diese Drehstrom- und Wechselstrommaschinen lassen sich ohne Aenderung der Ausführung auch als synchrone Dreh- und Wechselstrommotoren verwenden.

Bei dem Stromerzeuger auf Tafel I besteht die in Sternschaltung befindliche Ankerwicklung aus einem Kupferseil, dessen Querschnitt $8,5 \times 5,5$ mm blank und 10×7 mm isolirt ist. Dieses Seil ist in

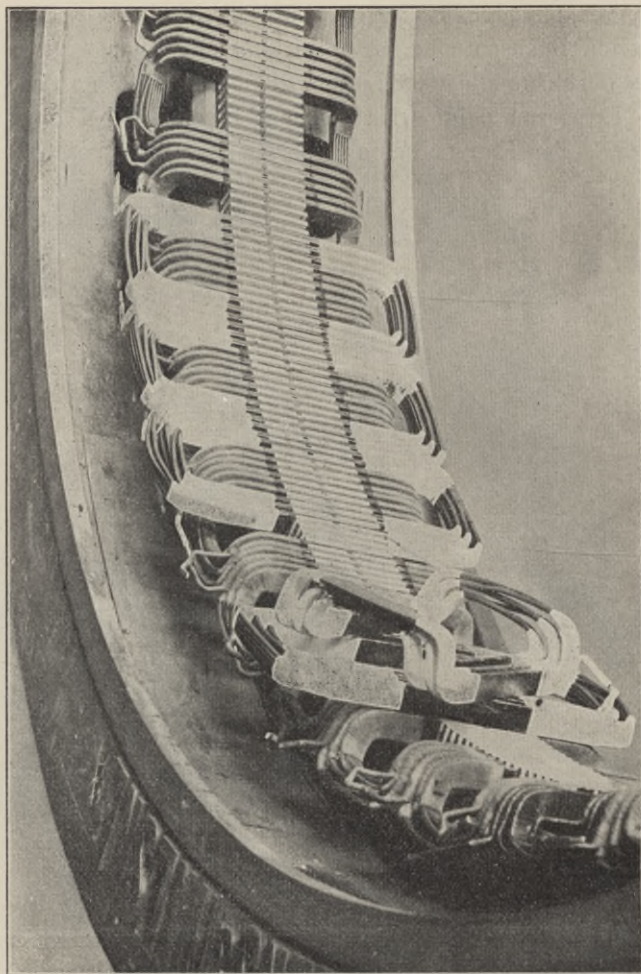


Fig. 113. Schablonenwicklung für Drehstromerzeuger (Siemens & Halske).

sechs Windungen durch jede der 576 Nuten geführt, deren freier Querschnitt 10×45 mm ist (mit 3 mm starker Isolation gegen das Eisen). Der Widerstand dieser Wicklung beträgt für jeden Zweig (kalt) 0,515 Ohm. Der Anker erzeugt 96,4 Ampere bei 5100 Volt, also 850 KW (bei $\cos \varphi = 1$).

Die Feldmagnetwicklung besteht aus Flachkupfer von $3,3 \times 30$ mm, auf jeden Schenkel kommen 57 Windungen. Die Spannung ist 110 Volt.

Die Fig. 110 zeigt den InductionsmanTEL eines 16poligen Drehstromerzeugers (Modell DG 46/45), welcher bei 375 Umdrehungen

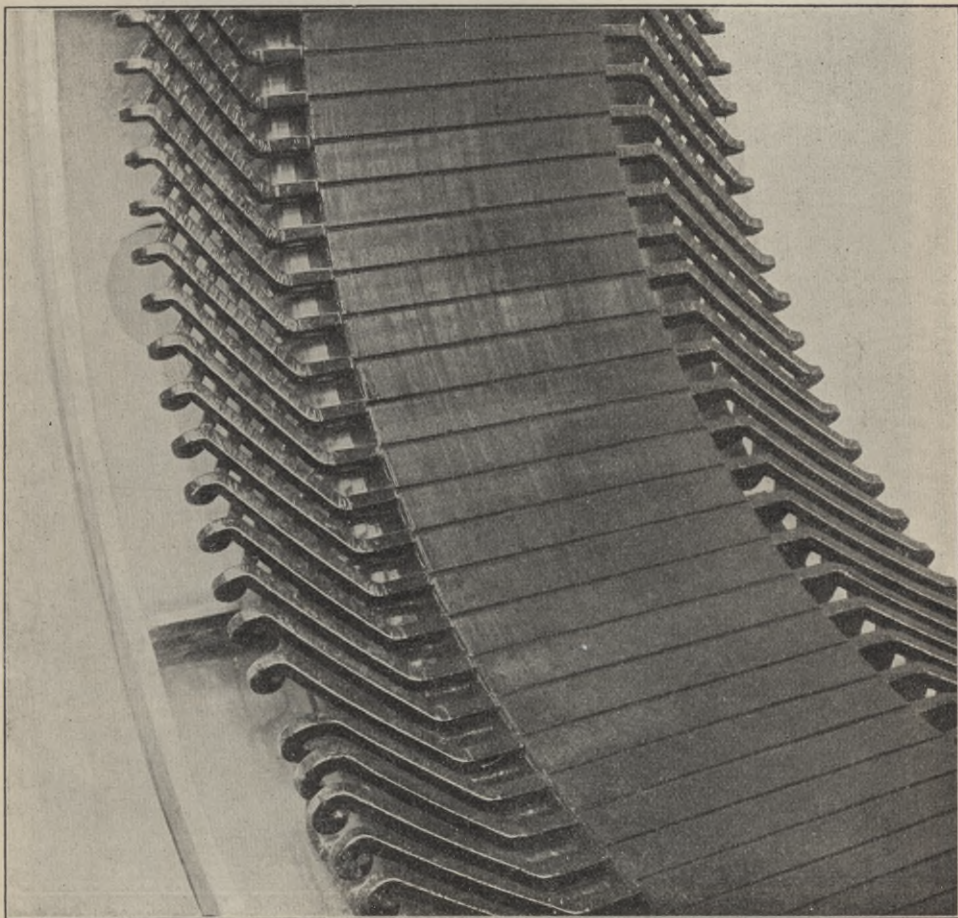


Fig. 114. Gitterwicklung für einen InductionsmanTEL (Siemens & Halske).

und 13500 Volt Spannung 700 KW leistet. Die Maschine ist für direkten Zusammenbau mit einer Turbine bestimmt und in der Centrale Ceres in Oberitalien aufgestellt. Der Strom gelangt ohne Umformung direkt in die Fernleitung. Die aus Flachkupfer hergestellte Erregerwicklung ist in 88 Windungen um die Pole geführt. Sämtliche Pole sind hintereinander geschaltet. Die Umfangsgeschwindigkeit

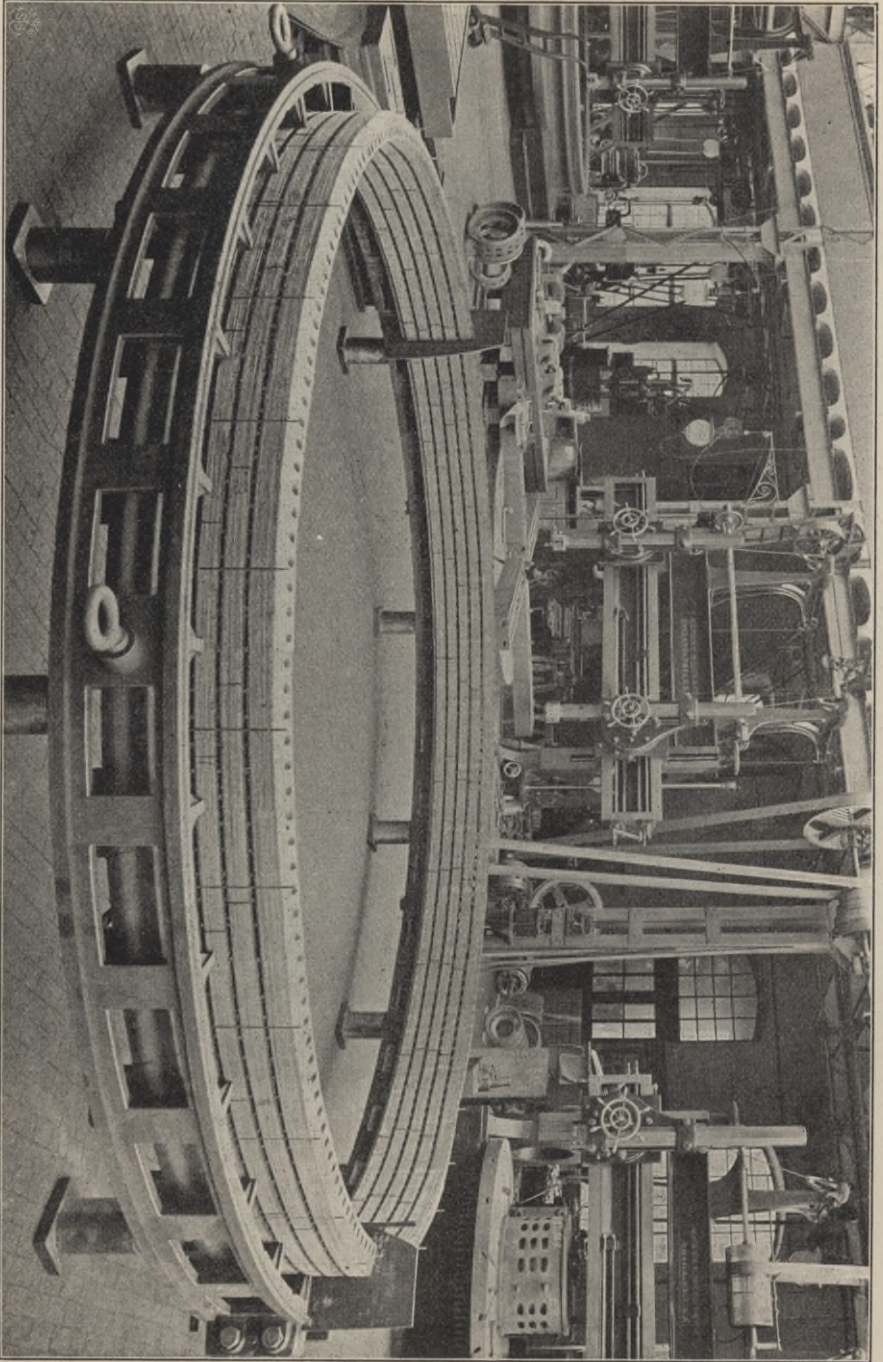


Fig. 115. Aufbau des Ankers der Schuckert'schen Drehstrommaschine von 1000 P.

beträgt 38 m in der Secunde. Trotz der hohen Spannung konnte die Wicklung gut untertheilt werden, so dass eine nahezu sinusartige Spannungscurve erzielt wurde. Der feststehende Theil hat im Ganzen 1728 Windungen.

Die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co. verwendet als Material der Magneträder überall Stahlguss, wo Rücksichten auf möglichste Gewichtsverminderung oder Festigkeit es erfordern. Wenn dagegen der Generator zur Erzielung eines hohen Gleichförmigkeitsgrades Schwungmassen aufnehmen muss, wird Guss-eisen auch für die Magneträder verwendet.

In Fig. 2 ist eine derartige Schwungradmaschine dargestellt, bei welcher die obenerwähnten Rücksichten bei dem Entwurf des fest-

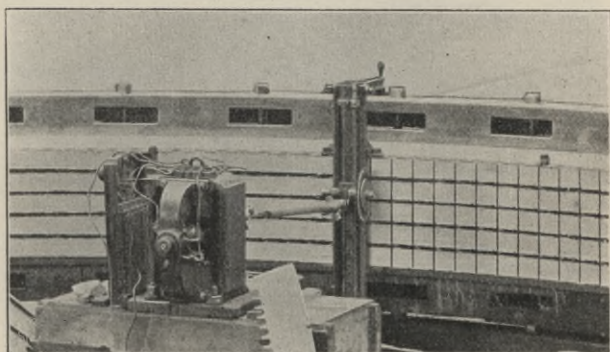


Fig. 116. Fraisen der Nuten des Ankers der Schuckert'schen Drehstrommaschine.

stehenden Ankertheiles massgebend waren. Hierbei ist durch die aus der Figur zu erkennende schmiedeeiserne Verspannung trotz geringen Materialaufwandes eine hohe Festigkeit erreicht.

Die Figuren 115—117 zeigen Theile der in Paris 1900 aus-
gestellten grossen 1000pferdigen Drehstrommaschine gleicher Bauart, und zwar Fig. 115 den Aufbau des Ankers, Fig. 116 die Bearbeitung der Nuten vermittelt einer transportablen Fraismaschine und Fig. 117 einen Theil der Wicklung. Die Maschine lieferte 98 Ampere bei 5000 Volt verketteter Spannung in jeder Phase. Der innere Durchmesser des Ankers betrug 5,5 m, das gusseiserne zweitheilige Gehäuse steht mit abnehmbaren Füßen auf schweren Fundamentbalken und kann nach Entfernung der Füße behufs Besichtigung um das Wellenmittel verdreht werden. Das Gesamtgewicht beträgt über 13 Tonnen.

Das Magnetgestell wiegt fertig über 26 Tonnen, es besteht in allen Theilen aus Stahlguss; die 72 Pole sind je mit zwei kräftigen Schrauben am Kranz befestigt.

Die Erregerspannung von 220 Volt wird durch zwei Schleifringe zugeführt.

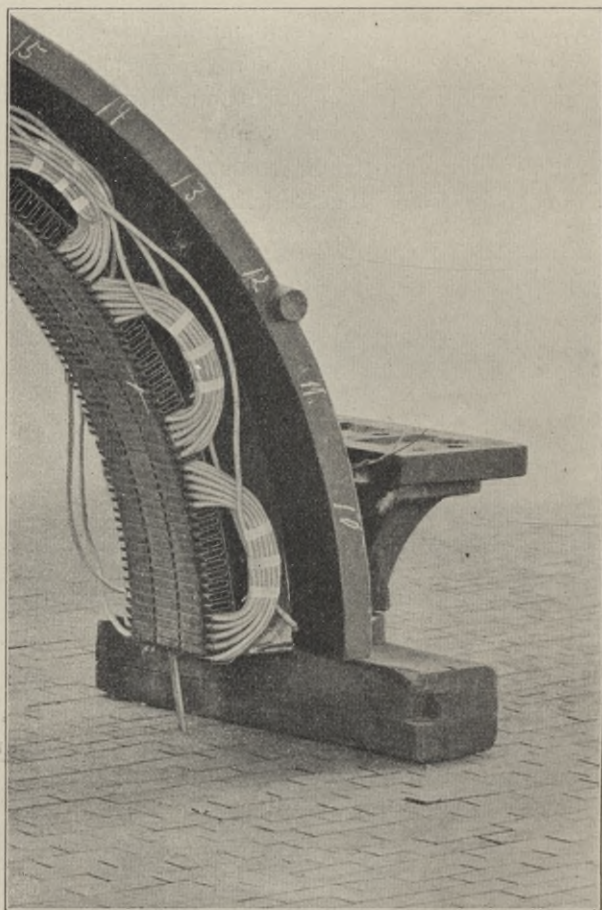


Fig. 117. Ein Theil des Ankers des Schuckert'schen Drehstromerzeugers mit Wicklung.

Auf Tafel VI ist eine noch grössere Maschine von $2500 \cos \varphi$ KW Leistung dargestellt, welche bei 90 Umdrehungen einen Strom von 5500 Volt liefert. Die Bauart ist dieselbe wie bei den vorher beschriebenen Maschinen, nur ist hier auf die Verspannung des Guss-eisenrahmens verzichtet.

Kapp hat zwei- und dreiphasige Maschinen entworfen, die zuerst von Johnson & Phillips ausgeführt wurden. Ein neuerer in den „Elektromechanischen Constructionen“ (Berlin 1898) S. 57 veröffentlichter Entwurf betrifft eine Maschine von 100 KW, mit 20 Polen, 300 Umdrehungen in der Minute, 50 Perioden in der Secunde und

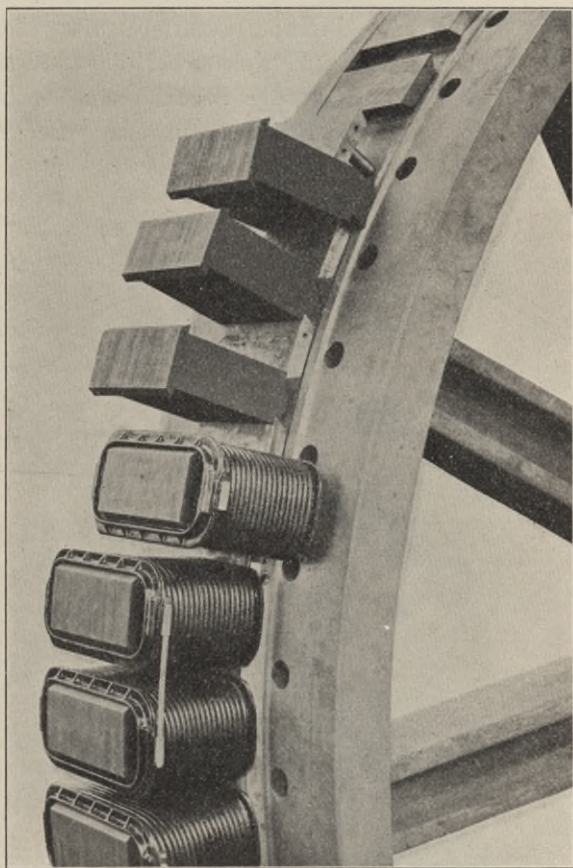


Fig. 118. Theil eines Magnetrades von Oerlikon.

mit $1\frac{1}{2}$ Ankerspulen für jeden Pol oder 1 Spule für jedes Polpaar und jede Phase. Der Feldmagnet wird (wie in Fig. 385) durch eine einzige Spule erregt. Bemerkenswerth ist an der Maschine, dass die Ankerspulen in Rillen der aus gestanzten Blechen zusammengesetzten Magnetkerne gewickelt sind, welche Segmente des Ankerringes bilden und behufs Prüfung oder Ausbesserung für sich von den übrigen

Segmenten getrennt werden können. Fig. 119 giebt ein Bild des Aufbaues der Maschine. Die mechanische Befestigung der Segmente an dem gusseisernen Ankergehäuse erfolgt durch die übergreifenden Endscheiben aus Rothguss.

Die Figuren 120 u. 121 stellen einen von H. F. Parshall entworfenen Dreiphasenanker dar, der in dessen Bericht¹⁾ über die elektrische Strassenbahn in Dublin beschrieben ist. Es ist eine sechspolige Maschine von 150 KW, welche bei 600 Umdrehungen in der Minute und 30 Perioden in der Secunde eine Spannung von 2500 Volt zwischen den Schleifringen aufweist. Der Anker hat

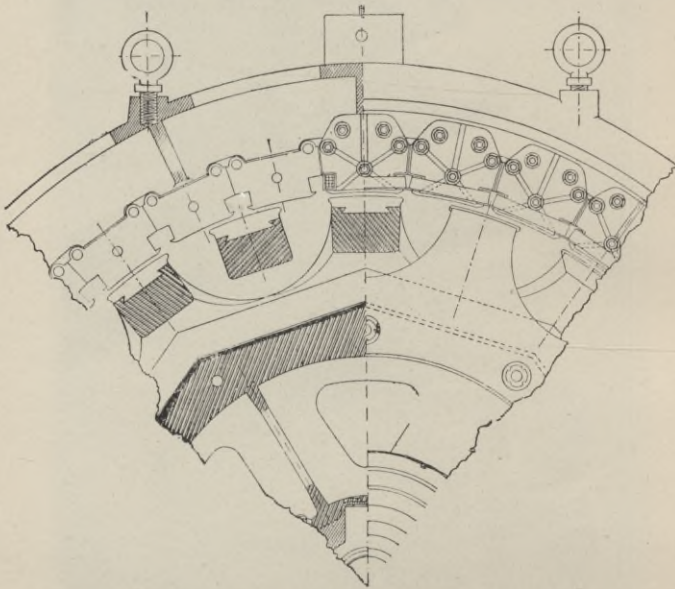


Fig. 119. Aufbau einer Drehstrommaschine von Kapp.

36 Schlitze, also 2 Schlitze für jeden Pol und jede Phase. Die Wicklung, deren Verbinder in drei Ebenen gelagert sind, gleicht der in Fig. *M* Tafel III dargestellten mit dem Unterschied, dass die Zahl der Schlitze doppelt so gross ist, also nur eine Wicklung auf jeden Schlitz entfällt. Die Peripheriegeschwindigkeit beträgt 22,5 m in der Secunde. Das Ankergerüst besteht aus zwei gusseisernen auf der Welle aufgekeilten Sternen, welche den aus Eisenblechen von 0,35 mm Dicke bestehenden Magnetkern mittelst Schraubenbolzen-

1) Proc. Inst. Civil Engineers, B. 133, 1897/1898.

zwickeln zusammenpressen. Jedes Blech bildet einen geschlossenen Kreisring und wird mit den übrigen Blechen durch die gemeinsame Keilnut in bestimmter Lage festgehalten.

Die Wickelung besteht aus Kupferspulen, die auf Schablonen gewickelt, isolirt und in Schlitz des Ankerkernes eingelegt und durch Holzkeile in ihrer Lage festgehalten werden. Die in Sternschaltung befindliche Wickelung liefert bei der vorgeschriebenen Geschwindigkeit 1440 Volt in jeder Phase. Die Enden der Wickelung und die Verbinder werden auf cylindrischen, an beiden Enden des Ankers vorstehenden Ansätzen der Endscheibe gelagert und befestigt.

Die Kraftlinienzahl bei voller Belastung beträgt in den Zähnen 15000 auf jeden Quadratcentimeter, vermindert sich in den Kernen auf 7400 und im Luftzwischenraum auf 7000. Die Stromstärke im Anker beträgt, ebenfalls bei voller Belastung, 2 Ampere auf das mm^2 , die Erwärmung steigt hierbei an der Oberfläche des Ankers um 30°C .

Das Gerüst des Feldmagnets ist von Gusseisen und hat sechs nach innen vorspringende Polkerne aus geblättertem Eisen, die im Joch vergossen sind. Die

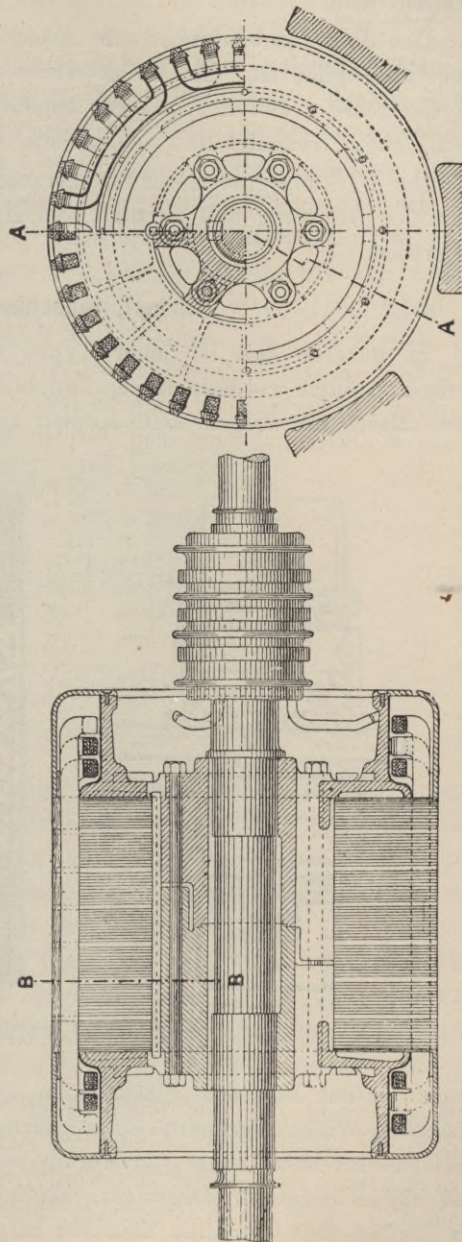


Fig. 120/121. 6 poliger Dreiphasenanker von Parshall.

Erregerwickelungen sind auf besonderen Spulen aufgebracht, die zum Schutz der Wickelung gegen die Ankergegenwirkungen und zum Ableiten der Wärme mit Messingflanschen von 9,5 mm Stärke versehen sind.

Das Joch ist senkrecht zur Achse geteilt, damit der Anker leicht zugänglich ist. Die Collectorringe sind auf einem besonderen auf die Achse gekeilten Armkreuz angebracht. Die Lager sind selbstöhlend, kuglig gestaltet und stellen sich selbstthätig ein.

Der Wirkungsgrad dieser Stromerzeuger wird zu 92 vom Hundert bei voller Belastung und zu 89,5 vom Hundert bei halber Belastung angegeben.

Inductormaschinen.

In neuerer Zeit ist jener Typus von Wechselstrommaschinen häufiger benutzt worden, der als Inductormaschinen bezeichnet wird. Diese Maschinen haben kein Kupfer auf dem umlaufenden Theil,

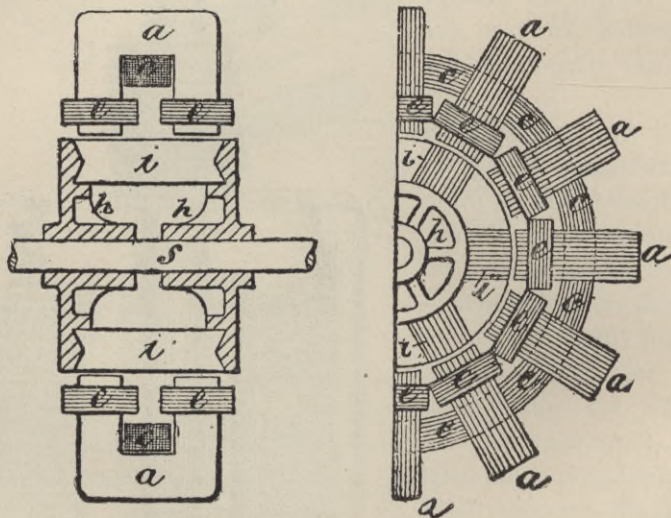


Fig. 122/123. Mordey's Inductormaschine.

dieser besteht nur aus Eisenmassen, welche mit Hilfe von feststehenden Wickelungen eine stets gleich bleibende Polarität erhalten. Diese neuere Form rührt von Mordey her und ist in den Figuren 122 und 123 schematisch dargestellt; ähnliche Entwürfe sind auch fast zur gleichen Zeit von Elihu Thomson hergestellt worden. Die Figuren

122/123 zeigen eine einphasige Wechselstrommaschine. Feststehende Ankerspulen *ee* sind zu je zweien auf vorspringenden geblättern Kernen *aa* aufgebracht, zwischen ihnen ist ebenfalls fest die Magnetisierungsspule *c* gelagert, die den inneren umlaufenden Theil umgiebt, ein Rad, das die Eisenmassen *ii* des Inductors trägt.

Die Fig. 124 zeigt einen Schnitt durch eine dreiphasige Inductormaschine neuerer Bauart der Oerlikon-Gesellschaft. Das Magnetrad ist ein vollkommen glatter Cylinder aus Grauguss, auf welchen in zwei Reihen die aus Blechen zusammengesetzten Polhörner mittelst Keilen und Schrauben aufgesetzt sind, so dass jedes Polhorn nach Lösen der Schrauben seitlich abgestreift werden kann. Der Anker besteht aus zwei Blechringen mit offenen Nuten. In die nackten Nuten jedes Ringes werden die vorher auf Schablonen fertig gewickelten und durch nahtlose Mikanithülsen isolirten Spulen ein-

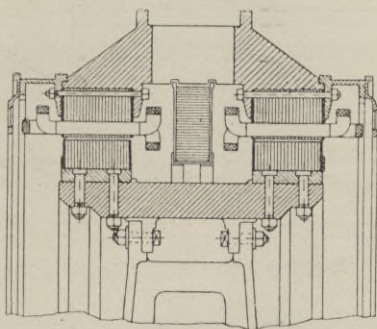


Fig. 124. Schnitt durch eine dreiphasige Inductormaschine von Oerlikon.

gelegt und durch Federkeile gehalten, welche seitlich in Einkerbungen der Nuten eingreifen. Die Spulen sind auf der Innenseite der Blechringe abwechselnd nach oben und unten abgebogen. Jede Spule kann für sich entfernt und durch eine neue ersetzt werden, nachdem ein Polhorn von der Trommel abgestreift ist.

In den Gusscylinder des Gehäuses zwischen die beiden Ankerkränze ist die Erregerspule eingesetzt, welche aus einem nackten, mit Asbestzwischenlagen aufgerollten Kupferband besteht. Die Wicklung füllt den Raum zwischen den Ankerspulen einerseits und den beiden Polreihen des Magnetrades andererseits aus.

Der Gussmantel, welcher die beiden Blechkränze vereinigt, ist mit Ventilationsöffnungen versehen, durch welche der von den rotierenden Polhörnern erzeugte Luftzug entweicht, nachdem er die Feldwicklung umspült hat.

Die Fig. 125 zeigt die Ergebnisse sorgfältiger Indicirversuche, welche im Electricitätswerke Zürich an einem derartigen Drehstromerzeuger von 1000 KW bei 100 Umdrehungen in der Minute angestellt wurden.

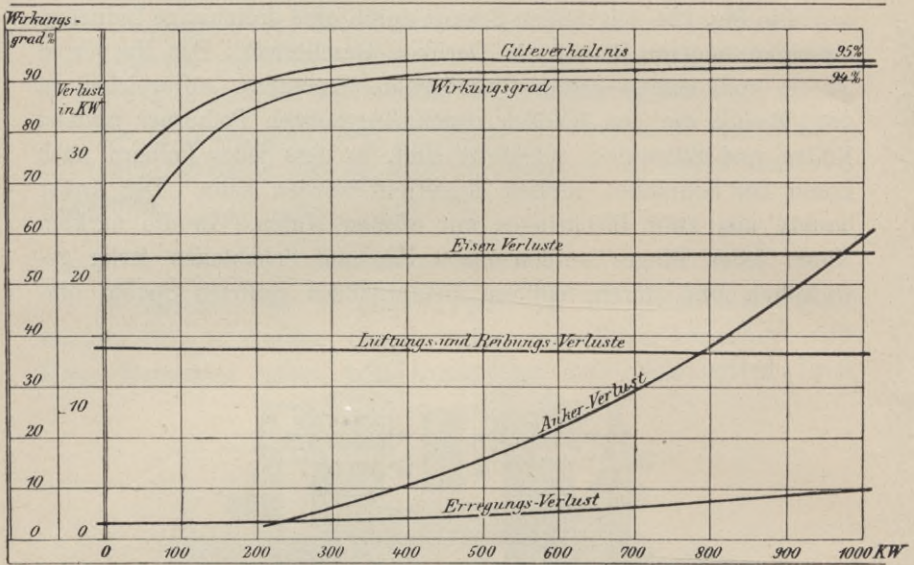


Fig. 125. Diagramm eines Drehstromerzeugers von 1000 KW.

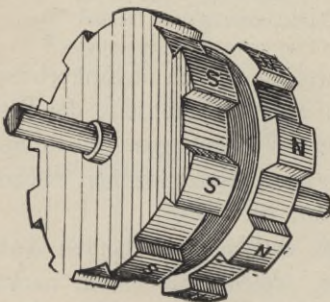


Fig. 126.
Typische Inductorform.

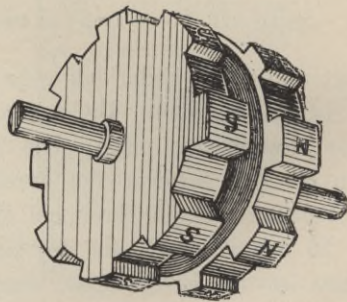


Fig. 127.
Inductor mit versetzten Polen.

Das Princip der Inductormaschinen ist noch leichter zu erklären an der Fig. 126, welche zeigt, wie ein Eisencylinder zu einem Elektromagneten gemacht werden kann durch eine in eine Rille seines Umfangs eingelegte Magnetisirungsspule. Die beiden Polkränze zu beiden

Seiten der Spule erhalten dann die gezeichnete Polarität. Solch ein Elektromagnet kann in Umdrehung versetzt werden, wenn auch die Magnetisirungsspule feststeht.

Der zu einem solchen Magnet passende Anker muss natürlich ein Doppelanker sein; die Spulen des einen Theiles werden von den N-Polen, die des anderen Theiles von den S-Polen inducirt. Eine einfache Ueberlegung zeigt uns, da die Inductionswirkungen der N- und S-Pole abwechselnd stattfinden müssen, dass die Spulen des

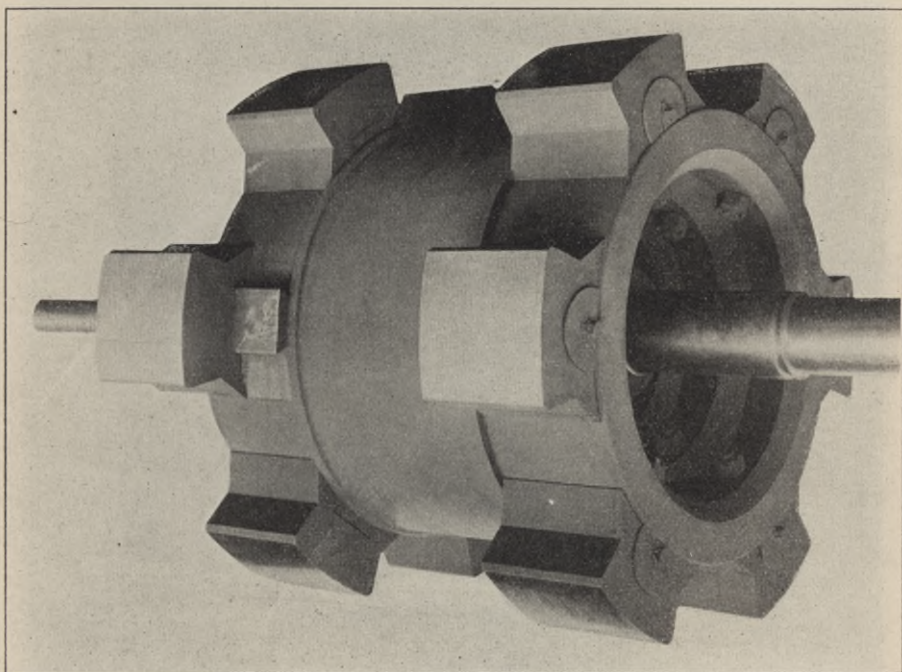


Fig. 128. Inductor von Oerlikon.

einen Ankers sich auch nicht in Linie mit denen des andern befinden dürfen, sondern dass die beiden Anker gegen einander versetzt sein müssen, und zwar um einen Betrag gleich dem halben Abstände eines N-Poles von dem nächsten. Die beiden so gegen einander versetzten Anker können dann mit einander parallel oder auch hinter einander geschaltet werden.

Sind indessen die Pole selbst gegen einander versetzt, wie in Fig. 127, so brauchen es die Spulen nicht zu sein, und in diesem Falle kann auch ein einziger Anker verwendet werden, der dann

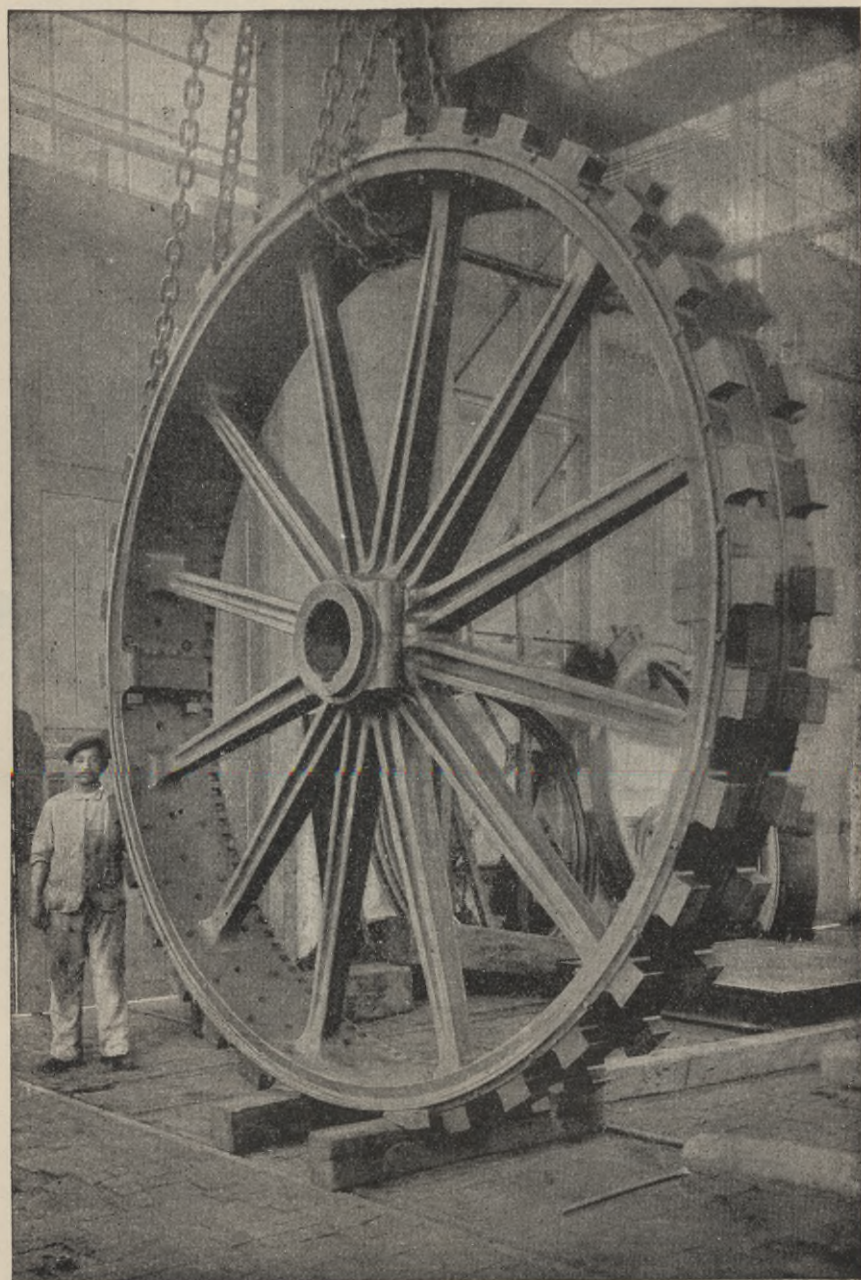


Fig. 129. Inductorrad einer langsam laufenden Drehstrommaschine.

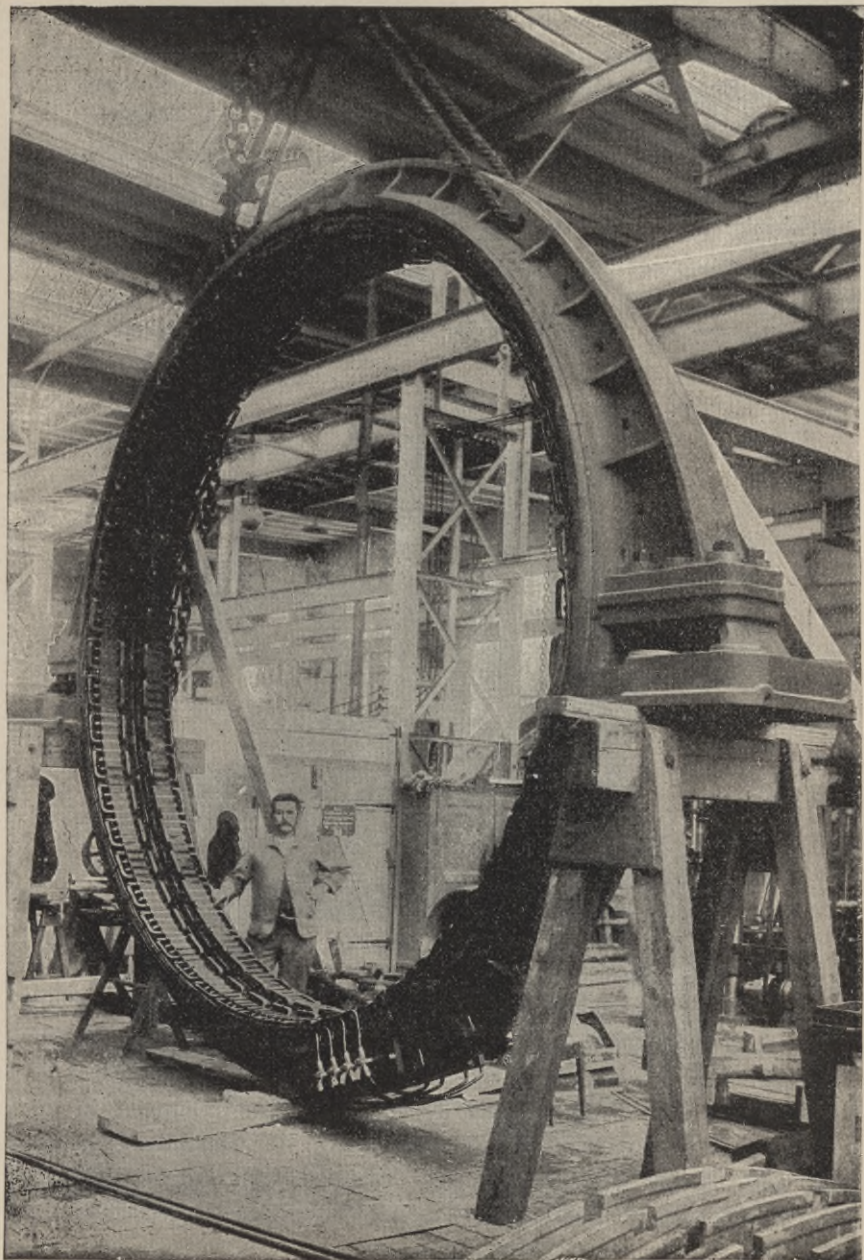


Fig. 130. Doppelanker einer langsam laufenden Inductormachine.

natürlich doppelte Breite besitzt. Versetzte Inductoren sind von Brown, Boveri & Co. z. B. für die Stromerzeuger der Strassenbahn in Lugano verwendet worden, ferner auch von Schwartzkopff in Berlin, Fynn in England und Ganz in Budapest. Nicht versetzte Pole werden von der Oerlikon-Gesellschaft und der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft Berlin bevorzugt. Auch die Firma Stanley & Kelly in Pittsfield, Massachusetts, baute schon früh zweiphasige Inductormaschinen mit nicht versetzten Polen.

Fig. 128 zeigt einen Inductor mit nicht versetzten Polen, welcher zu der in Fig. 124 dargestellten Drehstrommaschine von Oerlikon gehört; die Art der Befestigung der Pole ist deutlich zu erkennen.

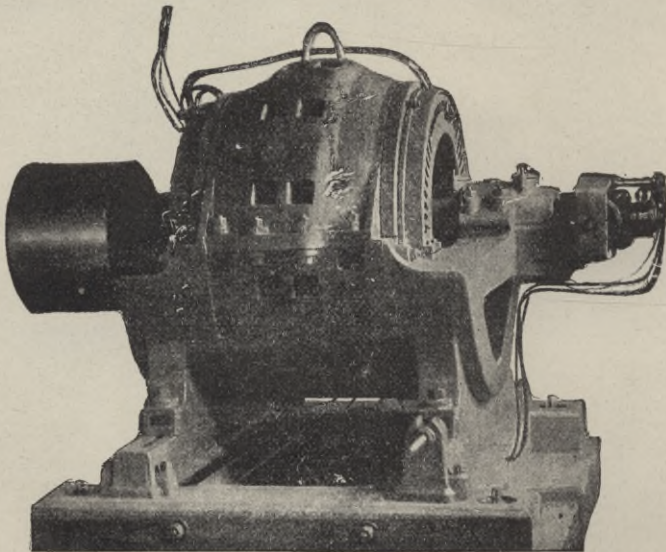


Fig. 131. Drehstrommaschine von Kolben & Co.

In den Figuren 129 und 130 ist das Inductorrad und der feststehende Doppelanker eines Drehstrom-Inductorgenerators mit sehr geringer Geschwindigkeit dargestellt. Er wurde von der Oerlikon-Gesellschaft gebaut und leistet 300 P bei 85 Umdrehungen in der Minute, die Frequenz beträgt 46 Perioden in der Secunde. Aus der Fig. 130 ist die Wickelungsart zu erkennen. Die nicht sichtbare Magnetisirungsspule befindet sich in dem ringförmigen Zwischenraum zwischen den beiden Ankerwickelungen.

Ein gutes Beispiel für diese Maschinengattung bietet die in Fig. 131 — 136 dargestellte Drehstrommaschine von Kolben & Co. in

Prag. Diese Maschine leistet bei 630 Umdrehungen in der Minute 37 KW (50 P), wobei die Periodenzahl 42 in der Secunde beträgt. Bei 750 Umdrehungen erfordert die Maschine 60 P und leistet 45 KW bei 50 Perioden. Bei voller Belastung beträgt die Strom-

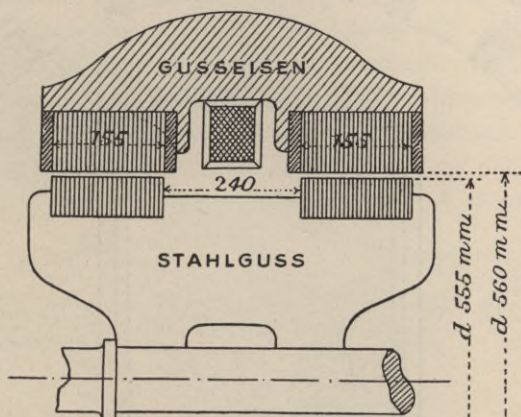


Fig. 132. Schnitt durch die Maschine Fig. 131.

stärke 115 Ampere in jeder Phase, die Spannung ist hierbei an den Klemmen 190 Volt, der Leistungsfactor $\cos \varphi$ ist = 0,85. Aus dem Schnitt (Fig. 132) ersieht man, dass der Inductor aus Stahlguss

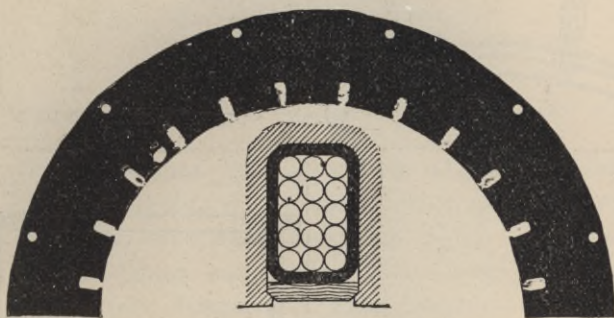


Fig. 133. Ankerkernscheibe und Anordnung der Drähte bei der Drehstrommaschine von Kolben & Co.

besteht und geblätterte Pole trägt, der äussere Durchmesser ist 555 mm. Der Luftzwischenraum zwischen dem feststehenden und dem rotirenden Theil beträgt nur 2,5 mm. Die Ankerkernscheiben haben 24 Schlitze. Da der Inductor in jeder der beiden Reihen 4 Pole trägt, kommen 6 Schlitze auf jeden Pol und jede Phase.

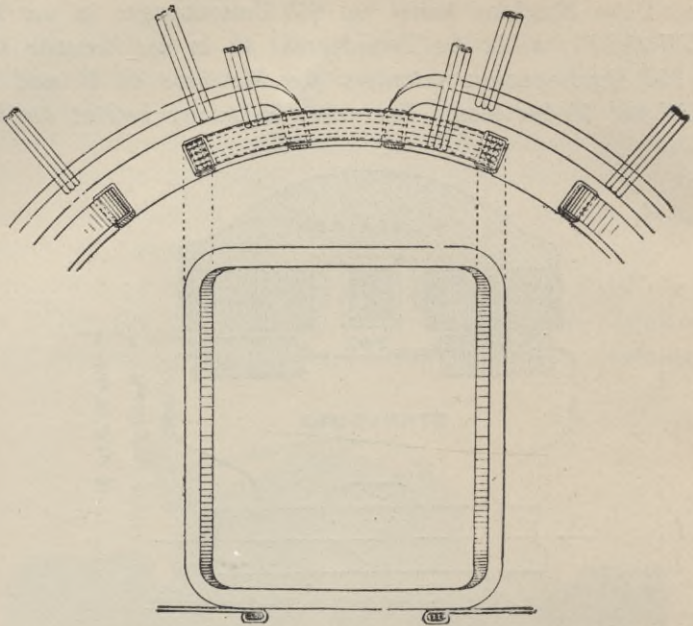


Fig. 134. Form einer Spule des äusseren Satzes.

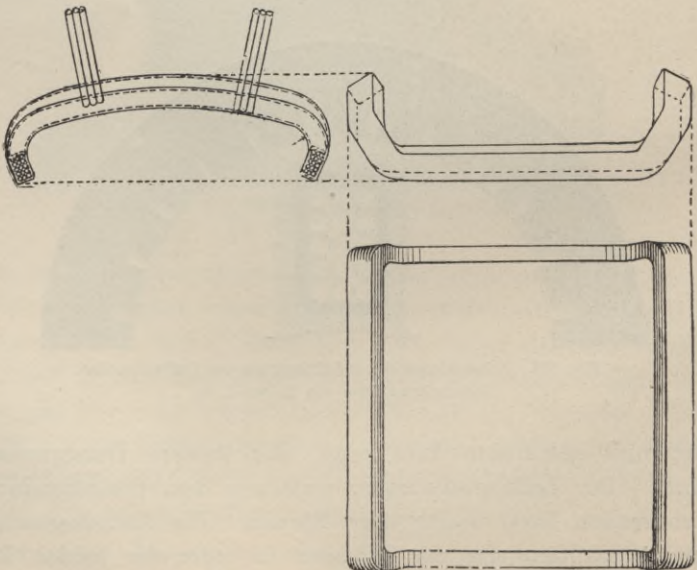


Fig. 135. Form einer Spule des inneren Satzes.

Der als Joch des magnetischen Kreises dienende äussere Rahmen ist aus Gusseisen. Die Lage der Magnetisirungsspule zwischen den beiden Ankern ist aus Fig. 132 zu ersehen, die Form der Kernscheiben und die Anordnung der Wickelungen aus Fig. 133. Die Letzteren sind auf Schablonen hergestellt und nacheinander in die Schlitzte des Kernes eingeschoben. Fig. 134 und 135 zeigen die Form der Spulen, die in zwei Sätzen, einem äusseren und inneren, angeordnet sind, so dass sie bequem in zwei Reihen hintereinander liegen. Fig. 136 zeigt das Wickelungsschema dieser Maschine. Es ist eine Sternschaltung mit dem gemeinsamen Punkte *J* und den drei äusseren Klemmen *A*, *B* und *C*. Wenn man die drei Wickelungen einzeln

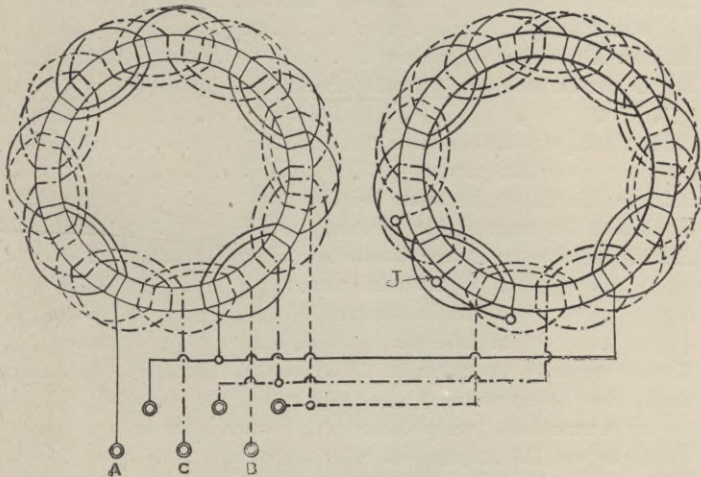


Fig. 136. Wickelungsschema der Drehstrommaschine von Kolben & Co.

verfolgt, sieht man, dass jede, obwohl im Allgemeinen dem Schema Fig. *O*, Tafel IV folgend, im Zickzack von *J* nach der zugehörigen Klemme geht, also eine Wellenwicklung bildet. Da jeder der aus drei parallelen Drähten bestehende Leiter fünfmal hin und zurück geführt ist, so liegen demnach in jedem Schlitz 15 Drähte. Wie das Schema Fig. 136 zeigt, sind die beiden Hälften der Wickelung gegen einander versetzt.

Die Hauptabmessungen dieser Maschine sind folgende:

Äusserer Durchmesser des Inductors	555 mm,
Innerer Durchmesser der Kernscheiben	560 "
Wirkliche Länge des Kernes parallel zur Achse	2 × 155 "
Dicke der Kernscheiben	0,45 "
Polstand	220 "

Abstand der einzelnen Spulen von einander	220 mm,
Breite der Polstücke (Bogenlänge)	172 "
Radiale Tiefe der Kernscheiben	78 "
Länge des magnetischen Kreises im Inductor	58 "
Querschnitt des magnetischen Kreises im Stahl des Inductors	1150 mm ² ,
Mittlerer Umfang der Magnetisirungsspule	2200 mm,
Innere Breite des Wickelungsraumes	7,5 "
Innere Tiefe des Wickelungsraumes	13 "
Zahl der Windungen der Magnetisirungsspule	450
Durchmesser des Drahtes der Magnetisirungsspule (nackt)	4,2 "
" " " " " " (isolirt)	4,7 "
Erregerstrom bei Leerlauf	19 Ampere,
" " voller Belastung wenn $\cos \varphi = 0,85$.	23 "
E.M.K. jeder Phase von J bis zur Klemme bei Leerlauf	110 Volt,
Zahl der hintereinander geschalteten Ankerwindungen in jeder Phase	40
Mittlere Länge der Ankerleiter	1020 mm,
Stärke der Ankerleiter (3 parallel) nackt (Durchmesser)	4 "
" " " " " " isolirt "	4,6 "
Widerstand jedes Ankerkreises (bei 15° C.)	0,0136 Ohm.
" der Erregerpule " " "	1,25 "
Zahl der Kraftlinien im Anker bei Leerlauf	$3,65 \times 10^6$
Koeffizient der magnetischen Streuung	1,25
Kraftliniendichte im Anker (Joch) bei voller Belastung	16100 auf d. cm ² ,
" " Luftzwischenraum " " "	13700 " " "
" in den Polstücken bei " " "	16300 " " "
" im Inductor " " "	15900 " " "
Kurzschlussstrom im Anker bei 19 Ampere Erregerstrom	550 Ampere,
Stärke des Erregerstromes, die erforderlich ist, damit der Kurzschlussstrom gleich ist der normalen Strom- stärke von 115 Ampere bei voller Belastung	3,9 "
Wirkungsgrad bei voller Belastung	88 %

Fig. 137 und 138 zeigen den Inductor eines Drehstromerzeugers der Allgemeinen Electricitätsgesellschaft in Berlin. Die Maschine leistet 300 KW bei 50 Perioden in der Secunde und 375 Umdrehungen in der Minute. Der Anker hat in jeder Hälfte 48 Schlitze, 6 für jeden Pol, bzw. 2 für jeden Pol und jede Phase. Die Fig. 139, 140 und 141 zeigen einen der grossen Drehstrom-Inductormaschinen, welche diese Firma nach Entwürfen der Oerlikon-Gesellschaft für die grosse Kraftstation in Rheinfeldern geliefert hat. Die Maschine ist mit senkrechter Drehachse für direkte Kupplung mit einer Turbine gebaut. Der umlaufende Theil besteht aus einem fünftheiligen Armkreuz aus Gusseisen, an dessen Umfang ein aus fünf Segmenten bestehender Kranz aus Stahlguss befestigt ist, dessen 55 Joche den Polen des Gehäuses gegenüberstehen und an ihren

Enden mit 110 paarweise übereinander angeordneten, aus dünnen Eisenblechen zusammengenieteten Packeten versehen sind. Die Befestigung der Packete geschieht durch schwalbenschwanzförmige schmiedeeiserne Leisten, welche an die Joche angeschraubt sind (Fig. 140).

Die Inductorwelle ist mittelst angeschweisster Flanschenkupplung an die senkrechte Turbinenwelle angeschlossen und wird von einem

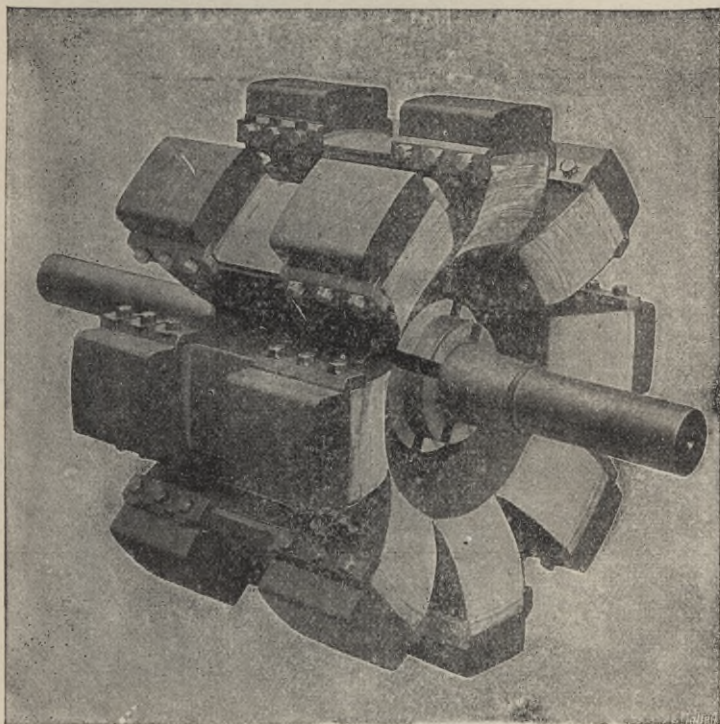


Fig. 137. Inductor der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

oberen und unteren Halslager geführt. Das Gesamtgewicht der umlaufenden Theile, 55 000 kg, wird von dem ringförmigen Flansch des unteren Lagers aufgenommen. Um die hierbei sich ergebende Reibungsarbeit — mehr als 100 P — zu ersparen, wird in eine zwischen beiden Flächen vorgesehene Ringnut Oel mit einem Druck von 25 Atmosphären gepresst, so dass die Flächen durch eine Oelschicht getrennt sind.

Das gusseiserne Gehäuse, mit einem äusseren Durchmesser von 6,840 m, besteht aus vier Bogenstücken, an die je zwei Füße

angegossen sind. Ausserdem ist das Gehäuse nochmals horizontal in eine untere und eine obere Hälfte geteilt zum Zweck des leichteren Transports sowohl als auch um die in der inneren Höhlung des C-förmigen Querschnittes untergebrachte, auf einem Bronceering aufgewickelte Erregerspule, deren mittlerer Durchmesser 6 m beträgt,

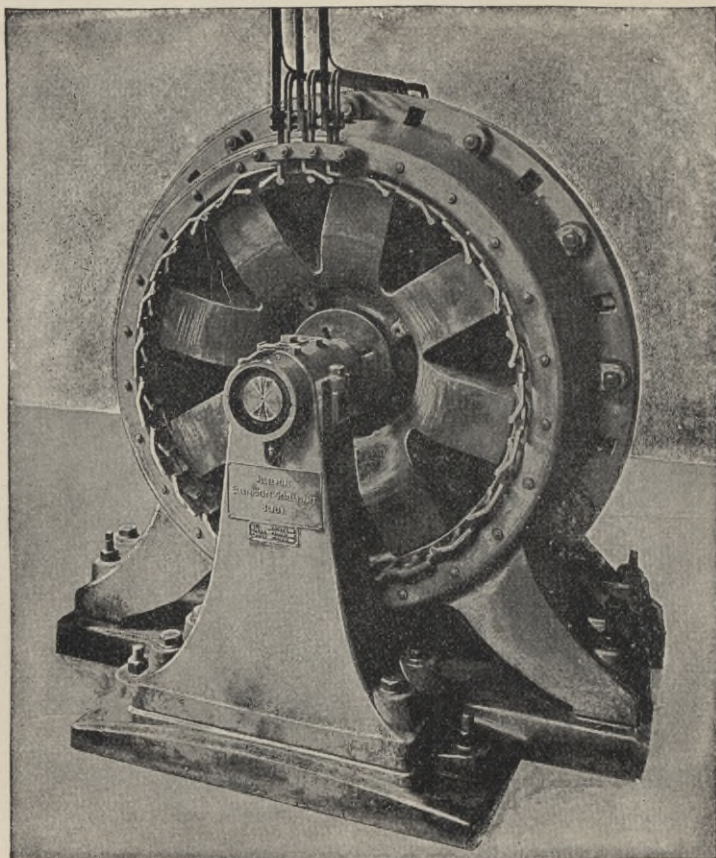


Fig. 138. Drehstrommaschine der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

leicht einbringen zu können. Die Ankerspulen, 165 für jeden Ring, werden auf die über die Flanschen des Gehäuses vorragenden Zacken der Ankerbleche in fertigem Zustande aufgeschoben. Auf jeden Pol entfallen sechs Schlitze. Das Schema der Wicklung (Sternschaltung) zeigt die Fig. 141. Die normale Leistung der Maschine beträgt 61,5 Ampere bei 3900 Volt für jede Phase (Spannung zum neutralen Punkt) also 720 KW.

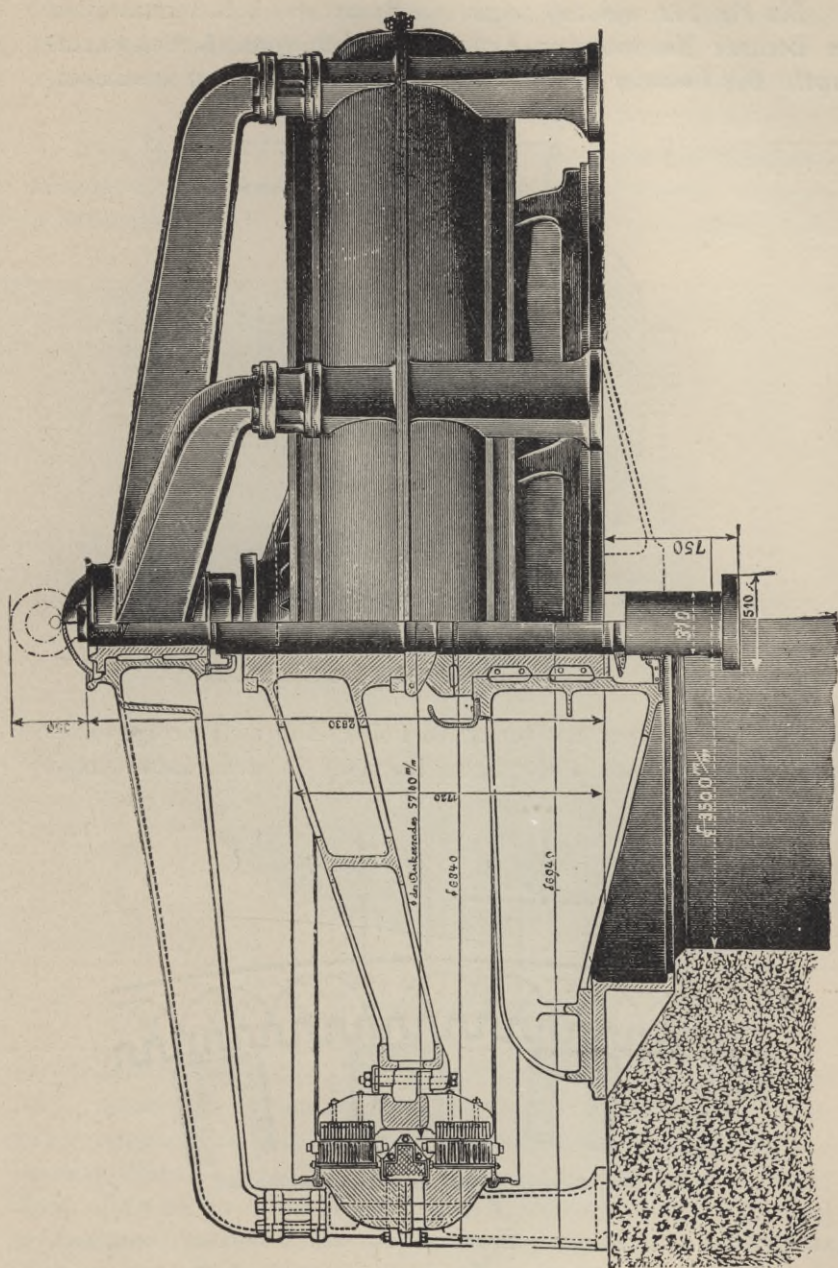


Fig. 189. Drehstrommaschine (Inductortypus) der Allgemeinen Elektrizitäts - Gesellschaft.

Die Fig. 142 und 143 zeigen die Bauart der Inductormaschinen der Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vorm. L. Schwartzkopff. Der Inductor ist ein zweitheiliger, durch Bolzen zusammen-

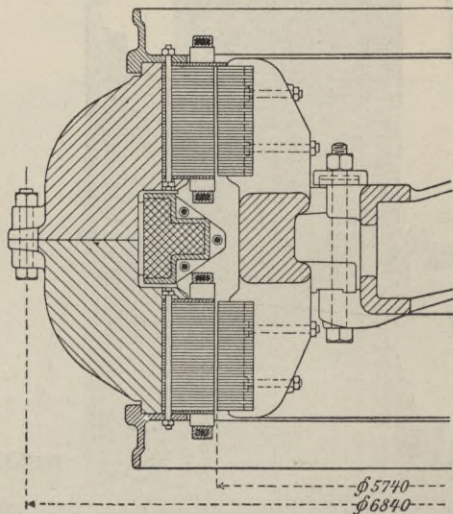


Fig. 140. Vergrößerter Schnitt durch die Maschine Fig. 139.

gehaltener Stahlkörper mit versetzten Polen. Die zwei Erregerspulen sind vermittelt eines \perp -förmigen Rahmens in dem feststehenden

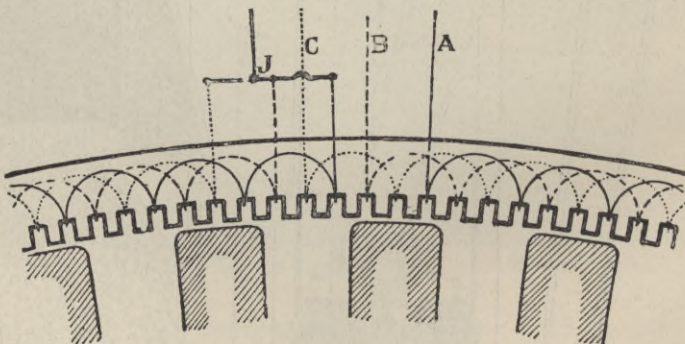


Fig. 141. Wickelungsschema der Drehmaschine Fig. 140.

Ankergehäuse aufgehängt. Letzteres ist aus Gusseisen, wagrecht getheilt und ist bei grösseren Maschinen so angeordnet, dass es gedreht werden kann, damit alle Theile der Ankerwicklung leicht zugänglich sind. Die Ankerspulen werden auf Schablonen gebogen

oder gewickelt, dann in die Nuten eingelegt und durch Keile aus isolirendem Material festgehalten.

Asynchrone Stromerzeuger.

Unabhängig von einander fanden gleichzeitig mehrere Forscher — darunter Brown und die Ingenieure der General Electric Company in Schenectady N. Y. — dass einphasige wie auch mehrphasige asyn-

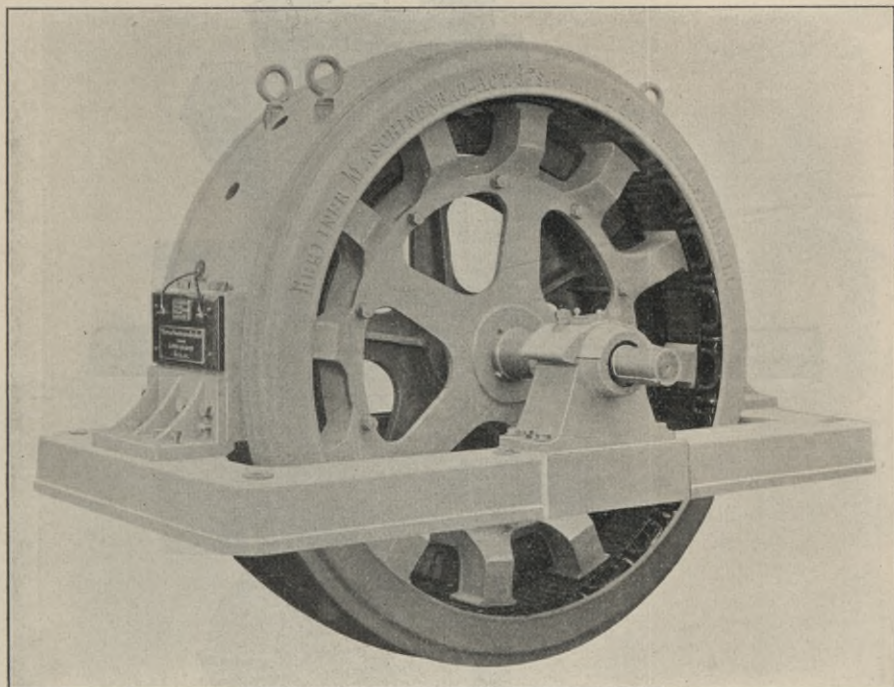


Fig. 142. Inductormaschine von Schwartzkopf.

chrone Inductionsmotoren als Stromerzeuger wirken, wenn sie mechanisch angetrieben werden und zwar mit einer etwas grösseren Umlaufgeschwindigkeit als dem Synchronismus entspricht (vergl. den Schluss des Kap. VIII und Fig. 226). Es ist aber nicht möglich, einen solchen Motor allein als Stromerzeuger für einen Stromkreis zu benutzen, denn er kann sich nicht selbst erregen, es muss zu diesem Zwecke Wechsel- oder Mehrphasenstrom den Klemmen von aussen zugeführt werden. Vielleicht wäre es ganz zweckmässig, bei Centralstationen mit plötzlich stark wechselnder Belastung einen oder mehrere asyn-

chrone Maschinen mit den übrigen Wechselstrommaschinen parallel zu schalten. Erstere würden dann gewöhnlich als unbelastete Motoren mit einer etwas geringeren Geschwindigkeit umlaufen als dem Synchronismus entspricht. Bei plötzlich ansteigender Belastung würde man nur die Geschwindigkeit der Antriebsmaschine etwas zu steigern brauchen (ohne auf das Eintreten des Synchronismus zu warten) und die Motoren würden als Stromerzeuger arbeiten, die Stromimpulse

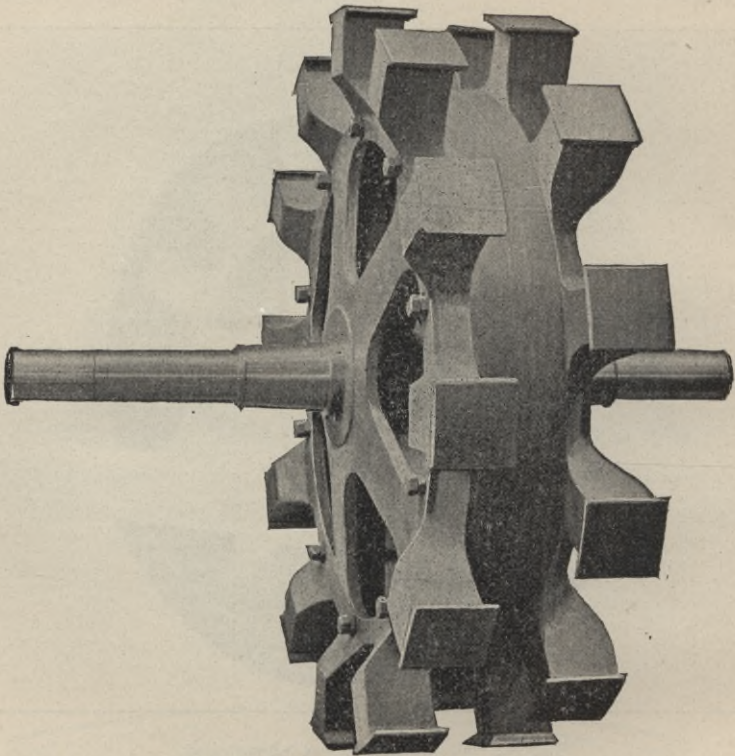


Fig. 143. Inductor der Maschine Fig. 142.

würden sich von selbst völlig in Uebereinstimmung mit denen des äusseren Stromkreises bringen, obwohl die Geschwindigkeit der Maschine nicht synchron ist.

In Schweden hat Danielson¹⁾ 1892 derartige Versuche angestellt, bei denen ein synchroner Drehstrommotor mit einem synchronen Drehstromerzeuger gekuppelt war. Der erstere wurde dann

1) Electrical World (N. Y.), Januar 1893, S. 44; ferner Electrical Review (London), Bd. 32, S. 169.

als Stromerzeuger angetrieben, während der letztere als Motor auf eine Bremse arbeitete. Es ergab sich bei diesen Versuchen, dass der asynchrone Motor nicht als Stromerzeuger dienen konnte, wenn der äussere Kreis nur aus Widerständen (Lampen) oder Widerständen mit Selbstinduction bestand.

Amerikanische Maschinen.

Die Westinghouse-Gesellschaft, die Eigenthümerin der Tesla'schen Patente, hat alle ihre Werkstätten in Pittsburg in sehr vollkommener Weise elektrisch mit Kraft versorgt und zwar unter Benutzung von

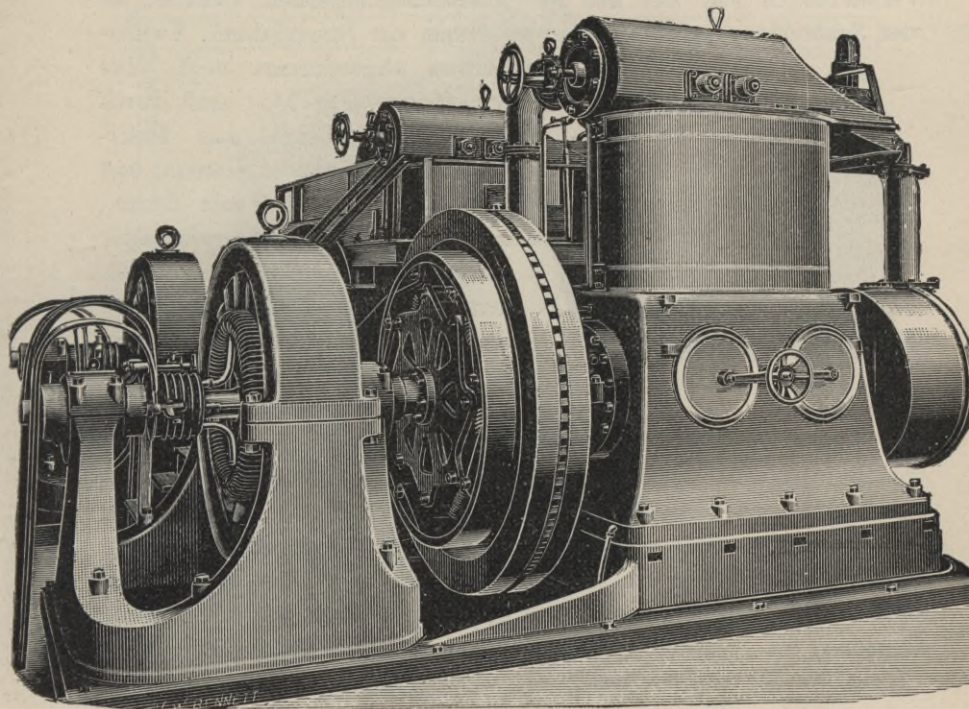


Fig. 144. 500 P Maschinensatz der Westinghouse-Gesellschaft.

Zweiphasenstrom. Die Fig. 144 zeigt eine der Krafteinheiten, bestehend aus einer 500pferdigen Dampfmaschine, direkt gekuppelt mit einer von der Gesellschaft gebauten Compoundmaschine. Die 14 Pole des Feldmagnets sind aus gestanzten und zusammengebolzten Stahlblättern aufgebaut und fest mit dem gusseisernen Joch verbunden. Die Erregerspulen liegen in einem einzigen Stromkreis, die Regelung geschieht durch einen rotirenden Umformer, welcher den gesammten

Erregerstrom liefert. Die Abmessungen der Maschine sind $2,4 \times 2,65$ m Grundfläche und 2,5 m Höhe. Der Anker ist aus geschlitzten Blechen zusammengebaut und auf einem Armkreuz befestigt. Für eine reichliche Luftkühlung während des Ganges ist gesorgt. Die Ankerstäbe werden in den 92 am Umfang angeordneten Schlitzten durch Streifen aus harter Isolationsmasse, welche in seitliche Ausbuchtungen der Schlitzte eingeschoben werden, festgehalten, so dass Bindedrähte überflüssig sind. Die Ankerwicklung ist wie bei den Gleichstrommaschinen eine Wellenwicklung ähnlich dem Schema Fig. L, Taf. III, nur mit dem Unterschied, dass sie in sich geschlossen ist und vier Verbindungen von vier um 90° auseinanderliegenden Punkten an vier Schleifringe geführt sind, von denen der Strom durch Kupferbürsten abgenommen wird. Die Schleifringe (Fig. 145) sind durch überstehende Ringe aus Isolirmaterial von einander getrennt und 38 mm breit bei 140 mm Durchmesser. Es sind vier Bürstenhalter vorhanden, je zwei für jede Phase, deren jeder zwei Bürsten trägt, zum Zweck einen dauernden Contact zu sichern. Diese Maschinen leisten bei 215 Umdrehungen in

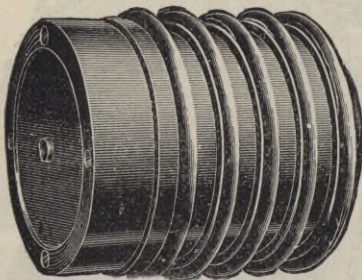


Fig. 145. Schleifringe.

der Minute 400 Ampere in jeder der beiden Phasen zu 240 Volt, die Periodenzahl ist 25 in der Secunde. Die Maschinen sind für gewöhnlich parallel geschaltet.

In der neueren Zeit hat die Gesellschaft für Mehrphasenmaschinen andere Typen hergestellt, darunter Ausführungen von bedeutender Grösse. Die bemerkenswerthesten darunter sind die für die Cataract Company am Niagara gelieferten zweiphasigen Maschinen. Diese Anlage ist die grösste unter den jetzt zahlreichen Kraftstationen, welche in den letzten Jahren in Amerika entstanden sind und mit Mehrphasenströmen arbeiten für Kraftübertragung auf weite Entfernungen wie zum Betrieb von nahegelegenen Fabriken und zur Beleuchtung.

Der allgemeine Entwurf der Niagara-Generatoren lehnt sich an die „Schirmgattung“ genannte Maschinenform an, welche von der Oerlikon-Gesellschaft schon vor Jahren, als Brown dort noch Oberingenieur war, gebaut wurde, weist aber das besondere von Forbes herrührende Merkmal auf, dass der umlaufende Feldmagnet ein

Der allgemeine Entwurf der Niagara-Generatoren lehnt sich an die „Schirmgattung“ genannte Maschinenform an, welche von der Oerlikon-Gesellschaft schon vor Jahren, als Brown dort noch Oberingenieur war, gebaut wurde, weist aber das besondere von Forbes herrührende Merkmal auf, dass der umlaufende Feldmagnet ein

äusserer den inneren festen Anker umgebender Stahlcylinder mit radial nach innen vortretenden Polen ist. Diese der gewöhnlichen entgegengesetzte Anordnung vereinigt grosse Festigkeit mit grosser Schwungwirkung, was bei Maschinen mit Turbinenantrieb sehr wesentlich ist. Sie hat noch den weiteren Vortheil gegenüber den Maschinen mit nach aussen vorspringenden umlaufenden Polen, dass die Centri-

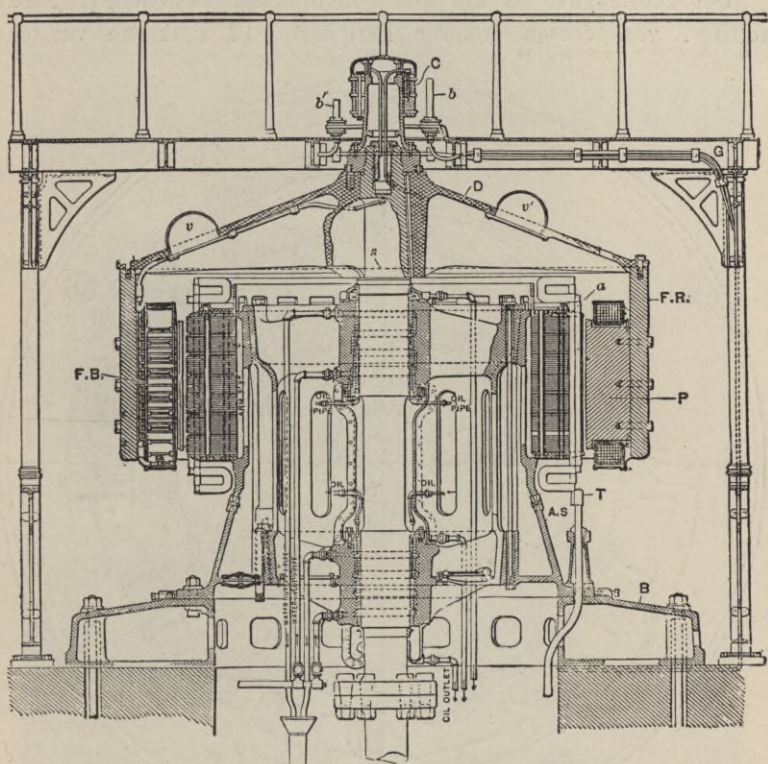
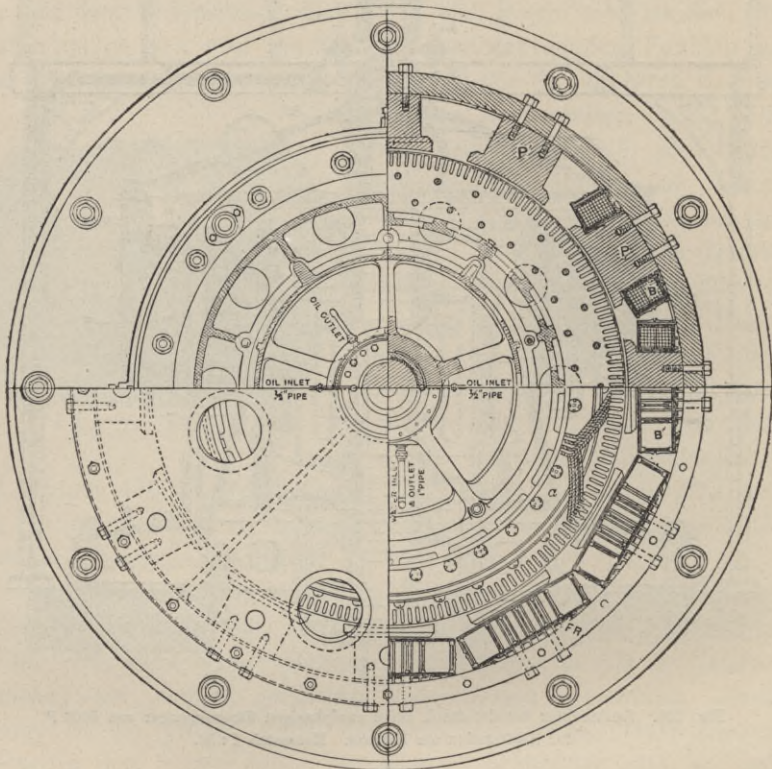


Fig. 146. Senkrechter Schnitt durch einen zweiphasigen Stromerzeuger von 5000 P der Kraftstation am Niagara. Maassstab 1 : 50.

fugalkräfte hier nicht auf Trennung der Polkerne und der Wicklung vom Sternrad wirken, auch durch die nach innen gerichteten magnetischen Zugkräfte ausgeglichen werden. Diese Anordnung wurde auch bei all den Abänderungen, denen der erste Entwurf noch bis zur endgiltigen Feststellung unterzogen wurde, beibehalten. Eine Wechselstrommaschine von solcher Leistung — 5000 P — war bis dahin noch nie gebaut worden. Aber alles, was Amerika und Europa an Intelligenz auf dem Gebiete der Technik besass, wurde zur Lösung

dieser Aufgabe herangezogen, deren Ergebniss alsdann in weitestem Maasse der kritischen Beurtheilung von Fachmännern übergeben und so schliesslich eine nach jeder Hinsicht befriedigende Maschine erzielt. Sechs solcher Maschinen von je 5000 P bildeten die erste Anlage. Die Figuren 146 und 147 stellen eine dieser Maschinen dar, Fig. 148 eine Ansicht der Centrale.

Der Feldmagnet ist ein aus einem Stück bestehender Nickelstahlring, von dessen innerer Peripherie 12 Polkerne vorstehen.



Quadrant links unten: Ansicht von oben, nachdem der Stromabgeber entfernt worden; rechts unten: dasselbe, nachdem der kegelförmige Träger entfernt worden; rechts oben: Schnitt durch Anker und Feldmagnet; links oben: Schnitt durch das Fussgestell.

Fig. 147. Grundriss des zweiphasigen Stromerzeugers von 5000 P der Kraftstation am Niagara.

Dieser Ring ist an einem schirmförmigen Gestell aufgehängt, das an dem Kopf der senkrechten Turbinenwelle befestigt ist. Die etwa 55 m lange Welle tritt durch ein bronzenes Lager, welches von fünf nach innen vortretenden Armen eines gusseisernen Lagerringes getragen wird. Dieser letztere, welcher den inneren feststehenden

Anker trägt, ist seinerseits an einem äusseren cylindrischen Mantel aus Gusseisen stellbar befestigt, der auf dem ringförmigen Fundament steht. Der Kern des Ankers ist aus dünnen schmiedeeisernen Blech-



Fig. 148. Ansicht der Niagara Kraftstation.

segmenten aufgebaut, wie aus Fig. 147 zu erkennen ist. Am Umfang sind 187 Schlitze angebracht, in denen je zwei Leiter untergebracht sind. Diese haben rechteckigen Querschnitt von $11,1 \times 33,3 \text{ mm}^2$, die Kanten sind leicht abgerundet. Als Isolationsmaterial ist mit

Rücksicht auf die hohe Spannung von 2000 Volt ausschliesslich Glimmer verwendet. Die zweiphasige Wickelung besteht aus zwei von einander unabhängigen, nicht in sich geschlossenen Wellenwickelungen, deren 374 Leiter gleichmässig über den Umfang vertheilt sind. Die Lager sind mit Wasserkühlung versehen.

Die wirkliche Spannung ist 2250 Volt bei 250 Umdrehungen in der Minute, die Stärke der beiden Ankerströme je 775 Ampere. Da 12 Pole vorhanden sind, ist bei dieser Geschwindigkeit die Periodenzahl 25 in der Secunde. Die Feldmagnetwicklung wird durch einen rotirenden Umformer mit Gleichstrom versehen, der durch zwei oben auf der Welle befestigte Schleifringe zugeführt wird.

Nachstehend sind einige Angaben über diese Maschinen zusammengestellt:

Leistung	3500 KW,
Umdrehungen in der Minute	250,
Stromstärke bei voller Belastung in jeder Phase	775 Ampere,
Spannung	2250 Volt,
Zahl der Perioden in einer Secunde	25,
Aeusserer Durchmesser des sich drehenden Feldes	3,53 m,
Aeusserer Durchmesser des feststehenden Ankers	2,62 „
Stärke des Luftzwischenraumes zwischen Beiden	2,5 cm,
Höhe über Fussboden	4,00 m,
Zahl der Schlitze	187,
Zahl der Segmente jeder Kernscheibe	11,
Zahl der Schlitze jedes Segmentes	17,
Radiale Tiefe jedes Segmentes	33,7 cm,
Querschnitt der Leiter (nackt)	$34,3 \times 1,1$ cm,
Tiefe der Schlitze	8 cm,
Breite der Schlitze	1,7 cm,
Peripheriegeschwindigkeit in der Secunde	45 m,
Zahl der Ventilationscanäle	6,
Weite der Ventilationscanäle	2,5 cm,
Temperaturerhöhung bei dauernder Vollbelastung	57° C.

Später wurde die Anlage noch durch vier ebenfalls von der Westinghouse-Gesellschaft gebaute Maschinen erweitert, die im Allgemeinen an Grösse und Bauart mit den zuerst gelieferten übereinstimmen, jedoch folgende Abweichungen aufweisen. Zunächst ist der Jochring etwas schwerer, woraus sich ein grösseres Trägheitsmoment, also ein grösserer Gleichförmigkeitsgrad ergibt. Die Feldpole sind mit hochkantig gebogenem Flachkupfer von 25 mm Breite und 3,2 mm Dicke bewickelt, das nur durch Schellack und Glimmer isolirt ist. Auf jedem Pol sind vier Lagen über einander angeordnet,

zwischen denen Luftcanäle offen gelassen sind, das Ganze ist in ein Gerippe aus Messingguss eingeschlossen. Alle Wickelungen sind hinter einander geschaltet; der Widerstand beträgt 1,5 Ohm, der Erregerstrom bei voller Belastung 80, bei Leerlauf 50 Ampere. Die gussstählernen Polkerne sind zur Verringerung des Widerstandes des Luftzwischenraumes mit ebenfalls gegossenen grösseren Vorsprüngen versehen, so dass etwa 70 % des Ankerumfanges von ihnen umfasst werden.

Die neuen Anker haben zwölf Ventilationscanäle von je 12,7 mm Weite. Der gusseiserne Ankerrahmen hat senkrechte Canäle, durch welche Kühlwasser geleitet wird. Die Kernscheiben sind 6,5 mm dick, sie werden von stärkeren Endplatten zusammen gehalten und haben 322 Schlitzte, demnach 13 und 14 Schlitzte für jede Phase und jeden Pol. Ihr äusserer Durchmesser beträgt 4,32 m. In jedem Schlitz liegt ein Leiter von $51 \times 5,6$ mm Querschnitt mit abgerundeten Ecken; die Isolation besteht aus mehreren Lagen von Glimmer. Der Luftzwischenraum beträgt nur 19 mm. Fig. 149 zeigt die Anordnung. Die Endverbindungen bilden zwei Lagen von Spiralen in der Weise, dass zwei nicht in sich geschlossene von einander völlig unabhängige Wellenwickelungen entstehen. Die Eisenverluste bei

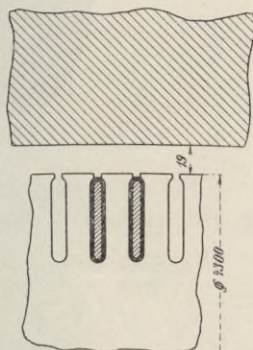


Fig. 149. Einzelheiten der neuen Niagaramaschinen.

der vollen Belastung von 3750 KW betragen 32,1 KW; der Kupferverlust im Anker 28,4 KW, in den Feldwickelungen 7,4 KW. Hieraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von über 98 % (abgesehen von Reibungsverlusten). Die Kraftliniendichte ist um etwa 15 % grösser als bei den älteren Maschinen, die Zahl der Leiter 322 gegenüber 374 bei den älteren. Die Stromdichte beträgt 3 Ampere auf das mm². Die Maschinen geben kurzgeschlossen bei voller Erregung ungefähr das Doppelte der Stromstärke bei voller Belastung, da die Ankergegenwirkung ziemlich hoch ist. Die Erwärmung steigt bei voller Belastung ungefähr fünf Stunden lang und erreicht bei einer Ueberlastung um 10 % ungefähr 47° C. über die Temperatur des Raumes. Weitere Angaben enthält die Electrical World vom 7. Januar 1899.

Die zweite grosse amerikanische Firma, die General Electric Company, baut verschiedene Muster von mehrphasigen Maschinen,¹⁾

1) Vergleiche die Abhandlungen in der Zeitschrift Electrical World, B. 27, S. 363 u. f. April 1896.

von denen einige nachstehend beschrieben und dargestellt sind. Fig. 150 zeigt den Anker einer Maschine, Type AP 14—150—514, d. h. einer Maschine mit vielen Zähnen auf jeden Pol, 14 Polen, 150 KW Leistung bei 514 Umdrehungen in der Minute. Bei der gezeichneten Maschine, einer Drehstrommaschine, sind sechs Zähne für

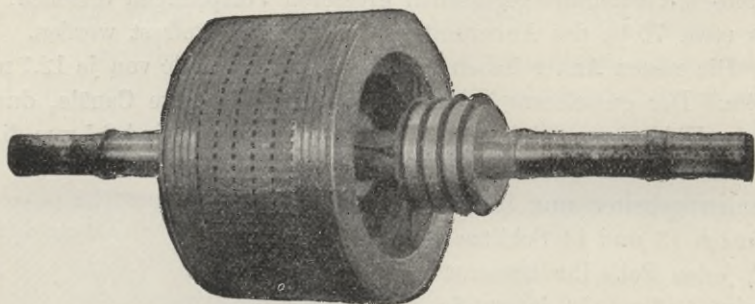


Fig. 150. Anker einer Drehstrommaschine der General Electric Company.

jeden Pol oder zwei Zähne für jeden Pol und jede Phase vorhanden. Die Bauart ist fast genau gleich der gewöhnlichen Schweizer Anordnung mit Trommelanker. Die Wicklungen werden durch Holzkeile in ihren Schlitten festgehalten und die spiraligen Endverbindungen durch Bindedrähte gesichert.

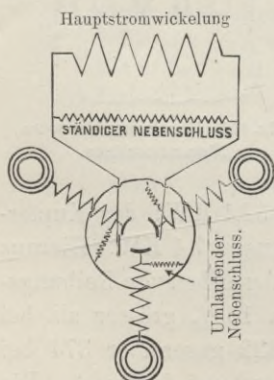


Fig. 151.

Schema eines compoundirten Drehstromgenerators.

Um diese Maschinen selbstregelnd zu machen, werden zuweilen die Stromkreise in der in Fig. 151 dargestellten Weise geschaltet. Bei der gewöhnlichen Sternschaltung werden die drei Phasen an einen gemeinsamen Punkt geführt, hier dagegen sind die drei inneren Enden an einen einfachen dreitheiligen Commutator angeschlossen, welcher eine Compoundwicklung des Feldmagnets mit Strom versorgt. Der Commutator steht durch drei

Widerstände im Nebenschluss zum Anker und dreht sich mit ihm. Ein weiterer Nebenschluss ist im äusseren Theile des Stromkreises angeordnet. Durch diese Einrichtung kann die Wirkung des Compoundirens der jeweiligen Belastung angepasst werden. In Fig. 152 ist ein Stromerzeuger von 300 KW Leistung dargestellt mit einem Anker ähnlich dem in Fig. 150. Es ist eine 12polige Maschine für Riemenantrieb und 600 Volt Klemmenspannung bei 400 Umdrehungen in der Minute. Die Höhe beträgt 2 m.

In den meisten Fällen wird die umgekehrte Anordnung, bei welcher also der Feldmagnet sich dreht und der Anker feststeht, vorgezogen. Fig. 153 zeigt die Feldspule einer solchen Maschine mit 48 Polen, deren Wickelung aus hochkantig gebogenem Flachkupfer hergestellt ist. Die Bauart der Anker ist im wesentlichen die gleiche wie in den Figuren 110 und 111. Wenn der Anker für

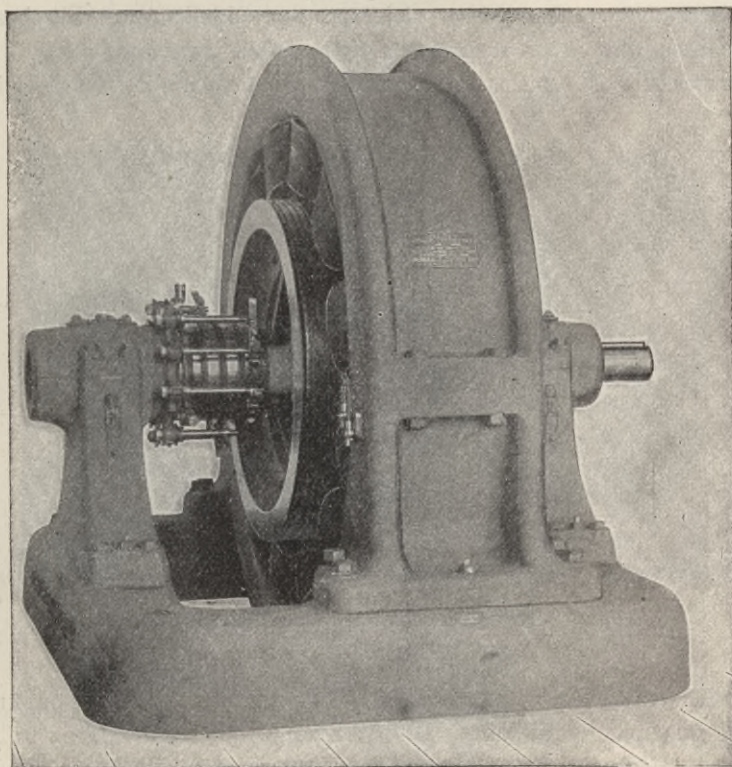


Fig. 152. 12poliger Stromerzeuger von 300 KW der General Electric Company.

hohe Spannungen bestimmt ist, werden die einzelnen Lagen der Kernbleche behufs Kühlung durch enge Luftspalten von 10—15 mm Weite von einander getrennt, in den Figuren 110 und 111 sieht man drei solcher Schlitze, durch welche die Blechscheiben in vier Gruppen geteilt werden.

Die General Electric Company hat das von Steinmetz herührende sogenannte „monocyklische“ System ausgebildet. Dieses

System sollte das alte Einphasen-Wechselstromsystem der Stromvertheilung ersetzen und den Vortheil bieten, dass Wechselstrommotoren, die bei voller Belastung anlaufen können, angeschlossen werden können, ohne dass die Gleichmässigkeit der angeschlossenen Lichtbetriebe gestört wird. Durch das Entgegenkommen der Electrical World sind wir in die Lage versetzt, eine kurze Beschreibung dieses Systems und einige zeichnerische Darstellungen zu geben. Die monocyclischen Stromerzeuger unterscheiden sich von den altbekannten Einphasenmaschinen nur dadurch, dass auf dem Anker zwischen den für die Ankerwicklung bestimmten Schlitzen noch eine zweite Reihe kleiner



Fig. 153. Foldmagnetspule aus hochkantig gebogenem Flachkupfer.

und flacher Schlitzte angeordnet ist, welche eine in Fig. 154 punktirte Hülfswicklung aufnimmt. Die Windungszahl dieser „Teazer“ genannten Hülfswicklung beträgt nur den vierten Theil der Hauptwindungen und liefert daher auch nur ein Viertel der elektromotorischen Kraft der Hauptwicklung. Sie ist mit dem einen Ende an einen dritten Collectoring, mit dem anderen Ende an die Mitte der Hauptwicklung angelegt, wie das schematisch die Fig. 155 andeutet. Es ist hiernach klar, dass der Strom der Hülfswicklung ausser Phase mit dem Hauptstrom ist. Da ferner der Strom der Hülfswicklung durch die eine oder die andere Hälfte der Hauptwicklung zurückgeht, ist eine ziemlich starke Selbstinduction die unvermeidliche Folge. Hierdurch wird in dem Hilfsstromkreis eine vergleichsweise hohe Impedanz hervorgerufen und die Strommenge begrenzt, indem die

Spannung in diesem Stromkreise herabgedrückt wird, wenn Strom entnommen wird, so dass die Leistung der Maschine im Wesentlichen

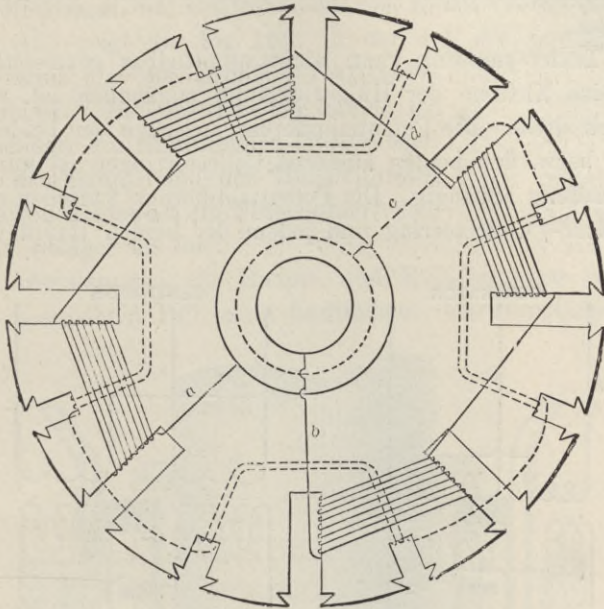


Fig. 154. Monozyclischer Anker.

nur von dem Strom der Hauptwicklung herrührt, gerade wie bei dem alten Einphasensystem. Mit anderen Worten, der Strom der

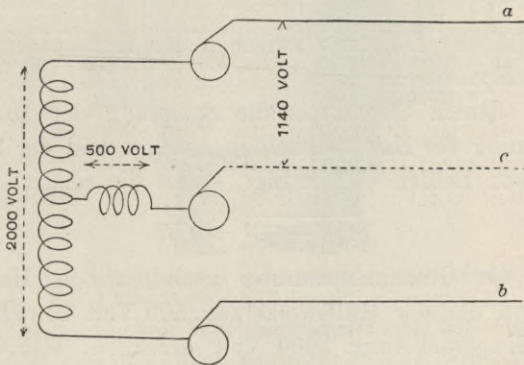


Fig. 155.

Hülfswicklung ist fast gänzlich ein arbeitsloser Strom, der geeignet ist, Motoren, welche an eine mit der Hülfswicklung in Verbindung

stehende Leitung durch einen dritten Draht angeschlossen sind, zum Anlaufen zu bringen ohne in Wirklichkeit etwas zu der treibenden Kraft beizutragen, wenn der Motor seine normale Geschwindigkeit erreicht hat.

Die Teazerspannung kann nicht unmittelbar gemessen werden, da nur eine Klemme der Hülfswicklung zugänglich ist, wenn der Anker sich dreht. Die Potentialdifferenz zwischen den beiden Hauptleitungen bzw. den beiden äusseren Collectorringen ist nur von der Hauptwicklung abhängig. Die Potentialdifferenz zwischen dem mittleren (Teazer-) Collectorring und jedem der beiden Haupt-Collector-

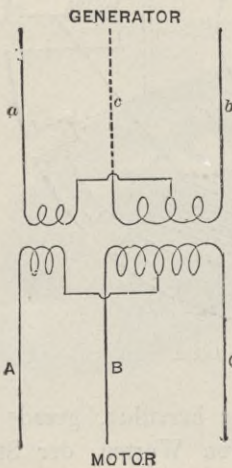


Fig. 156.

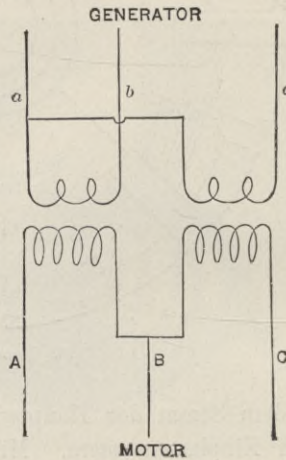


Fig. 157.

ringe ist gleich der Differenz zwischen der Hilfsspannung und der halben Aussenspannung.

Da bei offenem Stromkreis die Spannung der Hülfswicklung $\frac{1}{4}$ der Spannung der Hauptwicklung beträgt, und der Phasenunterschied zwischen Beiden 90° beträgt, so ist die relative Spannung

$$\sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} = 0,57$$

oder, wenn die Gesamtspannung zwischen den Hauptleitungen 2000 Volt und die der Hülfswicklung 500 Volt beträgt, wird jede Hälfte der Hauptwicklung 1000 Volt erzeugen, während die gemessene Potentialdifferenz zwischen jeder Hauptleitung und der Hilfsleitung ungefähr 1140 Volt beträgt.

Zum Betriebe von Induktionsmotoren wird die Primärspannung entweder durch zwei gleich grosse Transformatoren umgewandelt, wie

in Fig. 157 dargestellt, oder es wird ein grosser Transformator benutzt, der mit einem kleinen Teazertransformator verbunden ist, Fig. 156.

Das Diagramm der elektromotorischen Kräfte bei der Anordnung nach Fig. 155 zeigt die Fig. 158, in der ab die primäre Hauptspannung und cd die primäre Teazerspannung bedeutet. Die gestrichelten Linien ac und bc stellen die resultirenden Spannungen zwischen den Haupt- und den Hilfsleitungen dar, zwischen Beiden ist ein Phasenunterschied von etwas weniger als 60° .

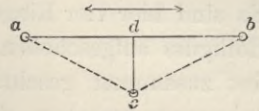


Fig. 158.

Die Abmessungen der Haupt- und Hilfsleitungen lassen sich für jeden besonderen Fall leicht bestimmen. Die Hauptleiter werden

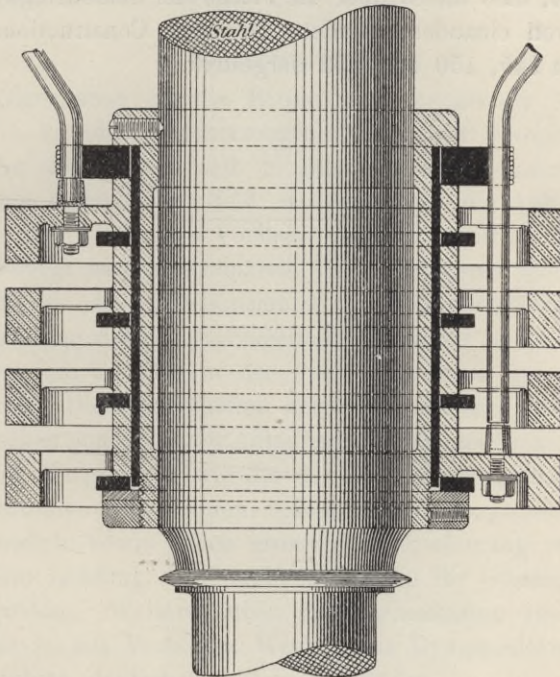


Fig. 159. Bauart der Schleifringe einer zweiphasigen Wechselstrommaschine.

wie für ein gewöhnliches Wechselstromsystem berechnet und dann das Verhältniss zwischen dem Querschnitt der Hülswicklung und dem der Hauptwicklung gleich gemacht dem Verhältniss zwischen der Belastung durch Motoren und der Gesamtbelastung durch Motoren und Lampen. Beim Entwerfen solcher Maschinen muss daher

das Verhältniss zwischen Motor- und Lampenbelastung des betreffenden Netzes annähernd bekannt sein.

Die Befestigung der Schleifringe auf den Wellen von Wechselstrommaschinen und deren Verbindung unter einander muss sehr sorgfältig hergestellt werden. In Fig. 159 ist eine von der Firma Alioth & Co. in Basel herrührende gute Befestigungsart dargestellt. Es sind hier vier Ringe über eine auf der Welle befestigte Hülse aus Rothguss aufgeschoben und unter Zwischenlegung von Isolirmaterial fest zusammen geschraubt. Jeder Ring ist mit passenden Durchbohrungen versehen, durch welche die einzelnen isolirten Zuleitungen zu den betreffenden Ringen geführt sind. Im vorliegenden Falle stehen die einzelnen Ringe frei, der Raum zwischen ihnen ist frei geblieben. Andere Firmen füllen ihn in der Weise mit isolirendem Material aus, dass dieses über die Fläche der Schleifringé hinausragt und diese von einander scheidet. Derartige Constructionen sind in den Figuren 145, 150 und 152 dargestellt.

Kapitel VI.

Bau der mehrphasigen Motoren.

Die mehrphasigen Motoren können in synchrone und asynchrone Motoren unterschieden werden.

I. Synchrone Motoren.

Im Allgemeinen ist die Bauart der synchronen Motoren die gleiche wie die der Stromerzeuger, sie haben besonders erregte Magnetfelder und drehen sich in genauem Synchronismus mit dem magnetischen umlaufenden Feld, welches durch die Ankerströme erzeugt wird. Sie bieten den Vortheil, dass sie, wenn ihr Magnetismus besonders erregt ist, im Stromkreis einen geringeren Spannungsabfall hervorrufen, als die Inductionsmotoren. Wenn sie übererregt sind, gleicht ihre Gegenwirkung die Selbstinduction mehr als aus und bewirkt ein Voreilen des Stromes in der Phase gegenüber der elektromotorischen Kraft. Die Eigenschaften der mehrphasigen Synchronmotoren sind, abgesehen vom besseren Anlaufen und der gleichmässigeren Zugkraft, genau die gleichen wie die der als Motoren gebrauchten Einphasen-Wechselstrommaschinen: indessen geben sie, gleiche Grösse und gleiches Gewicht sowie gleich grosse Ankererwärmung vorausgesetzt, eine grössere Leistung. Mit anderen Worten ihr Gesamtwirkungsgrad ist grösser. Weiteres über die Eigenschaften von Synchronmotoren ist in des Verfassers Werke: Die Dynamoelektrischen Maschinen, sechste (deutsche) Auflage, zu finden.

Einiges möge noch an dieser Stelle über ihre allgemeine Bauart Erwähnung finden. Da diese Maschinen nichts anderes sind als Wechselstromerzeuger, die in umgekehrtem Sinne als Motoren verwendet werden, so trifft alles, was über die Arten der Ankerwicklung dieser Maschinen gesagt ist, auch auf die Ankerwicklung dieser Motoren zu, gleichgültig, ob sie für Zwei- oder Mehrphasenbetrieb

bestimmt sind. Man betrachte z. B. den in Fig. 160 dargestellten Anker und vergleiche ihn mit den Figuren 91, *P* (Tafel III) und Tafel XI. Man erkennt, dass es ein Anker mit 48 Löchern ist, dessen Wickelung in zwei Sätzen oder Reihen angeordnet ist, deren

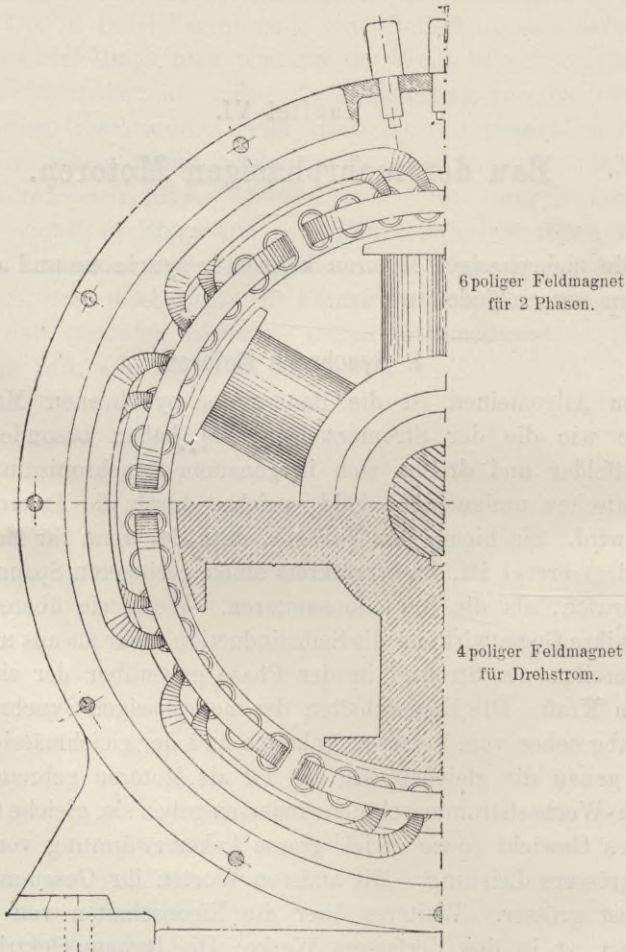


Fig. 160. Synchronmotor.

jede sechs Gruppen umfasst, jede Gruppe besteht aus einer inneren vier zwischenliegende Löcher umspannende Spule und einer äusseren, welche sechs zwischenliegende Löcher umgreift, wie die Wickelung in den Figuren *D* (Tafel III) und *P* (Tafel IV). Wenn dieser Anker für einen Zweiphasenmotor verwendet werden soll, so muss, da 12 Spulen (jede doppelt) vorhanden sind, der Feldmagnet sechspolig

sein, wie im oberen Theil der Figur gezeichnet ist, dann entfallen 2 Spulen auf jeden Pol. Soll der Anker für einen Dreiphasenmotor benutzt werden, so müssen 3 Spulen auf jeden Pol entfallen, also der Feldmagnet vierpolig sein, wie im unteren Theil der Figur dargestellt ist.

Es giebt eine Methode, Synchronmotoren selbstanlaufend zu machen, wenn man nämlich den umlaufenden Feldmagnet mit einem sog. Dämpfer versieht, einem System von kurzgeschlossenen Leitern, die in den Polschuhen eingebettet sind, wie das die Figuren 340/341 bei einem ursprünglich von Hutin und Leblanc entworfenen Stromerzeuger zeigt.

II. Asynchrone Motoren.

Die asynchronen Motoren, oftmals auch Inductionsmotoren genannt, sind eine sowohl in der Bauart als auch in der Wirkungsweise besondere Form. Sie haben im Allgemeinen einen äusseren festen Theil, der dem Anker eines Stromerzeugers oder dem Anker eines der oben beschriebenen Synchronmotoren ähnelt. Er empfängt die Mehrphasenströme von der Leitung und ist demnach in Wirklichkeit der Anker des Motors. In diesem festen Theil dreht sich ein Theil, der die Stelle des Feldmagnets einnimmt, jedoch nur durch Induction seitens des umgebenden Ankers magnetisirt wird: daher die Bezeichnung Inductionsmotor. Dieser innere Theil dreht sich stets mit einer Geschwindigkeit, die geringer ist als dem Synchronismus entspricht, aber im Allgemeinen nur um wenige Procente unterhalb des Synchronismus bleibt. Wenn dieser Theil aus irgend einem Grunde sich mit einer dem wirklichen Synchronismus entsprechenden Geschwindigkeit drehte, würde er keinerlei inductiven Antrieb seitens des Ankers mehr erfahren, und würde nicht im Stande sein, ein Drehmoment auszuüben. Das Maass, um welches die Drehungsgeschwindigkeit hinter dem Synchronismus zurückbleibt, nennt man den Schlipf; je grösser — innerhalb einer bestimmten Grenze — der Schlipf ist, desto grösser ist die Zugkraft, oder umgekehrt, je grösser die Belastung eines solchen Motors ist (bis zu einer bestimmten Grenze), um so grösser ist die Leistung des Motors.

Wir wollen nun näher prüfen, wie diese Wirkung bei Verwendung von mehrphasigen Strömen entsteht.

Nehmen wir eine besonders erregte Dynamomaschine, schliessen den Anker kurz und versuchen, diesen im magnetischen Felde zu drehen, so werden wir finden, dass bei der Drehung des Ankers

Widerstand zu überwinden ist. Dies kommt daher, weil bei einer Bewegung des Ankers relativ zum Feldmagnet die kurzgeschlossenen Ankerleiter die Kraftlinien schneiden und in ihnen Ströme erzeugt werden, welche durch ihre magnetische Gegenwirkung der Bewegung widerstreben. Wenn wir den Feldmagnet drehen, so würde der Anker sich gleichfalls drehen und die anfängliche Lage zum Anker wiederzugewinnen und beizubehalten das Bestreben haben. Dasselbe würde eintreten, wenn wir das magnetische Feld drehen könnten, ohne das Eisen des Feldmagnets zu bewegen; die die Ankerleiter schneidenden Kraftlinien würden in diesen Ströme erzeugen, welche auf den Anker ein gerade so grosses Drehmoment ausüben würden, als erforderlich wäre, den Anker mit der gleichen Geschwindigkeit in einem feststehenden magnetischen Felde zu drehen.

Wie wir im III. Kapitel sahen, geben uns nun mehrphasige Ströme ein sehr bequemes Mittel, ein Drehfeld hervorzubringen, ohne dass die den Strom führenden Wicklungen sich bewegen; sie ermöglichen uns also einen Motor in Drehung zu versetzen, dessen drehbarer Theil aus einem einfachen kurzgeschlossenen Anker ohne irgend welche Bürsten und Schleifringe besteht. Da die Ströme Wechselströme sind, so ergibt sich daraus noch die fernere Möglichkeit, in einfachster Weise von hoher Spannung zu niedriger überzugehen, und umgekehrt, und bietet die Uebertragung von Kraft auf grössere Entfernungen geringere Schwierigkeit als bei Anwendung von Gleichstrom. Hauptsächlich wegen dieses Vortheils sind die Mehrphasenmaschinen so sehr in Aufnahme gekommen.

Der Mehrphasenmotor besteht demnach im Wesentlichen aus zwei Theilen: erstens aus dem Theil, dessen Wicklung die Ströme vom Stromerzeuger aufnimmt, und Magnetpole erzeugt, die sich in Bezug auf die Wicklung drehen; und zweitens aus einem Theile, der die von den umlaufenden Polen vorwärts geschobenen Leiter trägt. Der erstere Theil steht gewöhnlich fest, wir nennen ihn den Ständer oder den primären Theil, den zweiten nennen wir den Läufer oder secundären Theil. Es kann natürlich auch ein Motor so gebaut werden, daß sich sein primärer Theil dreht und sein secundärer Theil feststeht, aber diese Anordnung erfordert dann Bürsten und Schleifringe, durch welche die Energie dem rotirenden Theil zugeführt wird und setzt die Wicklung und die Isolation der Wirkung der Centrifugalkraft aus. Aus diesem Grunde hat diese Anordnung neuerdings auch nur in besonderen Fällen Anwendung gefunden, obwohl sie den Vortheil bietet, dass der primäre Theil etwas

weniger Material erfordert und etwas geringere magnetische Streuung aufweist.

In Maschinen mit feststehendem primären Theil dreht sich das Feld mit grosser Geschwindigkeit und der drehbare Theil folgt nach, bis er vollständig oder nahezu synchron mit dem Felde läuft; der Magnetismus, der im drehbaren Theile inducirt wird, zeigt das Bestreben, eine in Bezug auf die sich drehende Metallmasse feste Richtung beizubehalten.

In Motoren der anderen Art, mit drehbarem primären Theil, ist der letztere selbst bestrebt, entgegengesetzt zur Richtung des magnetischen Feldes, das er selbst erzeugt, umzulaufen; demnach sucht er in der feststehenden Masse des secundären Theiles Magnetismus einer bestimmten Richtung zu erzeugen. Indessen nur in dem Falle, dass der Synchronismus wirklich erreicht wird, nimmt der Magnetismus in dem secundären Theile eine unveränderliche Richtung gegen die der Induction unterworfenen Masse an.

In allen anderen Fällen dreht sich der Magnetismus langsam gegen die Masse des secundären Theiles, und zwar mit einer Geschwindigkeit gleich der Differenz zwischen den Geschwindigkeiten des Feldes und der wirklichen Bewegung des drehbaren Theiles.

Läufer und Ständer.

Diese Betrachtungen legen die Frage nahe, welcher von beiden Theilen, der inducirende oder der der Induction unterworfenen, in Wahrheit ein Anker oder ein Feldmagnet genannt werden kann. In gewöhnlichen Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen wird, wie wir wissen, diese Frage nicht nach dem zufälligen Umstande beantwortet, ob der Theil sich dreht oder still steht, sondern das Kennzeichen ist, ob der Magnetismus in Bezug auf die Metallmasse eine unveränderliche oder eine veränderliche Richtung besitzt.

Im Feldmagnet jeder Dynamomaschine, jedes Motors und jeder Wechselstrommaschine liegt die Richtung des Magnetismus in Bezug auf den Eisenkern fest.

Im Anker jeder Dynamomaschine, jedes Motors und jeder Wechselstrommaschine wechselt der Magnetismus seine Richtung gegen die Metallmasse fortwährend.

Ausserdem ist beim Motor der Anker derjenige Theil, der den aus der Leitung kommenden Strom aufnimmt.

Daher dürfen wir den primären Theil des mehrphasigen Motors, der den Strom empfängt, als dem Anker entsprechend ansehen,

während der andere Theil, in dem der Magnetismus nahezu eine feste Richtung gegen die Metallmassen hat, dem Feldmagnet entspricht; es ist in der That ein Feldmagnet, der nicht durch irgend welche besondere Ströme oder durch einen gleichgerichteten Theil des Hauptstromes erregt wird, sondern dessen Magnetismus von den in ihm selbst inducirten Wirbelströmen herrührt.

Da es nun im Betriebe gebräuchlich ist, den drehbaren Theil Anker zu nennen, so findet man regelmässig den umlaufenden Theil des mehrphasigen Motors als Anker beschrieben. Dennoch ist in Wirklichkeit in fast allen mehrphasigen Motoren — vergl. z. B. Fig. 235—237 und 242 — der Anker derjenige Theil, der still steht und den drehbaren Theil umgiebt.

Um nun in dieser Beziehung alle Verwechslungen zu vermeiden, wollen wir allgemein bei der Beschreibung der mehrphasigen Motoren die Benennungen Anker und Feldmagnet nicht gebrauchen, sondern den drehbaren Theil Läufer und den feststehenden Theil Ständer nennen.

Sowohl der Ständer wie der Läufer werden gewöhnlich aus weichen Eisenblechscheiben aufgebaut, die zur Aufnahme der Wickelung durchbohrt sind.

Die Figuren 161 u. 162 zeigen die gestanzten Scheiben eines vierpoligen Zweiphasenmotors zu 6 P. Man sieht, dass die Löcher ganz nahe an dem äusseren Umfang des Läufers und dem inneren Rand des Ständers angebracht sind, so dass nach der Bearbeitung nicht mehr als ein dünner Span Eisen bleibt, durch den magnetische Streuung stattfinden kann. Andere Formen zeigen Fig. 220 und Tafel XIII. Fig. 161 ist ein Schnitt durch den Motor parallel zur Achse, welcher den Aufbau der Kernscheiben zeigt. Der Läufer endigt auf jeder Seite mit einer kräftigen Metallplatte. Die Abbildung zeigt, dass die Kupferstäbe in Papierhülsen gesteckt und an ihren Enden durch breite Kupferbänder kurzgeschlossen werden, welche eine grosse kühlende Oberfläche darbieten. Tafel XIII zeigt die Ständer- und Läuferbleche eines Motors neuerer Bauart der Firma Kolben & Co.

Soviel wäre über die Bauart der Eisentheile von Läufer und Ständer gemeinsam zu sagen; wir wollen diese beiden Theile jetzt jeden für sich und in grösserer Ausführlichkeit betrachten.

Bau des Ständers.

Die wichtigste Aufgabe des Ständers ist die, ein Magnetfeld zu erzeugen, dessen Kraftlinien von der inneren cylindrischen Oberfläche

in radialer Richtung austreten und, nachdem sie einen Theil des Läufers durchsetzt haben, wieder radial in den Ständer eintreten,

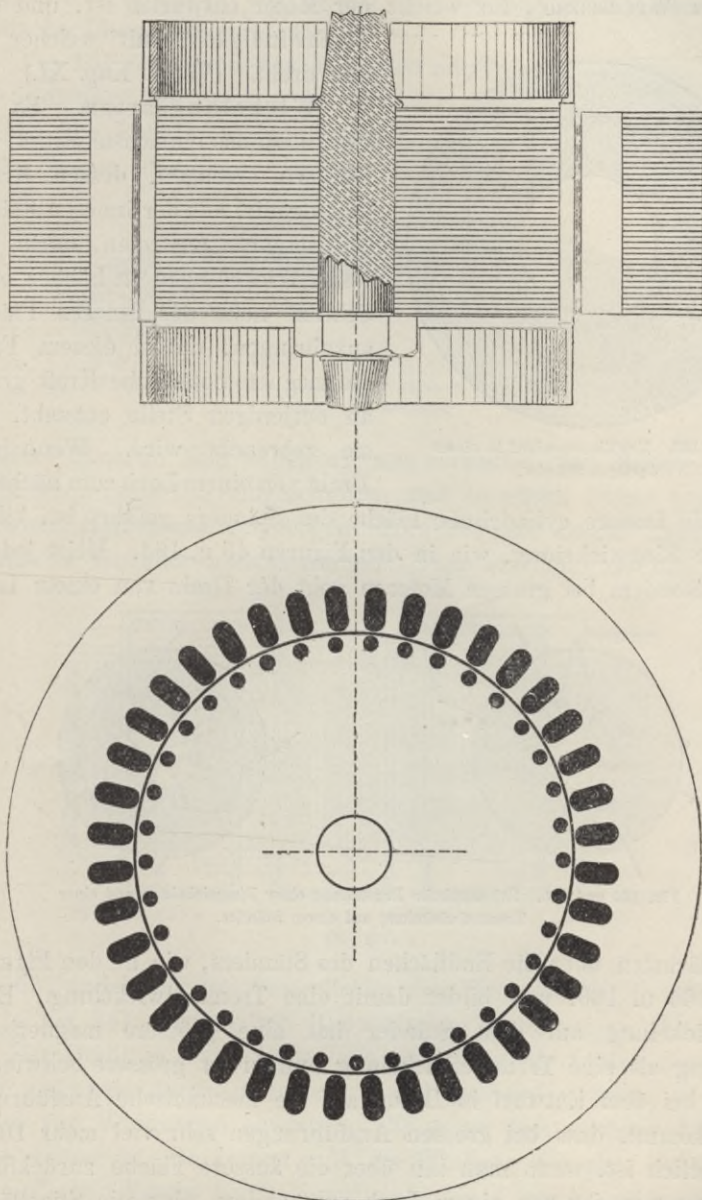


Fig. 161 und 162. Ständer und Läufer, entworfen von Brown.

wie in Fig. 163 dargestellt ist. Dadurch werden Nord- und Südpole erzeugt, welche sich rasch auf der Oberfläche des Ständers bewegen

und auf die Leiter des Läufers ziehend wirken, wie es ein einfaches rotirendes Feld thun würde. Die Zahl dieser Polpaare ist abhängig von der Wechselzahl, für welche der Motor entworfen ist, und der Geschwindigkeit, mit welcher er sich dreht. (Vergl. Kap. XI.)

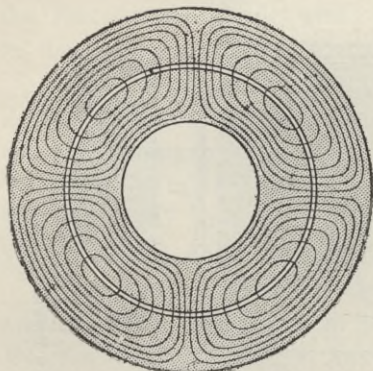


Fig. 163. Kraftlinienverlauf in einem 4poligen Ständer.

Wickelungsarten. Es ist klar, dass das einfachste Mittel, ein Feld zu erzeugen, dessen Kraftlinien radial aus der inneren Fläche des Ständers austreten, darin besteht, Wickelungen in Löcher oder Schlitze nahe der inneren Fläche anzubringen, da in diesem Falle die magnetomotorische Kraft grade an derjenigen Stelle entsteht, wo sie gebraucht wird. Wenn der Draht von einem Loch zum nächsten

über die äussere cylindrische Fläche des Ständers geführt ist, bildet er eine Ringwicklung, wie in den Figuren 49 u. 164. Meist jedoch und besonders bei grossen Motoren geht der Draht von einem Loch

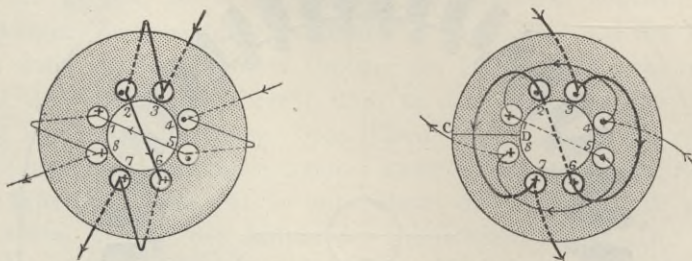


Fig. 164 und 165. Schematische Darstellung einer Ringwicklung und einer Trommelwicklung auf einem Ständer.

zum nächsten über die Endflächen des Ständers, wie in den Figuren 160, 165 u. 166, und bildet damit eine Trommelwicklung. Eine Ringwicklung auf dem Ständer hat eine grössere magnetische Streuung als eine Trommelwicklung und bietet grössere Schwierigkeiten bei dem Entwurf in Bezug auf die mechanische Ausführung. Dazu kommt, dass bei grossen Ausführungen sehr viel mehr Draht erforderlich ist, wenn man ihn über die äussere Fläche zurückführt als wenn man ihn von einem Loch zum andern über die Stirnfläche führt. Die Figuren 164 u. 165 dienen zum Vergleich der beiden Wickelungsformen.

Fig. 166 ist ein der Fig. 49 ähnliches Schema mit Spulen von nur je einer Windung, welche durch Bohrungen des Eisens geführt sind; die Windungen der beiden Phasen sind durch starke und schwache Linien unterschieden.

Fig. 165 zeigt denselben Eisentheil mit Trommelwicklung, wobei die Richtung des Stromes in den wirksamen Leitern ungeändert bleibt. Die Punkte in den Bohrungen bezeichnen Ströme, die aufwärts fließen, die Kreuze solche, die abwärts durch die Ebene des

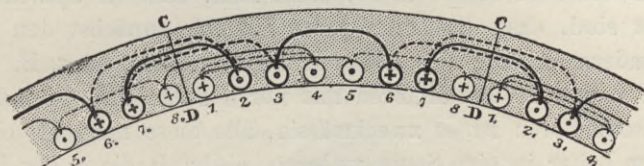


Fig. 166. Schematische Darstellung der Wickelung eines vierpoligen und eines zweipoligen Ständers.

Papieres fließen. Nun wollen wir uns vorstellen, der Ständer werde längs einer Linie *CD* aufgeschnitten und zu einem Bogen von weit größerem Halbmesser aufgebogen; dann soll eine Anzahl ebensolcher Stücke an einander gesetzt werden. Was wir dann erhalten, zeigt

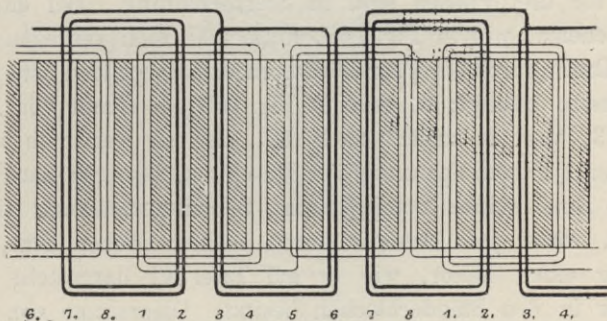


Fig. 167.

Fig. 166, und es ist im Wesentlichen dasselbe, wie die Bewickelung des in Fig. 241 dargestellten Brown'schen zweiphasigen Motors.

Der Draht in jeder Spule, wie der durch die Löcher 3 und 6, kann mehrmals durch dieselben Löcher gezogen werden, so dass ebenso viel Windungen entstehen, ehe er zu dem nächsten Löcherpaare weitergeht. So kommt z. B. die Windung des eben erwähnten Brown'schen Motors bei 3 herauf, geht bei 6 herab, auf zu 3 und ab zu 6 mehrmals wiederholt, geht dann hinauf zu 2 und führt wieder mehrmals durch 2 und 7, ehe sie zu 3 weiter geht u. s. w.

Die Wickelung ist auf eine Ebene abgewickelt in Fig. 167 gezeichnet; jede Spule enthält hier nur zwei Windungen.

Eine derartige Wickelung wird häufig für grosse vielpolige Zweiphasenmotoren verwendet. Wenn die Zahl der Pole gering ist, ist es üblich die Windungen jeder Spule über eine Reihe von Löchern auszubreiten, wie dies in Fig. K Taf. III zu sehen ist, nur sind die dort gezeichneten] Schleifringe bei einem Ständer nicht erforderlich.

Aus den Figuren 166 u. 167 sieht man, dass die Spulen so angeordnet sind, dass die Leiter jeder Schleife zunächst den Leitern einer andern Schleife der gleichen Phase liegen; so z. B. in den Löchern 2 und 3. Bei Motoren mit nur 4 Polen und besonders bei Dreiphasenmotoren ist es zweckmässig, alle diese nahe bei einander liegenden Leiter in eine Spule zu legen, also z. B. die in den Löchern 2, 3, 6 und 7 liegenden Leiter zu einer einzigen grossen Spule zu vereinigen. Auf S. 84 haben wir eine derartige Wickelung eine hemitropische genannt. Der auf Taf. XIII dargestellte 4polige Dreiphasenmotor von Kolben & Co. zeigt eine solche Wickelung, deren Schema in Fig. 168 dargestellt ist. Es ist eine Schleifenwickelung, bei welcher jede Schleife durch drei Paar Löcher geführt ist, wie in Fig. 88; die drei Phasen sind in Sternschaltung. Bei einem derartigen Schema, wie in Fig. 168, muss man sich vergegenwärtigen, dass der Draht durch ein Paar Löcher mehrmals geführt ist, bevor er zum nächsten gelangt; so geht in Fig. 168 der Draht von Loch 10 zu Loch 3, von da zurück nach 10, und so weiter in mehreren Windungen (je nach Spannung der Maschine), bevor er nach Loch 11 gelangt. Eine solche hemitropische Schleifenwickelung in Sternschaltung, wobei jede Schleife durch 3 Paar Löcher geht, ist geeignet für einen Motor, wie er auf Tafel XI dargestellt ist, der 48 Löcher in den Ständerblechen besitzt. Diagramme von Wellenwickelungen werden später bei der Betrachtung der Läufer gegeben werden, da Wellenwickelungen hauptsächlich bei den Läufern angewendet werden.

Hierbei ist es zweckmässig, sich die auf Seite 86—98 gegebenen Wickelungsarten für mehrphasige Stromerzeuger ins Gedächtniss zurückzurufen. Nicht alle die auf den Tafeln III und IV zur Darstellung gebrachten Wickelungsarten sind für Ständer von Inductionsmotoren zweckmässig. Im Allgemeinen sind hierfür ungeeignet die Wickelungen, die in wenigen grossen Schlitzten liegen, bei denen also grosse Zähne in den Blechen vorhanden sind; es sind vorzu-

ziehen diejenigen Arten, bei welchen die Bleche mehrere kleine Schlitz für jeden Pol haben, und die Wickelung vertheilt ist.

Die Anzahl der Leiter, welche in jedem einzelnen Falle in jedem Loch unterzubringen sind, hängt von der Spannung des zugeführten Stromes ab und wird später im Kapitel XI näher betrachtet werden.

Form der Bleche. Bei der Feststellung der günstigsten Form der Ständer- und Läuferbleche sind mehrere Forderungen zu berücksichtigen, welche einander widerstreiten, so dass zwischen ihnen ver-

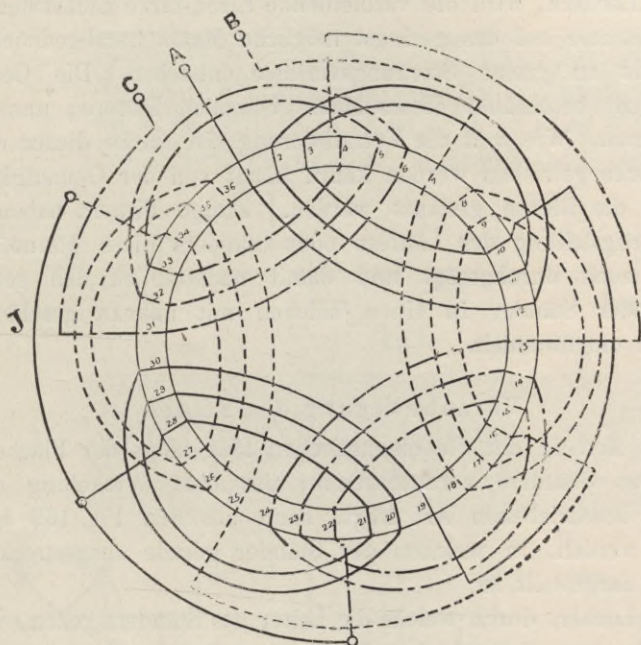


Fig. 168.

mittelt und durch Versuche festgestellt werden muss, welche Form am günstigsten ist. In erster Linie ist die Grösse der Kernstücke (also des Motors) gegeben durch den Raum, den die Wickelungen brauchen. Bei dem Bemühen, die Form und das Gewicht der Bleche klein zu halten, sind wir versucht, die zur Aufnahme der Wickelung bestimmten Löcher gross zu machen; hierin sind wir aber beschränkt dadurch, dass es wünschenswerth erscheint, den Querschnitt der Zähne möglichst gross und die Länge des magnetischen Kreises möglichst klein zu machen. Die Löcher dürfen daher nicht zu gross sein; auch ist es nicht erwünscht ihre Länge viele Male grösser als

ihre Breite zu machen. In der Paxis hat es sich als günstig erwiesen, beim Ständer die Breite der Löcher um ein geringes grösser zu machen als der Abstand der Löcher von einander beträgt, beim Läufer dagegen werden die Löcher nicht so breit gewählt. Die Darstellungen in den Figuren 79, 161, 220, 221 und auf Tafel XIII zeigen verschiedene Formen von Löchern und Schlitzen, die von hervorragenden Firmen benutzt werden. In Figur 221 ist die Breite der Löcher mehr als doppelt so gross wie die Breite des dazwischen liegenden Eisens. Wenn das Eisen die Leiter vollständig umgibt, also bei Löchern, wird die verbleibende Eisenstärke nächst dem Luftzwischenraume auf das geringst mögliche Maass herabgedrückt, damit nicht zu grosse Streuungsverluste entstehen. Die Oerlikon-Gesellschaft beschränkt dieses Maass bei allen Motoren unter 10 P auf $\frac{1}{10}$ mm. Wie weit die Verminderung der Stärke dieser dünnen Eisenbrücke getrieben werden kann, hängt von der Genauigkeit ab, mit der die Bleche gestanzt werden. Einige Firmen haben dann nach Fertigstellung des Läufers oder Ständers diese dünne Eisenbrücke noch durchgesägt und damit nachträglich den gelochten Läufer oder Ständer in einen solchen mit nahezu geschlossenen Schlitzen umgewandelt.

Voranbewegung des Feldes.

Die Art, in der die magnetischen Pole längs der Fläche eines vielpoligen Ständers voranschreiten, der eine Wickelung der in Fig. 167 beschriebenen Art trägt, kann aus den Fig. 169 bis 172 ersehen werden, in welchen der Ständer gerade ausgestreckt statt gebogen dargestellt ist.

Die Löcher, durch welche die Leiter des Ständers gehen, werden durch die obere Reihe kleiner Kreise dargestellt, während die untere Reihe solcher Kreise die Löcher für die Leiter des Läufers angibt. Der Einfachheit wegen wollen wir zunächst voraussetzen, dass der Läuferkreis offen ist; später werden wir genauer die Wirkung untersuchen, welche ein geschlossener Läuferkreis hervorruft. Zwischen Ständer und Läufer sieht man einen Luftzwischenraum. Die Wickelung ist zweiphasig, und um die zu einem Kreise gehörigen Leiter zu kennzeichnen, sind die zu dem einen Kreise (wir wollen ihn Nr. 1 nennen) gehörigen Löcher stärker umrandert, als die anderen.

Im Uhrdiagramm links von jeder Figur zeigt der starke Strahl *A* die Phase des Stromes im Kreise Nr. 1 und der schwache Strahl *B* die Phase im Kreise Nr. 2. In Fig. 169 ist der Strom im Kreise

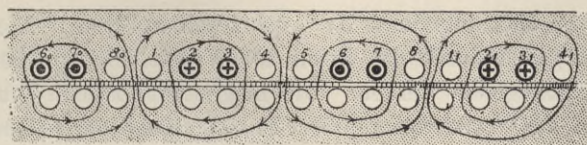


Fig. 169.

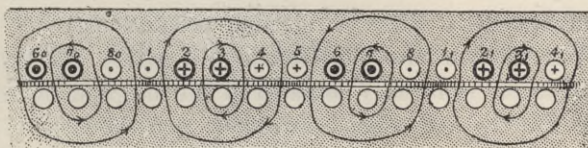
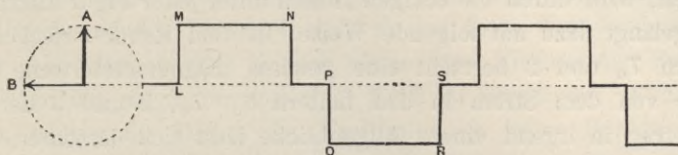


Fig. 170.

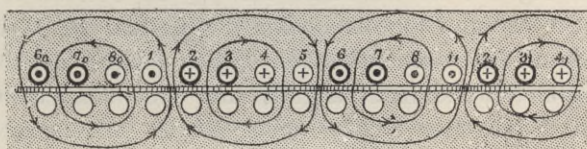
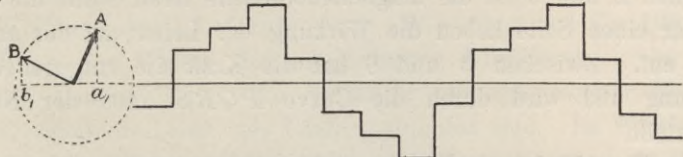


Fig. 171.

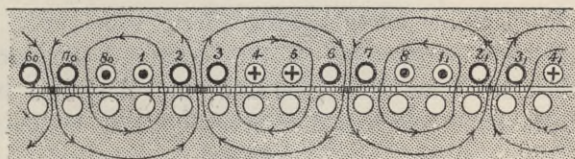
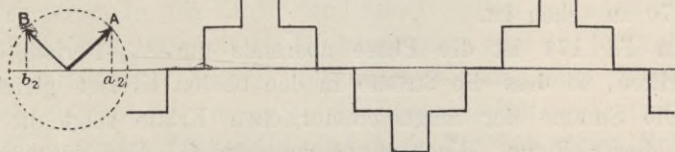
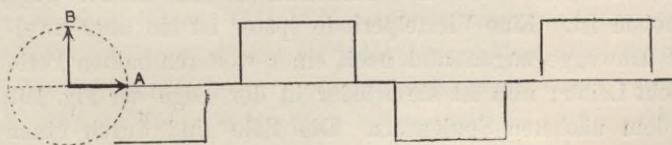


Fig. 172.



Nr. 1 im Maximum und Nr. 2 führt keinen Strom. Die magnetischen Linien gehen durch das Eisen auf Wegen, die annähernd durch die Pfeile angegeben werden. Die magnetomotorische Kraft, welche die Spulen des Ständers an jedem Punkte längs der Fläche des letzteren ausüben, wird durch die eckigen Linien unter jeder Figur angegeben. Man gelangt dazu auf folgende Weise: In dem Raum zwischen den Löchern 7_0 und 2 herrscht eine gewisse magnetomotorische Kraft, welche von dem Strom in den Leitern 6_0 , 7_0 , 2 und 3 herrührt. Ihr Betrag in irgend einem Augenblicke lässt sich darstellen durch die Projection des Strahles A auf eine senkrechte Linie (der Strom in den Spulen ist dieser Projection proportional).

Wir können also die Gerade LM gleich der Projection von A ziehen; dann stellt MN annähernd die magnetomotorische Kraft an jedem Punkte der Fläche zwischen den Löchern 7_0 und 2 dar. Zwischen 2 und 3 ist die magnetomotorische Kraft Null; die Leiter auf der einen Seite heben die Wirkung der Leiter auf der anderen Seite auf. Zwischen 3 und 6 hat die Kraft die entgegengesetzte Richtung und wird durch die Curve $PQRS$ unter der Nulllinie dargestellt.

In Fig. 170 ist die Phase um $\frac{1}{16}$ der Periode vorangeschritten. Zeichnen wir nun für die Spulen des Kreises Nr. 1 eine Curve, die derjenigen der vorhergehenden Figur ähnlich ist, wobei Aa die magnetomotorische Kraft angibt, und eine ähnliche Curve für die Spulen des Kreises Nr. 2, wobei Bb als magnetomotorische Kraft gilt; die Summe dieser beiden Curven ist diejenige Curve, die unter Fig. 170 zu sehen ist.

In Fig. 171 ist die Phase abermals um $\frac{1}{16}$ -Periode vorangeschritten, so dass die Ströme in den beiden Kreisen gleich sind.

Die Summe der magnetomotorischen Kräfte zeigt die Curve unter dieser Figur. Nach einer weiteren $\frac{1}{16}$ -Periode würde die Curve wieder eine unregelmässige Form wie in Fig. 170 annehmen; dies ist nicht dargestellt. Wieder nach $\frac{1}{16}$ -Periode ist der Strom im Kreise Nr. 1 auf Null gesunken, und derjenige im Kreise Nr. 2 ist im Maximum, so dass die Curve (Fig. 172) derjenigen in Fig. 169 gleicht, aber über den Zwischenraum zweier Löcher gegen diese verschoben ist. Eine Viertelperiode später ist sie über zwei weitere Leiter hinweggegangen und nach einer weiteren halben Periode über alle acht Leiter; nun ist sie wieder in der Lage der Fig. 169 gegenüber dem nächsten Spulensatz. Die Pole sind durch einen vollen Wechsel gegangen.

Obgleich diese Curven annähernd die Vertheilung der magnetomotorischen Kraft angeben, so stellen sie doch nicht die Vertheilung der magnetischen Kraftlinien dar, denn bei den letzteren können solch plötzliche Aenderungen, wie sie den Ecken der obigen Curven entsprechen, nicht vorkommen. Die natürliche Ausbreitung der Kraftlinien und der Umstand, dass sie bei ihrer Vorwärtsbewegung Leiter schneiden, wirken in dem Sinne, den Einfluss der Ecken in der Curve der magnetomotorischen Kraft zu beseitigen, so dass die Curve, welche die Dichte der Kraftlinien an jedem Punkte angibt, eine runde glatte Curve ist, nicht unähnlich einer Sinuscurve; ja sogar jede grössere Abweichung von der Sinuscurve würde eine Unregelmässigkeit sein, welcher die Ströme in den Leitern kräftig entgegenwirken würden, und wir dürfen demnach, ohne einen zu grossen Irrthum zu begehen, annehmen, dass die Vertheilung der Kraftliniendichte einer Sinuscurve folge.

Wirkung des Läuferstromes. Wir sahen aus Fig. 169, dass die Mitten der Wellen der magnetischen Kraftlinien in der Mitte zwischen Leitern liegen, die Strom in entgegengesetzter Richtung führen, wenn die Leiter des Läufers stromlos sind. In Wirklichkeit sind aber die Läufer nicht stromlos und dieser Umstand ist für die Lage der Wellen der magnetischen Kraftlinien von grosser Wichtigkeit. Im nächsten Kapitel werden wir genau untersuchen, wie die Ströme von Läufer und Ständer gegenseitig auf einander einwirken. Hier genügt es, die dort entwickelten Ergebnisse soweit zu berücksichtigen, als sie die Bauart der einzelnen Theile beeinflussen.

Der Strom in den Läufer- und Ständerleitern mag nach der Zahl der auf die Längeneinheit des Läuferumfangs oder des Luftzwischenraumes entfallenden Ampere betrachtet werden. Zum Beispiel sei hiernach die Zahl der Ampere auf die Längeneinheit des Luftzwischenraumes unter den Löchern 4 und 5 in Fig. 169 gleich Null. In Fig. 170 sind mehr Ampere unter den Löchern 2 und 3 als unter 4 und 5. Betrachten wir den Strom in dieser Weise, so finden wir, dass sowohl im Läufer wie im Ständer der Strom Bänder oder Wellen bildet. Im nächsten Kapitel werden wir nachweisen, dass diese Bänder oder Wellen im Läufer und Ständer nahezu gleich sind, dicht zusammen liegen, jedoch in entgegengesetztem Sinne gerichtet sind. Jedes Läuferstromband ist jedoch gegenüber dem zugehörigen Bande des Ständers um ein geringes Maass nach vorne verschoben, so dass, obwohl beide magnetisch entgegengesetzt wirken, doch eine kleine resultirende magnetomotorische Kraft verbleibt, welche ein Feld

erzeugt, das in der in Fig. 173 dargestellten Weise vertheilt ist. Man sieht hieraus, dass die Vertheilung der von den Ständerstrombändern herrührenden Kraftlinien sehr verschieden ist von der in Fig. 169 dargestellten. Der Luftzwischenraum unter den Löchern 4 und 5 ist zwar noch einer sehr grossen magnetomotorischen Kraft von den Ständerwickelungen unterworfen, aber diese Kraft wird durch eine fast gleich grosse, aber entgegengesetzte magnetomotorische Kraft von den Läuferleitern aufgehoben. Diese direct entgegengesetzten magnetomotorischen Kräfte verursachen eine magnetische Streuung auf jedem möglichen Wege. Die Vertheilung der Ströme im Läufer und Ständer ist so, dass die resultirenden magnetischen Kraftlinien um fast genau ein Viertel des Spulenabstandes von der Lage verschoben sind, die sie einnehmen würden, wenn der Ständerstrom allein vorhanden wäre. Mit anderen Worten: bei voller Be-

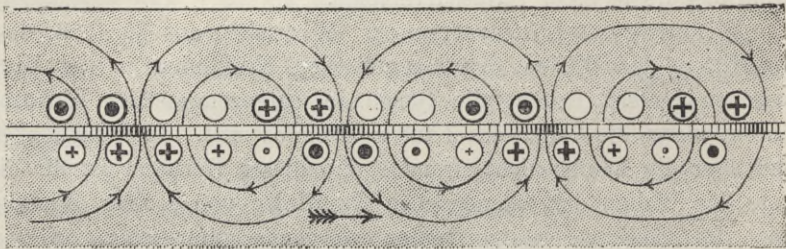


Fig. 173.

lastung ist die Phase des Scheitelwerthes der resultirenden Kraftlinien um ungefähr ein Viertel einer vollständigen Periode hinter dem Scheitelwerthe des maximalen inducirten Stromes verzögert.

Magnetische Streuung. Wir wollen die vereinigte Wirkung der Läufer- und Ständerströme auf das Entstehen des magnetischen Feldes noch eingehender verfolgen; besonders die Vertheilung der Kraftlinien in den Zähnen und dem Zwischenraum bedarf sorgfältiger Prüfung. Fig. 174 stellt einen solchen Fall deutlich dar. Die allgemeine Richtung der Kraftlinien, ihre Anhäufung im Eisen der Zähne, die Verzerrung des Feldes durch die ungleichförmig vertheilten Ströme im Läufer und Ständer, die Schirmwirkung des die Schlitze umgebenden Eisens, die schräge Lage des Feldes im Luftzwischenraum, welche tangential treibende Kräfte hervorruft, alles dies ist in der Zeichnung erkennbar. Weniger deutlich ist die magnetische Streuung. In der That, da das Streufeld das allgemeine Feld überlagert, ist es nicht auf den ersten Blick erkennbar, dass Streuung

vorhanden ist. Um dies klarer zu erkennen, wollen wir folgenden einfachen Fall betrachten. Es sei eine Eisenmasse, wie im oberen Theil der Fig. 175 dargestellt, mit einem Schlitz versehen, und dicht daneben ein zweites Eisenstück, wie im unteren Theil derselben Figur dargestellt, ebenfalls mit einem Schlitz oder Loch. Nehmen wir an, dass aus irgend einem Grunde magnetische Kraftlinien vom oberen Stücke Eisen nach dem unteren gehen. Die Wege der Kraft-

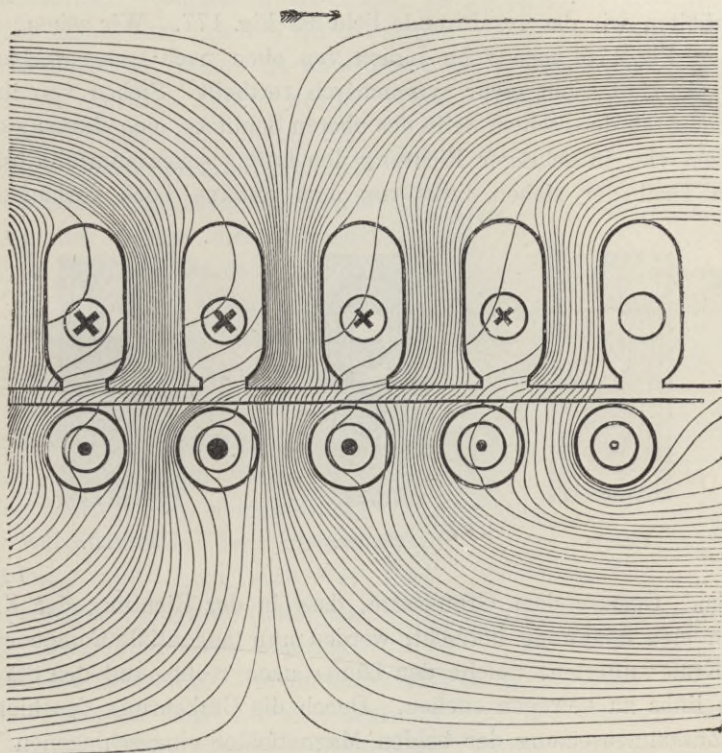


Fig. 174. Schematische Darstellung der magnetischen Verzerrung und Streuung.

linien sollen durch die 10 Linien angedeutet werden. Fünf von ihnen werden rechts und ebensoviel links an den Schlitzen vorbeigehen. Wir betrachten dann dieselben Eisenstücke ohne das senkrechte Feld, nehmen aber an, dass durch Kupferleiter in den Löchern Ströme verlaufen (Fig. 176); die Kreuze und Punkte in den Leiterquerschnitten sollen in bekannter Weise die Richtung der Ströme andeuten. Diese Ströme würden um sich herum Felder erzeugen, deren Richtung durch die umgebenden Linien angedeutet wird, welche den von den Strömen

in einem einzelnen Ständer- beziehungsweise Läuferleiter herrührenden Magnetismus darstellen. Diese Linien, deren zwei um jeden Leiter gezeichnet sind, stellen reine Streufelder dar, da weder die vom Läuferstrom herrührenden Kraftlinien den Ständerleiter, noch die vom Ständerstrom erzeugten Kraftlinien den Läuferleiter durchdringen. Solch ein Feld trägt also nichts zur Vergrößerung der Triebkraft bei, da keine Kraftlinien vom Läufer zum Ständer übergehen. Wenn wir nun das Feld von Fig. 176 über das der Fig. 175 überlagern, so erhalten wir das resultierende Feld der Fig. 177. Wir sehen, dass wie in Fig. 175 noch zehn Linien von oben nach unten verlaufen, aber sie sind nicht mehr symmetrisch vertheilt. Sieben von ihnen verlaufen an der rechten Seite des oberen Schlitzes, von diesen sieben kreuzen vier in schräger Richtung den Luftzwischenraum und bilden einen Theil der sieben links von dem unteren Loch verlaufenden

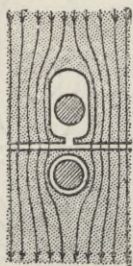


Fig. 175.

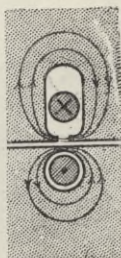


Fig. 176.

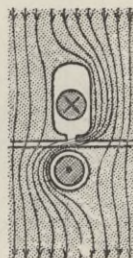


Fig. 177.

Linien. Gemäss dem Grundsatz, dass in der Richtung der Kraftlinien eine Spannung herrscht, werden nun tangentielle Componenten der Kraft auftreten, welche den Läufer nach rechts und den Ständer nach links zu bewegen suchen. Durch die Umkehrung des hier für die Zusammensetzung der beiden Magnetfelder eingeschlagenen Verfahrens würde es möglich sein, das zusammengesetzte Diagramm der Figur 174 in zwei Diagramme aufzulösen, von denen das eine nur das abwärts gerichtete Feld darstellt, welches von der resultierenden magnetischen Wirkung aller Ständer- und Läuferströme der Maschine herrührt; das andere würde gleich der Figur 176 nur die Kraftlinien zeigen, die von den Einzelströmen in den Läufer- und Ständerleitern herrühren. Alle Kraftlinien, welche nur einen oder mehrere Leiter des einen Theils umgeben, tragen nichts zur Triebkraft bei, sind also reine Stromverluste; sie stören nur die betreffenden Ströme, die sie umgeben. Es ist klar, dass das nächstliegende Mittel, diese Verluste

zu vermindern, darin besteht, den Luftzwischenraum zwischen Ständer und Läufer zu verkleinern und die Kupferleiter so dicht als möglich an die Oberflächen zu verlegen.

Jede Kraftlinie, welche von einem Zahn zu einem andern Zahn desselben Theils (also von Ständer zum Ständer oder vom Läufer zum Läufer) geht, ohne Leiter des andern Theils zu durchdringen, stellt einen Streuverlust dar. Trifft sie eine regelmässig quer durch den Zwischenraum verlaufende Kraftlinie, so verzerrt sie letztere und bewirkt damit auch insofern einen Verlust, als sie sie hindert, Leiter zu durchdringen, welche sie ohne die störende Beeinträchtigung der Streulinie berührt haben würde. Diese Verhältnisse werden im folgenden Kapitel an einem Beispiele noch näher erläutert, wo auch die Methode angegeben ist, durch welche die Grösse dieser Streuverluste bestimmt werden kann.

Es gibt noch einen andern Weg, auf welchem Streuverluste stattfinden, nämlich an den Seiten der Maschine. Dies ist in Fig. 178 dargestellt. Jede Streuung, die auf einem dieser beiden Wege stattfindet, bewirkt eine Vergrößerung der Selbstinduction der Ständerwicklung und daher eine Verminderung der Zugkraft (besonders beim Anlaufen) und des Wirkungsgrades der Maschine. Um diesen Verlusten zu begegnen, sollte das Eisen zwischen dem Luftzwischenraum und den Löchern bis auf das geringste Maass weggearbeitet werden. Einige Fabriken schneiden das Eisen an diesen Stellen ganz weg, obwohl dadurch dort zwar geringe aber sehr rasch verlaufende Wechsel der Kraftliniendichte entstehen, wenn die Zähne des Läufers an denen des Ständers vorbeigehen. Im grossen und ganzen ist es daher vorzuziehen, die Oberfläche bei kleinen Motoren, die sehr genau bearbeitet werden können, glatt zu halten und eine sehr dünne Verbindung zwischen den Zähnen stehen zu lassen. Den in Figur 178 dargestellten Verlusten aus den Seiten der Maschine wird in etwas durch die magneto-motorischen Kräfte der aus dem Eisen vortretenden Leiter entgegengewirkt.

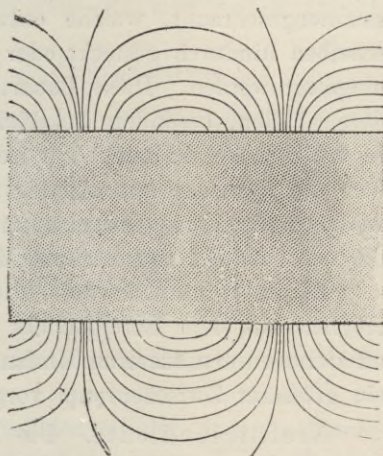


Fig. 178. Streufeld an den Polflanken.

Aufbau der Kernscheiben. Wir ersehen aus dem Vorstehenden, welche Form den Kernscheiben des Ständers zweckmässig zu geben ist. Wenn die Maschine nicht zu gross ist, sollen die Kernscheiben als geschlossene Eisenringe ausgestanzt werden; bei grösseren Abmessungen müssen die Ringe aus einzelnen Stücken aufgebaut werden und zwar so, dass die radialen Ränder der einzelnen Stücke sich überdecken.

Das Zusammenpressen der Kernscheiben von Läufer und Ständer gegen einander geschieht gewöhnlich in der Weise, dass sie von massiven Metallstücken umfasst werden, welche entweder lose für sich aufgesetzt oder als einzelne feste aus dem Rahmen hervortretende Flanken ausgebildet sind. Das Ganze wird durch Bolzen fest zusammengeschraubt, welche entweder durch Löcher in den Kernscheiben hindurch gesteckt oder in Vertiefungen am äusseren Umfang eingelegt werden. Diese Bauart ist in Fig. 140 dargestellt. In anderen Fällen, besonders bei kleineren Maschinen, wird der Rahmen in einer Ebene senkrecht zur Achse getheilt und beide Theile, nachdem die Kernscheiben eingelegt sind, fest mit einander verschraubt, wodurch die Kerne festgeklemmt werden. Diese Verbindung ist in der auf Tafel XI dargestellten Maschine gewählt.

Es ist wünschenswerth, die äusseren Rahmentheile soweit als möglich aus dem Bereiche des Streufelder zu halten, es ist daher oft zwischen den äusseren Umfang der Kernscheiben und den Rahmen ein grösserer Zwischenraum vorgesehen (vergl. Fig. 198 und 238).

Kraftliniendichte. Die höchst zulässige Kraftliniendichte \mathfrak{B} hängt von der Wechselgeschwindigkeit des Speisestromes ab. Der Energieverlust in den Eisenkernen während einer Periode, der von der Hysteresis herrührt, ist nicht proportional der Kraftlinienlichte. Steinmetz¹⁾ gibt folgende Formel für den Hysteresisverlust h in Erg auf das cm^3 Eisen und für jede Periode bei der Kraftliniendichte \mathfrak{B} :

$$h = \eta \mathfrak{B}^{1,6},$$

wo η eine Constante, die sogenannte Hysteresis-Constante, von der Eisensorte abhängig ist, und zwischen 0,0024 für sehr weiches Eisenblech und 0,004 für gewöhnliches Eisenblech liegt. Diese Formel gilt für Geschwindigkeiten bis zu etwa 200 Perioden in der Secunde.

1) Amer. Inst. Elec. Engineers, vom 19. Januar 1892 und Electrician vom 12., 19. und 26. Februar 1892.

Aus Versuchen mit wirklichen Transformatorenblechen wurde der Hysteresisverlust bei n Perioden in der Secunde zu

$$W = 0,0033 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \text{ Watt auf das cm}^3 \text{ Eisen gefunden.}$$

Ausser den Hysteresisverlusten entstehen in den Kernscheiben noch Verluste durch Wirbelströme. Diese ändern sich mit dem Quadrate der Blechstärke, dem Quadrate der Periodenzahl und dem Quadrate der Kraftliniendichte. Fleming hat hierfür folgende Formel durch Rechnung erhalten:

$$Y = X^2 \mathfrak{B}^2 n^2 10^{-16};$$

hier ist Y der Verlust in Watt auf das cm^3 der Kernstreifen, X deren Dicke in mm. Hieraus ergibt sich der Gesamtverlust für Wirbelströme und Hysteresis zu

$$W = 0,0033 n \mathfrak{B}^{1,6} \cdot 10^{-7} + X^2 \mathfrak{B}^2 n^2 \cdot 10^{-10}.$$

Bei einer Frequenz von 50 Perioden in der Secunde haben sich folgende Kraftliniendichten in den verschiedenen Theilen der Kernscheiben als vortheilhaft in der Praxis erwiesen:

Im vollen Eisenquerschnitt des Ständers	6 500 bis 8 000, je nach Grösse.
In den Zähnen des Ständers	9 000 bis 11 000, „ „ „
Im vollen Eisenquerschnitt des Läufers.	8 000 bis 12 000, „ „ „
In den Zähnen des Läufers	10 000 bis 12 000, „ „ „

Diese Angaben entsprechen einer Kraftliniendichte im Luftzwischenraum von 2500 bis 4500.

Bei einer Frequenz von 100 Perioden in der Secunde würde für die Kraftliniendichte nur etwa $\frac{2}{3}$ der oben angegebenen Werthe zu nehmen sein.

Aenderung des Feldes. Bei zweiphasigen Motoren ändert sich das von der Ständerwicklung erzeugte Feld in seiner Stärke während jeder Periode.

Bemerkenswerth ist, dass der Scheitelwerth der Curve in Fig. 171 grösser ist als der Scheitelwerth in Fig. 169; das Verhältniss beträgt $\sqrt{2} : 1$.

Ebenso zeigt der Scheitelwerth der Kraftliniendichte das Bestreben, in seinem Werthe zu schwanken. Indessen wirken die Leiter des Läufers jeder Schwankung entgegen, so dass letztere nur ganz schwach sein kann.

M. v. Dolivo-Dobrowolsky gab 1891 die Curve, die in Fig. 179 dargestellt wird, worin die Wirkungen der beiden magnetisirenden Ströme I und II eines einfachen zweiphasigen Motors addirt

sind; daraus entsteht ein Feld von wechselnder Stärke, welches die obere Curve zeigt, und dessen Schwankungen 40 Procent betragen.

In Fig. 180 werden solche Curven für einen dreiphasigen Motor dargestellt, worin die Aenderungen nur noch 14 Procent ausmachen. Je grösser die Zahl der Phasen, um so geringer werden diese Schwankungen. Dobrowolsky hatte damals die Ansicht, dass solche Schwankungen des Feldes im Motor nachtheilig wären und die Zugkraft verminderten, aber bei der jetzigen Anschauung über den einphasigen Motor scheint es nicht, als wenn sie schadeten. Die Schwankungen, soweit als sie noch eintreten, trotz der Gegenwirkungen der benachbarten Leiter, verhalten sich so, als wären über ein constantes Drehfeld mehrere feststehende Wechselfelder gelegt, deren Pole überall da liegen, wo eine Leitergruppe des einen Stromkreises an eine Leitergruppe des anderen Stromkreises anstösst, und deren Wechselgeschwindigkeit dieselbe ist, wie die des speisenden Stromes.

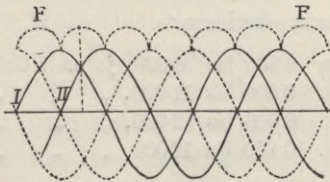


Fig. 179.

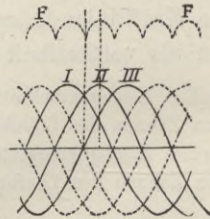


Fig. 180.

Isolation der Ständerwickelungen. Die Isolation der durch die Löcher und das umgebende Eisen geführten Wicklung muss sehr sorgfältig ausgeführt sein. Kurzschlüsse sind bei Mehrphasenmotoren häufig eingetreten, selbst wenn diese Isolation weit stärker war als es die normale Linienspannung erforderte. Diese Kurzschlüsse treten besonders leicht an den Enden der Wickelungen ein und sind zweifellos auf elektrische Schwingungen zurückzuführen, welche beim Ein- und Ausschalten entstehen und durch die Capacität der Windungen verstärkt werden. Die Endverbindungen müssen aus diesem Grunde mit besonderer Sorgfalt isolirt werden. Röhren aus Micanit oder ähnlich sicherem Material sollten zum Ausfüllern der diese Wickelungen aufnehmenden Löcher ausschliesslich verwendet, und diese Windungen auch von den sie kreuzenden gut isolirt werden. Zur Auskleidung der zwischenliegenden Röhren kann bei Maschinen, die mit geringerer Spannung als 600 Volt arbeiten, auch präparirtes Papier oder Fiber verwendet werden.

Lüftung. Die Methode, die Leiter in Löcher einzubetten, lässt eine directe Lüftung der Leiter nicht zu; aber es kann doch viel geschehen, den Motor vor Ueberhitzung zu schützen, wenn man dafür sorgt, dass die Kernbleche auf allen Seiten bei der Drehung des Motors von Luft umspült werden, und wenn man deren radial nach aussen gerichtete Bewegung für diesen Zweck ausnutzt. Bei grossen Motoren wird das Gestell in seiner äusseren cylindrischen Oberfläche durchbrochen, damit dieser Luftzug durch die vorstehenden Wicklungstheile und die Höhlungen hinter den Kernstücken des Ständers hindurchblasen kann. Auch zwischen den Kernscheiben sind bei vielen Maschinen in Abständen Lüftungskanäle geschaffen, so z. B. bei dem 1000pferdigen Motor Tafel XII.

Bauart der Läufer. Von den Eisentheilen der Läufer ist bereits auf S. 158 die Rede gewesen, und in Figur 161/62 ist eines der Kernbleche eines 4 poligen Motors von 6 Pferd dargestellt. Bei kleinen Motoren werden die Kernscheiben unmittelbar auf die Welle gekeilt, bei grösseren Ausführungen werden sie auf einem Radstern befestigt. Um dessen Masse auf das geringste Maass zu beschränken und schädliche Wirbelströme in ihm zu verhindern, wird die Unterlage der Kernscheiben nicht als gleichmässiger Cylinder hergestellt, sondern aus mehreren gegen einander isolirten Theilen zusammengesetzt, die mit einander fest verbunden, aber nicht in unmittelbarer Berührung sind. Die Figuren 198 und 120/21 zeigen dies; aus den letzteren sieht man auch, wie die Kernscheiben durch stärkere Endplatten mittelst durchgehender Schrauben zusammengepresst werden. Tafel XIV zeigt eine andere Art des Aufbaus des Radsterns.

Die Löcher für die Wicklung können geschlitzt oder rund sein; sie sind gewöhnlich zahlreicher vorhanden als beim Ständer und viel kleiner als bei diesem. Obwohl der Läufer auf die Längeneinheit des Umfangs fast ebensoviel Strom führt als der Ständer, nehmen doch die Leiter, da sie gewöhnlich aus massivem Kupfer hergestellt sind, nur halb soviel Raum ein, als für die isolirten Windungen des Ständers erforderlich ist. Hieraus erklärt sich der viel kleinere Lochquerschnitt beim Läufer. Die einzige Isolation, die für dessen Leiter erforderlich ist, besteht aus einem dünnen Isolationsohr um die Kupferleiter, und selbst dies wird zuweilen weggelassen.

Zur Erreichung der besten mechanischen Wirkung müssen die im Läufer inducirten Ströme auf Wegen geführt werden, die in einem starken magnetischen Feld von passender Polarität angelegt sind.

Betrachten wir den einfachsten Fall, den eines Kupfercylinders, der sich in einem Drehfeld befindet, wie in Ferrari's erstem Motor. Die Wirkung ist die gleiche, als wenn ein Paar Magnetpole auf entgegengesetzten Seiten des Cylinders aufgestellt wären und sich um letzteren drehen. Nehmen wir an, der Nordpol stehe vor dem Cylinder (Fig. 181) und bewege sich von rechts nach links (oder von oben gesehen wie der Zeiger der Uhr). Die Inductionswirkung ist dieselbe, als wenn der Pol still steht, während der Cylinder sich von links nach rechts dreht.

Dies erzeugt (nach den Grundsätzen, die auf Seite 4 erläutert worden sind) in dem Theil, der vor dem Pol vorbeigeht, elektromotorische Kräfte in der Richtung der beigezeichneten Pfeile, aufwärts; daraus entstehen zwei Stromwirbel, welche in der Zeichnung (Fig. 181)

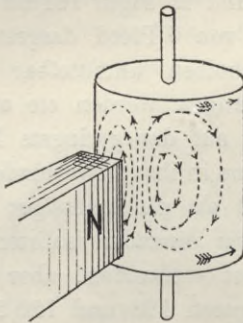


Fig. 181.

In einem Kupfercylinder inducirte Wirbelströme.

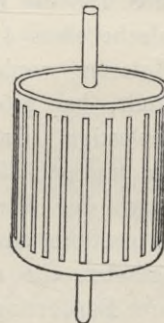


Fig. 182.

Geschlitzter Kupfercylinder.

angedeutet sind. Nun ist die mechanische Kraft, die ein stromführender Leiter im magnetischen Felde erfährt, sowohl zu den Kraftlinien des magnetischen Feldes, wie auch zu der Richtung des Stromes senkrecht gerichtet. Derjenige Theil des Kupfers, der den aufwärts gerichteten Strom durch das Feld führt, wird seitlich nach links gedrängt, während die Theile, in denen der Strom wagrecht fließt, nur auf- oder abwärts gedrängt werden, so dass sie zur Drehkraft nichts beitragen. Andererseits unterliegen diejenigen Theile des Kupfers, in denen der Strom abwärts fließt — wenn sie im gleichen magnetischen Felde liegen — solchen Kräften, die den Cylinder in der entgegengesetzten Richtung zu drehen suchen. Es erhellt hieraus, dass man ein besseres Ergebniss erzielt, wenn man die abwärts gerichteten Ströme auf einen Weg leitet, auf dem sie durch ein magnetisches Feld geführt werden, dessen Richtung der des vorigen entgegengesetzt ist. Dann werden sie die Drehkraft verdoppeln.

Als ein erster Schritt in dieser Richtung wird es schon eine Verbesserung sein, wenn der Kupfercylinder parallel zur Achse mehrmals bis nahe an seine Enden geschlitzt wird, wie in Fig. 182, oder wenn er aus einer Zahl paralleler Stäbe, die an den Enden durch Ringe verbunden sind, zusammengesetzt wird.

Dobrowolsky, der, wie es scheint, als Erster diese Construction unter dem Namen Schlussanker eingeführt hat, dachte vermuthlich, dass die Isolirung der Kupferstäbe vom eisernen Kerne von geringer Bedeutung sei; er betrachtete die Barren lediglich als Kupferadern in einer Eisenmasse.

Ein massiver Eisencylinder kann natürlich als Läufer dienen, da er in magnetischer Beziehung ausgezeichnet ist; aber der hohe elektrische Widerstand des Eisens lässt die inducirten Ströme sich

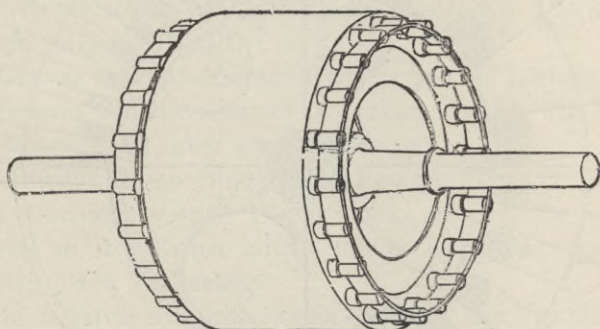


Fig. 183. Kurzschluss- oder Trillerkäfig-Anker.

nicht zu genügend grosser Stärke entwickeln. Der Eisencylinder wird also verbessert durch einen umgelegten Kupfermantel, oder indem man ihn in einen Trillerkäfig aus Kupferstäben setzt, wie in Fig. 183, oder indem man Kupferstäbe (die an den Enden durch Ringe kurz geschlossen werden) in Bohrungen ganz nahe an der Oberfläche des Cylinders einlegt. Aber da alle Wirbelströme, die in einer rund geschlossenen Bahn, wie in Fig. 181, verlaufen, in ihrer mechanischen Wirkung weniger vortheilhaft sind, als Ströme, denen geeignete Wege angewiesen sind, und da sie, ob nun mechanisch vortheilhaft oder nicht, Arbeit verzehren und dafür Wärme ausgeben, so ist es immer besser, wie Brown gefunden hat, eine sorgfältigere Construction zu verwenden, nämlich den Eisenkern aus dünnen Scheiben oder Ringen von weichem Eisenblech aufzubauen, die unter einander nur leicht, von den Kupferstäben des leitenden Stromkreises aber gut isolirt sind. So erhalten wir die Form der Fig. 183, einen

und viererlei Läufer. Die vier benutzten Ringe waren folgendermaassen beschaffen:

A. Löcherring mit 24 Bohrungen von 18 mm Weite; durch jede der letzteren führten 21 Drähte.

B. Einfacher Ring, gewöhnlicher Ringkern mit zwei Drahtlagen, welche 24 Gruppen von Spulen, jede Spule zu 19 Windungen, enthielten.

C. Feingezahnter Ring mit 48 Zähnen, in deren Zwischenräume je 9 Drähte gewickelt sind.

D. Grobgezahnter Ring mit 12 weiten Schlitzten, von denen jeder 36 Drahtwindungen fasst.

Die Länge dieser Ringkerne, parallel zur Achse gemessen, betrug 150 cm.

Die vier verschiedenen Läufer, die in der Fig. 184 angegeben sind, hatten folgende Gestalt:

a) Massiver schmiedeeiserner Cylinder mit 44 Löcherpaaren.

b) Massiver schmiedeeiserner **I**-Anker, ähnlich der bekannten Siemens'schen Form, aber ohne Windungen.

c) Zertheilter Eisencylinder, aus Kernscheiben mit 30 Löchern dicht am Umfang, welche 10 mm starke Kupferstäbe enthielten; diese waren an den Enden mittels zweier Kupferinge geschlossen und bildeten einen Trillerkäfig.

d) Ein massiver schmiedeeiserner Cylinder, der von einem 4 mm starken Kupfermantel umgeben war.

Ausser diesen vier waren noch sechs andere von derselben Grösse vorhanden, nämlich:

e) Ein einfacher massiver schmiedeeiserner Cylinder.

f) Ein massiver Gusseisencylinder.

g) Ein massiver Stahleylinder.

h) Ein schmiedeeiserner Cylinder mit vier grossen Längsbohrungen (wie in Fig. 184 durch den punktirten Kreis bei *h* angedeutet).

i) Ein Gussstahlkörper in Gestalt eines Cylinders, an dem zwei Segmente durch parallele ebene Flächen weggeschnitten sind.

k) Ein **I**-Körper wie b, aber aus Eisenblechscheiben zusammengesetzt.

l) Ein Cylinder mit Bohrungen wie a, aber massiv aus Schmiedeeisen, und mit Kupferstäben in den Löchern, die an den Enden kurz geschlossen, aber in ihrer ganzen Länge nicht isolirt waren.

Von diesen verschiedenen Läufern bewährte sich der aus zertheiltem Eisen in **I**-Form am wenigsten — er lief unter keiner

Belastung. Der massive Cylinder aus Schmiedeeisen war weit besser als der aus Gusseisen, während der Cylinder mit dem Kupfermantel beide übertraf, welcher Ring auch als Ständer benutzt werden mochte. Dies zeigten sowohl Bremsmessungen, wie auch die Benutzung des Motors zum Betrieb einer kleinen Dynamomaschine, deren Leistung elektrisch gemessen und geregelt wurde. Die beste Form des Läufers, welcher von den vier Ständern auch benutzt wurde, war der zertheilte Cylinder mit den kupfernen Stäben.

Unter den vier Ständern war derjenige mit glattem Kerne am wenigsten wirksam. Der fein- und der grobgezähnte Ring gaben grössere Zugkraft als derjenige, dessen Windungen in den Bohrungen enthalten waren, aber beide, besonders der mit breiten Zähnen, gaben Ursache zu einer beträchtlichen Erwärmung aller massiven Läufer und zu einem singenden Geräusch. Bei Benutzung des Ständers, dessen Windungen in den Bohrungen lagen, erhitzen sich die massiven Läufer minder stark; der Trillerkäfig-Läufer mit isolirten Leitern und zertheiltem Kerne blieb hingegen ganz kühl in seinen eisernen Theilen und die kupfernen erwärmten sich nur wenig. Diese Ergebnisse entschieden den Versuch zu Gunsten der Anordnung der Wickelung in Bohrungen, sowohl für den Läufer als für den Ständer, und diese Bauart hat sich seitdem durchaus bewährt.

Ohne Zweifel haben auch andere Pioniere dieses Gebietes ähnliche Versuche angestellt. Wer einige von verschiedenen Erfindern zu verschiedenen Zeiten angegebene Wickelungsarten unter einander zu vergleichen wünscht, wird auf die in der vorigen Auflage dieses Werkes in Fig. 111 abgebildeten Läuferformen verwiesen, welche Patentbeschreibungen entnommen sind, deren Datum angegeben ist.

Wickelung des Läufers. Einer der Vortheile des Inductionsmotors besteht in der grossen Einfachheit der Wickelung des beweglichen Theils. Wir sahen, dass es vortheilhaft ist, den inducirten Strom auf Wege zu beschränken, die parallel der Welle verlaufen, und dass die Käfigform des Läufers das geeignetste und einfachste Mittel hierzu darstellt. Wenn die Leiter wie in Fig. 183 durch Kreisringe von Kupfer an beiden Enden verbunden sind, ist es erwünscht, dass die Ringe recht kräftig sind und der Luft eine grosse Oberfläche zum Kühlen darbieten. Die Kupferleiter müssen mit den Ringen besonders sorgfältig verbunden werden, denn von der Güte dieser Verbindung und ihrem geringen elektrischen Widerstand hängt zum grossen Theil der Wirkungsgrad des Motors ab. Wegen der Schwierigkeit, die grosse Zahl dieser Verbindungsstellen gleichmässig

gut herzustellen, scheint sich allmählich der Gebrauch einzuführen, die Läuferwicklung auch in den Fällen aus Draht herzustellen, wo sie ständig kurzgeschlossen bleibt.

Wir wollen hier zunächst etwas eingehender die verschiedenen Mittel betrachten, durch welche diese einfache Wicklung hergestellt werden kann, und dann einige Darstellungen von grösseren Maschinen bringen, welche eine solche Anordnung der Wicklung erfordern, dass beim Anlaufen des Motors ein Hilfs widerstand eingeschaltet werden kann zu dem doppelten Zwecke, die Anzugskraft zu vergrössern und einen zu starken Stromstoss beim Einschalten zu verhindern.

Wie oben bemerkt, ist es klar, dass die beste Wirkung erhalten wird, wenn man die Leiter so verbindet, dass die Ströme, die durch ein Feld der einen Polarität abwärts fliessen, durch ein Feld der entgegengesetzten Polarität aufwärts zurückkehren. In einer zweipoligen Maschine sollen also die Schleifen der Wicklung einen Durchmesser oder nahezu einen Durchmesser umspannen; während in einer vierpoligen Maschine eine Schleife etwa 90 Grad, in einer sechspoligen Maschine etwa 60 Grad überspannt. Diese Bedingung erlaubt mannigfache Verbindungen und ist bei kleinen Maschinen nicht unverträglich mit der Kurzschluss- oder Trillerkäfigform.

Um eine bestimmte Vorstellung zu Grunde zu legen, wollen wir einen Läufer mit 24 Leitern, die durch 24 Löcher im Umfang der Kernscheiben geführt sind, betrachten (Fig. 185) und diesen in ein sechspoliges Drehfeld bringen. Wenn sich das Feld in Bezug auf den Läufer rechts herum dreht, und ein Nordpol gerade an dem Leiter Nr. 1 vorüber geht, wobei er eine aufwärts gerichtete elektromotorische Kraft inducirt (d. i.

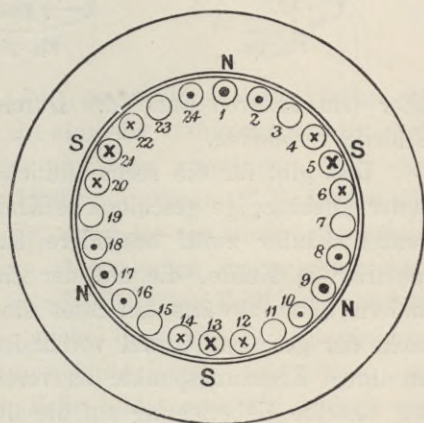


Fig. 185.

eine, die einen Strom in der Richtung auf den Beschauer zu erzeugen würde), so entstehen gleichzeitig ebenso grosse und ebenso gerichtete elektromotorische Kräfte in Nr. 9 und 17, und ebenso grosse, aber entgegengesetzt gerichtete in Nr. 5, 13 und 21. Um die beste Wirkung zu erzielen, müssen diese sechs Leiter mit ein-

ander verbunden werden, und es gibt mehrere Wege, dies auszuführen. Wir wollen diese sechs Leiter als ähnlich gelegene bezeichnen.

1. Methode. Alle Leiter parallel. Dies ist die oben betrachtete Trillerkäfiform.

2. Methode. Alle ähnlich gelegenen Drähte in Reihe. Wenn die sechs Leiter alle hinter einander geschaltet sind, so entsteht eine Art Zickzack- oder Wellenwicklung, die einen geschlossenen Stromkreis bildet (Fig. 186). In diesem Falle ergeben sich vier solche geschlossene Wickelungen, indem Nr. 2, 6, 10, 14, 18, 22 die zweite, die übrigen Leiter in ähnlicher Art die dritte und vierte bilden.

3. Methode. Die ähnlich gelegenen Leiter diametral zu Gruppen verbunden. Jeder Leiter wird mit seinem Gegen-

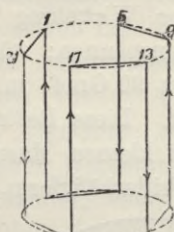


Fig. 186.

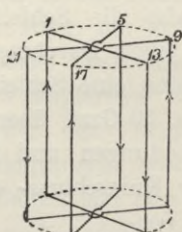


Fig. 187.

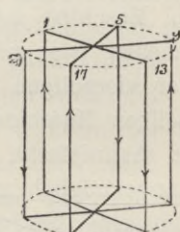


Fig. 188.

über (am anderen Ende des Durchmessers) zu einer geschlossenen Schleife verbunden.

Dies gibt für die sechs ähnlich gelegenen Drähte drei von einander unabhängige geschlossene Kreise, vergl. Fig. 187; d. i. für den ganzen Läufer zwölf besondere Kreise. Wenn aber die elektromotorischen Kräfte, die auf der einen Seite aufwärts und auf der andern Seite abwärts gerichtet sind, einander gleich sind, so ist nicht der geringste Grund vorhanden, die getrennten Schleifen nicht an ihrem Kreuzungspunkte zu vereinigen, wie in Fig. 188. Indem wir dieselbe Ueberlegung auf die übrigen Leiter anwenden, werden wir dazu geführt, alle 24 Leiter an beiden Enden mit einander zu verbinden und gelangen somit zu einer Anordnung, die im Grunde der Trillerkäfiform gleich ist und sich von dieser nur durch die Art der Endverbindungen unterscheidet.

4. Methode. Benachbarte ähnlich gelegene Drähte verbunden. Jeder Leiter wird mit dem nächsten ähnlich gelegenen

zu einem Paar geschlossen. Das Ergebniss zeigt Fig. 189; es entstehen drei unabhängige Stromkreise, oder zwölf besondere Kreise für den ganzen Läufer. Offenbar macht es keinen Unterschied, ob Nr. 1 mit Nr. 5 oder mit Nr. 21 gepaart wird. Daraus entsteht Fig. 117, welche sie alle durch sechseckige Verbindungsstücke an den Enden verbunden zeigt; diese Schaltung ist ebenso gut, wie die vorige. Die natürliche Folgerung dieses Aufbaues ist der Trillerkäfig, wo alle Leiter kurz geschlossen werden. In Fig. 189 sind so viele unabhängige Kreise vorhanden, als Paare von Leiterstäben, jeder Kreis umspannt einen Bogen gleich dem Polstand. Diese Art der Läuferwicklung wird von der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft angewendet, sie hat den Vortheil, dass die praktische Ausführung der Verbindung der Leiterenden die gleiche ist wie bei den Trommelankern der Gleichstrommaschinen. Wenn also die Leiter alle

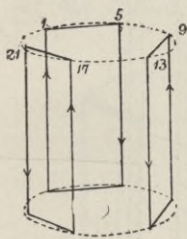


Fig. 189.

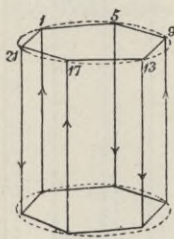


Fig. 190.

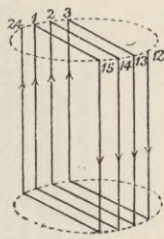


Fig. 191.

in einer einzigen Lage um den Läufer angeordnet sind, können sie durch zwei Sätze von Endspiralen mit einander verbunden werden, wobei ihre Enden abwechselnd kurz und lang vorstehen. (Man vergleiche die Wellenwicklung des Läufers in Figur 199.) Liegen die Leiter in zwei Lagen über einander, so ist die von Brown entworfene Trommelwicklung mit gleich lang vorstehenden Enden anwendbar. Fig. 192 zeigt ein abgewickeltes Schema für einen Theil eines solchen Läufers. Ist die Zahl der Leiter nicht durch die Polzahl theilbar, so kann der von einer Schleife umspannte Bogen nicht genau dem Polstand gleich sein; in solchem Falle bildet man die Schleife aus gleichliegenden Leitern so, dass der umspannte Bogen etwas kleiner als der Polstand ist.

5. Methode. Benachbarte Leiter als ähnlich gelegene verbunden. Anordnungen, bei welchen die Zahl der einzelnen getrennten Schleifen sehr gross ist, sind beim Zusammenbau nicht sehr bequem. Man kann in solchem Falle geringe Phasenunterschiede

unbeachtet lassen und benachbarte Leiter so behandeln, als wenn sie gleichzeitig derselben Wirkung unterlägen; dann kann man benachbarte Leiter in Gruppen zusammenfassen, als wenn sie ähnlich gelegene wären. Die Fig. 191, 193 und 194 zeigen verschiedene Ausführungsformen und bedürfen keiner weiteren Erklärung.

6. Methode. Gruppierung für die Einschaltung eines Anlasswiderstandes. Die Erfahrung hat gezeigt, dass zum Zweck des Einschaltens eines Anlasswiderstandes in den Läufer diejenige Wickelung am geeignetsten ist, bei welcher die Leiter des Läufers in drei unabhängige Kreise gruppiert sind. Dies führt praktisch dahin, solche Läufer mit einer dreiphasigen Wickelung zu versehen.

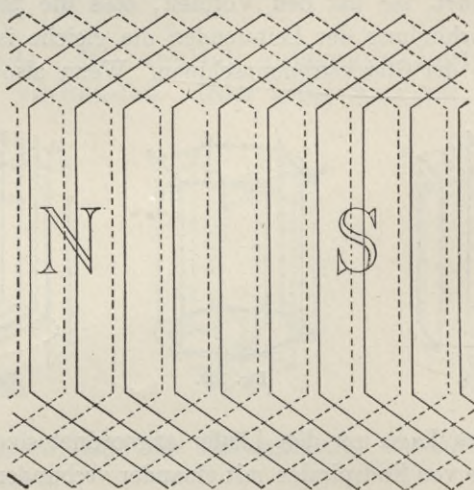


Fig. 192.

Die Enden derselben werden zu Schleifringen und Bürsten geführt. Man vermeidet hierbei Schwierigkeiten, wenn man die Windungen in Sternschaltung verbindet (Fig. 47) und jedes freie Ende an einen auf der Achse befestigten Schleifring führt. Von den drei Bürsten führen Drähte durch drei geeignete Widerstände zu einem gemeinsamen Knotenpunkte.

Die in den Figuren V, X und Y (Tafel IV) gezeichneten Wickelungen sind für diesen Zweck geeignet. Fig. X ist eine Netzschaltung, die beiden andern Sternschaltung, und zwar Fig. V eine Schleifenwicklung, Fig. Y eine Wellenwicklung. Läufer mit solchen dreiphasigen Wickelungen können auch ohne Schleifringe als einfache Kurzschlussläufer verwendet werden und sind dann den Käfigläufern gleichwerthig.

Wenn man eine Läuferwicklung so einrichten will, dass drei Anlasswiderstände eingeschaltet werden können, so müssen drei unter einander gleiche Stromkreise vorgesehen werden, welche wie eine Dreiphasenwicklung für die vorgeschriebene Polzahl um den Läufer vertheilt sind. Da Ringwickelungen ungeeignet sind, bleiben nur die zwei Arten der Trommelwicklung zu betrachten.

a) Schleifenwicklung. Der Einfachheit wegen ist es erwünscht, dass die Wicklung hemitropisch (S. 84) sei. Denn wenn P die Zahl der Polpaare, x die der Leiter bedeutet, welche den Schleifensatz in einer Phase und unter einem Polpaar ausmachen, S die Zahl aller Schleifen in der ganzen Wicklung, Z die Zahl aller Leiter um den Läufer, so haben wir:

$$Z = 3Px \text{ und } S = 1,5 Px.$$

Besteht die Läuferwicklung aus Stäben und enthält sie zwei Stäbe für die Nuthe, so ist die Zahl der Nuthen = S .

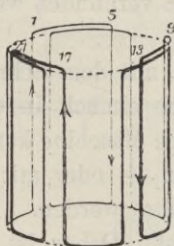


Fig. 193.

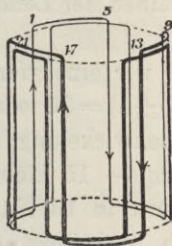


Fig. 194.

Wenn wir z. B. als eine passende Zahl 5 Nuthen für jeden Pol und jede Phase wählen, so haben wir 10 Nuthen für jedes Polpaar und jede Phase oder 15 Nuthen für den Pol im Ganzen. Für eine sechspolige Maschine ergibt das 90 Nuthen, wie in dem Kolben'schen Motor, Taf. XIII; vergl. auch Fig. 200, S. 190. Jede Phase nimmt 30 Nuthen ein; die drei Phasen können in Stern- oder in Netzschaltung verbunden werden, am Besten in Sternschaltung, um eine höhere Spannung zu ergeben.

b) Wellenwicklung. Es ist klar, dass der Symmetrie wegen die Zahl der Nuthen durch 3 theilbar sein muss, damit die drei Phasen gleich sind. Bei Sternverbindung ist es nicht nöthig, dass die Zahl der Nuthen oder Leiter gerade sei, wenn nur der Vereinigungspunkt an das eine Ende des Läuferkernes zu liegen kommt und die drei Verbindungen zu den Schleifringen an das andere Ende. Bei Netzschaltung muss die Zahl gerade sein; daher muss

die Zahl der Leiter durch 6 theilbar sein. Wenn in jede Nuthe zwei Leiter gelegt werden (um die Endverbindungen wie bei der Trommelwicklung bequem ausführen zu können), braucht die Zahl der Nuthen nicht gerade zu sein.

Betrachten wir ein Element der Wellenwicklung, welches aus zwei vereinigten Leitern besteht, so reicht ein solches Element nahezu von einem Pole zum nächsten. Bedeutet alsdann b die Zahl der Wellen für ein Polpaar und eine Phase, so sind es $P \cdot b$ solcher Elemente in jeder Phase oder $3 \cdot P \cdot b$ Elemente im Ganzen, d. h. $S = 3 P \cdot b \times 2 = 6 P \cdot b$. Wenn zwei Leiter in jeder Nuthe liegen, so ist die Zahl der letzteren $3 P b$. Setzen wir nun eine einmal in sich zurücklaufende Trommelwicklung voraus, so wissen wir, dass die Bedingung für einmaliges Zurücklaufen ist

$$Z = 2(Py \pm 1),$$

worin y der Schritt ist, d. h. die Zahl, welche angibt, wie viele Leiter das Element überspannt. Wenn z. B. $y = 7$ ist, so muss bei zweipoligen Maschinen der Leiter Nr. 1 mit Nr. 8 verbunden werden, Nr. 8 mit 15 u. s. f.

Nehmen wir eine vierpolige Maschine mit dem Schritt 7, so ist $Z = 2 \cdot (2 \times 7 \pm 1) = 30$ oder $\cdot 26$. D. h. eine einfach in sich zurücklaufende Wellenwicklung für eine vierpolige Maschine kann entweder mit 30 Leitern — 15 Elemente, 15 Nuthen — oder mit 26 Leitern — 13 Elemente in 13 Nuthen — ausgeführt werden. Nun ist die erstere durch 3 theilbar, die letztere nicht. Daher ist die letztere ungeeignet für eine Läuferwicklung. Ein Läufer mit 39 Nuthen und 2 Leitern in jeder Nuthe eignet sich für eine vierpolige Maschine, wenn $y = 20$ oder $= 18$ ist; für eine achtpolige Maschine, wenn $y = 10$ oder $= 9$ ist.

Jede Wellenwicklung, welche diese Bedingung des einmaligen Zurücklaufens erfüllt und eine durch 3 theilbare Zahl Elemente enthält, kann zu einem Läufer mit Sternschaltung verwandt werden, wenn man einfach die Wicklung an drei Punkten von gleichem Abstand theilt und die drei Stromkreise zu einem gemeinsamen Verbindungspunkte führt. Für einen Läufer mit Netzschaltung genügt es, drei Punkte auszuwählen, welche auf der in sich zurücklaufenden Wicklung symmetrisch vertheilt sind, und diese mit den drei Schleifringen zu verbinden. Wenn die in sich zurücklaufende Wicklung nicht so berechnet ist, dass sie in drei gleiche Theile zerlegt werden kann, so kann sie doch als dreiphasige Läuferwicklung dienen, wenn man drei Punkte wählt, die so nahe als möglich

geschlossen und stehen durch die Bürsten mit einem dreifachen Widerstand M in Verbindung, der an passender Stelle angebracht ist. Der Widerstand wird allmählich verringert in dem Maasse als die Geschwindigkeit zunimmt; wenn letztere ihre normale Grösse erreicht hat, wird der Hebel H so gedreht, dass die Contacte K mit den Enden C in Verbindung treten, wodurch die Wickelung kurz geschlossen wird. Tafel XI zeigt eine andere Verbindung der Enden der Wickelung mit den Schleifringen. Eine Dreiphasenwickelung ist für den Läufer ohne Frage in allen Fällen am geeignetsten, wenn ein Anlasswiderstand eingeschaltet werden soll. Solche Läufer können bei jedem Inductionsmotor verwendet werden, gleichgiltig ob ein-, zwei- oder dreiphasig, vorausgesetzt dass die Polzahl des Ständers mit der des Läufers übereinstimmt; sie können in Stern- oder Dreieckschaltung mit Wellen- oder Schleifenwickelung ausgeführt werden.

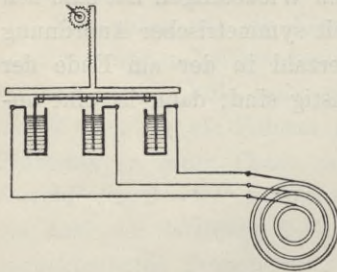


Fig. 196.

Wasserwiderstand von v. Dobrowolsky.

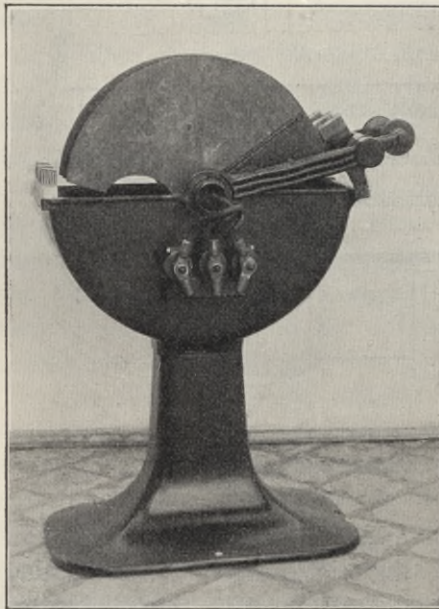


Fig. 197. Flüssigkeitsanlasser von Ganz & Co.

Er besteht aus drei mit Wasser oder Sodalösung gefüllten Gefässen, an welche die drei Leitungen der Läuferwickelung herangeführt sind. Die gemeinsame Verbindung wird durch drei Kohlenplatten

Anlasswiderstände. Für die Anlasswiderstände werden verschiedene Materialien verwendet. Zuweilen wird Gusseisen verwendet, von anderen Firmen wird Kruppin, Rheostan, Platinoid, Nickelin und ähnliches Material vorgezogen. Häufig werden auch Wasserwiderstände benutzt. Fig. 196 zeigt einen von Dobrowolsky angegebenen Wasserwiderstand der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

dargestellt, welche gehoben oder in die Flüssigkeit eingetaucht werden können und somit eine beliebige Veränderung des Widerstandes gestatten. Fig. 197 zeigt eine Ausführungsform der Firma Ganz & Co., bei welcher Eisenbleche statt der Kohlscheiben verwendet sind. Die oben beschriebene, in Fig. 195 dargestellte Anordnung mit einem Drahtwiderstand in Sternschaltung wird von der Oerlikon-Gesellschaft ausgeführt. Fig. 198 zeigt einen solchen Widerstand nebst Anlassschalter für einen 45 pferdigen Motor derselben Firma. Durch Drehen des oben angebrachten Handhebels werden die drei Widerstände schrittweise ausgeschaltet, bis der Läufer kurz geschlossen ist. Eine andere von Siemens & Halske herrührende Schaltung ist in der Fig. 199 angedeutet. Hier wird beim Drehen des Schalthebels der Widerstand in den drei Stromkreisen abtheilungsweise ausgeschaltet und zwar so, dass in jeder Schaltstellung nur eine Abtheilung eines Widerstandes ausgeschaltet wird. Hierdurch wird eine erheblich feinere Abstufung erzielt, die Ungleichheit der Ströme in den drei Phasen ist ohne Belang. Einzelne Firmen bringen den Anlasswiderstand im Läufer selbst unter, und das Ausschalten des Widerstandes nach erreichter Normalgeschwindigkeit geschieht hierbei entweder von Hand oder selbstthätig (durch einen Centrifugalregler).

Die Einrichtung mit Schleifringen und regulirbaren Widerständen ist bei Motoren, die nur selten angelassen werden und dann längere Zeit ruhig weiter laufen,

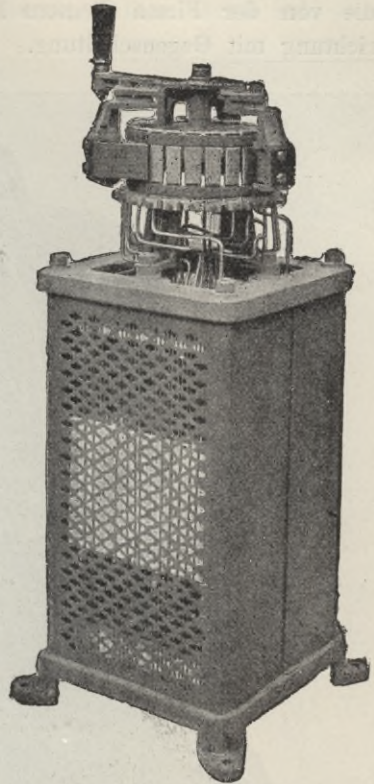


Fig. 198. Anlassschalter von Oerlikon.

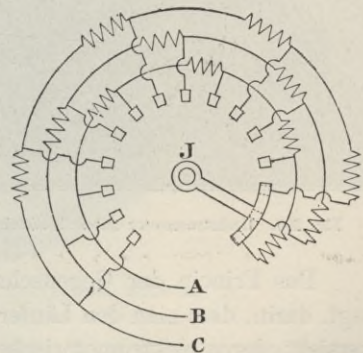


Fig. 199. Anlassschaltung von Siemens & Halske.

verhältnissmässig kostspielig; es liegt nahe, sich für diese Fälle nach einer einfacheren Anordnung umzusehen. Eine solche ist die von der Firma Siemens & Halske vielfach angewendete Einrichtung mit Gegenschaltung.

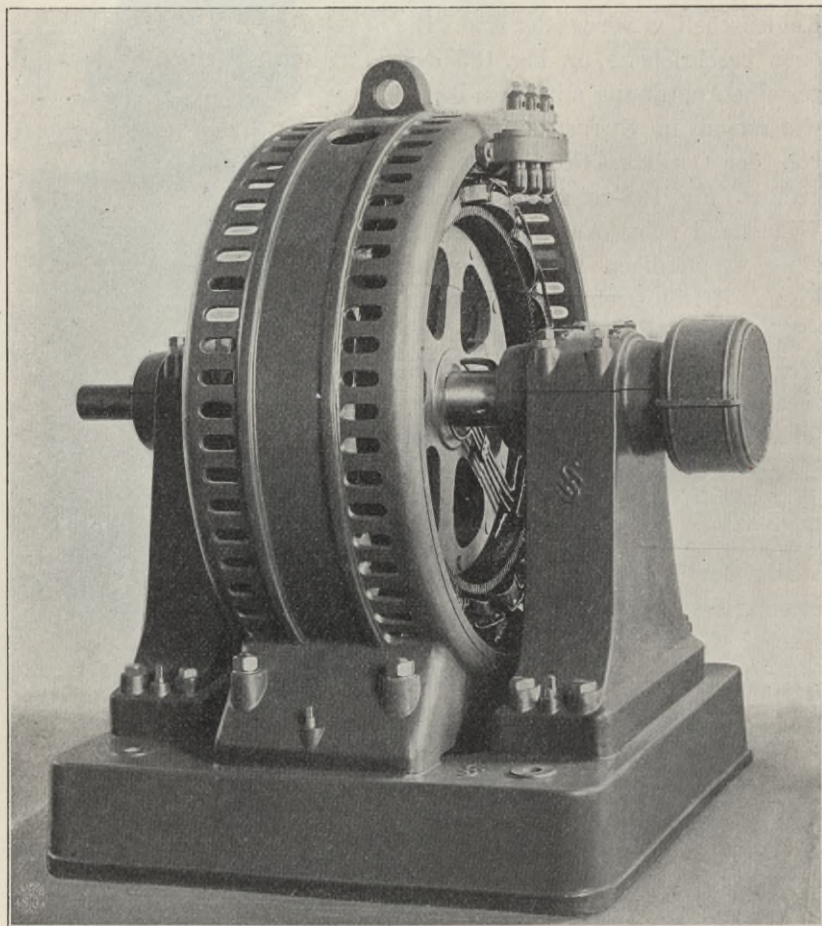


Fig. 200. Drehstrommotor mit selbstthätiger Gegenschaltung im Anker. Siemens & Halske.

Das Princip der Gegenschaltung beruht, in kurzen Worten gesagt, darin, dass man den Läufer mit mehreren getrennten Wicklungen versieht, deren elektromotorische Kräfte beim Anlaufen entgegengesetzt gerichtet sind. Hat der Motor eine gewisse Geschwindigkeit erreicht, so werden diese Gruppen parallel geschaltet, so dass der Motor von da ab in seiner normalen, ökonomisch arbeitenden Wicklungsanord-

nung weiter läuft. Durch das Gegeneinanderschalten der genannten Gruppen wird einmal erreicht, dass das vom feststehenden Theil erzeugte magnetische Drehfeld nicht in so hohem Masse von den

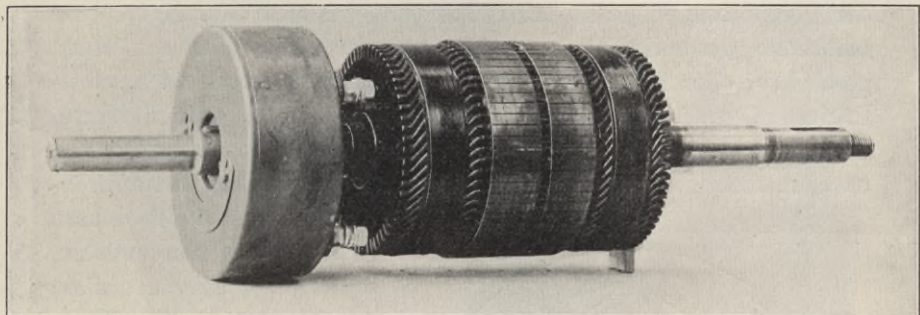


Fig. 201. Läufer mit Kurzschliesser zum Motor Fig. 200.

Amperewindungen des rotirenden Theiles abgedrosselt wird, wie bei gleicher Stromstärke in den Windungen eines nicht in Gegenschaltung

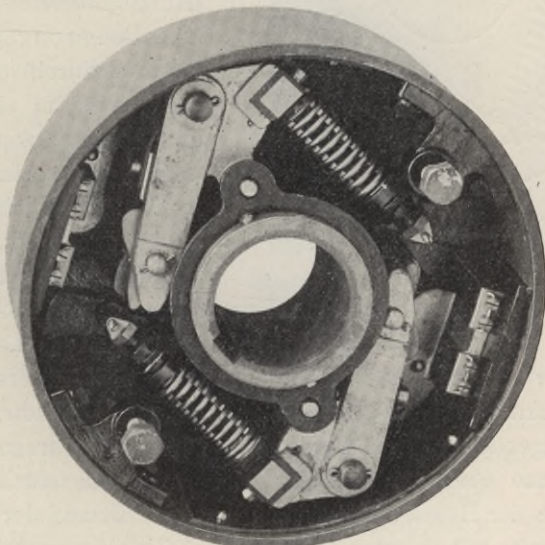


Fig. 202. Innere Einrichtung des Kurzschliessers zum Motor Fig. 200.

angeordneten Läufers; zweitens wird aber, trotz des stärkeren Feldes, keine zu grosse Stromstärke in der Läuferwicklung entstehen, weil die elektromotorischen Kräfte in den beiden zu einem Stromkreis vereinigten Gruppen entgegengesetzt gerichtet sind, während die

Widerstände der Gruppen sich addiren. Auf diese Weise lässt es sich erreichen, dass der Motor beim Einschalten keinen so hohen Strom aufnimmt, wie beim Kurzschlussanker und trotzdem eine Zugkraft bis zur normalen und darüber entwickelt. Das Kurzschliessen der gegeneinander geschalteten Gruppen, nachdem der Motor eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat, kann entweder von Hand geschehen, oder kann nach einmaliger Einstellung durch einen selbstthätigen Centrifugal-Kurzschliesser bewirkt werden. Da die erste Methode von der Willkür und Achtsamkeit des Bedienenden abhängt, und bei nicht rechtzeitiger Kurzschliessung die Wicklung des rotirenden Theiles durch starke

Erwärmung gefährden kann, so ist im allgemeinen diese Ausführung mit der Handgegenschaltung in neuerer Zeit verlassen und an ihre Stelle ist die Verwendung des selbstthätigen Centrifugal-Kurzschliessers getreten. Die Bedienung des Motors wird dadurch ebenso einfach, wie die eines Motors mit Kurzschlussanker. Fig. 200 zeigt einen zum Betriebe eines Haspels dienenden Motor, der mit dieser Einrichtung versehen ist.

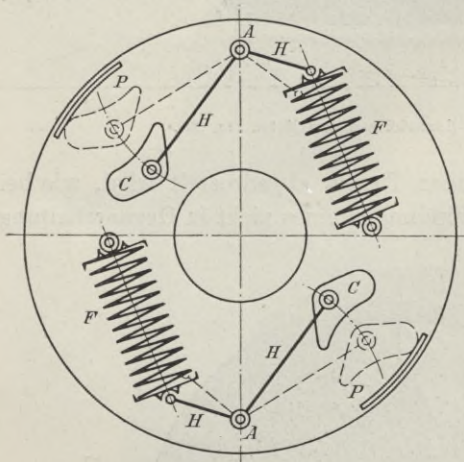


Fig. 203. Schaltungsprinzip des Centrifugal-Kurzschliessers zum Motor Fig. 200.

Fig. 201 zeigt den Läufer mit dem Kurzschliesser, Fig. 202 die innere Einrichtung und Fig. 203 schematisch das Princip des Letzteren.

In einer Trommel, die fest auf der Welle des Läufers sitzt, sind zwei doppelarmige Hebel HH drehbar um zwei diametral einander gegenüberliegende Zapfen AA gelagert. Diese Hebel tragen an ihrem längeren Arme ebenfalls drehbar gelagerte Contactstücke C . Der kürzere Arm der Hebel stützt sich gegen eine Druckfeder F , die der Centrifugalkraft, mit der das Contactstück C sich von der Achse zu entfernen strebt, entgegen wirkt. Bei einer gewissen Geschwindigkeit setzt sich der Hebel H in Bewegung, indem sich das Contactstück C der Contactplatte P nähert. Nun ist die Anordnung so getroffen, dass mit wachsendem Abstände des Contactstückes C von der Achse des Hebelarmes, an dem die Feder F angreift, kleiner wird. Der

Hebelarm H kann sogar so angebracht werden, dass das Moment der Feder, obwohl der Federdruck grösser wird, abnimmt. Infolgedessen befindet sich das Contactstück C , sobald es einmal die Ruhelage verlassen hat, in keiner Stellung mehr im Gleichgewicht. Es muss daher mit grosser Geschwindigkeit in die äusserste Lage übergehen, wobei es sich fest an die Contactplatte P anlegt. Dieser Uebergang von einer Lage in die andere macht sich durch einen kurzen Schlag im Kurzschliesser bemerkbar. Nimmt nun die Geschwindigkeit noch weiter zu, so wächst die Centrifugalkraft und das Contactstück C liegt dauernd mit grossem Druck auf der Contactplatte P auf, so dass ein sehr sicherer Contact entsteht. Damit beim Aufschlagen des Contactstückes C kein Abprallen, und dadurch ein momentanes Oeffnen des Contactes stattfindet, ist das Contactstück C drehbar am Hebel H angeordnet und gleichzeitig unsymmetrisch ausgebildet, so dass auf die eine Seite die Centrifugalkraft stärker wirkt, als auf die andere Seite. Es findet daher beim Kurzschliessen, selbst bei voller Belastung des Motors, kein nennenswerthes Funken statt.

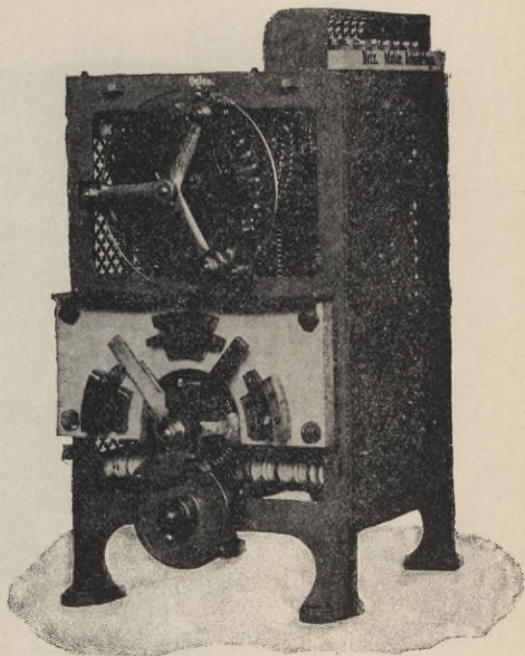


Fig. 204.

Stromwender und Widerstandscontacte am selbstthätigen Umkehranlasser der A. E. G. für Aufzüge.

Bei einstufiger Gegenschaltung kann eine Leitung mit dem Körper, und dadurch mit den Zapfen AA verbunden werden, während die beiden isolirten Leitungen mit den beiden Platten PP verbunden werden. Bei zweistufiger Gegenschaltung wird die eine Feder F stärker als die andere gespannt, so dass der eine Hebel früher in Thätigkeit tritt, als der andere. Es müssen dann die Zapfen AA isolirt werden und auf jeder Seite zwei von einander isolirte Platten P vorhanden sein, die durch die Contactstücke C unter sich mit A kurzgeschlossen werden. Der Kurzschliesser wird nach aussen hin durch eine Trommel fest abgeschlossen, um jede Beschädigung der

Theile zu verhüten; ausserdem kann die Trommel noch in einen besonderen feststehenden Schutzkasten eingebaut werden. In dieser Ausstattung ist der Motor besonders zur Verwendung an feuergefährlichen Orten geeignet, und in der That vielfach an solchen Stellen in Verwendung.

In den Figuren 204—206 ist ein für Aufzüge bestimmter selbstthätiger Umkehranlasser der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft dargestellt. Ein solcher Anlasser muss langsam und selbstthätig ent-

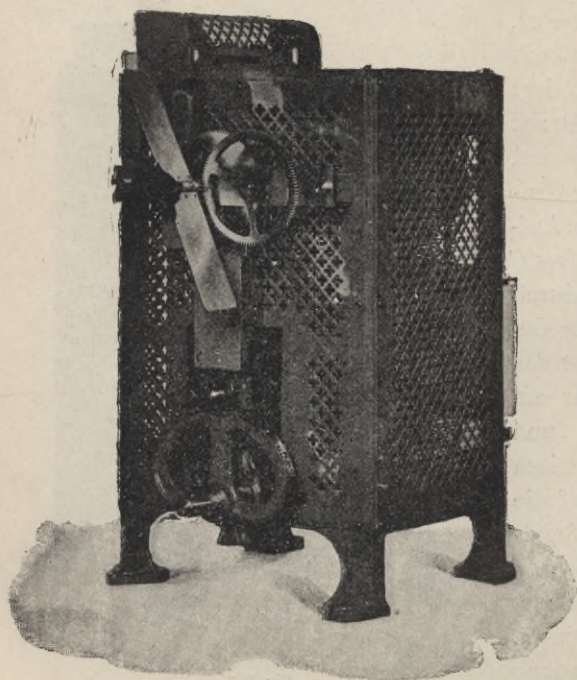


Fig. 205. Hinteransicht des Umkehranlassers Fig. 204.

sprechend der zunehmenden Geschwindigkeit des Motors den Widerstand ausschalten und zugleich für das Wechseln der Drehrichtung des Motors den Strom umkehren. Dem letzteren Zwecke dient ein Stromwender *S* und eine in Fig. 204 unter demselben sichtbare, von der Antriebswelle des Anlassers in Bewegung gesetzte Steuerscheibe. Das langsame Einschalten wird durch das in Fig. 205 oben sichtbare Laufwerk mit Windfang geregelt. Die Wirkungsweise ist

folgende: Durch die von der Steuervorrichtung im Fahrkorb je nach Fahrrichtung nach der einen oder anderen Seite gedrehte Antriebswelle wird die Steuerscheibe und durch diese der Stromwender *S* in die jeweils erforderliche Lage gebracht. Gleichzeitig wird hierbei die Sperrung des in der Mitte von Fig. 205 sichtbaren Gleitstückes ausgelöst, welches durch sein Eigengewicht herabsinkt und hierbei den Bürstenhalter *I* in Bewegung setzt, dessen Bürsten, auf den Contacten *W* schleifend, das Ein- und Ausschalten der Widerstände bewirken, wobei die Geschwindigkeit durch den Windfang geregelt wird; Fig. 206 zeigt das Schema der Stromverbindungen.

Eine andere von der Electricitäts-Actiengesellschaft vormals Schuckert & Co. gebaute Kurzschlusseinrichtung ist aus der Fig. 207 zu ersehen. Hier sind die Kurzschlusscontacte für die Läuferwicklung in einer mit der Läuferachse sich drehenden seitlich verschieb-

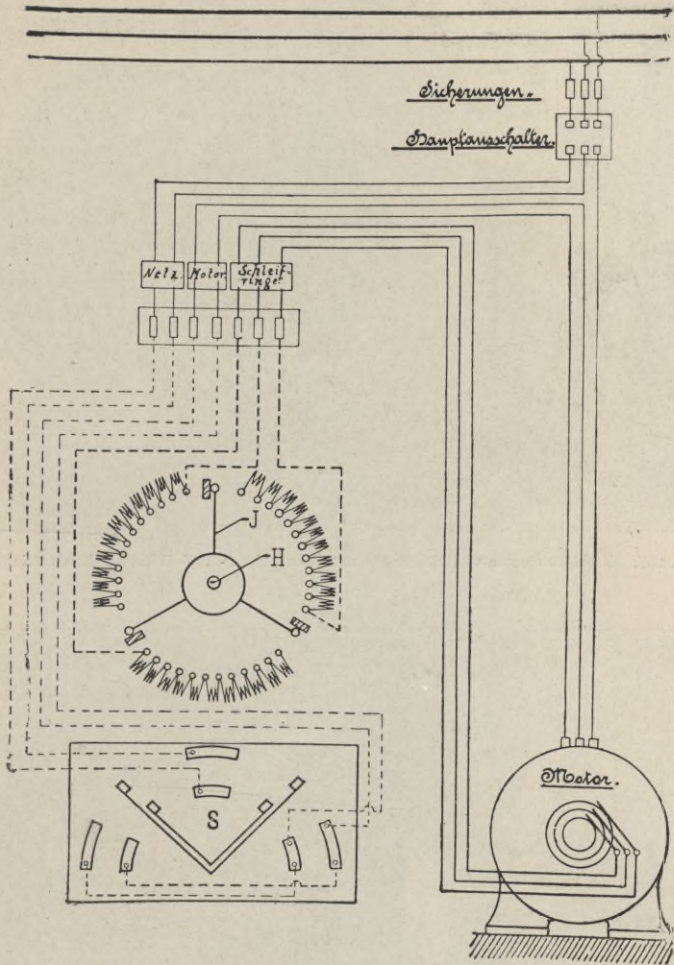


Fig. 206. Schaltungsschema des Anlassers Fig. 204.

baren Kapsel untergebracht, welche in ihren beiden Endstellungen durch ein Centrifugalpendel festgehalten wird. Die eine Stellung entspricht dem Stillstand des Motors und macht die Herstellung des Kurzschlusses so lange unmöglich, bis die Feststellvorrichtung durch das Centrifugalpendel nach Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit des Motors ausgelöst wird. Alsdann kann durch einen leichten

seitlichen Druck auf den unten links am Motor sichtbaren Handgriff der Kurzschluss bewirkt werden. In dieser Stellung hält das Centrifugalpendel die Kapsel fest; gleichzeitig wird hierbei auch die Ver-

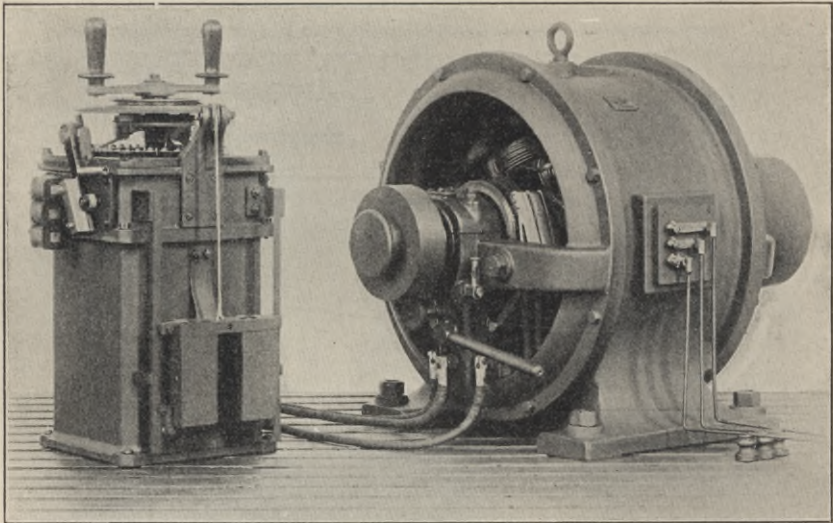


Fig. 207. Drehstrommotor von Schuckert mit Kurzschluss- und Bürstenanhebevorrichtung.

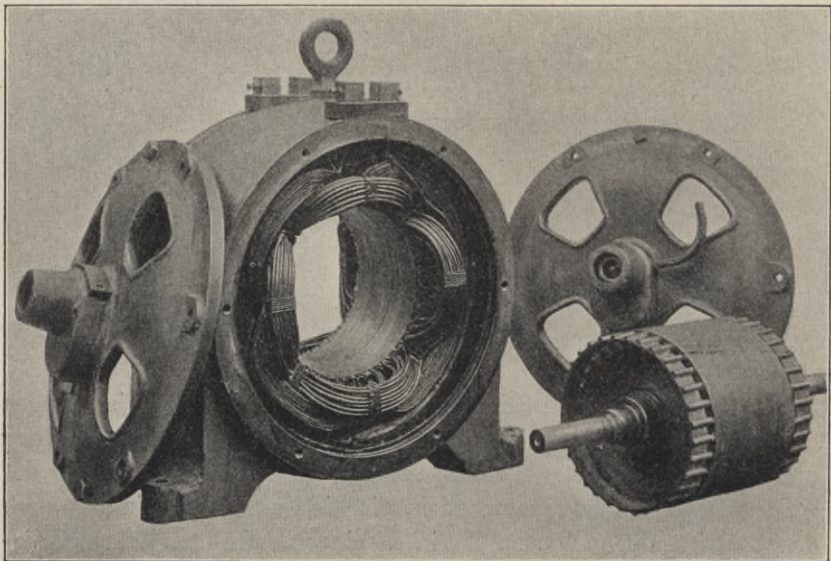


Fig. 208. Drehstrommotor von Helios (auseinander genommen).

riegelung der Bürstenabhebevorrichtung gelöst, und die sechs Bürsten, welche zu je dreien auf zwei gegenüberliegenden Bolzen angeordnet sind, selbstthätig abgehoben (D. R. P. 114828 und 116267). Gleichzeitig schaltet sich der mit Klebemagnet versehene Anlasser selbstthätig aus.

Sinkt die Umdrehungszahl unter eine bestimmte Grenze, sei es dass der Motor abgestellt wird, oder dass er in Folge von Ueberlastung stehen bleiben will, so wird der Kurzschluss selbstthätig auf-

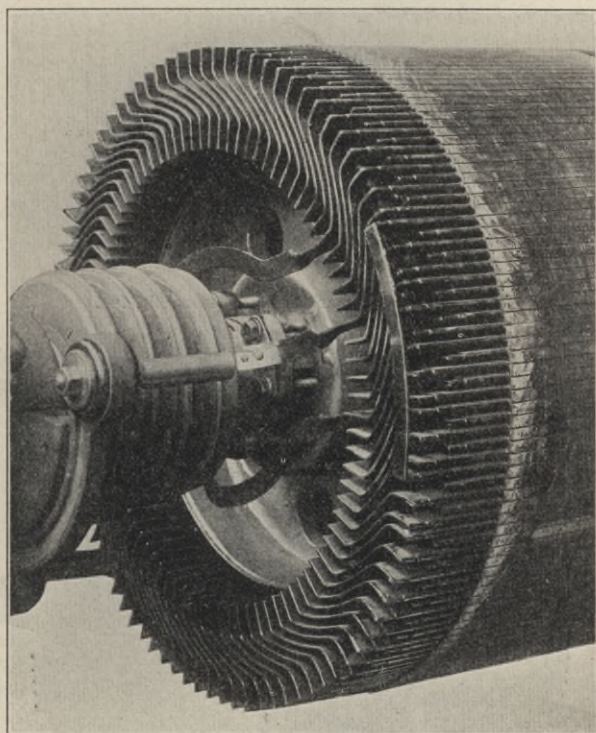


Fig. 209. Läufer eines Drehstrommotors von Siemens & Halske.

gehoben und kann erst wieder hergestellt werden, wenn der Motor seine normale Geschwindigkeit wieder erreicht hat.

Einzelheiten einiger ausgeführten Motoren. Fig. 208 zeigt einen auseinander genommenen Drehstrommotor der Firma Helios, der Läufer ist ähnlich gebaut wie der der Fig. 183. Der Motor ist seitlich durch an den Ständering angeschraubte Platten abgeschlossen, die auch die Lager für die Läuferwelle enthalten. Den Läufer eines Drehstrommotors von Siemens & Halske zeigt Fig. 209. Es ist dies ein Läufer mit Dreieckschaltung, deren Nullpunkt der auf der Figur

rechts sichtbare Riegel darstellt. Die Unregelmässigkeit der Stäbe innerhalb des Bügels bedingt die Wickelart, die aus Fig. 210 zu ersehen ist. Würden die Stäbe vollständig regelmässig eingebaut, so käme man an der Anfangsstelle der Wickelung mit dem Ende

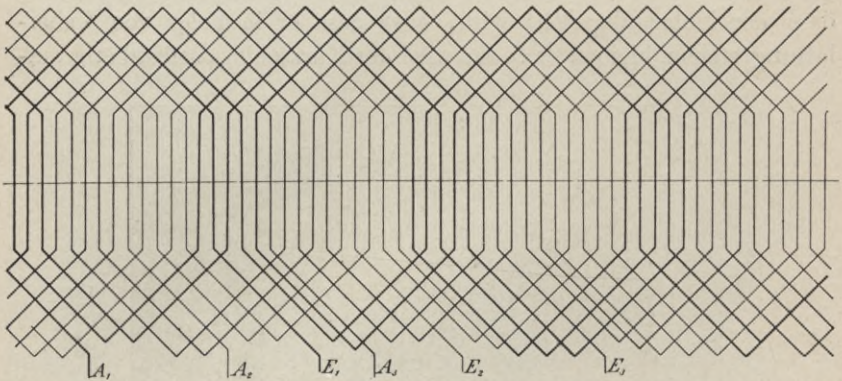


Fig. 210. Wickelungsschema des Läufers Fig. 209.

wieder zurück und es entstände ein in sich kurz geschlossener Anker. Um dies bei der hier gezeichneten Ankerform zu vermeiden, muss an einer Stelle die Wickelung unregelmässig werden.

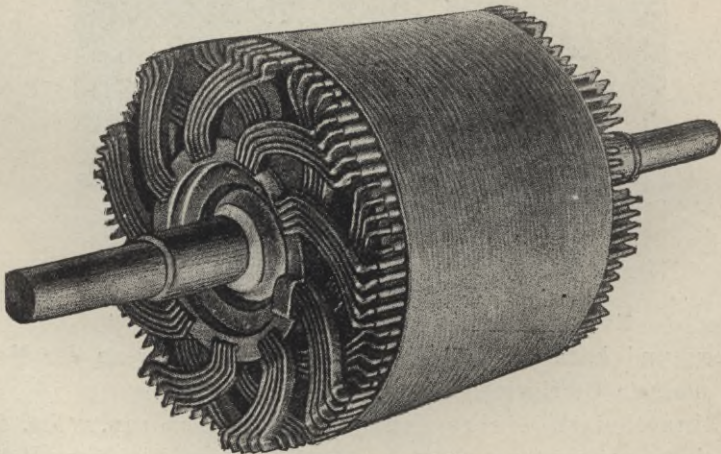


Fig. 211. Läufer von Oerlikon.

Der in Fig. 211 gezeichneten Läufer ist von der Oerlikon-Gesellschaft gebaut. Die Wickelung ist dreiphasig, für ein sechspoliges Feld bestimmt; es sind fünf Leiter für jeden Pol und jede Phase vorhanden, also 90 im Ganzen. Fig. 212 stellt das Wickelungsschema

eines gleichen Läufers von Kolben & Co. dar, der ebenfalls fünf Leiter für jede Phase und jeden der sechs Pole besitzt, also ebenfalls im Ganzen 90 Leiter.

Eine Eigenschaft der Käfigform der Läufer ist noch von Interesse. In allen Fällen, in denen die Zahl der Leiter des Läufers einen

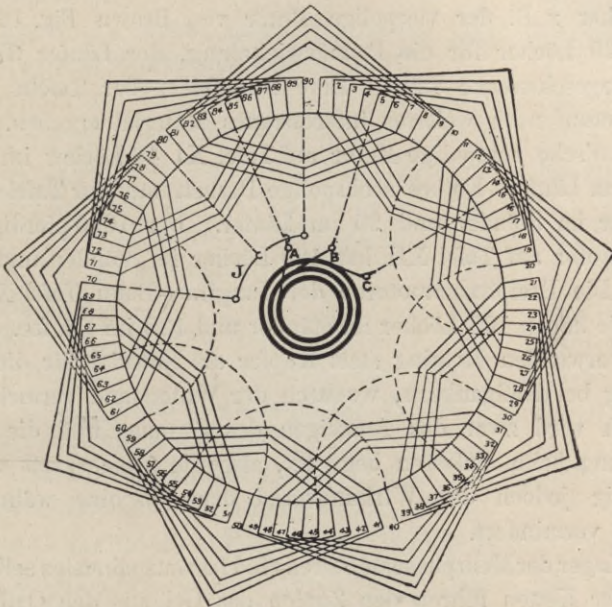


Fig. 212. Wickelungsschema eines Läufers von Kolben & Co.

gemeinsamen Factor mit der Zahl der Pole im rotirenden Felde hat, hat der Läufer (besonders beim Anlaufen) das Bestreben als blosser Transformator zu wirken, also schwer anzulaufen. Eine Form wie die der Figur 213 würde thatsächlich einen vorzüglichen Transformator abgeben, der sich nicht drehen würde; das Drehfeld würde einfach synchrone dreiphasige Ströme in den Wicklungen des inneren Theiles hervorrufen. Diese Anordnung mit breiten Zähnen würde thatsächlich nicht von selbst anlaufen und, wenn durch eine äussere Kraft eine Bewegung eingeleitet würde, wahrscheinlich nur als Synchronmotor laufen. Bei allen Inductionsmotoren wird das gleiche der

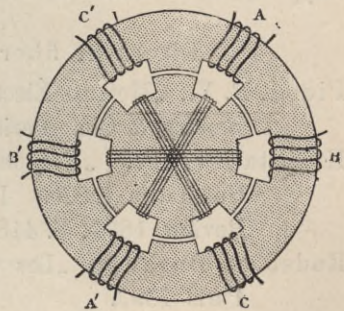


Fig. 213.

Fall sein, wenn die Zahl der auf einen Pol entfallenden Leiter oder Schlitze des Läufers mit der des Ständers übereinstimmte. Dies vermeidet man gewöhnlich, indem man die Zahl der Leiter oder Gruppen bei Läufer und Ständer verschieden wählt und geht hiermit bei Kurzschlusswickelungen so weit, dass diese beiden Zahlen auch keinen gemeinsamen Factor haben.

So hat z. B. der vierpolige Motor von Brown Fig. 161/62 im Ständer 40 Löcher für die Primärwicklung, der Läufer 37 beiderseits kurzgeschlossene Stäbe. Eine Durchsicht der Tafeln wird in Bezug hierauf noch weiteres interessantes Material ergeben. So hat der Brown'sche achtpolige Motor auf Tafel XI 48 Löcher im Ständer und 96 im Läufer, Kolbes sechspolige Drehstrommotor Tafel XIII hat 36 Löcher im Ständer und 90 im Läufer. Der 1000 pferdige zwei-phasige Motor auf Tafel XII hat 120 Löcher im Ständer und 180 im Läufer. Die Dreiphasenmotoren der Jungfrau-Bahn Tafel XIV sind 6 polig, sie haben 108 Löcher im Ständer und 128 im Läufer. Einzelne Firmen verwenden Messing statt Kupfer als Material für die Läuferwicklung bei Käfigankern, wodurch der Widerstand vermehrt wird. Hierdurch wird zwar das Ansteigen des Stromes und die Phasenverzögerung beim Anlassen begrenzt, also die Anzugskraft vermehrt, gleichzeitig jedoch der Wirkungsgrad der Maschine während des Betriebes vermindert.

Die Lager der Mehrphasenmotoren sind fast ausnahmslos selbsttönd; Ringe oder Ketten führen den Zapfen das Oel aus den Oelbehältern gleichmässig zu. Derartige Lagerconstructions sind aus den Tafeln zu ersehen, z. B. aus Tafel II, VIII und XII. Eine constructiv gehaltene Zeichnung eines solchen Lagers für einen 75 pferdigen Motor gibt Kapp in seinen Elektromechanischen Constructionen auf Tafel XVIII.

Literatur über Mehrphasenmaschinen.

- Picou, R. V., „Moteurs Électriques à Champs Magnétique Tournant“. Baudry & Cie. Paris 1892.
- Hospitalier, E., „Polyphased Alternate Currents“. Alabaster, Gatehouse & Co. London 1892 (veröffentlicht in Electr. Review 1891, S. 418, 474, 501, 534, 554, 590, 724.
- Rodet et Busquet, „Les courants polyphasés“. Gauthier-Villars. Paris 1893.
- Kapp, G., „Electric Transmission of Energy“. Whittaker. London 1894. — Deutsche Uebersetzung von Holbern und Kahle. 3. Aufl. J. Springer. Berlin 1898.

- Snell, A. P., „Electric Motive Power“. Electrician Series. London 1894.
- Martin, T. C., „Inventions, Researches and Writings of Nic. Tesla, with special reference to his work in Polyphase Currents and High Potential Lighting“. The Electrical Engineer. New York 1894.
- Banti, Angelo, „J Motori Elettrici a Campo Magnetico Rotatorio“. Tipografia Elzeviriana. Rome 1894.
- H. F. Parshall und H. M. Hobart, „Armature Winding of Electric Machines“. D. Van Nostrand Co. New York 1895.
- Blondel, A., „Du Role des Fuites Magnétiques dans les Moteurs à Champ Tournant“. E. Mauchaussat. Paris 1896.
- Krämer, J., „Der Drehstrom“. H. Costenoble. Jena 1896.
- Rühlmann, R., „Grundzüge der Wechselstrom-Technik“. O. Leiner. Leipzig 1897.
- Steinmetz, C. P., „Theory and Calculation of Alternating-Currant Phenomena“. W. J. Johnston Co. New York 1898.
- Rodet, J., „Distribution de l'Énergie par Courant Polyphasés“. Gauthier-Villars. Paris 1898.
- Kapp, G., „Elektromechanische Constructionen“. J. Springer. Berlin 1898. Zweite Aufl. 1902.
- Blondel, A., „La Traction Électrique“. Baudry et Cie. Paris 1898.
- Behrend, B. A., „The induction motor“. El. World and Engineer. New York 1901.
- Boy de la Tour, „Méthode pratique pour calculer les moteurs asynchrones polyphasés“. Ch. Béranger. Paris 1901.
- Vergleiche auch die Literaturangaben am Schlusse des Kapitels VIII.

Kapitel VII.

Graphische Theorie der mehrphasigen Motoren.

In diesem Kapitel sollen die Phasenbeziehungen zwischen Strom und EMK im Ständer und Läufer und ihr Verhältniss zu den magnetischen Kraftlinien betrachtet werden. Wir wollen suchen, uns ein vollständiges Bild der Veränderungen zu machen, welche sich in den verschiedenen Theilen eines Mehrphasenmotors unter verschiedenen Belastungen abspielen. Daneben werden wir unser Augenmerk darauf richten, wovon der Wirkungsgrad abhängt, woher die Zugkraft rührt und warum es zweckmässig ist, in die Stromkreise des Läufers beim Anlassen des Motors Widerstände einzuschalten.

Bei diesen Betrachtungen wollen wir ein Uhrdiagramm benutzen, worin einige der üblichen Bestimmungen über die Richtung der Vektoren geändert sind. Denn dieses Diagramm hat nicht nur die gegenseitigen zeitlichen Phasenunterschiede zwischen den verschiedenen Grössen auf einem Kreise darzustellen (vgl. S. 11), sondern seine Aufgabe ist ausserdem, durch die Richtung seiner Vektoren die gegenseitigen Stellungen der Strombänder und der magnetischen Kraftlinien (vgl. S. 210) anzugeben.

Auf S. 168 haben wir gesehen, wie Bänder magnetischer Kraft längs des Luftspaltes des Motors dahinziehen; diese Bewegung ist das Ergebniss der zusammenwirkenden Ströme in Ständer und Läufer. Auch haben wir dort gezeigt, dass der zweipolige und der mehrpolige Motor einander gleichwerthig sind, und haben gesehen, in welchen Beziehungen sie sich von einander unterscheiden. Es ist nun für die Anwendung unseres Uhrdiagramms zweckmässig, einen zweipoligen Motor vorauszusetzen und einige Festsetzungen zu treffen, um die Strom- und Kraftbänder durch die Linien des Diagramms darzustellen.

Da es sich darum handelt, die Theorie für praktische Zwecke und quantitativ darzustellen, und da unsere Ableitungen auf wirklich gebaute und im Handel zu habende Motoren angewandt werden sollen, wollen wir uns bemühen, Alles auf seine einfachste Form zurückzuführen und in unser geistiges Bild des Vorgangs nur das für die Theorie Wesentliche aufzunehmen. Deshalb wollen wir zunächst einen Motor betrachten, dessen Windungen in möglichst einfacher Art hergestellt sind. Die Leiter des Läufers und des Ständers mögen einfache Kupferstäbe sein, welche durch Löcher des Eisenkernes hindurchgesteckt sind. Die zu betrachtenden elektromotorischen Kräfte sind einfach die in dem einzelnen Stabe inducirten, und die Ströme werden in einer sogleich zu besprechenden Weise ausgedrückt in Ampere auf das Centimeter des Läuferumfangs. Man wird finden, dass diese Methode, elektromotorische Kräfte auszudrücken, leicht auf jedes beliebige Wickelungsschema ausgedehnt werden kann, und dass die durch graphische Construction gefundenen Werthe richtig in Volt und Ampere an den Klemmen der Maschine umgerechnet werden können.

Wenn die Leiter eines Läufers regelmässig vertheilt sind, etwa wie die in Fig. 211, so ist klar, dass es in theoretischer Beziehung keinen oder nur geringen Unterschied macht, wie oft die Zahl der mit Leitern ausgefüllten Löcher vervielfacht wird, vorausgesetzt, dass der gesammte Kupferquerschnitt derselbe bleibt. Wenn wir die Zahl der Löcher sehr bedeutend vermehren, so würden wir eine gleichmässige Vertheilung des Kupfers um den Läufer erhalten, so dass wir von dem Querschnitt des Kupfers für 1 cm des Läuferumfangs sprechen können. Um zu diesem Ziel zu gelangen, haben wir im praktischen Falle nur den gesammten Querschnitt aller Kupferleiter durch die Zahl der Centimeter des äusseren Läuferumfangs zu dividiren. Wenn wir die Länge der Leiter kennen und die Endverbindungen berücksichtigen, so lässt sich der Widerstand des Leiterriemens berechnen, der auf 1 cm des Umfangs kommt (vgl. das Beispiel auf S. 212). Diesen Widerstand wollen wir mit r_2 bezeichnen. Nun sei der Verlauf der magnetischen Kraftlinien im Luftspalt ähnlich dem in Fig. 216 dargestellten, und seine Vertheilung sei derart, dass die magnetische Dichte \mathfrak{B} sich wie eine Sinusfunction ändert, wenn wir um den Umfang fortschreiten. Ferner mögen diese Kraftlinien längs des Luftspaltes mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von v_1 cm in der Sekunde dahinziehen, während die Leiter des Läufers sich mit der kleineren

Geschwindigkeit von v_2 cm in der Sekunde bewegen; dann schneiden die Leiter die Kraftlinien mit der Geschwindigkeit $v_1 - v_2$. Die EMK in irgend einem Leiter wird für jeden Augenblick ausgedrückt durch

$$(v_1 - v_2) \mathfrak{B} \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ Volt,}$$

worin l die wirksame Länge eines Leiters in cm ist. Wenn \mathfrak{B} sich nach einer Sinusfunction ändert, so thut dies die EMK in derselben Weise. Wenn wir nun diese EMK durch r_2 dividiren, erhalten wir das, was wir den Strom auf das cm des Umfanges nennen; er möge mit i_2 bezeichnet werden. Auch der Strom ändert sich nach einer Sinusfunction. In den wirklich ausgeführten Motoren ist dieser Strom nicht gleichmässig um den Umfang vertheilt, weil die Leiter Gruppen bilden; aber wir werden später sehen, dass die praktisch eintretende Wirkung richtig berechnet werden kann, indem man den Breitencoefficient für die Spulen in Rechnung setzt (vgl. S. 81). Wegen unregelmässiger Vertheilung siehe Kap. XIII.

Um ein Diagramm herzustellen, welches sich für verschiedene Arten der Wickelung verwenden lässt, muss man natürlich von einem Normalfall ausgehen, mit dem alle anderen verglichen werden; dafür eignet sich am besten der der gleichmässigen Vertheilung um den Läufer. Auch beim Ständer kann man die Wickelung auf diesen Normalfall zurückführen und den Querschnitt auf 1 cm des Umfangs beziehen, wobei der letztere längs des Luftspaltes gemessen wird; der Widerstand r_1 dieses Querschnittes einschliesslich der Verbindungsstücke lässt sich dann berechnen (praktische Einzelheiten siehe S. 214). Wir können demnach auch beim Ständer von dem auf 1 cm des Umfangs entfallenden Strom sprechen; dieser soll mit i_1 bezeichnet werden. Demnächst müssen wir die Menge der Kraftlinien kennen, welche in der auf S. 170 beschriebenen Weise längs des Luftspaltes ausweichen und zur Triebkraft nichts beitragen; hieraus lässt sich die Selbstinduction unseres Normalleiters, welche durch die angegebene Ursache hervorgebracht wird, berechnen. Wie dies ausgeführt wird, zeigt das Beispiel auf S. 215. Diese Selbstinduction eines Normalleiters bezeichnen wir mit L_1 für den Ständer, mit L_2 für den Läufer.

Zwei andere Grössen, die wir kennen müssen, sind der magnetisirende Strom in Ampere für das cm des Umfangs, und der Kernverlust-Strom, der ähnlich ausgedrückt wird. Wie man diese Grössen erhält, wird auf S. 217—219 gezeigt.

Wir sind nun im Stande, ein Uhrdiagramm zu entwerfen, welches uns die Phasenbeziehungen zwischen den verschiedenen Strömen und Spannungen im Motor angibt. Es gibt mehrere Wege, um die Betrachtung der Aufgabe zu beginnen, je nach den zu Grunde liegenden Angaben. Wie bei der Betrachtung des feststehenden Transformators, so ist es auch bei der des umlaufenden Inductionsmotors am einfachsten, mit der Annahme zu beginnen, dass der Eisenkern einer bestimmten cyklischen Folge der Magnetisirung unterworfen ist. Hieraus und aus der Kenntniss der Windungen können wir sowohl vorwärts als rückwärts rechnen und die Werthe der primären und secundären Ströme berechnen. Deshalb wollen wir zunächst den Fall betrachten, wo wir annehmen, dass \mathfrak{B}_1 , v_1 und v_2 gegeben sind. Danach kommt der Fall, wo die speisende Spannung und die Leistung des Motors vorgeschrieben sind.

Wir haben oben bemerkt, dass unter dem Zusammenwirken von Ständer und Läufer Bänder magnetischer Kraft um die Maschine herumlaufen. Diese induciren elektromotorische Kräfte in den Kupferwindungen. In der primären oder Ständerwicklung induciren sie eine EMK, welche der Gegenkraft ähnlich ist, die im Anker eines Gleichstrommotors erzeugt wird, oder derjenigen in einer Drosselspule oder in der Primärspule eines Transformators. In der secundären oder Läuferwicklung induciren sie die EMK, welche die treibenden Ströme erzeugt. Wir haben nun Ausdrücke für diese inducirten EMKe zu suchen.

Wenn \mathfrak{B}_0 der Scheitelwerth von \mathfrak{B} im Luftspalt und l die wirksame Länge eines Leiters im Ständer ist, so lässt sich der Scheitelwerth der Spannung, welche durch die umlaufenden Kraftlinien zwischen den Enden eines Ständerleiters inducirt wird, ausdrücken durch $v_1 \cdot \mathfrak{B}_0 \cdot l \cdot 10^{-8}$. Wir ziehen nach Fig. 214 eine Linie OE , um dies darzustellen; ein passender Maassstab ist 10 cm für 1 Volt. In Fig. 214 ist der Maassstab nicht genau festgehalten worden, weil einige Grössen dafür zu geringfügig waren. Nun berechnen wir den Scheitelwerth der Spannung, welche zwischen den Enden eines Leiters des Läufers durch die umlaufenden Kraftlinien inducirt wird. Diese ist gleich $(v_1 - v_2) \mathfrak{B}_0 \cdot l \cdot 10^{-8}$. Im gleichen Maassstab stellt OE_2 diese Grösse dar, wobei OE_2 in derselben Richtung wie OE aufzutragen ist.

Demnächst brauchen wir den Winkel, um den die Phase des Läuferstromes hinter der von OE_2 zurückbleibt. Dies wird

folgendermaassen berechnet. Wenn der speisende Strom die Frequenz n_1 besitzt, so ist die Frequenz des im Läufer inducirten Stromes $\frac{v_1 - v_2}{v_1} \cdot n_1$, wir bezeichnen dies durch n_2 . Dann wird der Verzögerungswinkel so gross sein, dass seine trigonometrische Tangente gleich $2\pi n_2 L_2 / r_2$ ist. Es wird gezeigt werden (S. 217), dass der letztere Ausdruck die Tangente des Verzögerungswinkels des Stromes angibt, der eine Anzahl Leiter durchfliesst, die Seite an

Seite liegend ein Band bilden und mit anderen Leitern derselben Art neben oder hinter einander geschaltet sind. Es kommt nicht darauf an, welches Wicklungsschema angewandt wird, ob es zwei- oder dreiphasig ist, oder ob es die Reihenschaltung einer grossen Leiterzahl oder die Nebeneinanderschaltung von wenigen dicken Stäben verlangt.

Der Verzögerungswinkel des Stromes im Läufer, der auf diese Weise erhalten wird, ist ein kleiner Winkel, von der Grössenordnung 5° etwa bei voller Belastung. Dass er klein ist, rührt von dem geringen Werthe von n_2 her. Wir bezeichnen diesen Verzögerungswinkel im Läufer mit ψ . Nun legen wir den Winkel ψ an OE an und ziehen OC , welches den Läuferstrom darstellen soll. Von E_2 fallen wir das Lot $E_2 R_2$, welches von OC_2 den Theil OR_2 abschneidet. Dieser Theil OR_2 stellt die Componente der inducirten EMK dar, welche den Strom durch r_2 treibt, während $E_2 R_2$ die Componente bedeutet,

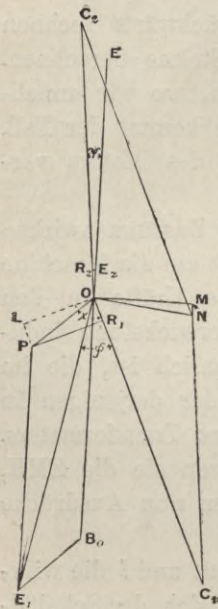


Fig. 214.

welche die EMK der Selbstinduction im Normalleiter überwindet. Indem wir die Grösse OR_2 durch den Widerstand r_2 dividiren, erhalten wir den Scheitelwerth des Stromes für 1 cm Umfang (vgl. S. 203). Wenn der Motor dreiphasig gewickelt ist (wie in den Fällen, wo es erwünscht ist, einen Anlasswiderstand einzuführen, S. 187), wird der Scheitelwerth des inducirten Stromes nur 0,95 von demjenigen sein, den man erhält, wenn man OR_2 durch r_2 dividirt (vgl. S. 47 und 203). Er ist in diesem Fall über einen breiteren Riemen ausgebreitet, und die ganze Summe seiner magnetischen Wirkung ist so gross, dass sie etwa 0,95 der Zugkraft erzeugt, welche bei einer sinusartigen Vertheilung des Stromes her-

vorgebracht wird. Da r_2 ein kleiner Bruch ist, so erhält man bei der Division von OR_2 durch r_2 einen verhältnissmässig grossen Werth für OC_2 , den Scheitelwerth des Läuferstromes für 1 cm Umfang. Wir müssen für OC_2 einen für die Darstellung passenden Maassstab auswählen. Da der Werth gewöhnlich auf einige Hundert Ampere steigt, so ist die Annahme von 1 mm für 1 Ampere zweckmässig. OC_2 zeigt die Stelle des Motors an, wo der Strom seinen positiven Scheitelwerth erreicht (vgl. Fig. 173 und 216).

Nun ziehen wir OM rechtwinklig zu OE , um den magnetisirenden Strom für 1 cm Umfang darzustellen. Dieser wird aus den magnetischen Widerständen der Wege im Eisen berechnet, wie auf S. 218 gezeigt wird. Er steht rechtwinklig zu OE , weil die Richtung des Magnetismus rechtwinklig steht zu der des magnetisirenden Stromes. Es folgt daraus, dass in dem Augenblick, wo der magnetisirende Strom (oder die Resultirende mehrerer Ströme) in einer bestimmten Richtung seinen Scheitelwerth erreicht hat, der Magnetismus seinen Scheitelwerth in der zu jener senkrechten Richtung des Diagramms annimmt. Darauf ziehen wir MN parallel zu OE , um den Kernverlust-Strom für 1 cm Umfang darzustellen (siehe S. 219). Die Verbindungslinie ON gibt den wirksamen Strom an, der den Magnetismus durch den die Leiter umschliessenden magnetischen Kreis treibt. Dies muss die gemeinsame Wirkung des Läufer- und Ständerstromes sein. Wenn wir daher die Verbindung C_2N ziehen und das Parallelogramm C_2OC_1N vervollständigen, so gibt OC_1 den Ständerstrom für 1 cm Umfang an, der aber in der Phase nicht genau OC_2 entgegengesetzt ist, sondern einen solchen Phasenunterschied ihm gegenüber hat, dass sich als Resultirende ON ergibt. Die Länge von OC_1 in Millimetern ergibt den Scheitelwert des Stromes auf 1 cm Umfang des Ständers in Ampere. Durch Multiplication mit r_1 erhalten wir die Spannung, welche nöthig ist, um diesen Strom durch einen Normalleiter zu treiben. Der letztere Werth wird längs OC_1 im Maassstab der Spannung (1 Volt = 10 cm) aufgetragen und ist in Fig. 214 durch OR_1 angegeben. Wir berechnen nun die Spannung, welche nöthig ist, um die Reactanz des Normalleiters zu überwinden, welche durch die ausweichenden magnetischen Kraftlinien hervorgerufen wird. Sie ist gleich $2\pi n_1 L_1 i_1$; diesen Werth tragen wir im Spannungsmaassstab als OL rechtwinklig zu OR_1 auf, so dass es diesem um 90° voraneilt. Vervollständigen wir nun das Viereck $OLPR_1$, so erhalten wir OP , welches um den Winkel χ voraneilt, als Spannung, welche nöthig ist, um

den Strom OC_1 zu erzeugen, ohne die elektromotorische Gegenkraft zu berücksichtigen, die in der Ständerwicklung durch die vorüberziehenden Bänder magnetischer Kraft inducirt wird. Die Spannung, die zur Ueberwindung der letzteren erforderlich ist, wird natürlich durch OB_0 , das gleich und entgegengesetzt zu OE ist, dargestellt. Setzt man Letzteres mit OP zusammen, wie in der Figur dargestellt, so erhält man OE_1 , den Scheitelwerth der wirksamen Spannung, welche jedem Ständerleiter zugeführt werden muss. Multiplicirt man diese Spannung mit der Zahl der Ständerleiter, welche in jeder Phase in Reihe geschaltet sind, so erhält man den Scheitelwert der Spannung (für die Phase), unter der der Strom geliefert werden muss, damit \mathfrak{B} , v_1 und v_2 die Werthe erhalten, die von vornherein dafür angenommen worden sind. Die Methode, nach welcher man bestimmt, welche Spannung und Stromstärke den Klemmen eines Motors von gegebener Grösse und Anordnung zugeführt werden muss, ist nun leicht aus dem praktischen Beispiel auf S. 212 zu verstehen.

Wir wollen nun die Veränderungen betrachten, welche sich in dem Diagramm abspielen, während die Belastung sich in verschiedener Weise ändert. Zunächst sieht man, dass \mathfrak{B}_0 bei allen normalen Belastungen, wenn die Klemmenspannung constant gehalten wird, auch nahezu constant bleibt; da nun die Zugkraft proportional ist dem Product von \mathfrak{B}_0 und i_2 (Läuferstrom) und dem $\cos \psi$, dem Verzögerungswinkel von i_2 (ψ ist klein bei allen Belastungen zwischen der höchsten Belastung und dem Leerlauf, sobald der Motor im Gang ist), so folgt, dass der Läuferstrom i_2 sich annähernd im Verhältniss der Belastung ändert, und dass die inducirte EMK, welche diesen Strom erzeugt, gleichfalls nahezu proportional zur Belastung ist. Nun ist die EMK, unter sonst gleichen Bedingungen, proportional zu $v_1 - v_2$, dem Schlipf zwischen den Leitern des Läufers und dem magnetischen Feld im Ständer. Daher ist auch der Schlipf $v_1 - v_2$ annähernd proportional zur Belastung. Bei Leerlauf hat der Läufer praktisch keinen Schlipf, da er annähernd in Gleichlauf mit dem Feld ist. Das Diagramm bei Leerlauf zeigt Fig. 215. Der magnetisirende Strom bleibt nahezu gleich bei allen gewöhnlichen Belastungen, aber i_2 ist nur gerade ausreichend stark, um den Motor in seinen Lagern zu drehen, und OE_2 ist in der That sehr klein. Der magnetisirende Strom ist bei diesen Motoren stets beträchtlich in Folge des magnetischen Widerstandes im Luftspalt, und beträgt ungefähr ein Viertel des Stromes

bei voller Last. Dies bewirkt, dass die Gegenspannung OL , welche von den ausweichenden Kraftlinien herrührt, schon bei Leerlauf beträchtlich ist; da nun diese Spannung bei Leerlauf mit der speisenden Spannung näher in der Phase übereinstimmt als bei voller Last, so ergibt sich, dass die Grösse $v_1 \mathfrak{B}_0 l \cdot 10^{-8}$ bei allen gewöhnlichen Belastungen annähernd constant ist. Wir werden sehen, dass der Verzögerungswinkel des primären Stromes $E_1 OC_1 (= \varphi)$ zwischen dem Strom im Ständer und der äusseren EMK bei Leerlauf gross ist. Er nimmt allmählich ab, in dem Maasse, wie der Läuferstrom wächst, bis er bei voller Last ungefähr 25° beträgt und einen Leistungsfactor von etwa 0,9 ergibt.

Ein Uhrdiagramm von der hier benutzten Art gibt uns die Phasenbeziehungen zwischen den verschiedenen Grössen, und setzt uns hierdurch in den Stand, uns ein geistiges Bild der gegenseitigen Stellungen der verschiedenen Grössen im Motor zu machen. Zum Beispiel können wir uns den Fall unseres idealen zweipoligen Motors vorstellen, wie in Fig. 216 gezeichnet; wir sehen für einen bestimmten Augenblick die gegenseitige Lage der Bänder der magnetischen Kraft und der Scheitelwerte des Stromes in Läufer und Ständer. Der äussere Ring stellt die Leiter des Ständers dar und die Tiefe der Schattirung deutet die Stärke des Stromes an. Der Vector C_1 führt nach dem Punkte, wo der Strom im positiven Scheitelwerthe steht. Der mittlere Ring gibt die Vertheilung der magnetischen Dichte, welche bei \mathfrak{B}_0 radial nach innen gerichtet ist und ein Maximum hat. Der Läuferstrom wird durch den inneren Ring und den Vector C_2 dargestellt. Die zwei Stromvectors C_1 und C_2 sind einander nahezu entgegengesetzt und erzeugen die Resultirende ON , den Strom, welcher den Magnetismus durch den Kreis treibt. Der Vector der magnetischen Dichte $O\mathfrak{B}_0$ steht indessen nicht genau senkrecht zu NO . Er bleibt ein wenig dahinter zurück in Folge der Hysteresis und der Wirbelströme im Eisen. Der Vector OM stellt die arbeitslose Componente des magnetisirenden Stromes dar, welche mit dem Magnetismus genau in Quadratur steht, während MN der Kernverlust-Strom ist. Indem nun der Magnetismus umläuft, dreht sich die ganze Figur mit der

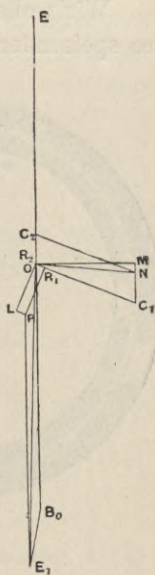


Fig. 215.

gleichen Geschwindigkeit; die feststehenden Ständerleiter führen Wechselströme von der Frequenz n_1 , während in den umlaufenden Leitern des Läufers der Strom seine Richtung nur so rasch wechselt, als die umlaufende Figur sie überholt.

Eine ähnliche Figur kann man zur Darstellung der EMKE zeichnen. Wenn Läufer und Ständer mit Wicklungen aus einzelnen Leitern (anstatt gleichmässig vertheilten Wicklungen) versehen werden, so können wir uns gleichwohl den Vorgang, wie die Strombänder in den Spulen wechseln, in derselben Weise vorstellen.

Wir wollen nunmehr annehmen, dass Spannung und Frequenz des speisenden Stromes gegeben seien, und werden hieraus und aus

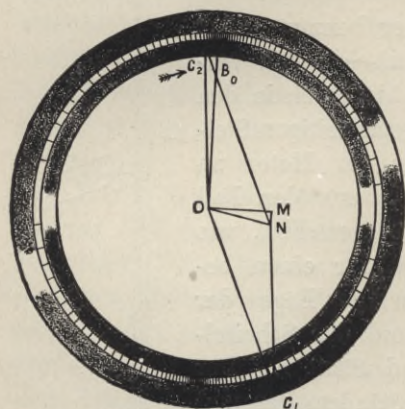


Fig. 216.

den Abmessungen des Motors das Diagramm für eine bestimmte Zugkraft zeichnen. Zu diesem Zweck muss zunächst der Scheitelwerth der Spannung in einem Leiter des Ständers ermittelt werden. Wenn die Spulen des Motors in Sternschaltung verbunden sind, so ist die Spannung des Speisestromes (die Spannung zwischen den Leitungsdrähten) durch 1,73 zu dividiren, um die Spannung einer Phase zu erhalten (vgl. S. 53). Dies durch die Zahl

der Leiter in der Phase dividirt, gibt die virtuelle Spannung für einen Leiter; durch Multiplication mit 1,41 erhalten wir den Scheitelwerth der Spannung für einen Leiter im Mittel für eine Spule. Der thatsächliche Scheitelwerth der Spannung für einen Leiter wird gefunden, indem man noch durch den Breitencoefficient (nach S. 81) dividirt. Dieser thatsächliche Scheitelwerth der Spannung für einen Leiter möge mit e_1 bezeichnet werden; er ist etwas grösser als die elektromotorische Gegenkraft $v_1 \mathfrak{B}_0 l \cdot 10^{-8}$. Dieser Werth kann durch direkte graphische Construction nach der im nächsten Kapitel beschriebenen Methode gefunden werden, oder er kann ermittelt werden als ein Theil der ganzen EMK, indem man Fig. 214, wie auf S. 206 angegeben, zeichnet. Dies lässt sich sehr leicht ausführen, indem man zunächst einen wahrscheinlich richtigen Werth für $v_1 \mathfrak{B}_0 l \cdot 15^{-8}$ annimmt — etwa 95% von e_1 —

und dann mittels einer Construction ähnlich wie Fig. 214 den Unterschied ermittelt zwischen der äusseren Spannung und der inneren Gegenkraft, wenn der Motor eine bestimmte Zugkraft äussert. Der Werth des Schliffes lässt sich leicht berechnen, da wir den Strom kennen, der nöthig ist, um eine bestimmte Zugkraft zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür wird unten gegeben. Diese Methode gibt den gesuchten Unterschied der Spannungen in Procenten von e_1 mit grosser Genauigkeit; denn selbst ein Fehler von 10 % in dem für $v_1 \mathfrak{B}_0 l \cdot 10^{-8}$ angenommenen Werth bringt in dem Ergebniss nur einen Fehler von $\frac{1}{10}$ % hervor. Wir zeichnen nun diesen Unterschied im Maassstab von OE als das richtige $v_1 \mathfrak{B}_0 l \cdot 10^{-8}$. Wir berechnen v_1 aus der Frequenz n und der Zahl p der Polpaare und dem Halbmesser ϱ (in cm):

$$v_1 = \frac{2\pi\varrho n}{p}.$$

Da die wirksame Länge l eines Ständerleiters bekannt ist, so erhalten wir sogleich \mathfrak{B}_0 , den Scheitelwerth der Kraftliniendichte. Aus \mathfrak{B}_0 können wir den magnetisirenden Strom und den Kernverlust-Strom berechnen in der Weise, welche am besten aus dem Beispiel auf S. 219 hervorgeht. Aus \mathfrak{B}_0 berechnen wir auch den Strom i_2 in dem Normalleiter des Läufers. Da wir r_2 kennen, so haben wir OR_2 und daraus OE_2 . Wir wissen, dass

$$\frac{OE_2}{OE} = \frac{v_1 - v_2}{v_1},$$

und finden daraus den Schliff $v_1 - v_2$. Wir können nun OC_2 , OM , MN , ON , OC_1 zeichnen und die Figur wie vorher vervollständigen, bis wir schliesslich OE_1 als Darstellung der äusseren Spannung erhalten. Auf diese Weise haben wir alle Phasenbeziehungen und alle wesentlichen Grössen in richtigem Maassstabe aufgetragen.

Die symbolische Methode.

In dem weiter unten ausgeführten Beispiel werden die Werthe der zu bestimmenden Grössen aus einem maassstäblichen Diagramm erhalten. Dies kann im Allgemeinen mit einer für praktische Zwecke ausreichenden Genauigkeit ausgeführt werden, aber es kann auch vorkommen, dass man Diagramme erhält, aus denen die Grössen nicht mit der gewünschten Genauigkeit entnommen werden können. In diesem Falle leistet die symbolische Methode, die von C. P. Steinmetz in seinem Buch über Wechselstromerwei-

nungen empfohlen wird, gute Dienste. Diese Methode wird im ersten Anhang dargelegt und Fig. 214 wird als Beispiel in Symbolen gegeben.

Auch auf S. 259 wird auf die Arbeit von Steinmetz näher eingegangen.

Beispiel der graphischen Behandlung.

Ehe wir tiefer auf die Theorie eingehen, wollen wir ein praktisches Beispiel der oben angegebenen graphischen Methode durcharbeiten. Wir legen einen Dreiphasenmotor der General Electric Company in Schenectady, New York, zu Grunde. Ein Ausschnitt der Eisenteile von Ständer und Läufer wird in Fig. 217 in $\frac{1}{5}$ der natürlichen Grösse dargestellt, einige Nuthen in voller Grösse mit Windungsdrähten und Isolation in Fig. 218.

Im Folgenden werden die Einzelheiten dieses Motors mitgeteilt, welche wir für die Rechnung brauchen. Später folgen Einzelheiten über das Arbeiten des Motors.

Allgemeine Beschreibung.

Dreiphasig, achtpolig (4 N- und 4 S-Pole), 150 P, 600 Umdrehungen in der Minute (vermindert um den Schlupf), 550 V, 40 Perioden in der Secunde (Frequenz).

Einzelheiten des Läufers.

Aeusserer Durchmesser der Kernscheiben	1016 mm
Innerer Durchmesser der Kernscheiben	813 „
Wirkliche Länge des Eisens parallel zur Achse	254 „
Gesamtlänge des Eisens zwischen den Schlussstücken	327 „
Zahl der Schlitze	144
Tiefe der Schlitze	32 mm
Weite der Schlitze an der Grundfläche	12,7 mm
Weite der Zähne an der Grundfläche	7,9 „
Zahl der Leiter in einem Schlitz	4
Höhe eines Leiters	11,1 mm
Breite eines Leiters	4,8 „
Zahl der neben einander geschalteten Leiter	4
Stromkreise in Sternschaltung	3
Zahl der Leiter hinter einander in einer Phase	48
Widerstand eines Sternzweiges, kalt	0,0036 Ohm

Einzelheiten des Ständers.

Innerer Durchmesser der Kernscheiben	1022 mm
Aeusserer Durchmesser der Kernscheiben	1219 „
Wirkliche Länge des Eisens parallel zur Achse	254 „
Zahl der Schlitze	120

Schlitze auf einen Pol	15
Schlitze auf den Pol jeder Phase	5
Tiefe der Schlitze	38 mm
Weite der Schlitze	17,5 mm
Weite der Zähne	9,5 „
Breite eines Leiters	4,8 „
Zahl der Leiter in einem Schlitz	4
Höhe eines Leiters	12,7 mm
Breite eines Leiters	5,6 „
Stromkreise in Sternschaltung	3
Zahl der Leiter hinter einander in einer Phase . . .	160
Widerstand eines Sternzweiges, kalt	0,036 Ohm
Luftspalt, Weite	3,2 mm

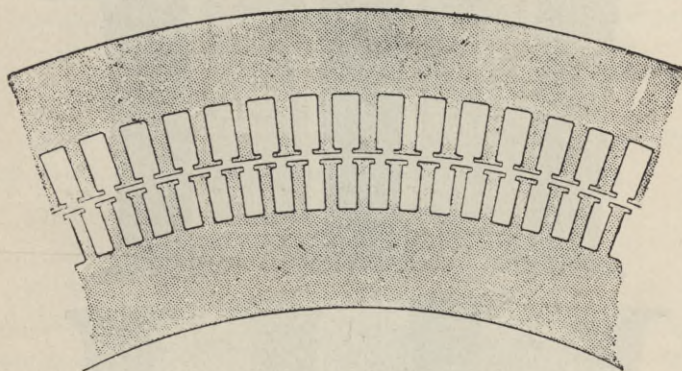


Fig. 217.

Zuerst wollen wir die Grössen r_1 und r_2 berechnen. Wenn der Widerstand eines Sternzweiges gegeben ist, können wir folgendermaassen verfahren:

Bestimmung von r_2 . Es sind im Ganzen 144 Schlitze, d. i. 48 Schlitze für die Phase. In jeder Phase liegen 48 Leiter hinter einander; demnach füllt der Querschnitt des Zweiges, dessen Widerstand 0,0036 Ohm beträgt, gerade einen Schlitz. Dies stimmt überein mit der obigen Angabe: „Zahl der Leiter in einem Schlitz 4“, und „Zahl der neben einander geschalteten Leiter 4“. Demnach ist $0,0036/48$ der Widerstand des Kupfers in einem Schlitz einschliesslich der zugehörigen Endverbindungen. Nun nimmt ein Schlitz nebst Zahn am Umfang eine Länge von 2,25 cm ein. Daher ist der Widerstand auf 1 cm Umfang

$$\frac{0,0036}{48} \cdot 2,25 = 1,69 \cdot 10^{-4} \text{ Ohm.}$$

Da man auf die Erwärmung durch den Betriebsstrom Rücksicht nehmen muss (etwa 30°C), so ist zu setzen:

$$r_2 = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ohm.}$$

Bestimmung von r_1 . Es sind 120 Schlitze oder 40 Schlitze für die Phase. In jeder Phase liegen 160 Leiter, d. i. 4 hinter einander geschaltete Leiter in jedem Schlitze. Jeder Leiter mit den zugehörigen Endverbindungen hat einen Widerstand von

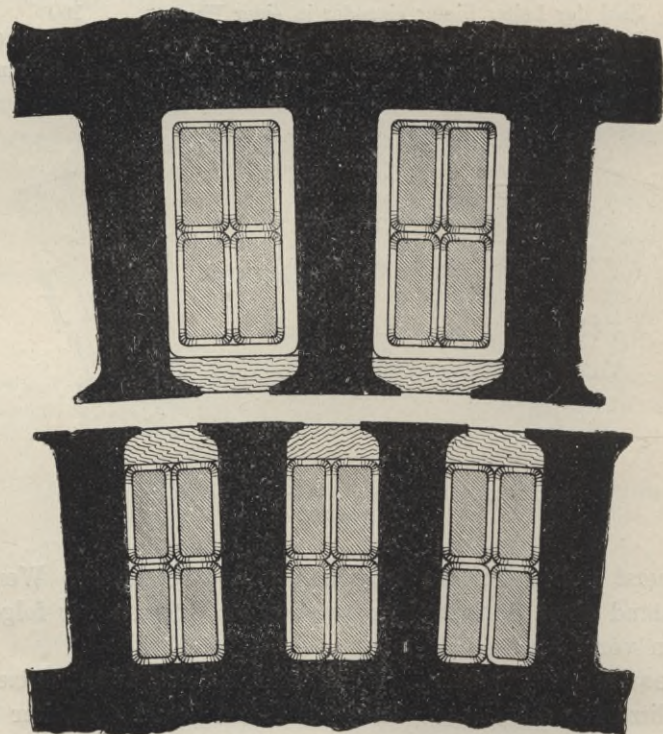


Fig. 218.

0,036/160 Ohm. Wenn die 4 Leiter eines Schlitzes parallel geschaltet würden, so würde der Widerstand des Kupfers in einem Schlitze sein:

$$\frac{0,036}{160 \cdot 4}$$

Da ein Schlitze und Zahn 2,7 cm des Umfangs einnimmt, so wird der Widerstand für 1 cm Umfang unter Rücksicht auf Erwärmung wie vorher:

$$r_1 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Ohm.}$$

Berechnung von L_1 und L_2 . Zuerst ist es nöthig, den magnetischen Widerstand zwischen zwei Zähnen zu ermitteln. Wir betrachten drei Theile der Zähne getrennt.

a) Die Streuung, welche zwischen den parallelen Seiten des Schlitzes von einem Zahn zum nächsten stattfindet, kann geschätzt werden, indem man den magnetischen Widerstand der halben Tiefe der Zähne ansetzt. Der magnetische Widerstand ist direct proportional der Länge des Weges für die Kraftlinien und umgekehrt proportional dem Querschnitt dieses Weges und zu der Permeabilität, welche für Luft oder Kupfer = 1 ist. Wir wollen die Zahl für 1 cm der Länge des Ständers (d. h. parallel zur Achse) haben; aus den Maassen der Fig. 218 S. 214 ergibt sich als magnetischer Widerstand zwischen den parallelen Seiten eines Schlitzes:

$$\frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt}} = \frac{1,75}{1,75} = 1 \text{ cgs für 1 cm Ständerlänge.}$$

b) Die Streuung an den Zacken der Zähne ist erheblich, der magnetische Widerstand kann geschätzt werden auf:

$$\frac{1}{0,5} = 2 \text{ cgs für 1 cm Ständerlänge.}$$

c) Wenn ein Zahn des Läufers einem Schlitz des Ständers gegenüber steht, so findet Streuung statt über den Luftspalt zum äusseren Theil des Zahnes, längs des Eisens des Zahnes und zurück über den Luftspalt. In der für die Streuung günstigsten Stellung können wir die Länge des Luftspaltes zu 0,6 und die Breite zu 0,6 annehmen. Dies ergibt einen magnetischen Widerstand 1; aber da diese Streuung im Mittel nur an der Hälfte der Schlitzes stattfindet, können wir den auf diese Streuung entfallenden magnetischen Widerstand zu 2 annehmen.

Indem man a), b) und c) parallel schaltet, erhält man als gemeinsamen magnetischen Widerstand 0,5 cgs für 1 cm Länge des Schlitzes.

Durch Division mit der Länge des Ständers erhalten wir den magnetischen Widerstand des Weges zwischen zwei Zähnen, ohne die Streuung an den Stirnflächen zu berücksichtigen. Die letztere kann angenähert in Rechnung gesetzt werden, indem man der Länge des Schlitzes ein Stück zurechnet, welches dreimal so lang ist als der Abstand von der Mitte eines Zahnes zur nächsten. Da dieser Abstand etwa 3 cm beträgt und die Länge der Schlitzes 25 cm, so erhalten wir eine angenommene Gesamtlänge von 34 cm. Daraus

ergibt sich der magnetische Widerstand des Weges zwischen den Zähnen zu

$$\frac{0,5}{34} = 1,46 \cdot 10^{-2} \text{ cgs.}$$

Der von der Streuung hervorgebrachte Selbstinductionscoëfficient des Leiters in einem Schlitz ist gleich

$$\frac{4\pi}{10} \cdot \frac{1}{0,0146 \cdot 10^8} = 8,5 \cdot 10^{-7} \text{ Henry.}$$

Hierzu muss noch etwas addirt werden, um die Selbstinduction der Endverbinder zu berücksichtigen. Diese Grösse kann man nicht berechnen, aber sie ist sehr klein. In unserem Beispiel, wo die Verbinder etwa 40 cm lang sind, beträgt sie etwa $2 \cdot 10^{-7}$. Man erhält demnach im Ganzen $1,05 \cdot 10^{-6}$ Henry.

Nunmehr ist zu zeigen, dass die von der Streuung hervorgerufene Reactanz eines Leiters, der sich der Breite nach längs der Peripherie ausdehnt, dieser Breite umgekehrt proportional ist. Dass dies so ist, kann daraus ersehen werden, dass, je weiter die Breite des Leiters sich längs des Umfangs erstreckt, um so länger der Weg für die magnetischen Linien wird, während der Querschnitt dieses Weges ungeändert bleibt. Um dies zu erläutern, mögen zwei Beispiele dienen. Zunächst wollen wir einen Wechselstrom von der Stärke 1 betrachten, der in dem Leiter eines Schlitzes fliesst. In Folge der Reactanz herrscht an den Enden des Leiters eine bestimmte Spannung. Schalten wir die Leiter von vier Schlitzten parallel und nehmen an, der Strom von der Stärke 1 fliesse nun in dem so geformten Band, so erhellt, dass nur $\frac{1}{4}$ des Stromes in jedem Schlitz fliesst und demnach nur $\frac{1}{4}$ der Spannung nöthig ist, um die Selbstinduction des Bandes zu überwinden, d. h. der Selbstinductionscoëfficient des Bandes ist $\frac{1}{4}$ von dem des Leiters in einem Schlitz. Nun wollen wir die Selbstinduction eines Ständerleiters unter den Verhältnissen des Betriebes bestimmen. Wenn in einem Leiter der Wechselstrom von der Stärke 1 fliesst, während auf jeden Schlitz vier Leiter kommen, jeder mit demselben Strom, so ist die Spannung an dem Ende eines jeden viermal so hoch, als sie wäre, wenn der Strom 1 durch alle 4 Leiter in Parallelschaltung flösse. Die Reactanz des einen Leiters ist viermal so gross, als wenn die 4 Leiter parallel verbunden wären und als ein einziger Leiter betrachtet würden. In dieser Beziehung gilt für die Reactanz dasselbe Gesetz wie für den Widerstand eines gegebenen Bandes. Die EMK zwischen

den Enden des Leiters, sowohl soweit sie von der Reactanz, als soweit sie vom Widerstande herrührt, ist proportional zur Stromdichte, wenn der Strom I in dem Band fließt. Wenn wir nun den Selbstinductionscoefficienten finden wollen, der von der Streuung herrührt, und zwar für 1 cm Breite des Leiters längs des Umfangs, so haben wir den Selbstinductionscoefficienten mit dem Abstand zweier Zähne (von Mitte zu Mitte gemessen) zu multipliciren. Dies ergibt

$$L_1 = 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot 2,7 = 2,82 \cdot 10^{-6}$$

$$L_2 = 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot 2,25 = 2,47 \cdot 10^{-6}.$$

Man kann nun zeigen, dass das Product $2\pi n L_1 i_1$ die Spannung an den Enden eines Leiters, welche von der Streuungsreactanz herrührt, angibt; z. B., wenn wir 40 Schlitze annehmen, jeden mit 4 Leitern, und suchen die Gegenspannung, die von der Streuung herrührt, wenn 150 Ampere bei der Frequenz 40 durch die 160 hinter einander geschalteten Leiter fließen, so ergibt sich eine sehr einfache Rechnung. Wir haben $150 \times 4 = 600$ Ampere auf den

Schlitz oder $\frac{600}{2,7} = 222$ Ampere auf 1 cm Umfang. Dies ergibt

$$2\pi n L_1 i_1 = 2\pi \cdot 40 \cdot 2,82 \cdot 10^{-6} \cdot 222 = 0,158 \text{ Volt für den Leiter.}$$

Da es 160 Leiter in Reihe für jede Phase sind, so beträgt die Reactanz für eine Phase $160 \cdot 0,158 = 25,2$ Volt. Der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ergibt sich aus der Beziehung $\text{tg } \psi = 2\pi n L_1 / r_1$.

Wir können nun dazu übergehen, die verschiedenen elektromotorischen Kräfte und Ströme in ein Uhrdiagramm einzutragen.

Wir nehmen an, der Motor sei mit den Leitungsdrähten verbunden; zwischen je zwei Leitungen herrsche eine Spannung von 550 virtuellen Volt; seine volle Leistung beträgt 150 P. Es wird gefordert, den Strom, den der Motor braucht, zu berechnen, ferner den Verzögerungswinkel φ des Stromes, den Schlupf, den Strom in den Leitern des Läufers und den Wirkungsgrad. Danach wollen wir die Anzugkraft, Anzugstrom und Leerlaufstrom betrachten.

Wir müssen zuerst die Spannung zwischen zwei Leitungen umrechnen auf die Spannung an einem Leiter des Ständers. Da der letztere Sternschaltung besitzt, ist die Spannung für die Phase (vgl. S. 210) $550/1,73 = 318$. Hieraus $318/160 = 1,98$ virtuelle Volt. Dies mit $\sqrt{2}$ multiplicirt und durch den Breitencoefficient 0,95 (S. 81) dividirt gibt 2,96 Volt für den Scheitelwerth der Spannung eines Leiters (S. 205).

Der Motor liefert ein Drehmoment von 183 kgm, oder, wenn man 3 P Reibungsverlust annimmt, 187 kgm, was gleichwerthig ist mit $3,73 \cdot 10^8$ cgs-Krafteinheiten am Hebelarm 49 cm (Entfernung von Mitte des Leiters bis zur Achse). Wenn nun der Scheitelwerth des Stromes für 1 cm Umfang des Läufers i_2 ist und dieser Strom sich nach der Formel $i_2 \sin \vartheta$ vertheilt (wo ϑ der Winkel auf dem Bezugskreis der Fig. 10, S. 11) ist, wenn ferner \mathfrak{B}_0 der Scheitelwerth der magnetischen Dichte ist, deren Vertheilung nach der Formel $\mathfrak{B}_0 \sin \vartheta$ stattfindet, so wird der Mittelwerth der Umfangskraft, ausgedrückt für 1 cm des Umfangs, gegeben durch den Ausdruck:

$$\frac{l i_2 \mathfrak{B}_0}{2\pi \cdot 10} \int_0^{2\pi} \sin^2 \vartheta \cdot d\vartheta = \frac{l i_2 \mathfrak{B}_0}{20},$$

worin l die Länge eines Leiters in cm.

Hier haben wir den Läuferstrom und \mathfrak{B}_0 als in der Phase mit einander übereinstimmend angenommen. Der hierdurch begangene Fehler beträgt nur etwa 0,3 %, da der Verzögerungswinkel ungefähr 4° beträgt (vgl. Fig. 214).

Um \mathfrak{B}_0 zu finden, ist zu bestimmen, ein wie grosser Theil von OE_1 die Gegenkraft $10^{-8} v_1 \mathfrak{B}_0 l$ ist. Wir nehmen zuerst angenähert an, dass $10^{-8} v_1 \mathfrak{B}_0 l$ um 5 % kleiner als OE_1 ist und zeichnen mit dieser Annahme das Diagramm, wie es auf S. 205 und 208 gezeigt wird; daraus ergibt sich das genaue Verhältnis zwischen OE_1 und $10^{-8} v_1 \mathfrak{B}_0 l$. Diese Methode ergibt im vorliegenden Falle 95,5 %, woraus \mathfrak{B}_0 zu 3340 bestimmt wird.¹⁾ Die Umfangskraft des Motors wird gefunden, wenn man den Ausdruck $\frac{l i_2 \mathfrak{B}_0}{20}$ mit dem Umfang des Läufers multiplicirt; dies gibt einen Werth gleich dem oben berechneten $3,73 \cdot 10^8$ cgs:

$$3,73 \cdot 10^8 = \frac{l i_2 \mathfrak{B}_0}{20} \cdot 101,6 \cdot \pi \cdot 0,97$$

woraus $i_2 = 288$ Ampere (vgl. S. 221).²⁾

Zur Bestimmung des magnetisirenden Stromes hat man nur nöthig, die magnetomotorische Kraft zu bestimmen, welche erforderlich ist, um den Scheitelwerth der magnetischen Dichte in einem Luftspalt von gewisser Länge und im Eisenweg zu erzeugen.

1) $10^{-8} v_1 \mathfrak{B}_0 l = 0,955 \cdot 2,96$; $l = 25,4$ cm, $v_1 = 1060 \cdot \pi$.

2) Der Factor 0,97 auf der rechten Seite der vorigen Gleichung rührt von der Zurückführung der Umfangskraft auf den mittleren Halbmesser der Windungen her: $49/50,8 = 0,97$.

Die Länge des Eisenweges kann man zu 42 cm ansetzen, und die mittlere magnetische Dichte im Eisen zu 6400. Setzt man die Permeabilität $\mu = 2800$, so ergibt sich:

$$\frac{42 \cdot 6400}{2800} = 96 \text{ egs für das Eisen.}$$

Wir müssen bemerken, dass im Luftspalt die vorspringenden Zähne die theoretische Sinus-Vertheilung der Kraftlinien stören. Aus Fig. 218 S. 214 können wir sehen, dass im Ganzen der Scheitelwerth der magnetischen Dichte um weniger als ein Drittel vergrössert wird. Die magnetomotorische Kraft, welche nöthig ist, um die Kraftliniendichte 4200 im Luftspalt von 0,32 cm Länge zu erzeugen, ist 1340 egs, demnach 1436 egs für Luft und Eisen zusammen. Dies erfordert 1140 Ampere-Windungen. Nun überspannt ein Pol 15 Schlitze mit 60 Leitern, und der Strom in diesen Leitern hat die magnetomotorische Kraft zu liefern, welche den magnetischen Widerstand von zwei Luftspalten und dem zugehörigen Eisen überwindet. Demnach muss die gesammte magnetomotorische Kraft der 60 Leiter = 2280 Ampere-Windungen, der magnetisirende Strom demnach 2280 Ampere sein; die 20 mittleren Leiter in der Lage des Scheitelwerthes führen hierbei genau doppelt so starken Strom wie die je 20 zu beiden Seiten. Demnach sind zur Erzeugung des Scheitelwerthes der magnetischen Dichte 28 Ampere in jedem seitlichen und 56 Ampere in jedem der 20 mittleren Leiter nöthig. Dies bedeutet einen Scheitelwerth von 224 Ampere auf den Schlitz oder 86 auf 1 cm des Umfangs.

Zur Berechnung des Kernverlust-Stromes müssen wir zunächst die Masse des Eisens im Ständer bestimmen; sie beträgt etwa 600 kg. Den Verlust durch Wirbelströme und Hysteresis kann man zu etwa 6 Watt auf 1 kg oder 3600 Watt im Ganzen annehmen. Da es drei Windungen sind, jede mit 320 Volt Spannung, so ergeben sich 3,76 Ampere für die Phase. Dies ergibt einen Scheitelwerth von 5,3 Ampere für den Leiter oder 7,8 Ampere für 1 cm Umfang.

Wir wollen nun die berechneten Werthe zusammenstellen. Die Scheitelwerthe der verschiedenen Grössen sind:

Äussere Spannung an einem Leiter des Ständers	2,96 Volt
Gegenspannung in demselben Leiter	2,82 „
Magnetische Dichte \mathfrak{B}_0	3340
Läuferstrom auf 1 cm Umfang	288 Ampere
Magnetirungsstrom	86 „
Kernverlust-Strom	7,8 „

Wir können nun dazu übergehen, das Uhrdiagramm zu zeichnen, welches die Phasenbeziehungen der verschiedenen Grössen ergibt. Hier möchten wir dem Ingenieur, der sich mit dieser Behandlungsweise des Mehrphasenmotors vertraut machen will, rathen, Maassstab und Reisschiene zur Hand zu nehmen und jeden Schritt an einer Zeichnung im vollen Maassstab zu verfolgen, wobei er sich fortwährend die physikalische Bedeutung jeder Linie klar machen möge. Passende Maassstäbe sind 10 cm für 1 Volt und 1 mm für 1 Ampere. Fig. 214 ist aus Rücksicht auf den erforderlichen Raum in einem anderen Maassstabe ausgeführt worden.

Wir ziehen zuerst $OE = 2,82$ Volt und schneiden den Theil $OE_2 = 0,055$ ab, um die Spannung darzustellen, welche nöthig ist, um 288 Ampere durch den Widerstand r_2 des Normalleiters des Läufers zu treiben. Das Verhältniss

$$\frac{OE_2}{OE} = \frac{v_1 - v_2}{v_1}$$

gibt uns $v_1 - v_2 = 67,5$ cm/sec. Der Schlipf beträgt dabei $2,01\%$, die Frequenz des Läuferstromes $n_2 = 40 \cdot 0,0201 = 0,804$.

$$2\pi n_2 L_2 i_2 = 3,58 \cdot 10^{-3}.$$

$$r_2 i_2 = 5,48 \cdot 10^{-2}.$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\pi n_2 L_2}{r_2} = 0,065.$$

$$\psi = \text{etwa } 4^\circ.$$

Demnach zeichnen wir OC_2 (Fig. 214) um 4° hinter OE und tragen OR_2 und OC_2 in richtiger Länge entsprechend den gewählten Maassstäben auf. Dann tragen wir $OM = 86$ Ampere und $MN = 7,8$ Ampere ein. Durch Vervollständigung des Parallelogramms $C_2 OC_1 N$ finden wir aus OC_1 , dass $i_1 = 315$ Ampere ist.

Die Spannung, welche nöthig ist, um diesen Strom durch r_1 zu treiben, ist $0,053$ Volt. Diese wird durch OR_1 dargestellt, während $OL = 2\pi n_1 L_1 i_1 = 0,222$ Volt ist. Die Vectorsumme dieser beiden, dargestellt durch OP , ist nun zusammzusetzen mit der EMK $OB_0 = 2,82$ Volt, welche nöthig ist, um die elektromotorische Gegenkraft auszugleichen. Dies geschieht durch das Parallelogramm $PE_1 B_0 O$, dessen Diagonale OE_1 durch ihre Länge die äussere Spannung, die auf einen Leiter entfällt, nämlich $2,96$ Volt, und durch ihre Lage den Phasenunterschied gegen die übrigen in Betracht kommenden Grössen ausdrückt. Der Verzögerungswinkel φ

wird zu 25° gefunden. Da $\cos \varphi = 0,89$, so ist diese Zahl der Leistungsfactor.

Es ist nun leicht, den Strom in jedem Draht zu bestimmen. Wir erhielten den Scheitelwerth des Stromes für 1 cm Umfang zu 315 Ampere. Da der Zahnstand 2,7 cm beträgt, haben wir $315 \cdot 2,7 = 850$ Ampere für den Schlitz oder 212,5 für den Leiter. Dies entspricht 150 virtuellen Ampere in jedem Leiter, und da die Wickelungen des Motors in Sternschaltung verbunden sind, so ist 150 Ampere auch der Strom in einer Zuleitung.

Die folgenden Zahlen geben ein Bild vom Betrieb des Motors bei voller Last:

Leistung	150 P
Drehmoment, gebremst	183 kgm
Strom in jeder Zuleitung	149 A
Spannung zwischen zwei Zuleitungen	550 V
Frequenz	40 Per/Sec.
Schliff	2,1 %
Scheinbare Leistung, dem Motor zugeführt $3 \cdot 149 \cdot 318 \text{ W} =$	142 KW
Wirklicher Verbrauch des Motors	125 „
$\cos \varphi$	0,88
Leistung an der Motorwelle	112 KW
Wirkungsgrad	90 %
Lagerreibung	2,2 KW
Elektrischer Wirkungsgrad	91 %

Die Verluste können etwa folgendermaassen vertheilt werden:

Ständer $J^2 R$	2,7 KW
Läufer $J^2 R$	2,5 „
Eisenverluste	3,6 „
Reibung	2,2 „
	zusammen 11,0 KW.

Der Strom im Ständer, der Schliff und $\cos \varphi$ können mit ausreichender Genauigkeit durch eine graphische Darstellung berechnet werden. Der Ständerstrom lässt sich, wie folgt, erhalten: Strom für 1 cm Umfang 288 A Scheitelwerth = 202 A virtuell; multiplicirt mit dem Zahnstand gibt 460 virtuelle Ampere auf den Schlitz. Dies in einem Widerstand von 0,004 Ohm (warm) gibt 840 W für die Phase, 2520 W in den drei Phasen als Verlust der Wärmeerzeugung.

Graphische Darstellung des Wirkungsgrades und der Zugkraft.

Ehe wir weitergehen und die Bedingungen behandeln, welche für das Anlaufen mehrphasiger Motoren bestehen, wollen wir einige einfache Beziehungen betrachten, welche für den normalen Betrieb

des Motors gelten, und welche uns lebhaft an das Verhalten von Gleichstrommotoren erinnern werden.

Wir haben gesehen, dass die Menge der magnetischen Kraftlinien in ihrem Betrage sehr nahe gleichbleibt, und dass der Läuferstrom mit jener sehr nahe phasengleich ist. Daraus folgt, dass die Zugkraft proportional ist dem Strom im Läufer. Schreiben wir D für das Drehmoment, Ω für die Winkelgeschwindigkeit des Feldes, ω für die des Läufers, W für die vom Ständer an den Läufer abgegebenen, w für die vom Läufer mechanisch geleisteten Watt, dann haben wir folgende einfache Beziehungen. Da der Läuferstrom zu $\Omega - \omega$ proportional ist, können wir schreiben:

$$D = b \cdot (\Omega - \omega),$$

wo b eine Constante ist, welche von der Feldstärke, dem Halbmesser des Läufers und der Länge und dem Widerstand der Leiter des Läufers in der oben betrachteten Weise abhängt. Wir haben demnach

$$\begin{aligned} \text{nützliche Leistung } w &= D\omega = b\omega(\Omega - \omega), \\ \text{an den Läufer abgegeben } W &= D\Omega = b\Omega(\Omega - \omega), \\ \text{im Läufer verloren } W - w &= b(\Omega - \omega)^2. \end{aligned}$$

Hier können wir nun das bekannte Diagramm für den Wirkungsgrad der Motoren anwenden, indem wir das Quadrat

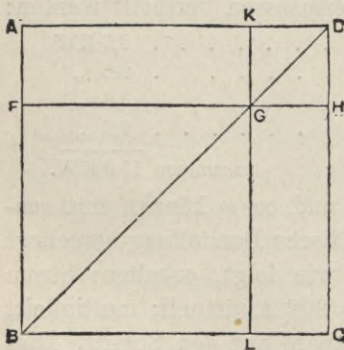


Fig. 219.

$ABCD$ (Fig. 219) zeichnen, dessen Seite AB gleich Ω ist und von der wir ein Stück $BF = \omega$ abschneiden. Die Fläche $AFHD$ stellt den gesamten Verbrauch des Motors dar, die Fläche $AFGK$ oder $GLCH$ die Nutzleistung und das Quadrat $KGH D$ den Verlust durch Stromwärme in den Leitern des Läufers. Der Wirkungsgrad nähert sich der Einheit, indem F sich gegen A hin bewegt; wenn das Feld nicht durch die Anker-

rückwirkung geschwächt würde, so wäre die Leistung ein Maximum für $\omega = \frac{1}{2} \Omega$, wobei der Wirkungsgrad nur 50 % sein würde. Wir werden sogleich sehen, dass magnetische Streuung und andere Ursachen bei einem Motor, der weit unter seiner richtigen Geschwindigkeit läuft, eine so grosse Rolle spielen, dass die obige Gleichung nicht mehr gilt. Fig. 219 lässt sich indess auf die Fälle des

kreises nicht erhöht wird. Das Diagramm ist nach der im Anfang des Kapitels beschriebenen Art gezeichnet, und der Maassstab ist so gewählt, dass OE_1 2,96 Volt darstellt; vgl. S. 205. Was wir zuerst bemerken, ist, dass ψ , der Verzögerungswinkel des Läuferstroms, sehr gross ist. Dies rührt daher, dass $n_2 = 40$ ist und die Reactanz $2\pi n_2 L_2$ etwa viermal so gross wird wie r_2 . Der Läuferstrom für

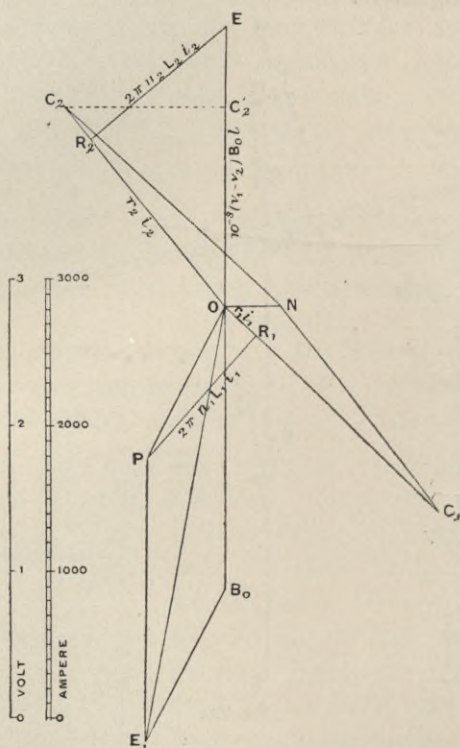


Fig. 221.

1 cm Umfang ist so ausserordentlich gross — er steigt zu einem Scheitelwerth von 1950 Ampere an —, dass es zweckmässig ist, den Maassstab auf $\frac{1}{10}$ des früheren zu verkleinern. Der Ständerstrom steht fast rechtwinklig zu OE , und die Gegenspannung, welche von der Reactanz des Ständers herrührt, nimmt für sich mehr als die Hälfte der äusseren Spannung in Anspruch. Die Wirkung ist zunächst, dass die Grösse $v_1 \mathfrak{B}_0 l \cdot 10^{-8}$ vermindert wird, so dass \mathfrak{B}_0 nur etwa die Hälfte des normalen Werthes hat, und dann, dass die Componente OC'_2 des Läuferstromes, welche

mit \mathfrak{B}_0 phasengleich ist, klein wird. Nun hängt die Zugkraft ab von dem Product von OC'_2 und \mathfrak{B}_0 , so dass trotz der ausserordentlich starken Ströme in Läufer und Ständer die Zugkraft nicht im Verhältniss gross ist.

Nun wollen wir den Widerstand des Läuferkreises auf das Fünffache seines gewöhnlichen Werthes erhöhen. Die Wirkung wird im gleichen Maassstab in Fig. 221 dargestellt. Der Läuferstrom wird nicht stark vermindert; sein Scheitelwerth beträgt nun 1720 Ampere für 1 cm des Umfangs, und die Componente OC'_2 , welche mit \mathfrak{B}_0 phasengleich ist, wird sehr beträchtlich vergrössert. Auch \mathfrak{B}_0 ist grösser geworden in Folge der geringeren Wirkung der Reactanz des Ständers. Die Wirkung ist schliesslich, dass die Zugkraft viermal grösser ist, obgleich der Ständerstrom geringer geworden ist. Wenn man den Widerstand des Läuferkreises 50mal vergrössert, so verringert sich der Anlassstrom auf den gewöhnlichen Betriebsstrom für volle Last, während auch die Zugkraft ungefähr die gleiche ist wie bei voller Last; das Diagramm ist dem in Fig. 214 dargestellten ziemlich gleich, nur dass E_2 mit E zusammenfällt. In der Praxis ist es bei grossen Motoren üblich, Einrichtungen zu treffen, welche erlauben, beim Anlaufen Widerstände in den Läuferkreis einzuschalten (siehe S. 187), um zu verhüten, dass der Motor einen zu starken Strom aus der Leitung nimmt, und um die Anzugkraft so gross zu machen, als sie bei dem gewählten Anlaufstrom sein kann. Wollte man den Widerstand in den Ständerkreis schalten, so würde allerdings der Strom herabgedrückt werden; aber die Anzugkraft wäre nahezu Null, wie man aus Fig. 220 erkennt, wenn man sich vorstellt, OC_2 sei auf den gewöhnlichen Betriebsstrom verringert worden.

Das obige Uhrdiagramm ermöglicht uns auch, die Zugkraft eines Dreiphasenmotors für jeden Schlupf zu bestimmen.

Nach Fig. 221 ist die Componente $OC'_2 = OC_2 \cos \psi$, also

$$OC'_2 = \frac{10^{-8} (v_1 - v_2) \mathfrak{B}_0 l r_2}{r_2^2 + 4\pi^2 n_2^2 L_2^2}.$$

Diesen Werth für den Strom setzen wir in den auf S. 218 angedeuteten Ausdruck für das Drehmoment

$$\frac{l i_2 \mathfrak{B}_0}{10} \cdot q^2 \pi$$

ein und erhalten, unter Benutzung der auf S. 210 und 218 erklärten Zeichen

$$\text{Drehmoment} = p \cdot \frac{(v_1 - v_2) \mathfrak{B}_0^2 l^2 \varrho^2 r_2}{r_2^2 + 4\pi^2 n_2^2 L_2^2},$$

worin p ein Factor ist, um den Werth auf die richtigen Maasseinheiten zurückzuführen. Für einen Motor mit Kurzschlussanker ist

$$p = \frac{\pi \cdot 10^{-14}}{981} = 3,2 \cdot 10^{-17}.$$

Hat der Motor eine Dreiphasenwicklung, so muss noch mit dem Breitencoefficient (vgl. S. 81) multiplicirt werden.

Wenn wir die Zugkraft bei verschiedenen Geschwindigkeiten berechnen wollen, so entwerfen wir eine Curve in der folgenden Weise.

Die Linie OX (Fig. 222) stellt die Drehgeschwindigkeit des magnetischen Feldes dar. Wir schneiden davon ein Stück OQ ab,

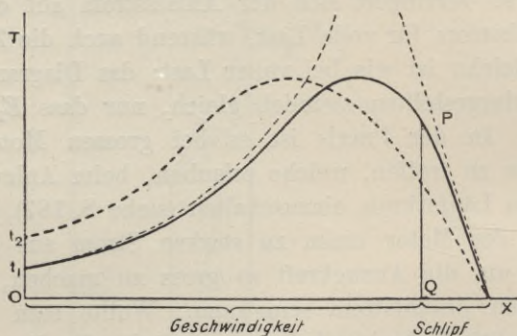


Fig. 222.

welches die Geschwindigkeit des Motors angibt. Der Rest QX bedeutet den Schlupf. Dies ist dasselbe, als wenn wir den Schlupf von X aus rückwärts auftragen. Die senkrechten Ordinaten mögen das Drehmoment darstellen, wie es aus der Gleichung berechnet wird, z. B. wenn QX der Schlupf ist, so bedeutet PQ den zugehörigen Werth von D . Beginnt man nun bei X , wo der Schlupf Null ist, so erhalten wir eine Curve XPt_1 , welche steil ansteigt, ein Maximum erreicht und wieder abfällt zu dem Werth Ot_1 , welcher das Drehmoment beim Anlauf darstellt. Man sieht, dass der steile Theil der Curve PX nahezu gerade ist; er verläuft asymptotisch neben der geraden Linie, welche punktirt daneben gezeichnet ist, und welche die Beziehung zwischen Drehmoment und Schlupf darstellen würde, wenn das magnetische Feld gleich-

bleibend und keine Streuung vorhanden wäre. Thatsächlich entspricht diese Linie dem Ausdruck $D = b \cdot (\Omega - \omega)$ auf S. 222. Wenn in dem obigen Ausdruck für das Drehmoment $v_1 - v_2$ durch s , $p \cdot \mathfrak{B}_0^2 l^2 \varrho^2$ durch Q und $2\pi n_2 L_2$ durch λs ersetzt wird, so nimmt er die einfachere Form an:

$$D = Q \cdot \frac{s r_2}{r_2^2 + \lambda^2 s^2},$$

aus welcher die Beziehungen zwischen D , r_2 und s leichter zu ersehen sind.

Besonders lassen sich zwei wichtige Folgerungen ziehen:

1. Gewöhnlicher Betrieb. Unter normaler Last, wo s verhältnissmässig klein ist, können wir den zweiten Ausdruck im Nenner vernachlässigen; die Gleichung kann in diesem Fall geschrieben werden:

$$D = Q \cdot \frac{s}{r_2},$$

d. h. unter den gewöhnlichen Belastungen ist die Zugkraft proportional dem Schliff und umgekehrt proportional dem Widerstande des Läufers.

2. Anlassen. Ehe der Läufer sich in Bewegung setzt, ist der Schliff im Maximum; wenn dann λs als gross gegen r_2 angenommen wird, kann man im Nenner den ersten Ausdruck weglassen und schreiben:

$$D = Q \cdot \frac{r_2}{\lambda^2 s},$$

d. h. beim Anlauf ist die Zugkraft proportional dem Widerstand des Läufers.

Die letztere Gleichung ist die einer Hyperbel, welche punktirt in Fig. 222 angegeben ist. Wenn wir r_2 einen höheren Werth beilegen und eine neue Curve zeichnen, so beginnt letztere gleichfalls bei X , wächst zu einem Maximum von derselben Höhe wie vorher und fällt dann, aber diesmal nur zu t_2 . Die Wirkung einer Einschaltung von Widerstand besteht, wie wir auf S. 225 gesehen haben, darin, die Zugkraft beim Anlauf zu erhöhen; zugleich wird das Maximum der Zugkraft verschoben, so dass es bei grösserem Schliff eintritt. Der Motor liefert praktisch die gleiche Leistung wie vorher, läuft aber mit einem grösseren Unterschied der Geschwindigkeiten zwischen leichter und voller Last, und der Wirkungsgrad bei voller Last ist vermindert.

Wir dürfen nicht vergessen, dass Q in den obigen Gleichungen keine Constante ist. Es ist sehr nahe constant unter den gewöhnlichen Belastungen; aber beim Anlauf, wenn in den Läuferkreis kein Widerstand eingeschaltet wird, fällt \mathfrak{B}_0 auf die Hälfte seines normalen Werthes (vgl. S. 259).

Wenn wir mit der Zugkraft der vollen Belastung anlaufen lassen und doch nicht mehr Strom wie bei voller Last verbrauchen wollen, müssen wir den Widerstand des Läufers im Verhältniss der Geschwindigkeit des Feldes zum Schlipf bei voller Last vergrößern. Dies

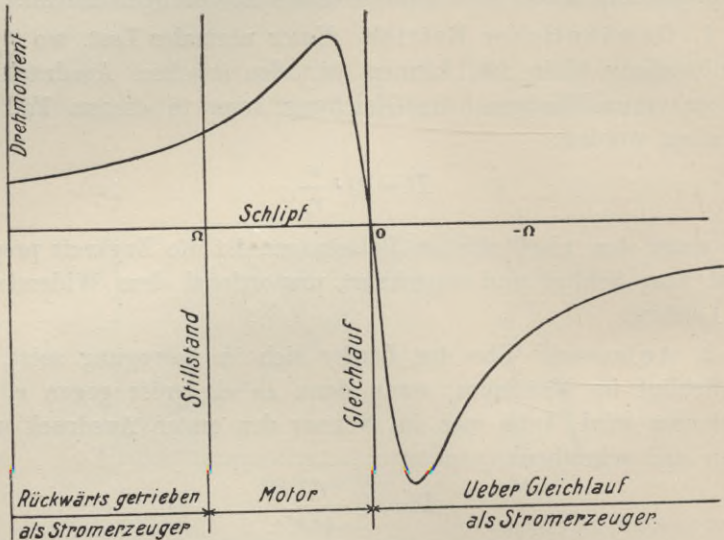


Fig. 223.

wird auf S. 225 und 251 gezeigt. Die Frage der höchsten Zugkraft lässt sich am leichtesten an der Hand der im nächsten Kapitel angegebenen Construction behandeln. Die Beziehung $r = 2\pi n L_2$, welche von vielen Schriftstellern¹⁾ als Bedingung für die höchste Anzugkraft aufgestellt wird, würde nur dann richtig sein, wenn \mathfrak{B} gleich bliebe.

Betrieb über Gleichlauf. Dreht man den Läufer rascher als das Drehfeld, so wird $v_1 - v_2$ negativ und die Zugkraft gleichfalls negativ. Die Maschine arbeitet dann als Stromerzeuger.

1) La Lumière Electrique. Bd. 40. S. 421. 1891. Bull. Soc. Internat. Electric. Bd. 14. S. 595. 1897.

Steinmetz¹⁾ hat die vollständige Charakteristik des Mehrphasenmotors gegeben, welche wir in Fig. 223 wiedergeben. Letztere ist in derselben Art gezeichnet, wie Fig. 222, aber die Theile der Curve links von der Linie des Stillstandes und rechts von der des Gleichlaufs werden auch gegeben. Man sieht, dass die Gestalt der Curve über Gleichlauf den gleichen allgemeinen Charakter hat, wie die Curve unter dem Gleichlauf, aber die Werthe der Zugkraft sind negativ. Es muss Arbeit zugeführt werden, um den Motor bei höherer als der Gleichlauf-Geschwindigkeit zu treiben, und er liefert elektrischen Strom an die Leitungen. Diese Eigenschaft des Motors leistet gute Dienste, wenn die Motoren zum Betrieb von Fahrzeugen benutzt werden, weil sie im Gefälle als Bremsen dienen und Strom in die Leitung zurückliefern können (vgl. Kap. XVIII, Beschreibung der Gornegrat-Bahn).

Wenn der Motor entgegen der Drehrichtung des Feldes gedreht wird, so nimmt die Zugkraft in der links angegebenen Weise ab.

1) American Inst. El. Engineers, December 1894, S. 803.

Kapitel VIII.

Graphische Theorie der mehrphasigen Motoren, Fortsetzung.

Wir wollen nun zu einer graphischen Construction übergehen, welche in einem einzigen Diagramm die Arbeitsvorgänge eines Inductionsmotors für alle Stufen der Belastung darstellt. Wir werden dieses Diagramm auf einen dreiphasigen Kolben'schen Motor anwenden, um zu zeigen, wie nahe die Theorie uns ermöglicht, die Arbeitsbedingungen vorauszusagen, wenn wir die Einzelheiten des Baues und einige einfache Constanten kennen.

Die Einfachheit der Construction rührt von der Thatsache her, dass die Grössen und Phasenbeziehungen der Ströme in Läufer und Ständer für eine bestimmte Last fast allein abhängen von den Beziehungen zwischen drei Zügen magnetischer Kraft: 1. dem Hauptzug, welcher die Arbeitsleistung verursacht, siehe S. 167, 2. dem Ständer-Streuzug, 3. dem Läufer-Streuzug, vgl. S. 170. Die anderen Factoren, wie Widerstand der Leiter und Eisenverluste, mögen zunächst ausser Betracht bleiben; es ist leicht, sie später in Rechnung zu setzen.

Von vornherein müssen wir nun vollkommen klare Definitionen für diese drei Kraftzüge haben und Symbole aufstellen, durch die wir ihre Werthe ausdrücken. Wir haben auf S. 167 gesehen, dass der Hauptkraftzug hervorgebracht wird durch das Zusammenwirken zweier nahezu entgegengesetzt gerichteter magnetomotorischer Kräfte im Ständer und Läufer, der Lage nach ist er nahezu phasengleich mit dem Läuferstrom (S. 209). Er wächst nicht mit der Last, sondern nimmt eher ab. Die Streu-Kraftzüge des Ständers und Läufers andererseits werden unabhängig von einander erzeugt durch die Ströme im Ständer und im Läufer und nehmen zu, wenn diese Ströme wachsen. Diese Streuzüge werden im Diagramm der Fig. 224 und 225 dargestellt. In Fig. 224 sind sie zur grösseren

Deutlichkeit getrennt gezeichnet, aber in Wirklichkeit setzen sie sich zusammen, wie Fig. 225 angibt, und bringen eine recht verwickelte Verteilung hervor. Ein besseres Bild von einem derartigen Feld gibt Fig. 174 S. 169. Wir können, wenn wir wollen, Fig. 224 als Theil eines Zweiphasenmotors ansehen; der obere Theil bedeutet den Ständer mit einem Schlitz auf die Phase und den Pol. In dem zur Darstellung gewählten Augenblick führt eine Phasenwicklung einen Strom, der gerade gleich dem magnetisirenden Strom ist (dargestellt durch den kleinen Punkt und Kreuz), und die andere Phasenwicklung führt den Arbeitstrom; es wird natürlich während jeder Periode einen Augenblick geben, in dem dies eintritt. Der magnetisirende Strom (d. h. der Unterschied zwischen dem Ständer-

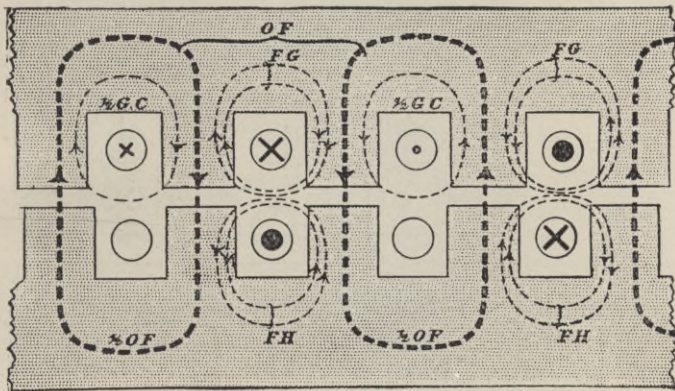


Fig. 224.

und Läuferstrom) erzeugt den Hauptkraftzug, welcher durch die dicken punktierten Linien *OF* dargestellt wird, und daneben einen kleinen Streuzug, der mit $\frac{1}{2}GC$ bezeichnet ist. Der Arbeitstrom des Ständers wirkt dem Arbeitstrom des Läufers gerade entgegen, und sie würden überhaupt keine Kraftlinien erzeugen, wenn nicht die Streuung längs des Luftspaltes und zwischen den Zähnen wäre. Die Streuzüge des Ständers und Läufers sind mit *FG* und *FH* bezeichnet.

Aus Fig. 224 ersieht man, dass in einigen Ständerzähnen die Pfeilspitzen einander entgegengesetzt stehen. Das bedeutet natürlich, dass ein Kraftzug vom andern zu subtrahiren ist. Im Ganzen werden die Kraftlinien des Ständers in der Phase vorangeschoben und in ihrem Werth ein wenig gehoben, während die des Läufers in der Phase verzögert und in der Grösse ein wenig verringert werden.

Ein einfacher Weg, um diese Wirkungen in ein graphisches Diagramm einzuführen, ist, den Ständer und Läufer so zu betrachten, als wenn jeder einen Kraftlinienzug hervorbrächte, der dem eigenen Strom proportional wäre. Die Haupttheile der beiden Kraftzüge, nämlich die Theile, welche der Annahme nach sowohl die Ständer- als auch die Läuferleiter umschliessen, setzen sich zusammen zu einem etwas schwächeren Kraftzug, welchen wir den Haupt-Kraftzug nennen, weil er für die Arbeitsleistung maassgebend ist; aber die anderen Theile, von jedem Hauptzug ein bestimmter Bruchtheil, suchen von einander unabhängig Seitenwege und löschen einander nicht aus. Das Verhältniss des ganzen angenommenen Kraftzuges im Ständer zu dem Theil, der beide Leitersätze umschliessen würde, wenn im

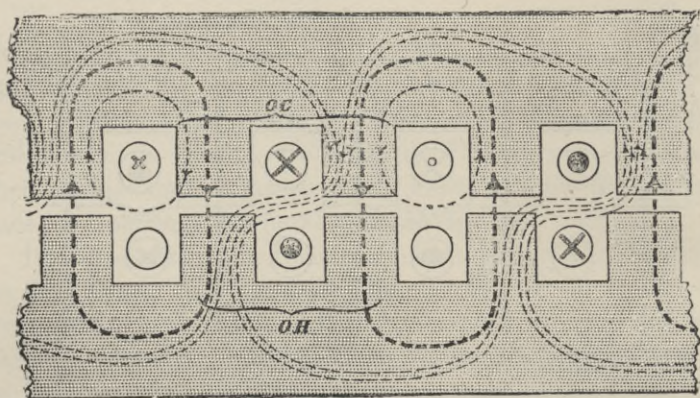


Fig. 225.

Läufer kein Strom wäre, ist eine wichtige Grösse, von der das Arbeiten des Motors beeinflusst wird. Dieses Verhältniss wollen wir „Coefficient der Ständerstreuung“ nennen und in diesem Kapitel mit u_1 bezeichnen. Dieser Coefficient ist etwas grösser als Eins, und ist für diese Motoren das Analogon zu dem sogen. Streucoefficient, welcher von Hopkinson in die Berechnung der magnetischen Kreise der Dynamomaschinen eingeführt worden ist. Fig. 226 ist eine diagrammatische Darstellung des Feldes, welches von einem Band der Ständerleiter hervorgebracht wird, während der Läufer stromlos ist. Die dicke Linie soll den Theil der Kraftlinien bedeuten, welcher beide Leitersätze umschliesst, während die dünne Linie den Theil angibt, der längs anderer Wege streut. Wenn die dicke Linie den Werth 1 hat, so sind die beiden Linien zusammen u_1 . Es ist also u_1 eine Zahl, die etwas grösser als 1 ist, etwa 1,04.

Sie hängt natürlich ab von dem Verhältniss zwischen den magnetischen Widerständen des Weges um die Leiter des Ständers und des Läufers und des ganzen Weges. Man kann den Werth angenähert berechnen (vgl. S. 215), aber es ist leichter, die Grösse in folgender Weise zu messen.

Wenn die Läuferwicklung mit Schleifringen versehen ist, braucht man nur einen Spannungsmesser mit zweien der Bürsten zu verbinden, während natürlich die Anlassvorrichtungen vollständig abgenommen werden, und dann die Betriebsspannung auf die Ständerwicklung zu schalten. Die Spannung zwischen den Klemmen einer Ständerphase ist proportional zur ganzen Kraftlinienmenge und der

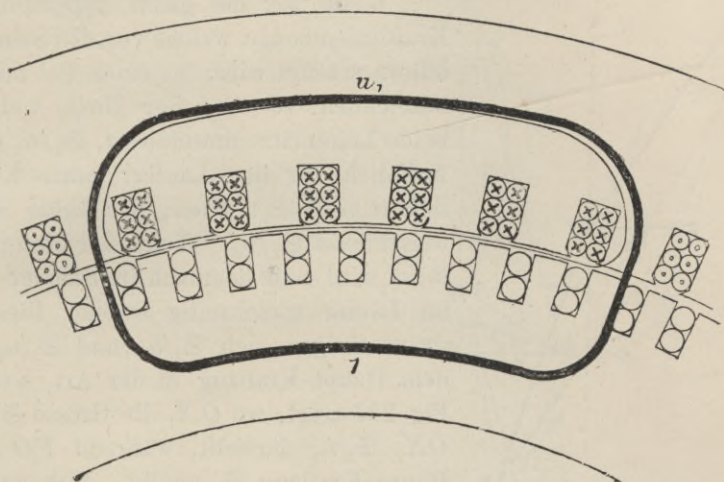


Fig. 226.

Zahl Z_1 der Ständerleiter in einer Phase. Die Spannung zwischen zwei Schleifringen ist proportional dem Kraftlinienzug, welcher die Läuferleiter umschliesst und der Zahl Z_2 der in der Phase hinter einander liegenden Leiter. Demnach ist u_1 das Verhältniss der beiden Spannungen, multiplicirt mit Z_2/Z_1 . Wird grössere Genauigkeit verlangt, so sind die Breitenkoeffizienten (S. 81) zu berücksichtigen.

Während der Messung sollte der Läufer mit der Hand gedreht und das Mittel aus den Ablesungen genommen werden, welche bei einem gut gebauten Motor wenig verschieden ausfallen werden. Diese Messung kann bei einem Motor mit Kurzschluss nicht ausgeführt werden, aber vor Einsetzung der Läuferleiter kann eine Bestimmung mit einer Hilfswickelung gemacht werden, welche sich über ein bis zwei Pole erstreckt.

Auf dieselbe Weise, indem wir einer Phase des Läufers eine bekannte Spannung zuführen und den Quotienten bilden aus dieser durch die Spannung an einer Phase des ungeschlossenen Ständers, können wir das Verhältniss zwischen der ganzen Kraftlinienmenge des Läufers und dem Theil, der sowohl die Läufer- wie die Ständerleiter umschliesst, ermitteln. Diesen „Coëfficienten der Läuferstreuung“ bezeichnen wir mit u_2 .

Die Streucoëfficienten u_1 und u_2 bleiben in ihren Werthen praktisch gleich für den ganzen Arbeitsbereich des Motors und unterscheiden sich wenig bei verschiedenen Motorgrössen über etwa 15—20 P.

Wenn wir die ganze hypothetische Kraftlinienmenge, welche von den Ständerleitern erzeugt wird, für einen Pol mit \mathcal{E}_1 bezeichnen, so wird der Theil, welcher beide Leitersätze umschliesst, \mathcal{E}_1/u_1 sein. Aehnlich für den Läufer: ganze Kraftlinienmenge \mathcal{E}_2 ; Theil, der beide Sätze umschliesst \mathcal{E}_2/u_2 . Wenn der Motor belastet wird und demnach im Ständer und im Läufer gleichzeitig Ströme fliessen, so vereinigen sich \mathcal{E}_1/u_1 und \mathcal{E}_2/u_2 zu dem Haupt-Kraftzug in der Art, welche Fig. 227 zeigt, wo OX_1 die Grösse \mathcal{E}_1/u_1 , OX_2 \mathcal{E}_2/u_2 darstellt, während FO den Haupt-Kraftzug \mathcal{E}_0 angibt. Wir dürfen FO auch ansehen als die Kraftlinien, welche von dem magnetisirenden Strom in

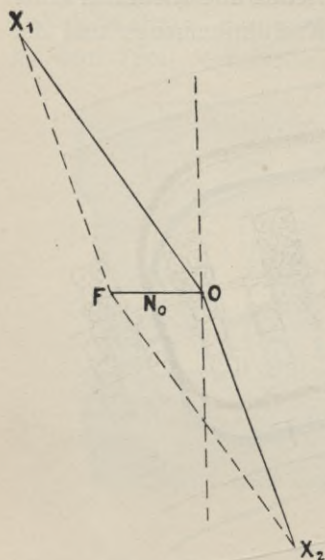


Fig. 227.

dem Ständer erzeugt werden. Nach den Festsetzungen des Kapitels VII für die Darstellung der verschiedenen Grössen durch Vektoren wurde ein magnetisches Feld stets dargestellt durch eine Linie, welche zu der den magnetisirenden Strom angehenden Linie senkrecht stand. Das rührt daher, dass in einem zweipoligen Motor ihre Richtungen senkrecht auf einander stehen. Wollten wir dieselbe Festsetzung für das zu entwerfende Diagramm annehmen, so müssten viele Linien zweimal gezogen werden, wir bekämen zwei zu einander rechtwinklig stehende Diagramme, und die Figur würde unnöthiger Weise verwickelt werden. Wir werden deshalb unsere Wahl so treffen, dass dieselben Linien (in verschiedenen Maassstäben) sowohl die Ströme, als die von ihnen hervorgebrachten Kraftlinienzüge darstellen. Der

Kraftzug darstellen. Die wahre Richtung des letzteren ist rechtwinklig zu OF , und die Phase der EMK, die im Läufer erzeugt wird, gibt die Linie OE_2 richtig an. Die Länge von OE_2 ist für den augenblicklichen Zweck nicht von Bedeutung. Dem gegenüber haben wir OE_1 , die EMK, die im Ständer aufgewandt werden muss, um die von dem umlaufenden Kraftlinienzug OF herrührende Gegenkraft auszugleichen. Es wird die Verhältnisse vereinfachen, wenn wir annehmen, der Motor habe einen gewickelten Läufer, dessen Drähte zu Schleifringen geführt sind, und dass die ganze Zahl der Drähte in einer Phase des Ständers gleich ist der Zahl in einer Phase des Läufers, so dass $Z_1/Z_2 = 1$. Nehmen wir nun für einen Augenblick an, wir kennten den Strom in einer Phase des Läufers und den Winkel seiner Verzögerung hinter der äusseren Spannung OE_2 , so können wir eine Linie OP_2 ziehen, welche diesen Strom darstellt. Gemäss unserer obigen Festsetzung stellt dieselbe Linie auch die magnetischen Kraftlinien, die von diesem Strome erzeugt werden, dar. Es möge nun OP_2 nach dem zweiten Maassstab den Kraftlinienzug \mathfrak{S}_2 und ein Theil davon OX_2 \mathfrak{S}_2/u_2 darstellen. Verbindet man nun FX_2 und vervollständigt das Parallelogramm $FX_2 OX_1$, so erhalten wir OX_1 als die hypothetische Componente von FO für den Ständer, d. i. \mathfrak{S}_1/u_1 .

Nun kommt der wesentliche Theil unserer Construction. Haben wir \mathfrak{S}_1/u_1 , so vergrössern wir die Linie, die es darstellt, im Verhältniss von u_1 zu 1, d. h. wir verlängern OX_1 bis P , wobei $OP : OX_1 = u_1 : 1$. Ebenso $OP_2 : OX_2 = u_2 : 1$. Nach Vervollständigung der Parallelogramme $PX_1 FC$ und $P_2 X_2 FH$ verlängern wir PC , bis es OH in K schneidet.

Da PO die ganze hypothetische Kraftlinienmenge des Ständers darstellt, so gibt $X_1 P$ oder FC denjenigen Theil an, welcher die Streuung bildet. Ebenso bedeutet $X_2 P_2$ oder FH die Läuferstreuung. Man sieht, dass FC und FH sich ändern, sobald die Ströme im Ständer und Läufer sich ändern, während OF nahezu gleich bleibt. Die Figur genügt also den auf S. 230 aufgestellten Bedingungen. Gehen wir auf die Fig. 224 und 225 zurück, in denen die Kraftzüge mit den gleichen Buchstaben wie in Fig. 228 bezeichnet sind, so sehen wir klarer, welche physikalischen Umstände die Linien des Diagramms darstellen. OF ist die ganze Kraftlinienmenge, die zwischen Ständer und Läufer übergeht, und die von dem magnetisirenden Strom hervorgebracht wird. In Fig. 225 ist OC der ganze Kraftlinienzug des Ständers einschliesslich der

Ständerstreuung, und OH ist der ganze Kraftlinienzug des Läufers einschliesslich der Läuferstreuung. Das Uhrdiagramm der Fig. 228 zeigt OC als die Summe von OF und FC und HO als Summe von OF und FH .

Nun muss OC , die Resultirende von OF und FC , den ganzen Kraftzug darstellen, welcher EMKe in den Ständerleitern inducirt; wir können $O\mathcal{E}_1$ rechtwinklig zu OC ziehen, um die äussere EMK anzugeben. Der Winkel φ ist dann die Phasenverzögerung zwischen Ständerstrom und äusserer EMK. Ferner ist OH , die Resultirende von OF und FH , der einzige Kraftlinienzug, welcher EMKe im Läufer inducirt; die wahre Stellung dieses Kraftzuges ist senkrecht zu OH (vgl. S. 234) und er muss mit dem Läuferstrom OX_2 in Phase sein. Daher ist HOX_2 ein rechter Winkel.

Beim Zeichnen dieser Figur haben wir angenommen, dass wir die Werthe der Kraftlinienmenge OF , des Stromes OP_2 und des Winkels φ kennen. Wie die Belastung des Motors wechselt, so ändern sich auch diese Grössen, aber die Linie OC bleibt gleich, so lange als die äussere Spannung gleich bleibt. (Wir vernachlässigen hierbei den Stromwärmeverlust im Ständer.) Wir nehmen deshalb die Linie OC als Standlinie des Diagramms, und die anderen Punkte der Figur ändern ihre Stellung gegen OC .

Wenn wir mehrere Werthe für den Läuferstrom annehmen, welche verschiedenen Belastungen entsprechen, so würden wir finden, dass der Punkt P sich auf einem Halbkreis bewegt.¹⁾ Der Beweis dafür ist sehr einfach. Wir wissen, dass der Punkt K auf einem Halbkreis läuft, weil der Winkel CKO ein Rechter ist. Wenn wir zeigen können, dass zwischen PC und CK ein gleichbleibendes Verhältniss ist, so muss auch der Punkt P sich auf einem Halbkreis bewegen. Um dies gleichbleibende Verhältniss zu erkennen, haben wir nur zu bemerken, dass

$$HX_1 = u_2 FX_1 = u_2 CP.$$

In den ähnlichen Dreiecken OX_1H und OPK stehen die Seiten OX_1 und OP im Verhältniss $1:u$, und die anderen Seiten nothwendig in demselben Verhältniss:

$$\begin{aligned} PK &= u_1 X_1 H = u_1 u_2 CP. \\ CK &= PK - CP = CP(u_1 u_2 - 1). \end{aligned}$$

1) Vgl. Heyland, ETZ. 1894. Electrician Bd. 36 (1896) S. 505, 578, 651, 719, 753.

Das gleichbleibende Verhältniss zwischen CK und CP ist demnach gleich $u_1 u_2 - 1$. Während P auf dem Halbkreis CPD nach D wandert, läuft der Punkt K nach O , so dass das Verhältniss zwischen CO und CD auch $u_1 u_2 - 1$ ist. Bei Leerlauf, d. h. wenn X_2 mit O zusammenfällt, liegt F in C . Nun stellt OF , im Strommaassstab gemessen, den magnetisirenden Strom dar; daher bedeutet OC im gleichen Maassstab den magnetisirenden Strom bei Leerlauf. Im Maassstab der Kraftlinien ist OC die ganze den Ständer durchsetzende Kraftlinienmenge \mathfrak{S} .

Wir gelangen also zu einer schönen Vereinfachung der Theorie des Inductionsmotors, welche in dem Fall gilt, wenn wir für einen Motor den magnetisirenden Strom kennen, der die erforderlichen Kraftlinien \mathfrak{S} durch das Eisen und den Luftspalt treibt, und wenn wir (z. B. von unserer vorherigen Bekanntschaft mit der Form der benutzten Eisenblechscheiben) die beiden Streucoëfficienten u_1 und u_2 haben; wir können dann sogleich OC im Maassstab zeichnen, nach D verlängern, wobei $CD \cdot (u_1 u_2 - 1) = OC$ sein soll, und einen Halbkreis über CD beschreiben, welcher der geometrische Ort des Punktes P für alle Belastungen ist. Die Linie CP , multiplicirt mit u_2 gibt im Maassstab den Läuferstrom an, die Linie OP den Ständerstrom, wobei $Z_1/Z_2 = 1$ angenommen ist, vgl. S. 236.

Aber ausserdem kann man durch Erweiterung der Figur in einfacher Weise Linien erhalten, welche der Zugkraft und dem Schlipf proportional sind. Wenn wir von P aus das Loth PA auf DC fällen, so erhalten wir ein Dreieck PAC , welches dem Dreieck OHG ähnlich ist: $\angle GOH = \angle CPA = \alpha$. Nun stellt OC die im Ständer vorhandene Kraftlinienmenge \mathfrak{S} dar; also bedeutet OG die Grösse \mathfrak{S}/u_1 und HO den Theil der Läuferkraftlinien, der mit dem Läuferstrom phasengleich ist. Das Product des Läuferstromes und OH ist demnach proportional zur Zugkraft. Wir haben also:

Zugkraft proportional $CPu_2 \cdot OH$.

$$\text{Da} \quad OH = OG \cdot \cos \alpha = \frac{\mathfrak{S}}{u_1} \cdot \frac{PA}{CP},$$

$$\text{so ist} \quad \text{Zugkraft proportional} \quad CPu_2 \cdot \frac{\mathfrak{S}}{u_1} \cdot \frac{PA}{CP},$$

d. h. die Zugkraft ist proportional zu PA , da die anderen Factoren gleich bleiben. Wir schreiben für das Drehmoment $D = K_1 \cdot PA$ und wollen K_1 genauer betrachten, wenn wir das unten gegebene Beispiel durchrechnen.

Die grösste Zugkraft, welche der Motor unter irgend welchen Umständen bei einer äusseren Spannung \mathcal{E}_1 ausüben kann, wird durch den Halbmesser des Kreises CPD angegeben.

Um eine Linie zu erhalten, welche dem Schlipf proportional ist, haben wir nur daran zu denken, dass der Läuferstrom $CP \cdot u_2$ proportional ist dem Produkt des Schliffes in denjenigen Theil von OH der Kraftlinienmenge, der mit dem Strom phasengleich ist; wir erhalten dann:

$$\text{Schlipf proportional } \frac{CPu_2}{OH}.$$

Da nun
$$OH = OG \cdot \cos \alpha = \frac{OC}{u_1} \cdot \frac{CP}{PB},$$

so folgt
$$\text{Schlipf proportional } \frac{u_1 u_2 \cdot PB}{\mathcal{E}}.$$

Da u_1 , u_2 und \mathcal{E} gleichbleibende Grössen sind, so ist die Linie PB dem Schlipf proportional. Alle diese Linien PB stellen also den Schlipf¹⁾ in einem gewissen Maassstab dar, und wenn wir den Schlipf für eine Belastung kennen, so haben wir ihn auch für andere Belastungen und können danach eine Curve für den Schlipf entwerfen.

Fig. 229 zeigt ein Motordiagramm, welches nach dieser Regel hergestellt worden ist, wobei eine kleine Berichtigung vorgenommen wurde, um den Kernverlust-Strom (siehe S. 245) zu berücksichtigen. OC stellt den theoretischen Magnetisierungsstrom bei Leerlauf dar, und diesem ist OC_H in Phase mit $O\mathcal{E}_1$ zugefügt, um den Kernverlust einzuführen. CD ist so bemessen, dass $(u_1 u_2 - 1) CD = OC$ ist, und über CD ist ein Halbkreis beschrieben. Die Punkte P , P_1 und P_2 , welche verschiedene Stellungen auf dem Halbkreis einnehmen, entsprechen verschiedenen starken Belastungen, nämlich volle normale Last, grösste Zugkraft und Anlassen.

Dann geben die Linien $C_H P$, $C_H P_1$ und $C_H P_2$ den Ständerstrom für die Phase, welcher den Werthen der Zugkraft entspricht, die durch die Linien PA , $P_1 A_1$, $P_2 A_2$ dargestellt werden. Die zugehörigen Werthe des Schliffes werden durch die Linien AS , $A_1 S_1$, $A_2 S_2$ angegeben, welche proportional den wie PB in Fig. 228 erhaltenen Längen gezogen sind. Der Winkel φ ist der Verzöge-

1) Ein einfacher Weg, um PB zu erhalten, ist, DP zu verlängern bis zum Schnitt mit einem Loth, das in C auf DC errichtet wird. Der Schlipf kann auf dem Lot abgegriffen werden.

rungswinkel des Ständerstromes hinter der äusseren Spannung; der Leistungsfactor wird durch $\cos \varphi$ gegeben. Die Läuferströme für die drei Belastungen sind $CP \cdot u_2$, $CP_1 \cdot u_2$ und $CP_2 \cdot u_2$, im gleichen Maassstab, wie die anderen Ströme. Wenn indess das Umsetzungsverhältniss des Motors nicht 1 ist, wie wir bisher angenommen hatten, so müssen die nach obigem erhaltenen Werthe des Läuferstromes mit dem Verhältniss der Leiterzahlen auf Ständer und Leiter (vgl. S. 250) multiplicirt werden.

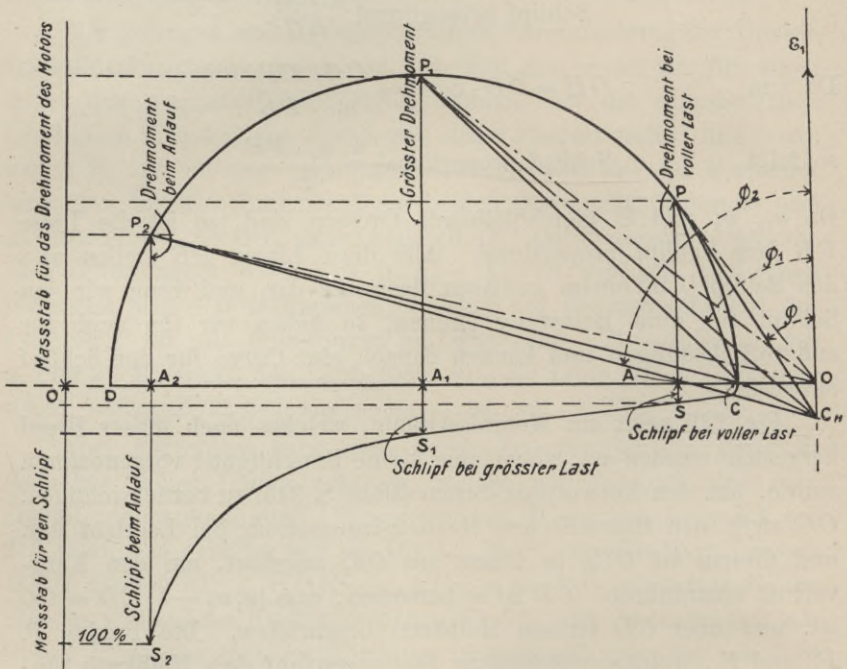


Fig. 229.

Wir haben CD so gezogen, dass

$$CD = \frac{OC}{u_1 u_2 - 1},$$

bezeichnen wir $\frac{1}{u_1 u_2 - 1}$ durch U , so wird

$$CD = OC \cdot U.$$

Die Constante U mag „Coefficient der Ausnutzung“ genannt werden, weil von ihr das Verhältniss zwischen den Kraftlinien im Ständer und den im Läufer nützlich verwandten Kraftlinien ab-

hängt. Dieser Coëfficient ist in der That ein Maass der Güte des Motors. Wenn u_1 und u_2 beide gleich 1,04 sind, so wird $U = 12,3$. Im Allgemeinen schwankt U bei verschiedenen Motortypen zwischen 30 bis herab zu 5. Die höchsten Werthe werden bei Motoren mit Schlitzen, nicht Löchern erhalten. Der schmale Luftspalt, den man bei Motoren mit Löchern herstellen kann, ermöglicht indess, U viel grösser zu machen, als es sonst sein würde; vgl. weiter S. 259.

Man kann nun leicht Ausdrücke für verschiedene Grössen, wie Ständer- und Läuferströme bei voller Last, $\cos \varphi$ u. dgl., ausgedrückt durch U , bilden. Einige davon werden unten gegeben.

Man sieht aus Fig. 229, dass es einen Werth der Ständer- und Läuferströme gibt, für den der Leistungsfactor $\cos \varphi$ ein Maximum wird, nämlich wenn die Linie des Ständerstromes OP eine Tangente des Kreises wird. In der neueren Praxis wird ein Motor, der ununterbrochen laufen soll, so gebaut, dass die Belastung, bei der $\cos \varphi$ ein Maximum wird, die volle Last ist. Das ist der in der Figur dargestellte Fall, wobei AP die Zugkraft bei Vollast ist. Im Falle der Kranmotoren, welche mit Unterbrechungen benutzt werden, und bei denen ein hoher Wirkungsgrad weniger wichtig ist, dagegen die Anlaufs-Zugkraft die grösste Bedeutung hat, stimmt der Entwurf nicht mit der obigen Regel überein.

Es ist leicht zu zeigen, dass die Linie OP , welche den Ständerstrom darstellt, den Halbkreis tangirt, wenn

$$\cos \varphi \text{ für Vollast} = \frac{U}{U+2},$$

was also ein Ausdruck für den grössten Werth des Leistungsfactors des Motors ist, ausgedrückt durch jene magnetische Streuung. Es gibt noch andere einfache Ausdrücke, welche aus den geometrischen Eigenschaften der Figur abgeleitet werden können, z. B. wenn der Leistungsfactor seinen höchsten Werth erreicht, so haben wir

Ständerstrom bei Vollast = Magnetisirungsstrom $\cdot \sqrt{U+1/4}$
und

$$\text{Läuferstrom bei Vollast} = \text{Magnetisirungsstrom} \cdot \frac{U \cdot u_2}{\sqrt{U+2}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}.$$

Bezeichnen wir ferner das Drehmoment des Motors, welches dem Ständerstrom J_1 virtuelle Ampere entspricht, mit D , das grösste Drehmoment des Motors mit D_m , so erhalten wir:

$$D_m = D \cdot \frac{J_M \cdot U}{2 \cdot J_1 \cos \varphi},$$

worin J_M den Magnetisierungsstrom bedeutet. $J_1 \cos \varphi$ ist hier einfach die Arbeitskomponente des Ständerstromes.

Der Ständerstrom bei der höchsten Zugkraft wird ferner gegeben durch:

$$J_1 = J_M \cdot \sqrt{\frac{U^2}{2} + U + 1}.$$

Im Vorhergehenden haben wir die Stromwärme-Verluste im Motor nicht in Betracht gezogen. Ihre Wirkung auf die Gestalt des Diagramms ist nur klein und darf im Allgemeinen bei der Construction vernachlässigt werden. Man kann sie aber leicht in folgender Weise in Rechnung setzen.

Wenn wir J_1 , den Ständerstrom, angenähert kennen, so lässt sich die in der Ständerwicklung durch den Widerstand verzehrte Spannung berechnen; zieht man dies von der Speisespannung \mathcal{E}_1 ab, so erhalten wir \mathcal{E} , die Spannung, welche von aussen wirken muss, um die Gegenspannung des Ständers zu überwinden. Beim Anwachsen des Stromes J_1 besteht die ganze Wirkung auf das Diagramm in einer Verkleinerung des Verhältnisses $\mathcal{E}/\mathcal{E}_1$.

Ehe wir dazu übergehen, unsere Construction auf einen ausgeführten Motor anzuwenden, wollen wir einige Formeln ableiten, aus denen die Werthe von \mathcal{E}_1 , J_1 , J_2 u. s. w. berechnet werden können. Hierzu wird es zunächst zweckmässig sein, ein vollständiges Verzeichniss der in diesem Kapitel verwendeten Zeichen zu geben.

- \mathcal{E}_1 = Spannung in virtuellen Volt an den Klemmen einer Phase der Ständerwicklung.
- E_1 = Spannung in virtuellen Volt, welche in einer Ständerphase durch den umlaufenden Haupt-Kraftlinienzug inducirt wird.
- E_2 = Spannung in virtuellen Volt, welche in einer Läuferphase durch den umlaufenden Haupt-Kraftlinienzug inducirt wird.
- J_1 = Strom im Ständer für eine Phase (virtuelle Ampere).
- J_2 = Strom im Läufer für eine Phase (Dreiphasenwicklung).
- J_0 = Leerlaufstrom des Ständers für eine Phase.
- J_H = Kernverlust-Strom für eine Ständerphase.
- J_M = Magnetisierungsstrom für eine Ständerphase.
- φ = Verzögerungswinkel (in Radianten) des Ständerstromes hinter \mathcal{E}_1 .
- ϑ = Verzögerungswinkel des Ständerstromes hinter E_2 .
- n_1 = Frequenz des Ständerstromes.
- n_2 = Frequenz des Läuferstromes.
- R_1 = Widerstand einer Ständerphase bei 60 ° C.
- R_2 = Widerstand einer Läuferphase bei 60 ° C.
- R_3 = Widerstand des Anlagers.

p = Zahl der Polpaare.

Z_1 = Zahl der Ständerleiter für eine Phase.

Z_2 = Zahl der Läuferleiter für eine Phase.

W = Leistung des Motors in Watt.

w = Verlust im Läufer in Watt.

w_0 = Verlust im Ständereisen bei Leerlauf.

\mathcal{E} = Scheitelwerth der wirklichen Kraftlinienmenge (d. i. nützliche Kraftlinien und Streuung zusammen) für einen Pol des Ständers.

\mathcal{E}_0 = Scheitelwerth der nützlichen Kraftlinienmenge für einen Pol des Ständers.

\mathcal{E}_1 = Scheitelwerth der hypothetischen Kraftlinienmenge für einen Pol des Ständers (vgl. S. 232).

\mathcal{E}_2 = Scheitelwerth der hypothetischen Kraftlinienmenge für einen Pol des Läufers.

u_1 = Coëfficient der Ständerstreuung (vgl. S. 232).

u_2 = Coëfficient der Läuferstreuung.

U = Coëfficient der Ausnutzung = $1/(u_1 u_2 - 1)$.

D = Drehmoment des Motors in kgm.

Wir leiten nun folgende Formeln ab.

Klemmenspannung an einer Ständerphase \mathcal{E}_1 . Da \mathcal{E} der Scheitelwerth der Kraftlinienmenge ist, so beträgt die EMK in einer Windung, welche einen Pol umschliesst, $2\pi n_1 \mathcal{E} \sin 2\pi n_1 t \cdot 10^{-8}$. Der Scheitelwerth der Klemmenspannung ist demnach $2\pi n_1 \mathcal{E} \cdot 10^{-8}$ Volt.

Der virtuelle Werth wird durch Multiplication mit 0,707 erhalten. Um die Spannung für eine Phase zu bekommen, multipliciren wir mit der Zahl der Windungen in einer Phase, welche gleich der halben Zahl der Leiter ist, und mit dem Breitencoëfficienten (vgl. S. 81). So wird schliesslich

$$\mathcal{E}_1 = 4,45 q n_1 \mathcal{E} Z_1 / 2 \cdot 10^8 \text{ Volt} \quad (1)$$

Dies mag als allgemeine Gleichung für den virtuellen Werth der Klemmenspannung einer Phase eines dreiphasigen Motors gelten, wobei wir die Verluste im Widerstand vernachlässigen.

Für die Zwecke unseres Entwurfes hängt \mathcal{E} von zwei Factoren ab: 1. dem zulässigen Scheitelwerth von \mathfrak{B} und 2. dem Inhalt der Polfläche. In Wirklichkeit hängt \mathcal{E} , während der Motor läuft, von der äusseren Speisespannung ab, genau wie in einem Transformator der Scheitelwerth der Kraftlinienmenge von der Speisespannung bestimmt wird; aber der Motor ist so gebaut, dass der Werth von \mathfrak{B} die Werthe, die von der Praxis für wirtschaftlich anerkannt werden, nicht überschreitet, so lange er mit der Spannung läuft, für die er bestimmt ist; vgl. S. 173 und 219. Sind also E_1 , n_1 und Z_1 gegeben, so können wir \mathcal{E} bestimmen.

Der Werth von \mathfrak{B} . Dieser lässt sich aus \mathfrak{S} in folgender Weise bestimmen. 1. Im Luftspalt, für den wir Sinusvertheilung der Kraftlinien annehmen, ist der Scheitelwerth von \mathfrak{B} bei Leerlauf so gross, dass sein Product mit 0,637 (dem Mittelwerth des Sinus) und mit der Grösse der Polfläche in cm^2 \mathfrak{S}/u_1 ergibt. Indessen ist in der Praxis der Mittelwerth von \mathfrak{B} näher 0,7 als 0,637 des Scheitelwerthes von \mathfrak{B} , so dass der

$$\text{Scheitelwerth } \mathfrak{B}_1 \text{ bei Leerlauf} = \frac{\mathfrak{S}}{\text{Polfläche} \cdot u_1 \cdot 0,7} \quad (2)$$

2. In den Ständerzähnen ist der

$$\text{Scheitelwerth } \mathfrak{B}_2 = \frac{\mathfrak{S}}{\text{Querschnitt des Zahnes} \cdot 0,7} \quad (3)$$

3. Für die anderen Theile des Ständereisens wechseln die Werthe von \mathfrak{B} sehr stark, und der einzige Weg, einen Mittelwerth zu erhalten, ist, ihn nach der Zeichnung der Ständerbleche abzuschätzen, indem man die Grösse der Polflächen und die Dicke des Ständereisens berücksichtigt.

4. Mit den Läuferzähnen verfahren wir wie mit den Ständerzähnen, nur nehmen wir \mathfrak{S}/u_1 statt \mathfrak{S} .

Der Magnetisierungsstrom. Dieser wird gefunden, indem man zuerst die erforderliche Gesamt-Strommenge bestimmt, welche die Drähte zwischen den Mitten zweier Pole durchfliessen muss, damit eine magnetomotorische Kraft entsteht, welche gross genug ist, um den Scheitelwerth \mathfrak{B} zu erzeugen. Wir ziehen eine Linie durch den magnetischen Kreis, welche die Orte verbindet, wo \mathfrak{B} seinen grössten Werth hat, bilden für alle Stücke des Kreises den Ausdruck $\mathfrak{B}l/\mu$ und addiren. Dann erhalten wir die magnetomotorische Kraft

$$M = 2 \mathfrak{B}_1 l_1 + 2 \mathfrak{B}_2 l_2/\mu_2 + 2 \mathfrak{B}_3 l_3/\mu_3 + \mathfrak{B}_4 l_4/\mu_4 + \mathfrak{B}_5 l_5/\mu_5 \quad (4)$$

Darin sind l_1 bis l_5 der Reihe nach die in cm gemessenen Längen des Luftspaltes, der Ständer-, der Läuferzähne, des Ständer- und des Läuferisens, und die Indices an \mathfrak{B} und μ beziehen sich auf magnetische Dichte und Permeabilität in denselben Stücken. Die ganze Strommenge in den Leitern zwischen den Mitten zweier benachbarter Pole ist gleich $M/1,257$. Die Hälfte dieser Strommenge wird geliefert von dem Strom in den Leitern einer Phase im Scheitelwerth und die andere Hälfte von den Leitern der anliegenden Phasen, in den der Strom die Hälfte des Scheitelwerthes erreicht hat. Der magnetisirende Strom für die Phase ist

$$J_M = \frac{M}{1,257} \cdot \frac{2p}{2Z_1} \cdot 0,707 \text{ virt. Amp.} \quad (5)$$

Der Kernverlust-Strom J_H wird gefunden aus den Gewichten der verschiedenen Eisentheile und den Verlusten w_0 , die bei den verschiedenen magnetischen Dichten darin stattfinden (siehe S. 173).

Da jede Phase ein Drittel dieses Verlustes trifft, so ist

$$J_H = \frac{w_0}{3 \mathcal{G}_1} \quad (6)$$

Ausdrücke für die Zugkraft (Drehmoment). Um die Zugkraft durch den Läuferstrom J_2 und die magnetische Dichte auszudrücken, ist das einfachste, den Strom im Läuferleiter umzurechnen auf Strom für 1 cm Umfang, wie es auf S. 204 beschrieben worden ist. Nennen wir den Scheitelwerth des Stromes für 1 cm Umfang i_2 , so ist

$$i_2 = \frac{1,41 \cdot J_2 \cdot 3Z_2}{2\pi \varrho},$$

worin ϱ den Halbmesser des Läufers in cm bedeutet. Wenn der Strom und die magnetische Dichte \mathfrak{B} beide sich wie eine Sinusfunction ändern, so ist die Kraft für 1 cm auf die Leiter von der Länge l

$$\frac{1}{10} \mathfrak{B} \cdot i_2 l \sin \vartheta^2,$$

worin ϑ der Phasenwinkel eines beliebigen Theils des Umfanges ist. Um den Mittelwerth zu erhalten, müssen wir von 0 bis π integriren und durch π dividiren:

$$\frac{l}{\pi \cdot 10} \cdot \int_0^\pi \mathfrak{B} i_2 \sin \vartheta^2 d\vartheta = \frac{\mathfrak{B} i_2 l}{20} \text{ cgs.}$$

Die ganze Kraft für den Pol ist

$$\frac{2\pi \varrho l \mathfrak{B} i_2 q}{2p \cdot 20},$$

worin q ein Breitencoefficient ist.

Nun sahen wir in Fig. 228, dass die magnetischen Kraftlinien, die mit dem Strom phasengleich waren, gleich $\mathcal{S} \cos \alpha / u_1$ sind, und dies ist gleich

$$\frac{2\pi \varrho}{2p} \cdot \mathfrak{B} \cdot 0,637,$$

so dass das Drehmoment in kg für alle Pole ist:

$$D = \frac{\mathcal{S} \cdot i_2 \cdot \cos \alpha \cdot 2p \cdot \varrho \cdot q}{20 \cdot 0,637 \cdot 981 \cdot 10^5 \cdot u_1}.$$

Setzt man hier den oben gefundenen Werth von i_2 ein, so erhält man

$$D = 1,08 \cdot 10^{-9} \cdot \mathfrak{E} \cdot p \cdot q \cdot Z_2 \cdot J_2 \cdot \cos \alpha / u_1.$$

Nun ist in Fig. 228 die Linie $PA = CP \cos \alpha$; die Länge von CP in mm gibt die virtuellen Ampere für einen Läuferleiter, dividirt durch $u_2 \cdot Z_1 / Z_2$ (vgl. S. 233). Setzen wir noch $u_1 = u_2$, so wird

$$D = 1,08 \cdot 10^{-9} \mathfrak{E} p q Z_1 \cdot \overline{PA},$$

worin \overline{PA} in Millimetern zu messen ist (7)

Dies ergibt den auf S. 238 erwähnten Werth der Constanten K_1 .

Es ist von Interesse, die Richtigkeit dieses Ergebnisses zu prüfen, indem man es auf eine vollständig andere Weise ableitet. Statt das Product des Läuferstromes mit der magnetischen Dichte zu integriren, können wir auch das Product aus der EMK \mathfrak{E} in die mit ihr phasengleiche Componente des Ständerstromes bilden und durch die Winkelgeschwindigkeit dividiren, um das Drehmoment zu erhalten:

$$D \cdot \frac{2\pi n_1}{p} = 3 \mathfrak{E}_1 J_1 \cos \varphi.$$

Setzen wir hier den Werth von \mathfrak{E}_1 aus Gleichung (1) S. 243 ein und bedenken, dass $J_1 \cos \varphi = PA$ (vgl. Fig. 228), so erhalten wir — die Watt sind in kgm/sec umzurechnen —

$$D = 1,08 \cdot 10^{-9} \mathfrak{E} p q Z_1 \cdot \overline{PA}$$

wie oben.

Wir haben bisher die Verluste in Ständer und Läufer vernachlässigt. Das Ergebniss stimmt ebenso gut, wenn diese in Rücksicht gezogen werden, aber die Rechnung ist verwickelter. Wir schreiben W_1 für die Watt, welche vom Ständer-Drehfeld auf den Läufer übertragen werden, und W_2 für die Watt, die vom Läufer als äussere Leistung abgegeben werden, so dass $W_1 - W_2 = w$ den Verlust im Läufer angibt. Dann ist

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{W_2 + w}{W_2},$$

$$D \cdot \frac{2\pi n_2}{p} = W_2$$

oder

$$D \cdot \frac{2\pi n_1}{p} = W_2 + w.$$

Wenn wir die Leistung des Motors vorschreiben, und demnach auch w (welches nahe gleich $3J_2^2 R_2$) ist, so können wir das Drehmoment ausrechnen:

$$D = \frac{0,0163 p}{n_1} \cdot (W_2 + 3J_2^2 R_2) \dots \dots \dots (8)$$

Hieraus ergibt sich, dass der Schliff ist:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{3J_2^2 R_2}{3J_2^2 R_2 + W_2} \dots \dots \dots (9)$$

Wir sind nun in der Lage, die Construction der Fig. 228 auf einen wirklichen Motor anzuwenden. Der Motor, den wir der Prüfung unterziehen, ist auf Tafel XIII dargestellt. Aus den Zeichnungen und Angaben, welche die Firma gütigst zur Verfügung gestellt hat, erhalten wir folgende Zusammenstellung der Einzelheiten.

Modell	Kolben Δ M 20
Leistung, mechan. gebremst	16 P
Drehzahl bei Leerlauf	840 i. d. Min.
Frequenz	42 i. d. Sec.
EMK für die Phase	110 virt. Volt
Zahl der Pole	6
Polstand	205 mm
Magnetfläche für 1 Pol	460 mm ²
Aeusserer Durchmesser des Ständers	590 mm
Innerer Durchmesser des Ständers	391,5 mm
Ganze Eisenlänge des Ständers parallel zur Achse	225 mm
Zahl der Ständerlöcher	36
Löcher für 1 Pol	6
Zahl der Drähte in einem Loch	7
Leiter in 1 Phase des Ständers	84
Widerstand des Ständers für 1 Pol, bei 60 °C	0,043 Ohm
Aeusserer Durchmesser des Läufers	390 mm
Innerer Durchmesser des Läufers	240 „
Zahl der Läuferlöcher	90
Leiter in 1 Phase des Läufers	60
Löcher für 1 Pol	10
Zahl der Drähte in 1 Loch	2
Widerstand des Läufers für 1 Phase, bei 60 °C	0,033 Ohm

Ständer und Läufer besitzen Sternschaltung (Fig. 212).

Die Spannung zwischen den Klemmen des Ständers beträgt etwas über 180 virt. Volt, was 110 virt. Volt für einen Zweig des Sternes ergibt. Die Wicklung des Ständers ist hemitropisch (vgl. S. 84), indem jeder der drei gleichen Pole von zwei Spulen in besonderen Löchern umgeben wird (vgl. Tafel XIII). Der Breitencoefficient dieser Art Wicklung (vgl. S. 81) ist $q = 0,96$.

Aus Formel (1) S. 243 erhalten wir

$$\mathfrak{S} = \frac{100 \cdot 2 \cdot 10^8}{4,45 \cdot 0,96 \cdot 42 \cdot 84} = 1,46 \cdot 10^6.$$

Nehmen wir für u_1 den Werth 1,04, so ergibt Formel (2):

$$\mathfrak{B}_1 = \frac{1,46 \cdot 10^6}{460 \cdot 1,04 \cdot 0,7} = 4300$$

$$\mathfrak{B}_2 = \frac{1,46 \cdot 10^6}{22,5 \cdot 1,8 \cdot 6 \cdot 0,9 \cdot 0,7} = 9500.$$

Der Factor 0,9 ist eingesetzt worden, um die Papierisolation zwischen den Eisenblechen zu berücksichtigen.

Aehnlich erhalten wir $\mathfrak{B}_3 = 10500$, $\mathfrak{B}_4 = 5000$ und $\mathfrak{B}_5 = 6000$.

Die magnetomotorischen Kräfte für verschiedene Theile ergeben sich folgendermaassen:

	\mathfrak{B}	Länge	μ	M
Für den Luftspalt	4300	0,075	$\cdot 2/1$	= 650
Für die Ständerzähne	9500	0,8	$\cdot 2/2000$	= 17
Für die Läuferzähne	10500	1	$\cdot 2/1900$	= 11
Für das Ständereisen	5000	28	$/2800$	= 50
Für das Läuferisen	6000	20	$/2800$	= 43
			zusammen	771

Hierzu sind etwa 610 A zwischen den Mitten zweier Pole (vgl. S. 244) erforderlich, d. i. 305 A in dem Löcherpaar, das den Scheitelwerth des Stromes führt, und da in diesen Löchern 14 Leiter liegen, 21,8 A Scheitelwerth für den Leiter oder der magnetisirende Strom beträgt 15,4 virt. Ampere. Diese Berechnung stimmt sehr nahe überein mit dem, was beim praktischen Betrieb gefunden wird. Motoren der gleichen Type, wie der betrachtete, mit wenig verschiedenem Luftspalt erforderten einen magnetisirenden Strom von 12 bis 16 A. Der Scheitelwerth der magnetischen Dichte in den Zähnen des Ständers und des Läufers ist manchmal höher, wenn die Dichte nicht nach einer Sinusformel vertheilt ist; sie steigt thatsächlich oft bis 12000 in denjenigen Zähnen, welche im Augenblick sowohl den Haupt- als auch den Streuzug der Kraftlinien führen.

Nachdem wir den magnetisirenden Strom zu 15,4 virt. A erhalten haben, errichten wir die Linie OC in Fig. 230 in solchem Maassstab, dass sie diesen Strom darstellt, und verlängern sie bis D , wobei $CD = U \cdot OC$. Für den vorliegenden Motor mag U zu 12,3 angenommen werden (vgl. S. 241). Ueber CD schlagen wir einen Halbkreis. Demnächst fügen wir zu OC den Kernverlust-Strom. Dieser wird, wie folgt, berechnet. Das Ständereisen wiegt 183 kg;

bei $\mathfrak{B} = 5000$ und einer Frequenz von 42 beträgt der Verlust etwa 2 Watt für 1 kg.¹⁾

Die Ständerzähne wiegen 24 kg und erfordern 4 Watt für 1 kg, alles zusammen demnach 462 Watt. Durch Division mit 3 und mit der Spannung erhalten wir 1,4 virt. A. als Kern-Verluststrom in einer Phase. Dies wird als OC_H rechtwinklig zu OC aufgetragen.

Hätten wir einen Motor zu entwerfen, so würden wir von C_H aus eine Tangente C_HP an den Halbkreis legen und ihre Länge

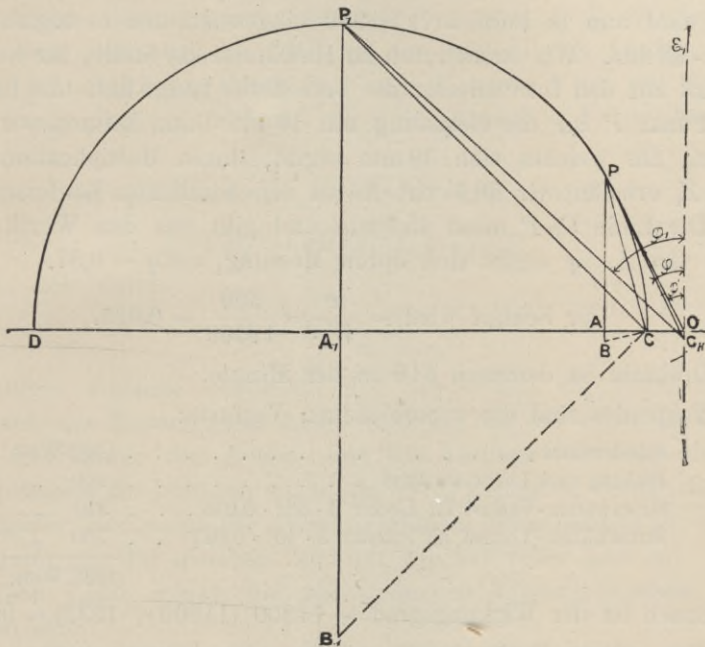


Fig. 230.

im Maassstab als Strom bei voller Last bezeichnen. Die Leiter müssten stark genug gewählt werden, um diesen Strom leicht zu führen, und für das Drehmoment müsste sich der richtige Werth ergeben. Wenn dies nicht annähernd zuträfe, müssten wir den Entwurf verbessern (siehe S. 210) und wiederholt versuchen. Zuletzt würden wir den Strom bei voller Last als eine Linie erhalten, die nahe mit der Tangente C_HP übereinstimmt, so dass der $\cos \varphi$ klein wird.

1) vgl. Dynamo-elektrische Maschinen, 6. Aufl.

Indess, wenn wir die Methode auf einen bereits fertigen Motor anwenden, ist es nicht erlaubt, anzunehmen, dass der Strom bei voller Last mit $C_H P$ zusammenfällt. Die Linie CP gibt uns angenähert den Läuferstrom für die Rechnung nach Formel (8) S. 247. Wir messen sie aus und multipliciren mit $u_2 Z_1/Z_2$; dies ergibt 60 A, was wir in Formel (8) einsetzen. Der Motor leistet 16 P, fügen wir noch 2 % für Reibung und Luftwiderstand hinzu, so wird

$$D = \frac{0,0162 \cdot 3}{42} \cdot (12000 + 320) = 14,3.$$

Dies wird nun in Formel (7) S. 246 eingesetzt, und es ergibt sich $\overline{PA} = 38$ mm. Wir suchen nun im Halbkreise die Stelle, für welche das Lot auf den Durchmesser die berechnete Länge hat, und finden den Punkt P für die Belastung mit 16 P. Dann können wir CP ziehen, für welches sich 39 mm ergibt; durch Multiplication mit $Z_2/u_1 Z_1$ erhalten wir 56,5 virt. A. als den wirklichen Läuferstrom.

Die Linie $C_H P$ misst 45,5 mm und gibt uns den Werth von J_1 in virt. A. φ ergibt sich durch Messung, $\cos \varphi = 0,87$.

$$\text{Der Schlupf wird} = \frac{w}{W_1} = \frac{300}{12300} = 0,025.$$

Die Drehzahl ist demnach 818 in der Minute.

Folgendes sind die verschiedenen Verluste:

Ständereisen	462 Watt
Reibung und Luftwiderstand	200 „
Stromwärme-Verlust im Läufer $3 \cdot 56^2 \cdot 0,033$. . .	310 „
Stromwärme-Verlust im Ständer $3 \cdot 46^2 \cdot 0,043$. . .	260 „
	1232 Watt.

Demnach ist der Wirkungsgrad = $11800/(11800 + 1232) = 90$ %.

Das grösste Drehmoment, welches der Läufer ausübt, wird durch den Halbmesser $A_1 P_1$ angegeben. Dieses ist 91 mm lang und demnach gleich 34 kgm. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus Formel (9) zu etwa 90 % der des Feldes, und daraus die höchste Leistung zu 34 P.

Anlasswiderstand für Dreiphasenmotoren. Das Motor-diagramm zeigt, dass für grossen Schlupf (wie z. B. beim Anlaufen, wenn $n_1 = n_2$) die Ströme im Motor mehrmals stärker sind als bei gewöhnlicher Belastung, und dass sie ausserdem beträchtliche Phasenverschiebungen haben. In Folge der starken Rückwirkung solcher verzögerter Ströme wird nicht nur der Stromkreis erheblich gestört, sondern die Anlass-Zugkraft ist auch klein. Daher wird

bei Motoren von einiger Grösse stets ein Anlasswiderstand im Läuferkreis angewandt. Die diesem Widerstand am zweckmässigsten zu gebende Grösse ist demnach von einer gewissen Bedeutung und einer besonderen Untersuchung werth.

Wir nehmen an, der Motor soll bei voller Last angelassen werden. Wenn wir den ganzen Widerstand im Läuferkreis R_0 so bemessen können, dass der Läuferstrom beim Anlassen und seine Phasenverschiebung ebenso gross sind, wie bei voller Last, so wird auch die Kraftlinienmenge dieselbe sein, wie bei voller Last, denn die inducirte Gegenspannung des Ständers muss auch die gleiche sein. Nun lässt sich die EMK in den Leitern des Läufers bei voller Last ausdrücken durch $(n_1 - n_2) \cdot F$, worin F von der Kraftlinienmenge abhängt, während sie beim Anlauf $n_1 F$ ist. So erhalten wir:

$$J_2 \cdot \sqrt{R_2^2 + 4\pi^2 (n_1 - n_2)^2 L_2^2} = (n_1 - n_2) F$$

und

$$J_2 \cdot \sqrt{R_0^2 + 4\pi^2 n_1^2 L_2^2} = n_1 F,$$

woraus sich ergibt:

$$R_0 = R_2 \cdot \frac{n_1}{n_1 - n_2}.$$

Dieser einfache Ausdruck lehrt uns: wenn der Strom beim Anlassen des Motors nicht höher sein soll als bei voller Last, so wird die Summe des Anlass- und des Läuferwiderstandes durch Multiplication des letzteren mit $n_1/(n_1 - n_2)$ gefunden. Unter diesen Umständen, und wenn der Anlasswiderstand inductionsfrei ist, läuft der Motor mit der gleichen Zugkraft wie bei voller Last an.

Dem Leser mögen die nachstehenden Literaturangaben von Nutzen sein.

Bücher und Aufsätze über die Theorie der Inductionsmotoren.

- Duncan, L., „Alternate Current Motors“, El. World (N. Y.), Bd. 17, S. 341, 357.
- Hutin und Leblanc, La Lumière Électrique, Bd. 40, S. 373.
- Sahulka, Dr. J., „Ueber Wechselstrom-Motoren mit magnetischem Drehfelde“. Leipzig 1892.
- Picou, R.-V., „Les Moteurs Électriques à champ magnétique tournant“. Paris 1892.
- Arnold, E., „Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrom-Motoren“; Aufsätze in El. World (N. Y.), 1893—94.

- Ferraris, G., „A Method for the Treatment of Rotating or Alternating Vectors &c.“, *Electrician*, 1894, Bd. 33, S. 110, 129, 152, 184.
- Reber, „Theory of Two- and Three-phase Motors“, *Amer. Inst. Elec. Engineers*, Oct. 1894.
- Lori, *L'Électricista*, July 1, 1895.
- Danielson (Graphische Theorie), *El. Zeitschr.*, 1895, S. 601, 674, 758.
- Goerges, *El. Zeitschr.*, 1895, S. 750, 768, 789, 804.
- Heyland (Graphische Theorie), *El. Zeitschr.*, 1895, S. 649, 697, 823.
- Behrend, *El. Zeitschr.*, 1896, S. 63.
- Blondel, *Lum. Elec.*, 1893, Bd. 50, S. 351, 473, 516, 605. *El. Zeitschr.*, 1895, S. 625 und 1896, S. 116, 366; auch *L'Industrie Électrique*, 1896.
- Behn-Eschenburg, *El. Zeitschr.*, 1896, S. 10.
- Kübler, *El. Zeitschr.*, 1896, S. 788; *El. World*, Bd. 29, S. 99.
- Arno, *Bull. Soc. Inter. des El.*, Bd. 14, S. 595, 1897; *Electrician*, Bd. 40, S. 254; *Ecl. él.*, Bd. 13, S. 390.
- Steinmetz, *American Inst. Elec. Engineers*, December 1894, S. 803, 1897, S. 185 und 1898, S. 35.
- Atkinson, *Proc. Inst. Civil Eng.*, Bd. 133, Th. III; *Engineer*, Bd. 80, S. 218, 1898.
- Wilson, E., *J. Inst. Elec. Eng.*, Bd. 28, S. 321; *Electrician*, Bd. 42, S. 729, 801, 824, 861; Bd. 37, S. 565.
- Hawkins, C. C., *Electrician*, Bd. 42, S. 467, 528, 610, 866.
- Field, M. B., *Elec. Rev.*, Bd. 44, S. 194, 271, 439, 492, 579.
- Wiener, A. E., *Amer. Electrician*, Bd. 10, S. 317.
- Siehe auch S. 200 und die Fussnote im Anfang des Kap. XIII.
-

Kapitel IX.

Analytische Theorie der mehrphasigen Motoren.

Die folgende Methode, die Theorie mehrphasiger Motoren zu behandeln, ist eine Abänderung der von Potier¹⁾ angegebenen. Statt das sich drehende Feld als ein Kraftlinienbündel von veränderlicher Zahl anzusehen, welches die Drähte des Ankers schneidet, während der letztere sich dreht, wollen wir es auflösen in zwei Bündel von Wechselkraftlinien, welche unveränderlich nach den beiden auf einander senkrechten Achsen X und Y (Fig. 231) gerichtet sind. Dann können wir alle Bewegungen des Ankers, seine Magnetisirung und seinen Strom auf diese gemeinsamen Achsen beziehen.

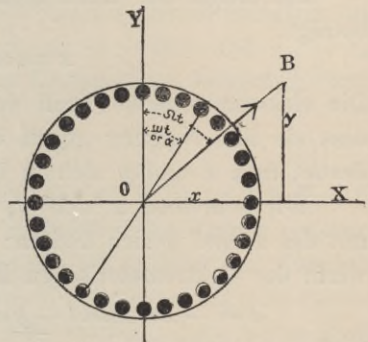


Fig. 231. Läufer im Drehfeld.

Die Linie OB stellt Richtung und Betrag der sich drehenden Magnetisirung dar (d. h. die Resultierende der vom Strom im Ständermagnet und vom Strom im Läufer erzeugten Magnetisierungen). Dann geben x und y Richtung und Stärke ihrer wagerechten und senkrechten Komponenten in einem beliebigen Zeitpunkte an.

Wenn das Feld sich mit der gleichförmigen Geschwindigkeit von Ω Radianten²⁾ in der Secunde dreht und in seiner Stärke gleich bleibt, so ist

$$x = x_m \sin \Omega t \quad \text{und} \quad y = y_m \cos \Omega t,$$

1) A. Potier, Sur les moteurs à induit fermé sur lui-même. Bull. Société internat. des Electr. Mai 1894. Seite 248.

2) 1 Radiant = $\frac{360^\circ}{2\pi} = 57,3^\circ$.

worin x_m und y_m die Scheitelwerthe der wagerechten und der senkrechten Componenten sind und die Stärke des sich drehenden Kraftlinienbündels darstellen.

Wollen wir indess ganz allgemein bleiben, und auch Felder mit elliptischer Drehung, wie sie bei einphasigen Motoren vorkommen, berücksichtigen, so müssen wir schreiben:

$$x = x_m \sin \Omega t \text{ und } y = y_m \sin(\Omega t + \varphi), \dots \dots (1)$$

worin x_m und y_m nicht nothwendig gleich sind.

Betrachten wir den allgemeinen Fall zuerst. Der Anker mag N Leiter enthalten, welche man immer als $\frac{1}{2} N$ Windungen ansehen kann, die als Trommelwicklung den Anker umgeben; jede Windung soll den Widerstand r besitzen.

Dreht sich der Anker mit einer Geschwindigkeit von ω Radianen in der Secunde, so lässt sich der Winkel, den die Ebene einer Windung mit der Senkrechten einschliesst, durch ωt darstellen (vgl. Fig. 231).

Die Menge der Kraftlinien, welche diese Windung durchsetzen, beträgt

$$x \cos \omega t - y \sin \omega t.$$

Die elektromotorische Kraft der Windung rührt sowohl davon her, dass sie ihre Neigung gegen die Felder x und y ändert, als auch davon, dass x und y sich in ihrer Grösse ändern.

Wir schreiben \dot{x} und \dot{y} , um die Geschwindigkeit anzugeben, mit der x und y sich ändern; dann ergibt sich für den Augenblickswerth der elektromotorischen Kraft:

$$e = -x\omega \sin \omega t - y\omega \cos \omega t + \dot{x} \cos \omega t - \dot{y} \sin \omega t$$

oder

$$e = \cos \omega t (\dot{x} - y\omega) - \sin \omega t (\dot{y} + x\omega) = ir, \dots \dots (2)$$

worin i der Strom in der Windung und r ihr Widerstand ist.

Um einen Ausdruck für das Drehmoment aller Windungen zu erhalten, hat man den Ausdruck für das Drehmoment einer Windung über eine halbe Umdrehung des Ankers zu integrieren; für diesen Zweck ist es bequemer, den Winkel, den eine Windung mit der Y -Achse einschliesst, mit α zu bezeichnen. Das Drehmoment¹⁾ einer Windung ist dann

$$i (y \cos \alpha + x \sin \alpha).$$

1) Es wird vielleicht eine Schwierigkeit in den Gedanken des Lesers beseitigen, wenn erklärt wird, dass das Drehmoment unabhängig vom Halbmesser des Läufers ist, weil x und y die ganze Menge der Kraftlinien bedeuten, welche

Durch Einsetzen des Werthes für i aus (2) und Integriren zwischen $\alpha = 0$ und $\alpha = \pi$, und indem man berücksichtigt, dass der Winkel π $1/2 N$ Windungen umfasst, so dass

$$\Sigma \sin \alpha^2 = \Sigma \cos \alpha^2 = 1/4 N \text{ und } \Sigma \sin \alpha \cos \alpha = 0,$$

erhalten wir für das Drehmoment den Ausdruck

$$D (\text{Augenblickswerth}) = \frac{N}{4r} [y (\dot{x} - y\omega) - x (\dot{y} + x\omega)].$$

Im allgemeinen Falle war

$$x = x_m \sin \Omega t \text{ und } y = y_m \sin (\Omega t + \varphi).$$

Setzen wir nun die Werthe für x , y , \dot{x} , \dot{y} ein, so erhalten wir nach Integration zwischen den Grenzen $\Omega t = 0$ und $\Omega t = 2\pi$, und Division durch 2π

$$D (\text{Mittelwerth}) = \frac{N}{8r} [2x_m y_m \Omega \sin \varphi - \omega (x_m^2 + y_m^2)]. \quad (3)$$

Dieser allgemeine Ausdruck für das Drehmoment lässt sich auf jede Form eines mehrphasigen Motors mit elliptisch rotirendem Felde anwenden. Wenn das Feld bei gleichbleibender Geschwindigkeit und gleichbleibender Stärke sich dreht, so ist $\varphi = 90^\circ$ und $y_m = x_m$; hierdurch wird der Ausdruck für das Drehmoment vereinfacht auf

$$\frac{N}{4r} \cdot x_m^2 [\Omega - \omega].$$

Wenn der Anker von der gewöhnlichen Art ist, z. B. wie ihn Fig. 161 u. 162 zeigt, so dass der magnetische Widerstand des Kreises praktisch von der Richtung des Feldes unabhängig ist, so wird der Ausdruck für die den Achsen X und Y parallelen Componenten der vom Läuferstrom erzeugten Quermagnetisierung sehr einfach, denn wenn \mathcal{Q} die Menge der Kraftlinien bedeutet, die senkrecht zur Ebene einer Windung erzeugt werden, wenn der Strom 1 in dieser Windung fließt, so sind die Componenten x_1 und y_1 des Querfeldes

$$x_1 = -\mathcal{Q} \cdot \Sigma i \cos \alpha \text{ und } y_1 = \mathcal{Q} \cdot \Sigma i \sin \alpha.$$

Setzt man für i seinen Werth

$$\frac{1}{r} [(\dot{x} - y\omega) \cos \alpha - (\dot{y} + x\omega) \sin \alpha]$$

und integrirt man zwischen den Grenzen $\alpha = 0$ und $\alpha = \pi$, so dass alle Windungen inbegriffen sind, so erhält man

durch den Läufer wagrecht und senkrecht verlaufen. Denn eine Vergrößerung des Halbmessers würde die magnetische Dichte verringern (x und y bleiben gleich), während sie zugleich den Hebelarm der Kraft vergrößert.

$$x_1 = -\frac{N \cdot \mathcal{L}}{4r} \cdot (\dot{x} - y\omega) \text{ und } y_1 = -\frac{N \cdot \mathcal{L}}{4r} \cdot (\dot{y} + x\omega). \quad (4)$$

Statt $\frac{N \cdot \mathcal{L}}{4r}$ schreiben wir $\frac{1}{u}$, so dass

$$u x_1 = -(\dot{x} - y\omega) \text{ und } u y_1 = -(\dot{y} + x\omega).$$

Um einen Ausdruck für die Componenten des vom äusseren Strome herrührenden (ursprünglichen) Feldes zu erhalten, haben wir nur das Querfeld vom resultirenden Felde abzuziehen; wenn \mathcal{E}_x und \mathcal{E}_y die beiden Componenten des ursprünglichen Feldes nach den Richtungen der X - und Y -Achse bedeuten, so ist

$$\mathcal{E}_x = x - x_1 \text{ und } \mathcal{E}_y = y - y_1$$

oder

$$\left. \begin{aligned} u \cdot \mathcal{E}_x &= ux + \dot{x} - y\omega \\ u \cdot \mathcal{E}_y &= uy + \dot{y} + x\omega \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Aus den Componenten des ursprünglichen Feldes können wir hier nach x und y finden, und umgekehrt.

Wir wollen nunmehr diese Formeln auf den Fall eines einfachen Motors anwenden, dessen Drehfeld die wagrechte und die senkrechte Componente

$$x_m \sin \Omega t \text{ und } x_m \cos \Omega t$$

besitzt. Nach den Gleichungen (5) ist

$$u x_m \sin \Omega t + x_m \Omega \cos \Omega t - \omega x_m \cos \Omega t = u \cdot \mathcal{E}_x,$$

wonach sich die Componente des ursprünglichen Feldes nach der X -Achse ergibt zu

$$\mathcal{E}_x = x_m \frac{\sqrt{u^2 + (\Omega - \omega)^2}}{u} \sin(\Omega t + \beta),$$

worin

$$\beta = \text{arc tg } \frac{\Omega - \omega}{u}.$$

Die Componente nach der Y -Achse hat denselben Werth, nur dass der sin durch den cos ersetzt wird.

Das Drehmoment ist, wie wir (S. 255) gesehen haben

$$\frac{N}{4r} x_m^2 (\Omega - \omega).$$

Um die Leistung des Läufers zu erhalten, multipliciren wir mit der Winkelgeschwindigkeit ω

$$P = \frac{N}{4r} x_m^2 \omega (\Omega - \omega).$$

Nun wollen wir zunächst die im Läufer erzeugte Wärme betrachten. In einer Windung wird in jeder Secunde die Menge $r i^2$ Joule erzeugt; setzen wir den Werth von i ein und integrieren wie vorher über alle Windungen, so erhalten wir

$$\frac{N}{4r} [(\dot{x} - y \omega)^2 + (\dot{y} + x \omega)^2]$$

als den Augenblickswerth.

Der Mittelwerth hiervon während einer vollen Periode gibt die während der Secunde erzeugte Wärmemenge zu

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{4r} [(x_m^2 + y_m^2)(\Omega^2 + \omega^2) - 4x_m y_m \Omega \omega \sin \varphi].$$

Handelt es sich um ein gleichmässiges Drehfeld $x_m = y_m$ und $\sin \varphi = 1$, so ist

$$W = \frac{N}{4r} x_m^2 (\Omega - \omega)^2$$

$$\text{und } P + W = \frac{N}{4r} x_m^2 [(\Omega - \omega)^2 + \omega(\Omega - \omega)] = \frac{N}{4r} x_m^2 \Omega (\Omega - \omega),$$

schliesslich der Wirkungsgrad des Läufers

$$\frac{P}{P + W} = \frac{\omega}{\Omega},$$

dieses Ergebniss haben wir schon aus anderen Betrachtungen erhalten (vgl. S. 233).

Um den Verlust in einem zweipoligen Ständer zu berechnen, bezeichnen wir die ganze Zahl der magnetisirenden Windungen, die er trägt, mit N_1 (also in jeder Spule $\frac{1}{4} N_1$) und den ganzen Widerstand der hinter einander geschalteten Windungen mit R . Die Klemmenspannung an einem der beiden Stromkreise — z. B. an demjenigen, der die wagrechten Kraftlinien erzeugt, wenn der Ständer nach Fig. 49 geschaltet ist — kann auf folgende Art gefunden werden:

Wir haben gesehen, dass das wagrechte ursprüngliche Kraftlinienfeld gleich

$$\frac{\sqrt{u^2 + (\Omega - \omega)^2}}{u} x_m \sin(\Omega t + \beta)$$

ist, und dies muss sein gleich

$$\frac{N_1 \mathcal{G}}{4} i_1,$$

worin i_1 der Strom in der Magnetisirungsspule des Ständers ist; demnach ist

$$i_1 = \frac{4}{N_1^2 \mathcal{Q}} \cdot \frac{\sqrt{u^2 + (\Omega - \omega)^2}}{u} x_m \sin(\Omega t + \beta)$$

und der Augenblickswerth der Klemmenspannung an einem der Stromkreise gleich

$$e_1 = \frac{R}{2} i_1 + \frac{N_1}{4} \dot{x}.$$

Setzen wir hierin die Werthe von i_1 und x ein und schreiben

v statt $\frac{4R}{N_1^2 \mathcal{Q} u} = \frac{R}{N_1^2} \cdot \frac{N}{r}$, so erhalten wir

$$e_1 = \frac{N_1}{4} x_m \Omega \left[2v \cdot \frac{u}{\Omega} \sin \Omega t + \left(1 + 2v \cdot \frac{\Omega - \omega}{\Omega} \right) \cos \Omega t \right].$$

Wenn wir dies in der Form

$$e_1 = e_m \sin(\Omega t - \gamma)$$

schreiben, so finden wir, dass

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Omega - \omega}{u} + \frac{\Omega}{2v u} \text{ ist.}$$

Die Verzögerung des Stromes ist β , wo

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Omega - \omega}{u},$$

demnach wird die Phasendifferenz φ_1 zwischen Strom und elektromotorischer Kraft berechnet aus der Gleichung

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{u \Omega}{\Omega(\Omega - \omega) + 2v u^2 + 2v(\Omega - \omega)^2}.$$

Diese Ausdrücke sind nur dann richtig, wenn der Schlipf klein ist. Um eine vollständige Theorie zu geben, müssten wir Rücksicht nehmen auf die Selbstinduction der Streuung, auf die Aenderungen im Magnetisierungsstrom und den Kernverlust-Strom. Die Ausdrücke, welche alle diese Grössen enthalten, werden aber so unübersichtlich, dass sie keinen praktischen Nutzen haben. Der Verfasser hat deshalb gedacht, dass die graphische Theorie, wie sie in den Kapiteln VII und VIII enthalten sind, die symbolische Methode im Anhang I und die in diesem Kapitel gegebene Darstellung einer Methode, den Gegenstand analytisch zu behandeln, dem Leser willkommener sein möchte, als die Durcharbeitung der vollkommeneren Theorie, die in einigen der auf S. 251 u. 252 erwähnten Abhandlungen enthalten ist.

Die symbolische Methode.

C. P. Steinmetz hat in seinem Buch über Wechselstromerscheinungen¹⁾ und in den auf S. 251 u. 252 erwähnten Aufsätzen eine sehr vollständige Theorie des Inductionsmotors mit Hülfe der Vector-Algebra entwickelt. Eine kurze Darlegung dieser Methode und ein Rechnungsbeispiel enthält der Anhang I. Unter Benutzung derselben Zeichen sollen hier einige interessante Verallgemeinerungen mitgeteilt werden, welche Steinmetz abgeleitet hat.

Man sieht, dass die Ausdrücke für Strom, elektromotorische Gegenkraft, Drehmoment, Leistung, Wirkungsgrad, Leistungsfaktor und überhaupt alle wichtigen Grössen des Motors die Constanten h , m , r_1 , r_2 , x_1 und x_2 enthalten. Die Aussenspannung geht einfach als ein Faktor in die Ausdrücke für den Strom, die Gegenkraft, Drehmoment und Leistung ein, so dass die charakteristischen Grössen des Motors von den obigen sechs Constanten abhängen. In ausgeführten Motoren sind r_1 und r_2 nahezu gleich, und ebenso x_1 und x_2 . Wir dürfen ohne merklichen Fehler an ihrer Stelle mittlere Werthe r und x benutzen. Dann wird der Admittanzoperator $Y = h + jm$, und der Impedanzoperator Z sowohl für den Ständer als für den Läufer gleich $r - jx$. Schreiben wir für den absoluten Werth der Admittanz $y = \sqrt{h^2 + m^2}$, ebenso $z = \sqrt{r^2 + x^2}$, für den Leistungsfaktor der Admittanz $\beta = h/y$, für den Leistungsfaktor der Impedanz $\gamma = r/z$ und setzen $2yz = \delta$, so lässt sich zeigen, dass die charakteristischen Grössen des Motors vollständig bestimmt werden durch die drei Constanten β , γ , δ . Der Grund, weshalb das Product $2yz$ gebildet wird, ist der folgende. Man sieht aus den Ausdrücken für die Hauptgrössen des Motors, dass die charakteristischen Grössen nicht geändert werden, wenn yz constant gehalten wird. Dies wird man leichter verstehen, wenn man bedenkt, dass

$$y = \frac{\text{Erregungsstrom}}{\text{Aussenspannung}}$$

und

$$z = \frac{\text{Aussenspannung}}{2} \cdot \frac{1}{\text{Stillstandstrom}}$$

Denn wenn der Motor in Ruhe gehalten wird, so wird die Hälfte der Aussenspannung dazu verwendet, die Impedanz z des Ständers zu überwinden, während die andere Hälfte auf e (vgl. Anhang I)

1) Steinmetz, Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen. Berlin 1900.

entfällt, auf die EMK, welche die Impedanz z des Läufers überwindet — der Widerstand des letzteren als unverändert angenommen.

Hieraus ergibt sich

$$2yz = \frac{\text{Erregungsstrom}}{\text{Stillstandstrom}} = \delta.$$

Nun ist bei festgehaltenem Läufer die gesammte Kraftlinienstreuung annähernd gleich dem Haupt-Kraftlinienzug bei Synchronismus, weil beide die Aussenspannung nahezu vollständig in Anspruch nehmen. Daher

$$2yz = \text{nahezu} \frac{\text{magn. Widerstand des Haupt-Kraftlinienzuges}}{\text{magn. Widerstand der Streuzüge}}.$$

Nimmt man nun den magnetischen Widerstand des Haupt-Kraftlinienzuges als Einheit, so ist (nach S. 232) der Widerstand der Streuzüge des Läufers und Ständers zusammen = $1/2(u - 1)$, was sehr nahe = $1/(u^2 - 1)$ ist; dies aber haben wir Coefficient der Ausnutzung U genannt. Thatsächlich ist die Constante $2yz$ oder δ das Reciproke unseres U , nachdem es wie in Fig. 229 wegen der kleineren Verluste berichtigt ist. Die Constante β ist der Cosinus des Winkels B_0ON in Fig. 214 und γ der Cosinus des Winkels POR_1 . Steinmetz gibt ein Verzeichniss der Werthe dieser Constanten, mit 100 multiplicirt, welche von wirklichen Motoren entnommen sind, und zeigt an einer Zahl sehr lehrreicher Diagramme den Einfluss ihrer Werthe auf die charakteristischen Eigenschaften der Maschine.

Kapitel X.

Einige Beispiele neuerer mehrphasiger Motoren.

Durch die Güte von Firmen, die hauptsächlich zur Entwicklung der mehrphasigen Motoren beigetragen haben, ist der Verfasser in den Stand gesetzt worden, einige in neuerer Zeit ausgeführte Beispiele dieser Maschinengattung zu beschreiben.

Motoren der Maschinenfabrik Oerlikon.

Seit Herbst 1891 war die Maschinenfabrik Oerlikon unablässig bemüht, den Drehfeldmotor zu vervollkommen und hat mehrere hunderte davon in verschiedene Grössen gebaut. In allen kleineren Motoren, ein-, zwei- oder dreiphasig, besitzt der Läufer die einfache Trillerkäfiggestalt, während für die grösseren Motoren bewickelte Läufer benutzt werden, so dass man beim Anlassen Widerstand einschalten kann. Schon im Juli 1892 war es den Ingenieuren dieser Firma durch viele ins Einzelne gehende Verbesserungen gelungen, einen dreiphasigen Motor herzustellen, der vierpolig und dreiphasig war und einen Wirkungsgrad von 0,71 besass. Die Firma hat zuerst der Construction ihrer Maschinen eine Wechselgeschwindigkeit von 50 Perioden in der Secunde zu Grunde gelegt, bei grösseren Kraftanlagen verwendet sie Wechselgeschwindigkeiten von 42, 40 und 38 Perioden. Der Regel nach beträgt der Schlupf bei voller Belastung nicht mehr als 3 vom Hundert. Für Krähne, Aufzüge u. ä. werden dagegen besondere Motoren gebaut (gleichfalls ohne Schleifringe oder Bürsten), deren Läufer bei voller Last um 12 % hinter dem Feld zurückbleibt. Ihr Leistungsfactor ist infolge dessen niedrig, aber sie gehen mit einer Zugkraft an, die zwei- oder dreimal so gross wie bei normaler Belastung ist. Einige Zahlen für einen Kranmotor werden später auf S. 297 mitgetheilt werden.

Auf die einphasigen Motoren dieser Firma und die dazu gehörige Anlassvorrichtung wird weiter unten hingewiesen werden.

Eine Ansicht eines grösseren Motors (von 100 P) desselben Modells ist in Fig. 232 dargestellt. Die Anordnung der 3 Schleifringe, des Anlagers und des Handhebels zum Ausschalten der Widerstände ist besser aus der Fig. 195 S. 187 zu erkennen.

Häufig werden diese Motoren mit einer Losscheibe versehen, damit sie leichter anlaufen können, ohne dass ein zu grosser Strom



Fig. 232. Hochspannungsmotor (5000 Volt) von Oerlikon.

aus den Leitungen entnommen wird, Fig. 233. Die Gesellschaft baut auch kleine Motoren für die mannigfaltigsten Zwecke, z. B. für den Antrieb von Webstühlen, Förderwerken u. dergl.

Die eigenen Werke der Maschinenfabrik Oerlikon werden elektrisch betrieben; die Kraft wird von einem etwa 23 km weit entfernten Wasserfall bei Hochfelden in der Nähe von Bülach ent-

nommen und elektrisch übertragen. Die Dreiphasenmaschinen, mit denen dies ausgeführt wurde, sind die ersten ihrer Art gewesen. Es sind drei dreiphasige Stromerzeuger, jeder von 200 P. Sie wurden im Herbst 1890 von C. E. L. Brown entworfen, zugleich mit der Maschine, die bei dem berühmten Frankfurter Versuch aus dem Jahre 1891 benutzt wurde.

Ein ganz neuer für besondere Verhältnisse entworfener Motor ist in Fig. 234 und auf Tafel XIV dargestellt.

Der Motor dient zum direkten Antrieb einer Wasserförderpumpe in einem Bergwerk Deutschlands und wurde bestellt für eine Leistung von normal 570 P bei 75 Umdrehungen mit einer maximalen Anlaufs-

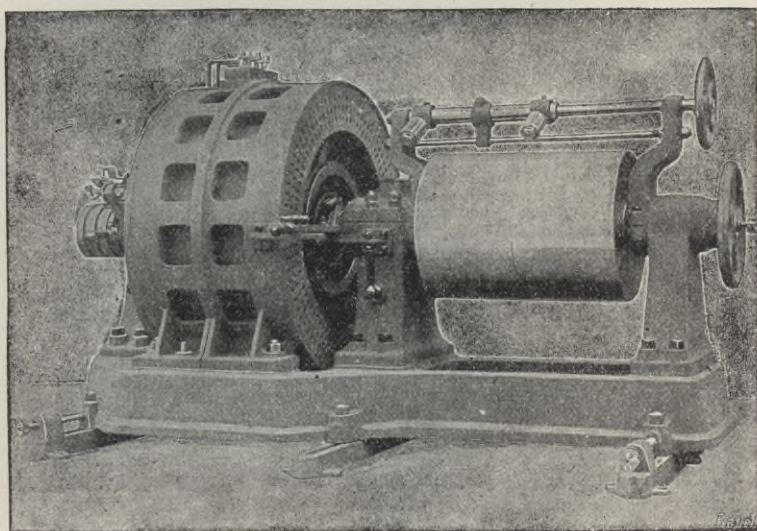


Fig. 233. Normaler Drehstrommotor von Oerlikon.

kraft von 20 % über der normalen. Die Pumpe soll in der Minute 5 m^3 etwa 400 m hoch fördern. Eine besondere Bedingung für die Construction des Motors bildete die Nothwendigkeit, den Motor durch einen Schacht von $1950 \times 2050 \text{ mm}$ Weite zu befördern, wobei das maximale transportirbare Gewicht 10 000 kg nicht übersteigen durfte. Ferner sollte dem rotirenden Theil des Motors ein ansehnliches Trägheitsmoment gegeben werden, um die grossen Ungleichförmigkeiten in dem Kraftdiagramm der Pumpe zum Theil durch die Wirkung der lebendigen Energie auszugleichen. Diese Bedingung führte auch dazu, die Schlüpfung in der Geschwindigkeit des Motors grösser als 2 % anzunehmen.

Vom Standpunkt des Elektrikers aus liegt die Schwierigkeit in der Construction von asynchronen Motoren mit so kleiner Umdrehungszahl in der Vermeidung übermässiger magnetischer Streuung, welche mit der Anordnung von grossen Polzahlen auf verhältnissmässig kleinem Umfang und dem grösseren Luftraum zusammenhängt, der aus mechanischen Gründen bei grösseren Durchmessern zwischen inducirendem und inducirtem System erforderlich ist. Es darf angenähert der

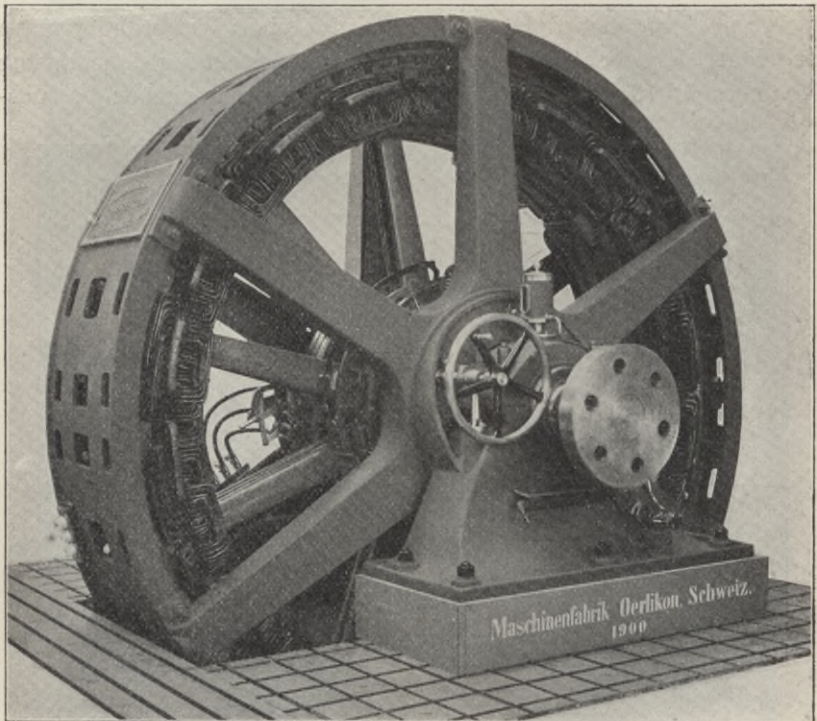


Fig. 234. Asynchroner Drehstrommotor von 600 P.

Streuungscoefficient eines solchen Motors, d. h. der Procentsatz der von den Amperewindungen des einen Systems erzeugten magnetischen Kraftlinien, der die Windungen des andern Systems nicht schneidet, proportional angesetzt werden der Dicke des Luftzwischenraums zwischen festem und rotirendem Theil und umgekehrt proportional der Länge des Polbogens, d. h. dem Radumfang getheilt durch die Polzahl. Von diesem Streuungscoefficienten hängt bekanntlich in erster Linie die maximale Zugkraft und die günstigste Phasenverschiebung des Motorstroms ab.

Zugleich mit diesem Motor war der Stromerzeuger zu liefern, ein Drehstromgenerator für 840 P, der direkt gekuppelt wird mit einer Dampfmaschine mit 90 Umdrehungen, und dessen Rad zugleich als Schwungrad der Dampfmaschine wirken soll. Die Hauptbelastung des Generators bildet der grosse Motor. Es konnte also die Periodenzahl der Anlage so gewählt werden, dass einerseits die Polzahl des Motors nicht übermässig gross und andererseits die Polzahl des Generators nicht übermässig klein wurden. Für den Generator war die Wahl eines grösseren Durchmessers empfehlenswerth, um das vorgeschriebene sehr grosse Schwungmoment zu erreichen. Würde nun die Polzahl des Generators zu klein gewählt, so müssten den Polkernen und Magnetspulen sehr unrationelle Dimensionen gegeben werden. Auf Grund dieser Ueberlegungen wurde die Periodenzahl zu 22,5 festgesetzt, welche für den Generator 30, für den Motor 36 Pole ergibt. Die Klemmenspannung beträgt 1900 Volt. Der Durchmesser des Generatorrades erreicht 4800 mm, der Luftzwischenraum soll 10 mm betragen. Das Rad besitzt eine Schwungmasse von 17000 kg mit einem Schwungradradius von 2,2 m.

Der Durchmesser des Motorrades beträgt 2996 mm, der Luftzwischenraum zwischen feststehendem und rotirendem Theil 2 mm. Das fertige Rad besitzt ein Schwunggewicht von 8000 kg bei einem Schwungradradius von 1,5 m. Die Wickelung des feststehenden Systems besteht aus 162 Spulen, die mit Kupferdraht in 324 geschlossene, mit Mikanitröhren ausgefüllte Nuten gewickelt sind; das rotirende System trägt 216 Spulen in 432 halbgeöffneten, ebenfalls mit Mikanitröhren ausgefüllten Nuten. Jede Spule ist aus 19 nackten parallel geschalteten Kupferdrähten von 3,6 mm Durchmesser hergestellt, nach dem besonderen Wickelungssystem der Maschinenfabrik Oerlikon, und besitzt im Ganzen nur 54 gelötete Verbindungsstellen der Wickelung, da je vier Spulen aus einer zusammen hängenden Drahtlänge gewickelt sind. Die drei Enden der Wickelung des Rotors führen einerseits zu drei Kurzschlusscontacten und andererseits zu drei gusseisernen Schleifringen, auf welchen drei Bürsten schleifen, die den inducirten Strom zu einem grossen regulirbaren Rheostaten aus Constantanblech führen. Mittelst dieses Rheostates kann, bei normaler Umdrehungszahl des Generators, der Motor mit voller Zugkraft bei normaler Stromstärke anlaufen. Sobald der Motor die normale Geschwindigkeit erreicht hat, wird mittelst eines Handrades und Zahngetriebes eine mit dem Rad rotirende Kurzschlussvorrichtung vorgetrieben, bis die Wickelung des Ankers in sich selbst kurzgeschlossen

ist; die Schleifbürsten werden dann von den Schleifringen abgehoben. Da der Generator ausser dem grossen Motor noch kleinere Motoren zu speisen hat, konnte das Anlassen des Motors nicht mit kurzgeschlossener Wicklung gleichzeitig mit dem Anlassen des Generators ausgeführt werden, wie dies von der Maschinenfabrik Oerlikon bei einem ähnlichen Pumpenantrieb in einer französischen Bergwerksanlage ausgeführt wurde.

Die Kurzschlussvorrichtung besteht aus einem kleinen auf der Spindel des Handrades sitzenden Zahnkolben, welcher in ein centrisch um die Welle angeordnetes grosses Zahnrad eingreift. Mit diesem arbeiten drei weitere Zahnräder zusammen, welche gegen einander um 120° versetzt, um das grosse Zahnrad angeordnet sind. Die Naben dieser drei Räder sind als Spindelmutter ausgebildet, die darin geführten Spindeln greifen an einem Ringe an, welcher die drei Kurzschlusscontacte trägt. Durch Drehen des Handrades werden die Spindeln in axialer Richtung verschoben und damit der Kurzschluss bewirkt.

Um ein Durchbiegen der langen das Feldeisen zusammenhaltenden Bolzen und damit ein Durchsenken des Eisens gegen den rotirenden Theil zu verhüten, sind die Bolzen in ihrer Mitte durch Bügel gegen das Gehäuse hin angezogen.

Die Bürsten sind von den gusseisernen Schleifringen abhebbar.

Um den Motor durch den engen Schacht von 2000 mm Seitenlänge bis zu seinem Aufstellungsort zu transportiren, mussten der feststehende und der rotirende Ring in zwei Halbkreisbogen zerlegt werden. Zu diesem Zweck ist die Wicklung in beiden Theilen nach besonderem Schema ausgeführt, so dass eine Trennung der Wicklung ohne Oeffnung der gewickelten Spulen möglich ist durch Lösen von wenigen Löthstellen. Die Spulenseiten, welche ausserhalb des Eisens liegen, sind für die drei Wicklungsphasen abwechselnd in drei Wicklungsebenen abgebogen, so dass die ganze Windungslänge für jede Phase genau gleich wird.

Die mechanische Bauart des Motors ist aus der Tafel XV ersichtlich. Es wurde ganz besonders Sicherheit in der Festigkeit des stehenden und rotirenden Systems gesucht gegenüber den magnetischen Zugkräften, welche bei einer gewissen unvermeidlichen excentrischen Lagerung des Läufers auftreten müssen. Diese Festigkeit musste erreicht werden innerhalb der durch die Weite des Schachtes beschränkten äussern Dimensionen.

Das Gehäuse ist durch zwei Gusssterne mit sechs Armen versteift, welche auf den beiden Lagergestellen aufsitzen und nach Lösen von drei Schrauben um diese Gestelle mit dem Gehäuse gedreht werden können. Jeder Blechkörper ist durch 54 Bolzen von 20 mm Durchmesser mit den Gussringen fest verschraubt. Die Bolzen sind ausserdem in dem Ventilations Schlitz durch Haken an das Gehäuse angezogen. Thatsächlich konnte bei einer absichtlich excentrisch eingestellten Lagerung des Läufers mit einer Differenz des Luftzwischenraumes von 1 mm bei den grössten magnetischen Sättigungen keine Deformation des Luftzwischenraumes beobachtet werden. Die Schmierung der Lager wird von einer kleinen Sulzer'schen Oelpumpe besorgt. Das ablaufende Oel wird in einer Rinne unterhalb des Lagerandes aufgefangen und von der Pumpe in den Tropfbecher über das Lager gefördert.

Der äussere Durchmesser des fertigen Gehäuses beträgt 4000 mm, die Breite 900 mm, der äusserste Abstand der beiden Lagerfüsse 3000 mm, das totale Gewicht des Motors beläuft sich auf 28000 kg; davon 9000 kg Eisenblech und 1400 kg Kupfer. Der Läufer wiegt 11000 kg.

An diesem Motor konnten im Versuchsraum der Maschinenfabrik Oerlikon folgende Messungen ausgeführt werden:

Widerstand der Wicklung einer Phase des Ständers: 0,4 Ohm (die Ständerwicklung ist in Dreieckschaltung angeordnet); Widerstand der Wicklung einer Phase des Läufers: 0,016 Ohm. Bei leerlaufendem Motor mit 75 Umdr.: 1900 Volt, 62 Amp., 22,5 Perioden, 16000 Watt.

Bei ruhendem Motor und kurzgeschlossenem Läuferstromkreise (Kurzschlussstrom) 390 Volt, 110 Amp., 22,5 Perioden, 600 Volt, 200 Amp.

Daraus ergibt sich ein Streuungscoefficient für 190 Amp. Belastungsstrom: $\sigma = 0,1$; für höhere Stromstärken wird σ kleiner. Die Verluste für Reibung und Ventilation konnten zu etwa 3500 Watt eliminirt werden. Die Erwärmung des Eisens bei Leerlauf betrug 18° über die Temperatur der Umgebung.

Aus diesen Daten wurde das Diagramm der Stromstärke, der Umdrehungszahl, des $\cos \varphi$ und des Wirkungsgrades des Motors bei verschiedenem Drehmoment unter Annahme eines abnehmenden Streuungscoefficienten aufgezeichnet (Fig. 235). Bei normaler Belastung wird der Motor etwa 170 Amp. aufnehmen mit einem Leistungsfactor von 0,82 und einem Wirkungsgrad von 92 % bei

einem Schlupf von 2,7 %. Das maximale Drehmoment beträgt 11 500 kg, gleich dem doppelten des normalen.

Diese Werte dürfen in Anbetracht der sehr kleinen Umdrehungszahl und der beschränkten Raumverhältnisse als sehr günstig bezeichnet werden.

Für einen normalen Motor der Maschinenfabrik Oerlikon, Typ 3072, für gleiche Leistung bei 370 Umdr. und 50 Perioden

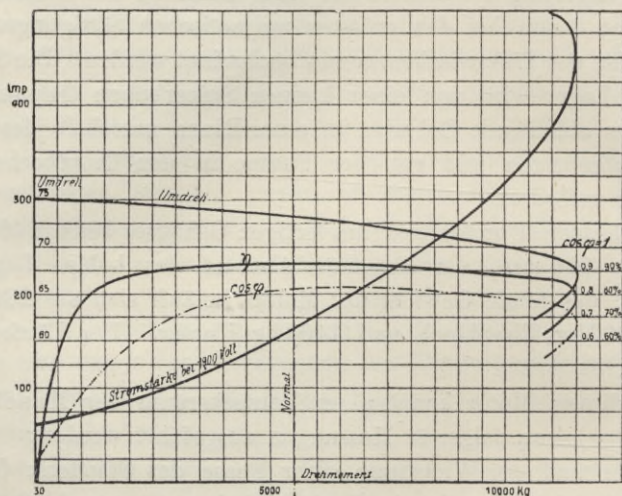


Fig. 235. Leistungskurven des 600 P Drehstrommotors mit 75 Umdrehungen.

wurden am gleichen Orte die entsprechenden Werte durch direkte Beobachtung erhalten:

$$\cos \varphi = 0,92, \text{ Wirkungsgrad} = 95 \%, \text{ Schlupf} = 1,5 \%$$

Das maximale Drehmoment beträgt hier das 2,5fache des normalen.

Motoren von Brown, Boveri & Co.

Auf S. 178 haben wir die älteren Arbeiten von Brown erwähnt. Seine Firma hat seit 1892 eine grosse Zahl mehrphasiger Anlagen gebaut.

Eine neuere Form, die je nach dem Zwecke mit verschiedenen Wickelungen versehen werden kann, ist auf Tafel XI und in Fig. 236 dargestellt. Der auf Tafel XI dargestellte Motor ist dreiphasig gewickelt, er empfängt seinen Strom von Hauptleitungen mit 5000 Volt, seine Wechselgeschwindigkeit beträgt 40 Perioden in der Secunde und seine Drehgeschwindigkeit 600 Umläufe in der Minute. Seine Leistung

ist dann 100 P. Die Höhe misst 120 cm und die Länge zwischen den äusseren Enden der Achslager etwas weniger. Der Durchmesser des Läufers ist 75 cm und die Länge parallel zur Achse, weniger als 45 cm. Der Läufer besitzt 96 Bohrungen zur Aufnahme isolirter Kupferleiter, die dann zu einer Wellenwicklung verbunden werden; letztere hat die Gestalt eines dreistrahligen Sternes, dessen drei äussere Enden durch eine die Achse durchsetzende centrale Bohrung zu drei Schleifringen geführt sind, so dass man einen äusseren Anlasswiderstand einschalten kann. In den Kernringen des Feldmagnetes befinden sich 48 Löcher, und durch diese werden die Spulen ge-

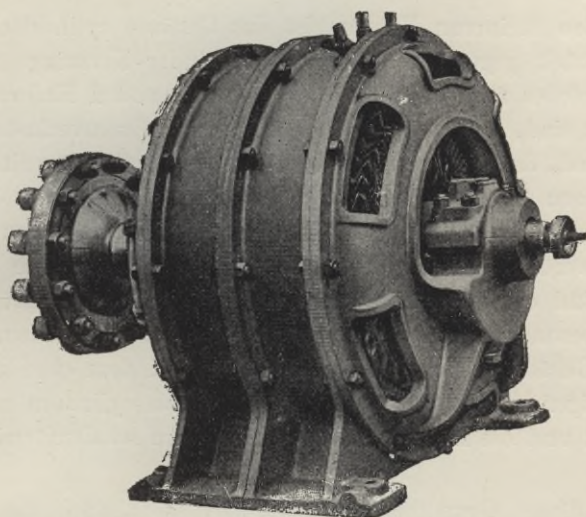


Fig. 236. Zweiphasiger Motor für 120 P von C. E. L. Brown.

wickelt; zum Schutze der letzteren dienen starke Röhren aus besonders zubereitetem Papier. Die Anordnung dieser Spulen zur Erzeugung eines vierpoligen Feldes ist in Fig. 93 dargestellt. Dieser Motor geht mit voller Last an, wobei er einen stärkeren Strom verbraucht, als wenn er mit voller Last im Gange ist.

Dasselbe Eisengerüst, jedoch als zweiphasiger Motor für 2000 Volt gewickelt, zeigt Fig. 236. Er leistet 120 P. Der Anlasswiderstand wird hier im Läufer untergebracht; ein einfacher, aus dem Ende der Achse rechts in der Figur hervorragender Mechanismus dient dazu, den Widerstand kurz zu schliessen, wenn der Motor in Gang gekommen ist.

Einer der grössten Inductionsmotoren, welche bis jetzt gebaut wurden, ist von Brown, Boveri & Co. für die städtische Pumpstation

in Genf gebaut. Dieser auf Tafel XII und Fig. 237 dargestellte Motor ist zweiphasig und leistet 1000 P; er treibt eine Sulzer Pumpe an, welche das Wasser 140 m hoch hebt. Der Ständer hat die übliche Form, 10 Pole und 6 Löcher für jede Phase und jeden Pol. Der Läufer hat 180 Löcher mit je 2 Leitern, die unter einander verbunden sind wie bei einem cylindrischen Trommelanker mit einer für 3 Stromkreise bestimmten Wellenwicklung. Der vom Kraftwerk in Chèvres gelieferte Strom hat eine Spannung von 2500 Volt und eine Wechselgeschwindigkeit von 46 Perioden in der Secunde. Der Motor läuft mit 544 Umdrehungen in der Minute, sein Gesamtgewicht beträgt 27 Tonnen.

Bei den kleineren Motoren ist das Gehäuse cylindrisch als ein einziges Stück gegossen, welches die Ständer-Kernringe aufnimmt und an welches zwei gewölbte die Lager tragenden Endwangen angeschraubt sind, welche zur Vermeidung von Streuverlusten so gekrümmt sind, dass sie von den Kernscheiben möglichst weit abstehen. Bei grösseren Motoren über 20 P ist der Mantel aus 2 Cylindern zusammengeschraubt, wie Fig. 236 erkennen lässt. Bei ganz grossen Motoren werden die Lager nicht von den Endwangen getragen, sondern sind entweder ein Theil des Fundamentrahmens, oder sie sind als besonderes sternförmig gestaltetes Stück mit dem Rahmen und dem Gehäuse gleichzeitig verschraubt. Bei dem eben erwähnten 1000pferdigen Motor ist das Gehäuse aus 4 Gusscy lindern zusammengeschraubt und die Lager befinden sich an den schalenförmigen Endwangen.

Von dieser Grundform unterscheiden sich auch die bei den Locomotiven der Gornergrat- und der Jungfraubahn verwendeten Motoren nur wenig; die Form des Gehäuses ist dem besonderen Verwendungsgebiet entsprechend ausgebildet, ferner sind mit Rücksicht auf Raumersparniss die Ständerwickelungen in 3 statt wie gewöhnlich in 2 Reihen angeordnet.

Die Motoren von Kolben & Co. sind nach ihrer Bauart sehr ähnlich den eben beschriebenen, Tafel XIII zeigt einen solchen Motor, man erkennt wie die Ständer-Kernringe tief bis fast an den äusseren Umfang in den Ständer versenkt sind, damit sie sicher im Gehäuse befestigt werden können. Einzelheiten eines 20pferdigen Motors derselben Firma und die Berechnung des Entwurfs finden sich S. 198 und 247.

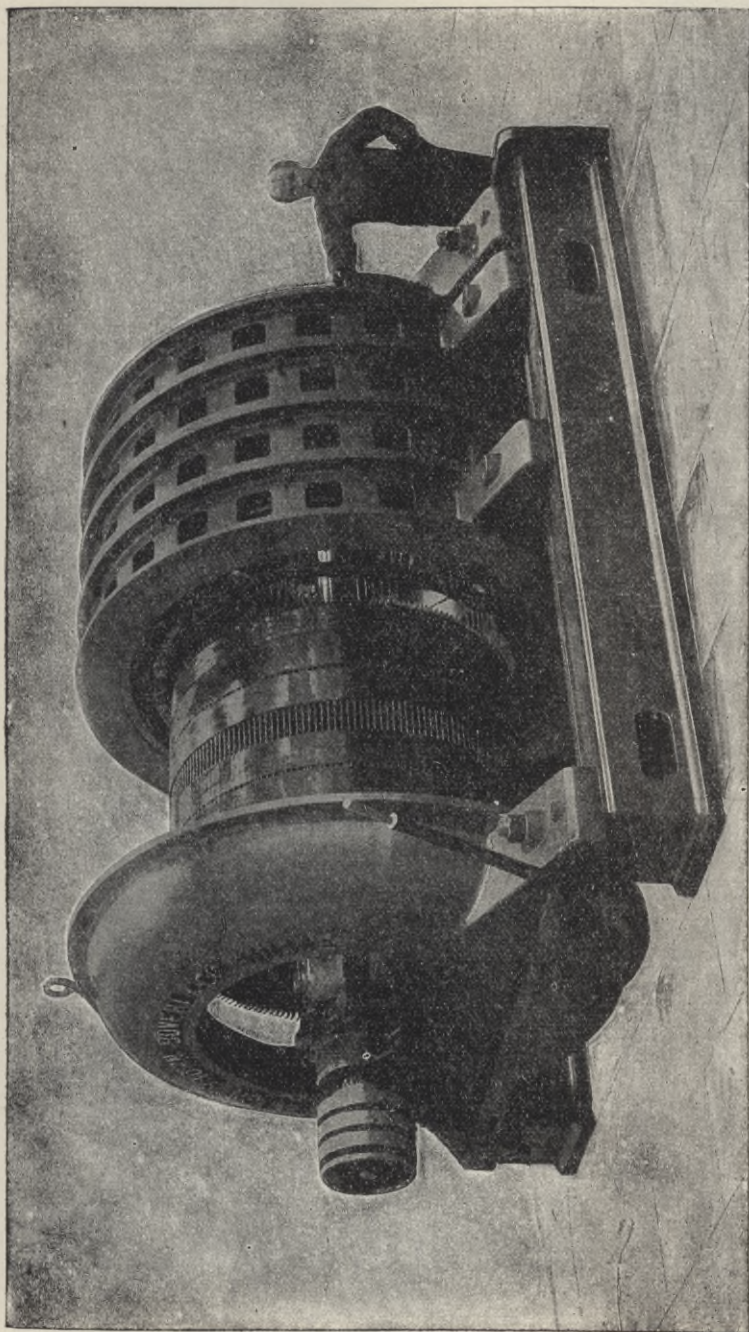


Fig. 237. Zweiphasen - Induktionsmotor von 1000 P (Brown, Boveri & Co.).

Fig. 238 zeigt einen Motor neuester Bauart der Firma Helios. Die Befestigung des die Ständerbleche zusammenpressenden Ringes wird in der Weise bewirkt, dass in das Gehäuse und den Ring vor

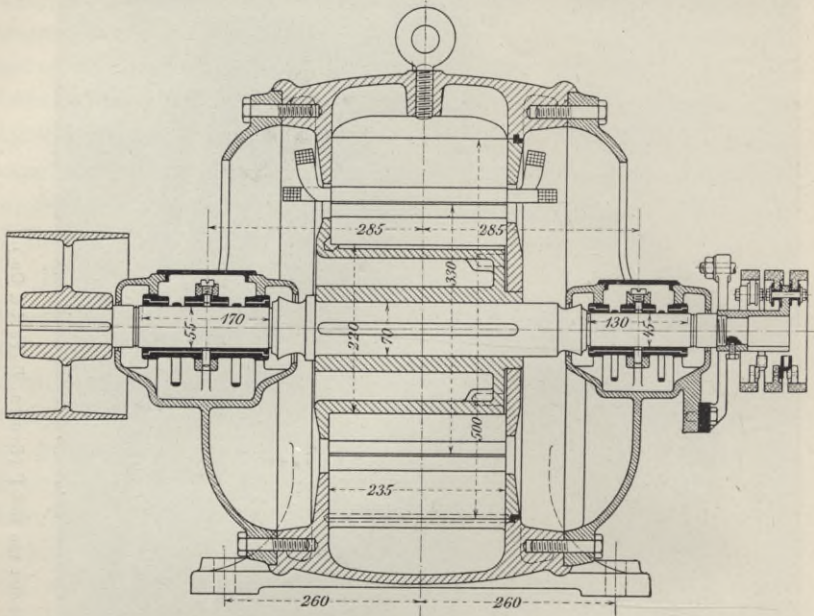


Fig. 238. Drehstrommotor von Helios, Modell DM 12.

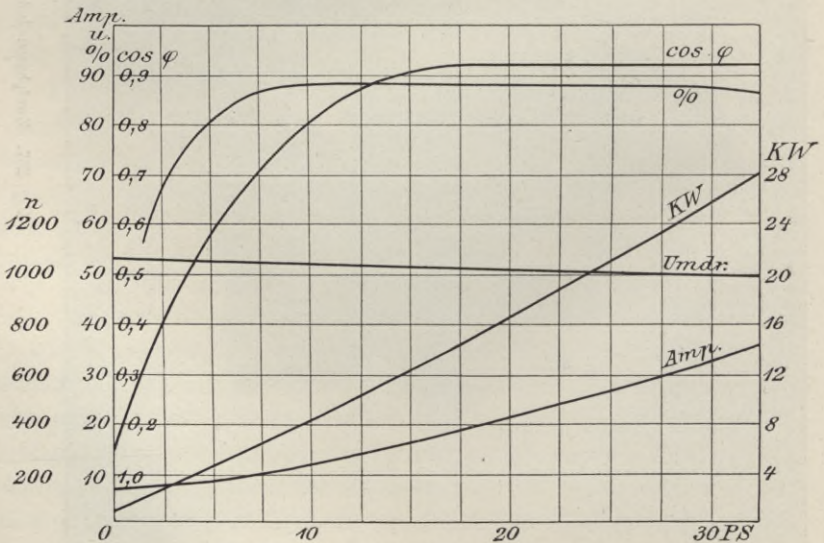


Fig. 239. Diagramm zum Motor von Helios.

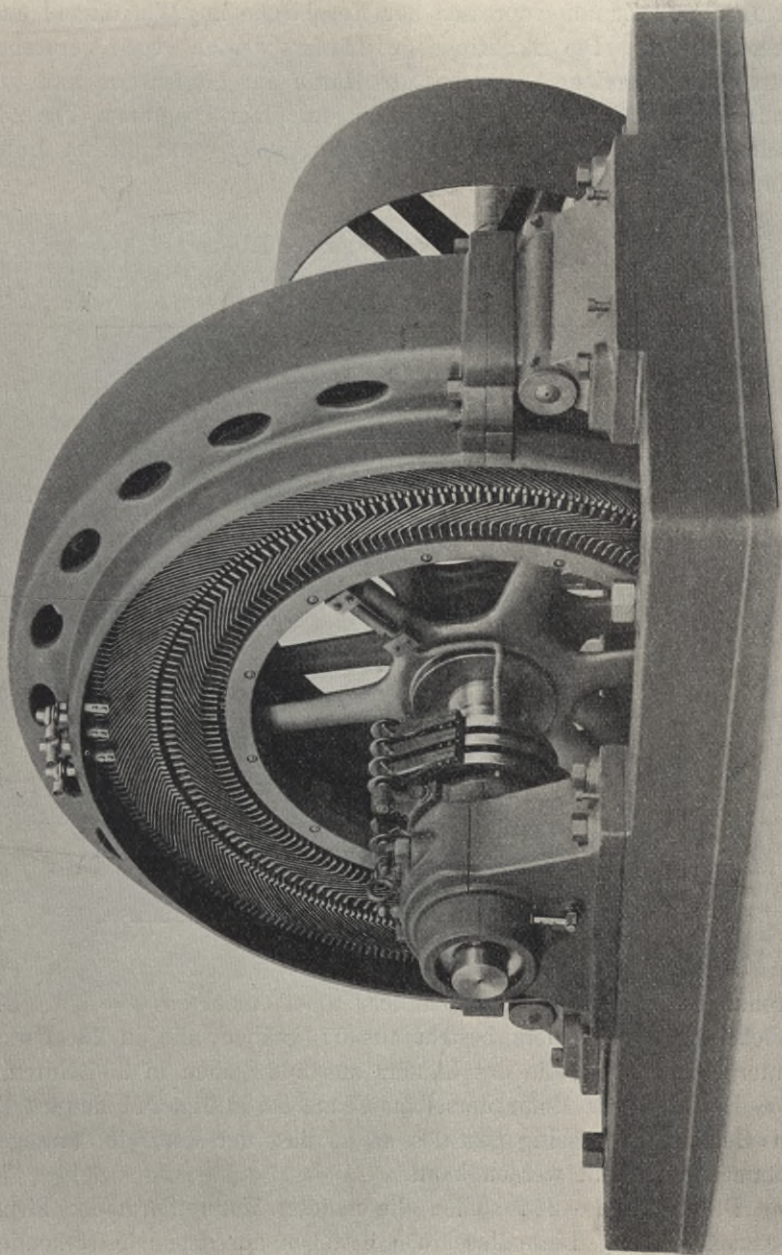


Fig. 240, Drehstrommotor von Schuckert, Modell N^o 200.

dem Zusammensetzen eine Rille gedreht wird, die nach dem Einbringen und Zusammenpressen der Kernbleche mit Weissmetall ausgegossen wird. Die Blechringe des Läufers werden gegen Verdrehen durch Keile gesichert, welche zur Hälfte im Läuferkern und zur andern Hälfte in den Blechringen sitzen. Das Diagramm Fig. 239 stellt die Ergebnisse von Messungen dar, welche mit diesem Motor vorgenommen wurden.

Fig. 240 zeigt einen Drehstrommotor der Elektrizitäts-Actiengesellschaft vorm. Schuckert & Co., der bei 480 Volt und 366 Um-

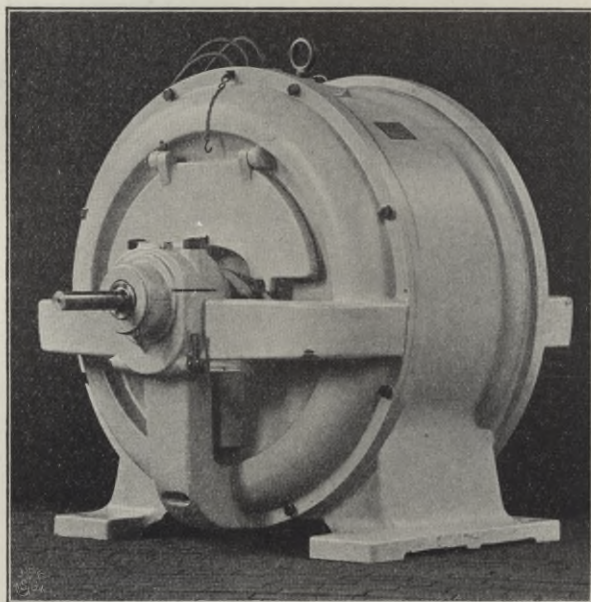


Fig. 241. Gehäusemotor von Schuckert.

drehungen in der Minute 200 P leistet bei einem $\cos \varphi = 0,9$. Die Wicklung des Ständers besteht aus 576 Stäben, die in 288 Nuten untergebracht sind, die des Läufers aus 366 Stäben in 366 Nuten.

Ein kleinerer Motor derselben Firma ist in Fig. 241 dargestellt, das Gehäuse ist allseitig geschlossen, so dass der Motor in staubigen Räumen aufgestellt werden kann.

Die Fig. 242—244 stellen die neueste Motorenform der Firma Ganz & Co. dar. Diese Maschinen bestehen aus einem feststehenden inducirenden und einem drehbaren inducirten Theile. Der Kern des ersteren besteht aus schmiedeeisernen 0,5 mm starken und mit Seiden-

papier von einander isolirten Lamellen, die von einem ringförmigen Gehäuse aus Gusseisen zusammengehalten werden.

Dieser Kern ist an dem inneren Umfange mit Nuten versehen, in welche die auf besonderen Maschinen vorher angefertigten Spulen eingesetzt sind. Der Primärtheil (Ständer) bildet also ein unabhängiges Ganzes, das von einem zweitheiligen gusseisernen Korb umgeben ist.

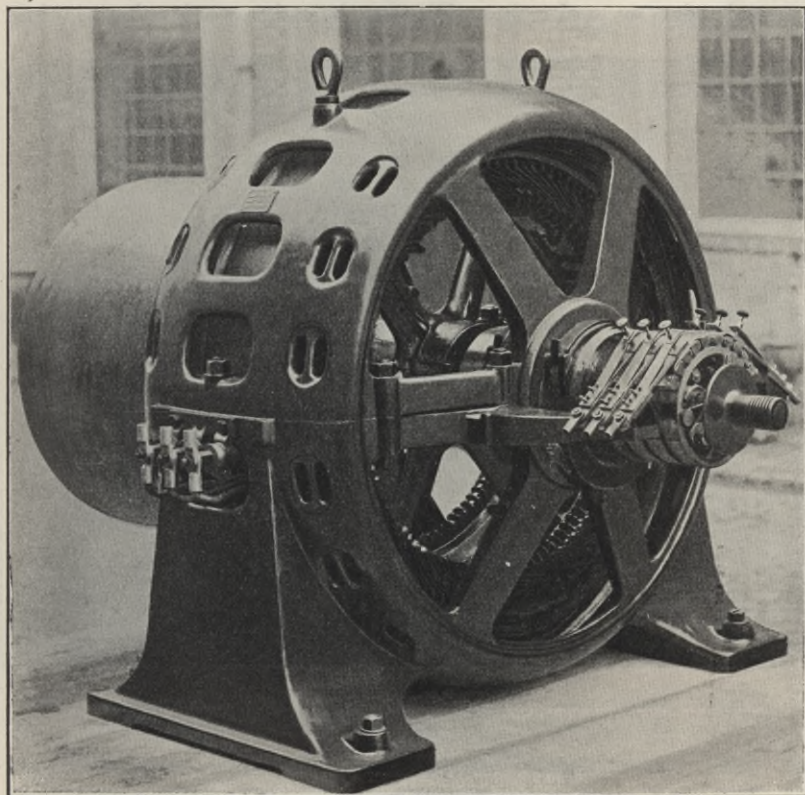


Fig. 242. Drehstrommotor von Ganz & Co., neueste Form, Modell FF 160.

Im Inneren dieses Korbes sind zwei ringförmige Ausdrehungen zur Aufnahme des Ständers angeordnet.

Bei Hochspannungsmotoren, welche normal bis zu 5000 Volt und zwar von 30 P an gebaut werden, werden die Spulen durch Micanitröhren, welche in die Nuten eingetrieben werden, mit der Hand hineingewickelt. Bei den grösseren Motoren für Mittelspannung und bei den kleineren für niedrige Spannung werden blanke Kupfer-

stangen durch die in den Ständernuten befindlichen Carton- oder Mikanitröhren gezogen. Die Verbindung derselben wird durch hart angelöthete Gabeln gebildet. Bei diesen Motoren sind die Nuten auf der Peripherie aufgeschlitzt. Es wird ausschliesslich Trommelwicklung angewendet.

Die Lager sind in den runden Löchern der beiden Seiten des Korbes drehbar befestigt, so dass der Motor nach Belieben stehend, hängend oder an senkrechten Wänden befestigt werden kann, ohne

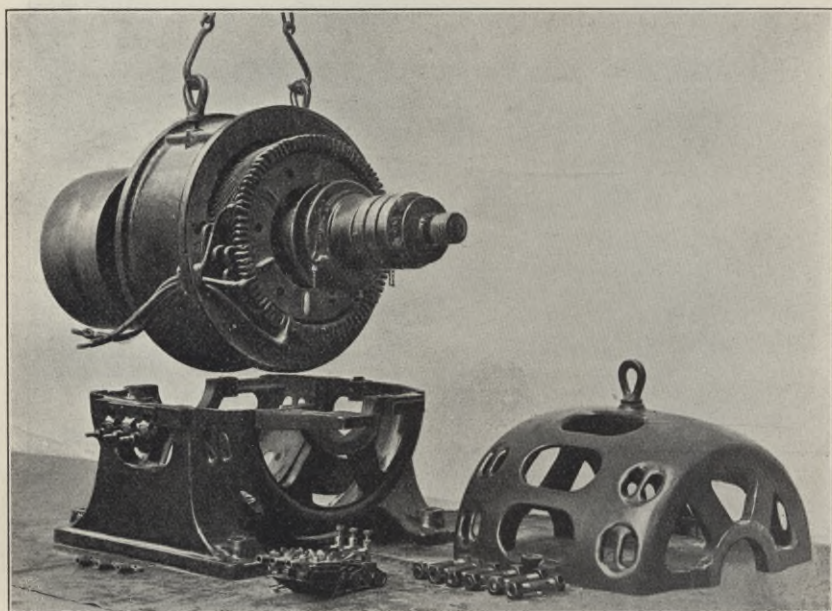


Fig. 243. Drehstrommotor von Ganz & Co., Modell FF 20, auseinander genommen.

dass eine Veränderung am Motorgehäuse erforderlich wäre; es müssen nur die Lager um einen entsprechenden Winkel verdreht werden.

Der secundäre Theil (Läufer) besteht aus dem auf einem Broncerad befestigten und aus Blechen zusammengesetzten ringförmigen Eisenkern, in dessen Nuten die secundäre Bewickelung eingesetzt ist, deren drei Phasen bei den kleineren Motoren — bis 8 P — unter einander kurzgeschlossen sind, während sie bei den grösseren Formen zu drei ausserhalb der Lager auf Wellenstummeln aufgebraachten Bronceschleifringen führen. Diese sind durch Kohlenbürsten und isolirte biegsame Kabel mit den drei Blechen eines Wasserrheostaten verbunden, wie er in der Fig. 207 dargestellt ist.

Die kleineren Motoren werden so angelassen, dass die drei Klemmen des Ständers durch einen dreipoligen Hebelumschalter mit der Stromquelle verbunden werden, während bei den grösseren Formen noch der Wasserrheostat langsam kurzgeschlossen wird.

Die Fig. 242 zeigt einen Motor, welcher bei einer verketteten Spannung von 300 Volt bei 42 Perioden und 350 Umdrehungen in der Minute für eine Leistung von 160 P gebaut ist. Der Motor ist 14 polig; der Durchmesser des Läufers beträgt 1150 mm, die Breite des Eisenkernes 270 mm, der Luftzwischenraum 2 mm. Die Stabwicklung des Ständers ist aus 294 rechteckigen Stäben von

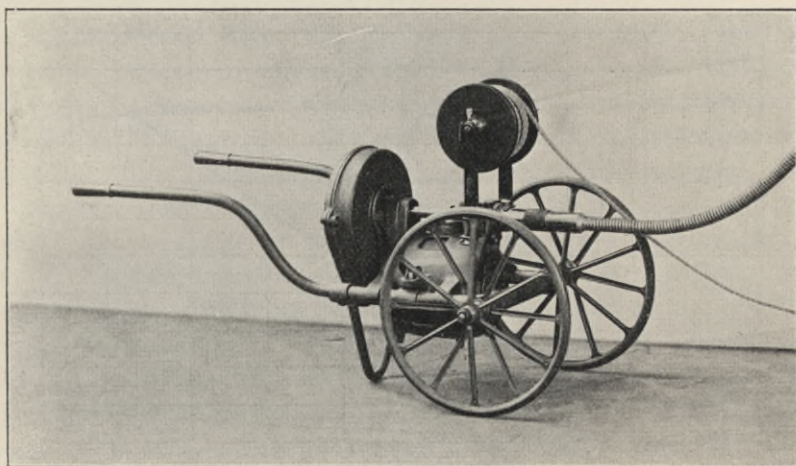


Fig. 244. Fahrbarer Drehstrommotor von Ganz & Co.

$16 \times 6,5 \text{ mm}^2$ gebildet, deren Kanten nach einem Radius von 3,25 mm abgerundet sind. Der Querschnitt der Verbinder ist $4 \times 25 \text{ mm}^2$. Die Isolation zwischen Nuten und Stäben ist aus 2,4 mm starkem Carton gebildet. Die Schaltung ist Y-Schaltung.

Die Bewickelung des Läufers besteht aus 210 Stäben von $9 \times 17 \text{ mm}^2$ Querschnitt, die Kanten sind nach einem Radius von 4,5 mm abgerundet. Der Querschnitt der Verbinder ist $5 \times 25 \text{ mm}^2$. Der Wirkungsgrad des Motors beträgt bei normaler Belastung 92 % bei einem Leistungsfactor von 0,9.

Die Fig. 243 zeigt einen kleineren Motor dieser Art auseinander genommen, man sieht, dass die Bauart gestattet, den Motor in kürzester Zeit zu zerlegen und wieder zusammen zu bauen. Dieser Motor ist

ist 6polig, er leistet bei 300 Volt 42 Perioden in der Secunde und 810 Umdrehungen in der Minute 20 P. Die Wickelung des Ständers besteht aus 72 Spulen von je 24 Windungen, die in 72 Nuten gelagert sind. Der Draht hat einen Querschnitt von $3,9 \text{ mm}^2$, er ist zweimal mit Band isolirt, und die fertige Spule noch einmal mit Bandisolation versehen. Der Läufer von 350 mm Durchmesser hat ebenfalls 72 Nuten, in denselben liegen 288 Stäbe von $3,5 \times 7 \text{ mm}^2$, die mit Carton isolirt sind.

In Fig. 244 ist ein $\frac{1}{2}$ pferdiger Motor dieser Art mit einer transportablen Bohrmaschine dargestellt. Der Läufer ist mittelst einfacher Zahnradübersetzung 1:5 und biegsamer Welle mit dem

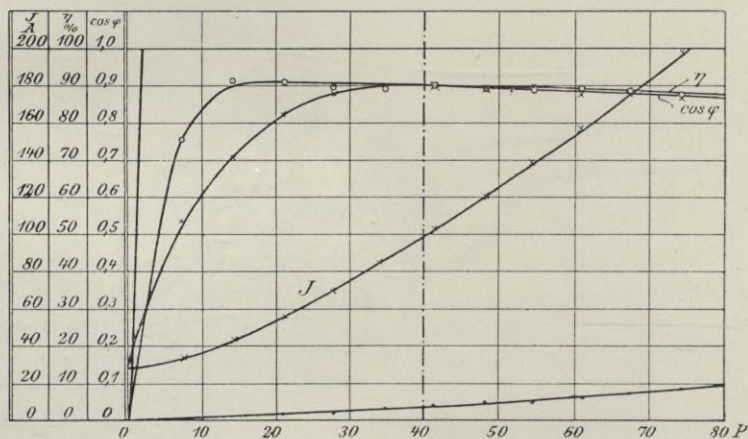


Fig. 245. Diagramm zum Drehstrommotor cDM 20 von Siemens & Halske.

Bohrkopf verbunden. Das kleinere Rad ist aus Rohhaut, sämtliche Zähne sind gefräst. Die Stromzuführung geschieht durch ein Dreileiterkabel, welches auf einem am Motor selbst angebrachten Haspel aufgewickelt ist. Letzterer ist derartig gebaut, dass das Ende des Kabels durch die Haspelachse stets mit dem Motor verbunden ist unabhängig von der abgewickelten Kabellänge.

Die Motoren der Firma Siemens & Halske sind bereits auf S. 190 u. f. erwähnt worden.

Das Diagramm Fig. 245 zeigt das Resultat von Versuchen, welche mit einem neueren Motor Modell cDM20, dessen Bauart aus Fig. 200 zu erkennen ist, angestellt wurden. Derselbe leistet bei 210 Volt 50 Perioden in der Secunde und ca. 975 Umdrehungen in der Minute

40 P bei einem Leistungsfactor von 0,9. Der Ständer enthält 54 Nuten, der Läufer 126 Nuten, deren Isolation 1 mm stark ist. Die Ständerwicklung besteht aus Kupferdraht von 3 mm blank, 3,5 mm isolirt, jede Nut enthält 14 Windungen, die zweifach parallel geschaltet sind. Der Widerstand jedes Zweiges beträgt kalt 0,0215 Ohm.

Die Isolation der Läufernuten ist 0,8 mm dick, in jeder Nut liegen 2 Kupferstäbe von $10 \times 3,5$ mm blank, der Widerstand jedes Zweiges (kalt) beträgt 0,02 Ohm. Die Abmessungen der Nuten ergeben sich aus Fig. 246.

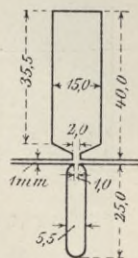


Fig. 246.

Ein neuerer Motor der Elektrizitäts-Actien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M. ist in den Fig. 247—251 dargestellt. Er dient zum Betriebe einer elektrischen Wasserhaltungsmaschine für Bergwerke und war auf der Pariser Weltausstellung aufgestellt. Die Pumpe ist eine schnellaufende Drillingspumpe und vermag bei einer Umdrehungszahl von 214 in der Minute eine Wassermenge von 1—1,2 m³ in der Minute auf etwa 250—300 m Höhe zu fördern. Mit der Pumpe direkt gekuppelt ist ein asynchroner Drehstrommotor von 75—100 P bei 214 Umdrehungen in der Minute, 500 Volt und 100 Polwechsel in der Secunde. Ursprünglich für 1000 Volt gebaut, ist der Motor in Rücksicht auf die in der Ausstellung zur Verfügung stehende Spannung auf 500 Volt umgeschaltet worden. Fig. 247 zeigt die Gesamtanordnung des Maschinensatzes. Motor und Pumpe sind durch eine elastische Kupplung mit einander verbunden. Fig. 248 gibt einen Schnitt durch den Motor, während Fig. 249 u. 250 Einzelheiten zur Darstellung bringen. Der inducirende Theil ist feststehend angeordnet und in ein gusseisernes Gehäuse eingebaut, an welches seitlich die Lagerschilder angeschraubt sind. Bei einem Durchmesser von 1900 mm besitzt der Ständer eine Breite von 170 mm. Der Läufer ist vermittelst zweier Schrumpfringe auf der Welle befestigt und hat einen äussern Durchmesser von ca. 1700 und eine Bohrung von 1500 mm. Entsprechend der Tourenzahl von 214 in der Minute ist der Ständer 28polig gewickelt. Derselbe ist in offener Verkettung geschaltet und trägt eine in geschlossenem Micanitrohr untergebrachte Drahtwicklung, bestehend aus 13 Drähten von $4,8 \times 5,3$ mm² Querschnitt in jeder Nut. Die Nuten haben einen Querschnitt von 20×34 mm². Der Läufer ist als Schleifringanker mit Stabwicklung ausgebildet. Seine Wicklung liegt in halbgeschlossenen Nuten von $11,5 \times 27,5$ mm² Querschnitt

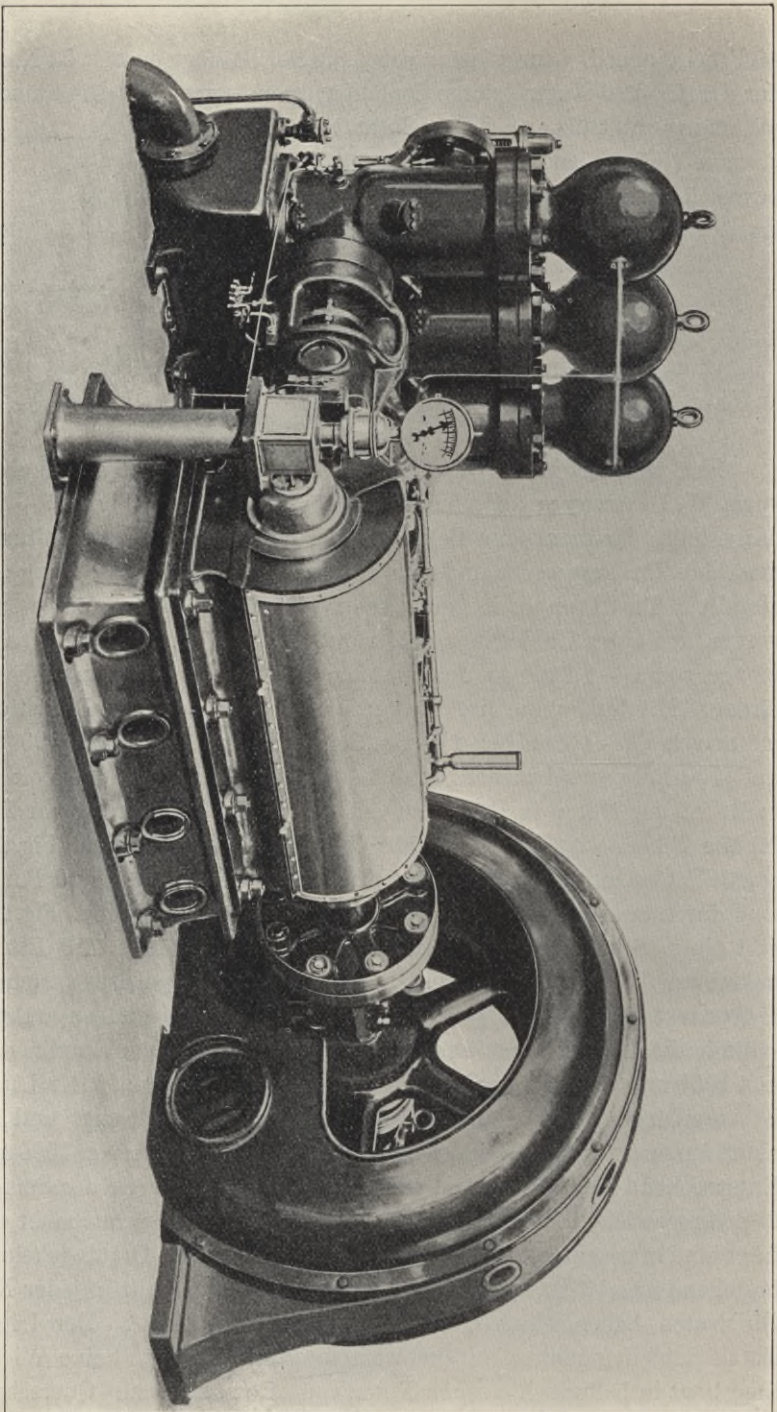


Fig. 247. Asynchroner Drehstrommotor von Lahmeyer (Frankfurt).

und besteht aus drei parallelen Flachkupferstäben von $3 \times 9 \text{ mm}^2$. Die freien Enden der in Stern geschalteten Wicklung führen zu 3 Schleifringen, die ihrerseits durch Vermittelung von Schleifbürsten mit dem Anlasswiderstand verbunden sind.

Die Gefahr der Funkenbildung an diesen Schleifringen, welche beim Vorhandensein explosibler Gase in einem Bergwerke von verhängnisvollem Einfluss sein könnte, ist zwar eine sehr ge-

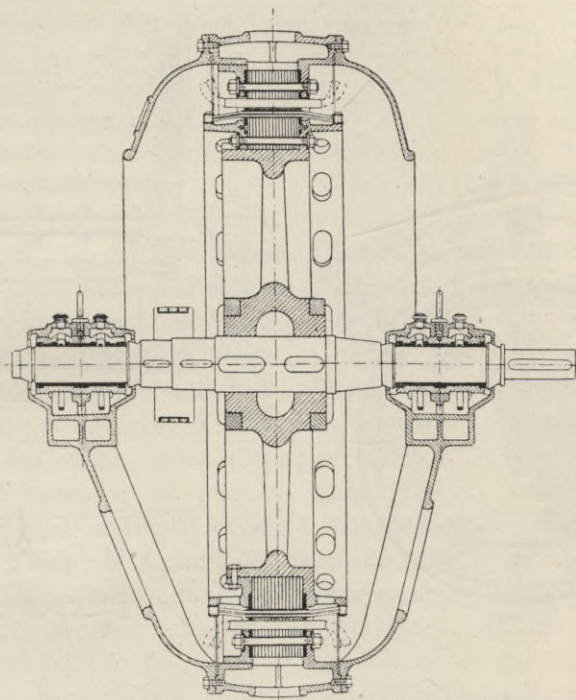


Fig. 248. Schnitt durch den Motor der Fig. 247.

ringe; um jedoch auch bei eventuellem unbeabsichtigten Aufheben einer Bürste Stromunterbrechung und damit Funkenbildung zu vermeiden, ist der Motor mit Kurzschluss- und Bürstenabhebevorrichtung versehen.

Wie die Fig. 249 u. 250 zeigen, sind an der Büchse *B*, welche die Schleifringe *S1*, *S2* und *S3* trägt, federnde Contactstücke *C1*, *C2* u. s. w. isolirt befestigt und mit den Schleifringen paarweise durch die Verbindungsstücke *V* leitend verbunden. Gegenüber den Contactfedern *C1*, *C2* u. s. w. sind an einem über einer Feder geführten

Körper messerförmige Schlusstücke M befestigt, die durch axiale Verschiebung des Körpers mit den Contacten $C1$ und $C2$ in Eingriff gebracht werden können. Die Schlusstücke sind, durch den Ring R leitend mit einander verbunden, so dass durch den Eingriff die Wickelung des Läufers kurzgeschlossen wird.

Nachdem der Motor angelassen und der Anlasswiderstand vollständig kurzgeschlossen ist, wird zunächst vermittelst eines Hand-

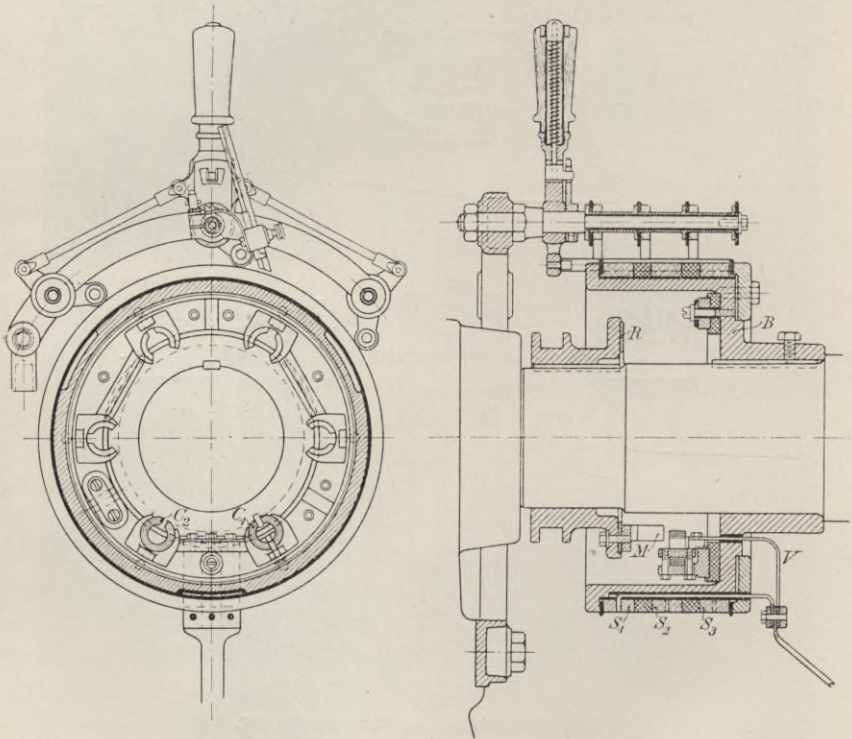


Fig. 249/250. Einzelheiten zum Motor Fig. 247.

hebels die Wickelung durch axiale Verschiebung des Körpers kurzgeschlossen, wonach die Bürsten mit Hilfe eines zweiten in Fig. 250 sichtbaren Hebels gleichzeitig aufgehoben werden können. Eine besondere Sicherheitsvorrichtung macht es unmöglich, etwa die Bürsten vor dem Kurzschliessen der Wickelung aufzuheben.

Da von dem guten Functioniren der Wasserhaltung unter Umständen die ganze Existenz einer Grube abhängt, ist bei dem Bau des Motors besonders auf eine hohe Betriebssicherheit Rücksicht

genommen worden. Demgemäss ist zur Isolation der Wickelung lediglich Glimmer und Mikanit zur Anwendung gekommen, alle der Abnutzung unterworfenen Theile sind reichlich gehalten und die Erwärmung des Motors gering bemessen worden. Nach siebenstündigem Betriebe mit etwa 75 P beträgt die Temperaturerhöhung in keinem Theile mehr als etwa 20° C.

Bei 500 Volt beträgt der Leerlaufstrom ca. 34 Ampere, die Leerlaufarbeit 3,5 KW, $\cos \varphi$ bei einer Belastung von 75 P = 0,8.

Die Gewichte des Motors sind folgende:

Ständer	2670 kg
Läufer	2345 „
Zwei Schildlager	1652 „
Welle	343 „
Gesammtgewicht	7250 „

Der in Fig. 251 dargestellte Motor ist ein von der Union Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin für Hebezeuge gebauter Motor und besonders zum Anziehen von Bremsgewichten bestimmt. Er leistet $\frac{1}{8}$ P und ist mit Kurzschlussanker versehen. Wenn diese Motoren im eigentlichen Kranbetriebe Verwendung finden sollen, werden sie mit Schleifringanker versehen, da nur auf diese Weise durch Einschalten von Widerstand der Schlipf vergrössert und die Umdrehungszahl am Ende jeder Bewegung wie erforderlich, herabgemindert werden kann.

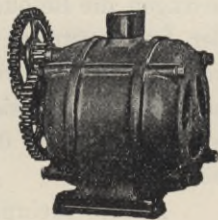


Fig. 251.
 $\frac{1}{8}$ P Inductionsmotor,
Modell Kl der Union.

In Amerika hat besonders die General Electric Co. sich mit dem Bau von Inductionsmotoren beschäftigt. Auf S. 212—221 waren Angaben über einen als J—8—150—600 bezeichneten Motor gemacht. Hierunter ist zu verstehen, dass es sich um einen Inductionsmotor handelt, der achtpolig ist und bei 600 Umdrehungen in der Minute 150 P leistet. Ein Diagramm über Versuche mit diesem Motor ist in Fig. 255 dargestellt. Obwohl der Motor sich ausgezeichnet bewährte und bei voller Belastung einen Wirkungsgrad von 91 % aufwies, ist diese Bauart in neuerer Zeit doch verlassen worden.

Ueber einen neueren als J—8—30—900—550 bezeichneten Motor, also einen Inductionsmotor mit 8 Polen, der bei 900 Umdrehungen in der Minute, 550 Volt Netzspannung und 60 Perioden

in der Secunde 30 P leistet, werden folgende Angaben gemacht: der Ständer hat einen Durchmesser von 660 mm, der Läufer einen solchen aussen von 483, innen von 356 mm. Die Länge des Läufers beträgt 254 mm, er ist mit 2 Ventilationscanälen von je 12,7 mm versehen. Die Zahl der Schlitze beträgt 71, ihre Abmessungen sind 12,7 mm in der Tiefe und 13,5 mm in der Breite; die Zähne sind mit Köpfen versehen, zwischen denen 1,2 mm freier Raum ist. Der Läufer ist als Käfiganker gewickelt, die Messingstäbe der Wickelung haben einen Querschnitt von $12,7 \times 10,2 \text{ mm}^2$. Die in Stern geschaltete Wickelung des Ständers ist in 96 graden Schlitzen untergebracht, jeder Schlitz enthält 8 Doppelleiter aus je 2 Kupferdrähten von 25,4 mm Durchmesser. Der Polstand der Ständerwickelung ist ein Bruch, jede Spule umgreift 83 vom Hundert des Polbogens; in anderen Worten: während auf den Pol 12 Zähne entfallen, ist die Wickelung nur um 10 herumgeführt. Diese Maschine wurde, obwohl sie nur für eine Leistung von 30 P gebaut war, bis zu einer Maximalleistung von 95 P geprüft. Bei normaler Geschwindigkeit, aber unbelastet betragen die Reibungsverluste 400 Watt, die Kernverluste 1070 Watt, der Leerlaufstrom war hierbei 11 Ampere. Der Wirkungsgrad bei voller Belastung wurde zu 89,5 %, bei halber Belastung zu 85 % ermittelt. Der Leistungsfactor war bei voller Belastung 0,895, bei halber Belastung 0,77. Die Temperatur stieg bei voller Belastung bis zu 29 ° C.

Andere Mehrphasenmotoren der General Electric Company findet man in der *Electrical World* Bd. 27 S. 429 beschrieben.

Der grösste Inductionsmotor in Amerika und wahrscheinlich der grösste der Welt mit Käfigläufer ist ein 500 P Motor der Westinghouse Gesellschaft.¹⁾ Er hat 36 Pole und ist für 60 Perioden und 400 Volt Spannung des Speisestromes gebaut. Seine Maximalgeschwindigkeit (bei Synchronismus) würde also 200 Umdrehungen in der Minute betragen; bei voller Belastung fällt aber die Umdrehungszahl auf 192, der Schlupf beträgt also in diesem Falle 4 vom Hundert. Die Anlassmethode ist die allgemein von der Westinghouse Gesellschaft bevorzugte; es wird nämlich in die Primärwickelung ein regelbarer Drehstromtransformator eingeschaltet, welcher den Ständer zunächst mit einer niedrigeren Spannung speist, welche allmählich mit zunehmender Geschwindigkeit selbstthätig erhöht wird, bis die Wickelungen unmittelbar an die Speiseleitungen angelegt

1) Vgl. *Electrical World* Bd. 32 S. 258 vom 10. Sept. 1898.

werden können. Er ist so gebaut, dass das Anfangsdrehmoment $2\frac{1}{4}$ mal so gross ist wie bei voller Belastung.

Seine Hauptabmessungen sind folgende:

Durchmesser des Läufers	2134 mm
Gesamthöhe	3127 "
Länge, gemessen parallel zur Achse	1067 "
Gesamttgewicht	19500 kg.

Wegen kleinerer Inductionsmotoren der Westinghouse Gesellschaft wird auf *Electrical World* Bd. 26 S. 14 und *Engineering*, April und Mai 1899 verwiesen.

Kapitel XI.

Winke für das Entwerfen von Mehrphasenmotoren.

Will man einen Motor entwerfen, der irgend welchen gegebenen Anforderungen entsprechen soll, so muss man zunächst versuchen, sich ein Bild von den Hauptabmessungen zu machen, die er wahrscheinlich erhalten wird. Dies lässt sich ziemlich leicht erreichen, wenn man folgende Erwägungen anstellt. Erfahrungsgemäss ist für 1 Watt Wärmeverlust eine Anker- oder Läuferoberfläche von 6,45 cm² erforderlich, wofern die Erhitzung in angemessenen Grenzen bleiben soll. Nehmen wir nun an, dass durchschnittlich 2 vom Hundert der Bruttoleistung in Wärme verloren gehen, so würden wir auf 1 KW Leistung 20 Watt als Wärmeverlust für den Läufer zu rechnen haben, dieser müsste also etwa 130 cm² Oberfläche für 1 KW Leistung haben oder etwa 95 cm² auf jede Pferdestärke. Der angegebene Werth passt für Motoren von 10—20 P, bei grösseren Motoren kann man etwas günstigere, bei kleineren etwas ungünstigere Verhältnisse annehmen. Nun beträgt die Oberfläche des Läufers πdl in cm², wenn d der Durchmesser, l in cm die Länge parallel der Achse gemessen ist. Hieraus ergibt sich die Regel:

$$\frac{\pi dl}{\text{Leistung in } P} = 100,$$

$$dl = 32 P.$$

Um die relativen Werthe von d und l festzustellen, müssen wir zunächst die Geschwindigkeit berücksichtigen. Ist die Umdrehungszahl des Motors nicht vorgeschrieben, so haben wir für die Wahl von d ziemlich weite Grenzen.

Die Formel
$$d = 400 \sqrt{\frac{P}{v}},$$

wo v in cm in der Secunde gemessen ist, liefert einen mittleren Werth. Die Formel ist durch Vergleichen der Abmessungen einer

grossen Zahl guter Motoren von verschiedener Leistung ermittelt worden. Wenn es sich um Motoren von irgendwie ungewöhnlichen Verhältnissen handelt, ist die Formel naturgemäss nicht so zutreffend, so ist bei dem S. 270 beschriebenen, auf Tafel XII dargestellten 1000pferdigen Brown'schen Motor, der für eine ungewöhnlich hohe Geschwindigkeit bestimmt ist, der Durchmesser etwas kleiner als er nach obiger Formel erhalten wird. Die Umfangsgeschwindigkeit bemessen wir für Motoren bis zu 50 P auf etwa 15—20 m in der Secunde; dieser Werth kann für Läufer von sehr grossem Durchmesser bis auf etwa 40 m gesteigert werden.

Beispiel. Es soll ein Drehstrommotor für eine Leistung von 40 P entworfen werden.

$$d = 400 \sqrt{\frac{40}{2000}} \approx 56 \text{ cm.}$$

Nehmen wir an, dass die Umdrehungszahl durch den Zweck, welchem der Motor dienen soll, oder durch sonstige Umstände wie Polzahl und Wechselzahl des Speisestromes bedingt, also gegeben ist, so bestimmt sich der Durchmesser aus der Peripheriegeschwindigkeit. Dividiren wir Letztere durch die Zahl der Umdrehungen in der Minute, so erhalten wir die Länge des Umfangs und durch Division mit π den Durchmesser.

Beispiel. Es soll ein 40pferdiger Motor mit 600 Umdrehungen in der Minute entworfen werden, die Frequenz des Speisestromes ist 30 Perioden in der Secunde. Zunächst ergibt sich aus dem Umstande, dass 10 Umdrehungen und 30 Perioden gegeben sind, also 3 Perioden auf jede Umdrehung entfallen, der Motor 6polig sein muss. Die gegebene Umdrehungszahl 600 in der Minute bezieht sich auf synchronen Lauf; die wirkliche Geschwindigkeit ist wegen des Schlipfes, den wir zu 4 vom Hundert annehmen können, etwas geringer, etwa 576 Umdrehungen. Da die Polzahl eine grade Zahl sein muss (wenn nicht 6, so gleich 8, 10 oder eine andere grade Zahl), so muss die synchrone Geschwindigkeit gleich 600 oder 450 oder 360 sein, wenn die Frequenz genau gleich 30 sein soll. Nach der oben gegebenen Regel wird $dl = 32 \text{ P} = 1280 \text{ cm}$ sein. Setzen wir die Umfangsgeschwindigkeit auf 20 m in der Secunde fest, so ist

$$600 \pi d = 2000 \times 60,$$

$$\text{woraus } \pi d = 200 \text{ und } d \approx 63,8 \text{ cm.}$$

$$\text{Da } dl = 1280, \text{ wird } l = \frac{1280}{63,8} = 20 \text{ cm.}$$

Hätten wir die Umfangsgeschwindigkeit zu 15 m angenommen, so wäre $d = 48 \text{ cm}$ und $l = 25,7 \text{ cm}$ geworden. Für zwischenliegende Grössen dieser Werthe hätte sich die Umfangsgeschwindigkeit entsprechend ergeben. Hätte man Kernscheiben von 50, 60 oder 70 cm Durchmesser in genügender Anzahl im Vorrath, so würde man diese wählen und die Länge dementsprechend

berechnen. Bei Kernscheiben von 60 cm Durchmesser würde man so viele brauchen, dass die Kernlänge 21,3 cm beträgt. Dieser Werth würde gegebenenfalls nachträglich noch geändert werden müssen, wenn die Zahl der Windungen festgestellt ist.

Die Bestimmung des inneren Durchmessers des Ständers ergibt sich aus der Nothwendigkeit den Luftzwischenraum möglichst klein zu halten. Ein Millimeter Zwischenraum ist genügend, wenn man auf sorgfältige Arbeit rechnen kann, als Höchstmaass für einen Motor von 40 P wäre 1,6 mm zulässig.

In nachstehender Tabelle sind die betreffenden Abmessungen von einigen der im vorigen Kapitel beschriebenen Motoren zusammengestellt:

Brown's Motor . . .	6 P	4 polig	$d = 24,9$ cm	0,5 mm Luftzwischenraum
„ „ . . .	120 „	8 „	$d = 75$ „	1,8 „ „
„ „ . . .	1000 „	10 „	$d = 155$ „	2,5 „ „
Kolben's „ . . .	20 „	6 „	$d = 39$ „	0,75 „ „
Gen. Electric Co.'s Motor	30 „	8 „	$d = 48,26$ „	1,6 „ „
„ „ „ „	150 „	8 „	$d = 101,6$ „	3,2 „ „

Nunmehr wollen wir die Zahl der Schlitze im Ständer ermitteln. Der oben betrachtete Motor soll 6 Pole haben. Eine für diese Motorgrösse passende Dreiphasenwicklung würde eine über 4 Löcher für jeden Pol und jede Phase vertheilte Wicklung sein, hieraus würden sich also $4 \times 3 \times 6 = 72$ Schlitze für den Ständer ergeben. Die Abmessungen der Wicklungen sind unter Berücksichtigung der Spannung zu ermitteln. Hierzu kann man zwei Wege einschlagen. Der eine Weg besteht darin, dass man eine Berechnung wie bei einem Transformator anstellt, und nach einer annähernd aus der Polfläche und der passenden Kraftliniendichte im Luftzwischenraum ermittelten Kraftlinienmenge für jeden Pol die Zahl der primären Windungen berechnet, die eine Spannung zu erzeugen vermag, die der der Speisestromes gleich ist.

Der andere Weg besteht darin, dass man die Zahl der hintereinander geschalteten Leiter mit Rücksicht auf ihre Länge, ihre Geschwindigkeit und die Stärke des von ihnen geschnittenen Feldes festzustellen. Wir wollen nach einander beide Wege einschlagen.

Bei einer Drehstromwicklung in Dreieckschaltung ist die Spannung der Spulen jeder Phase gleich der Spannung zwischen den Leitungen; bei der Sternschaltung ist die Spannung einer Phase nur $= 0,58$ derjenigen zwischen den Leitungen. Diese Verhältnisse und die bei Zweiphasenwicklungen bestehenden sind im Kapitel III behandelt

worden. Wir wollen die Spannung des zu entwerfenden Motors zu 1000 Volt annehmen, so dass also zwischen den Leitungen die Spannung 1732 Volt beträgt. Es ist nun aus bestimmten Gründen vortheilhaft, dem Motor Sternschaltung zu geben, diese Gründe sind aber verschieden bei Ständer und Läufer. Beim Ständer können wir bei Sternschaltung einen stärkeren Leiter und weniger Wickelungen verwenden als bei Dreieckschaltung, wodurch der Raum für die Isolation und die Kosten der Einbringung der Wickelung vermindert werden.

Ist die Spannung V des Speisestromes und die Schaltungsweise bestimmt, so ist auch die Spannung jeder der 3 Wickelungen festgelegt. Hieraus und aus der Kenntniss der Gesamtzahl W der gelieferten Watt können wir unter Annahme eines mittleren Leistungsfactors $\cos \varphi$ eine erste Annäherung der Stromstärke jedes Zweiges ermitteln, da $W = 3 V J \cos \varphi$ ist, woraus sich $J = \frac{W}{3 V \cos \varphi}$ ergibt.

Nun entsprechen 40 P der Zahl von $40 \cdot 746 = 29840$ Watt. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 88 vom Hundert bei voller Belastung würden $\frac{29840 \cdot 100}{88} = 33909$ Watt zugeführt werden müssen. Setzen wir diesen Werth in die Gleichung ein und $\cos \varphi = 0,87$, $V = 1000$, so erhalten wir $J = 13$ Ampere als Maximalwerth des Stromes in einer Phase bei voller Belastung.

Nun muss der Ständer (soweit der Entwurf in Frage kommt) 1. die so ermittelte Stromstärke aufnehmen und 2. damit in jeder der 3 Phasen eine gegenelektromotorische Kraft gleich der des Speisestromes erzeugen können.

Nach den für Transformatoren ermittelten Grundsätzen ist die EMK, die in einer Spule von N_1 Windungen durch den Wechsel einer Kraftlinienmenge \mathfrak{S}_1 (maximal) mit der Frequenz n_1 erzeugt wird,

$$E_1 = 4,45 q n_1 \mathfrak{S}_1 N_1 : 10^8.$$

Diese Formel wurde auf S. 243 entwickelt; N_1 schliesst alle hinter einander geschalteten Windungen in einer Phase ein und ist gleich $Z_1/2$; \mathfrak{S}_1 ist die gesammte Kraftlinienmenge für jeden Pol. Kennen wir demnach \mathfrak{S}_1 , n , q und E , so können wir N bestimmen.

Bei dem zu berechnenden Motor sind 6 Pole vorhanden, jeder nimmt also $1/6$ der ganzen Umfangsfläche des Läufers ein, das ist also $1/6 \pi dl = 1/6 \cdot 3,14 \cdot 70 \cdot 21 = 770 \text{ cm}^2$. Die Kraftlinien werden aber über diese Fläche nicht gleichmässig vertheilt sein. Nicht nur die Zähne werden stellenweise die Dichte ungleich machen, es wird

auch Letztere von einem Maximum in der Mitte beiderseits allmählich abnehmen. Bei dieser überschläglichen Berechnung genügt es zu wissen, dass bei den üblichen Motoren die Kraftliniendichte im Durchschnitt zu 3000 Linien auf das Quadratcentimeter der Polfläche anzunehmen ist. Haben wir also eine Fläche von 770 cm^2 , so beträgt die gesammte Kraftlinienzahl für den Pol $= 770 \times 3000 = 2300000$. Setzen wir diesen Werth von \mathfrak{C}_1 in die Gleichung ein und nehmen $E_1 = 970$, $q = 0,96$ (s. Tabelle S. 81), $n_1 = 30$, so erhalten wir für N_1 den Werth

$$N_1 = \frac{970 \times 10^8}{4,45 \cdot 0,96 \cdot 30 \cdot 230000} = 375.$$

Der nächstliegende vielfache Werth von 24 ist 384. Wenn nun die Wickelung 384 Windungen enthält, geht sie 384mal durch die 24 Schlitze hin und 384mal wieder zurück, also entfallen $\frac{768}{24} = 32$ Leiter auf jeden Schlitz. Da die Windungszahl 384 etwas grösser ist als die berechnete 375, so ist dementsprechend die Kraftlinienmenge etwas kleiner als 2300000.

Der zweite Weg zur Berechnung der erforderlichen Zahl der Ständerleiter besteht darin, die Gesamtlänge der wirksamen Leiter in einer Phase festzustellen. Dieselbe kann berechnet werden aus der Gleichung

$$(V - V_1) \times 10^8 = q \mathfrak{B} \lambda v_1.$$

Hierin bedeutet V die maximale Spannung einer Phase,

V_1 die Spannung, welche im Widerstand der Ständerleiter verloren geht, q der Breitencoefficient (vergl. S. 47 und 81),

λ die Gesamtlänge der erforderlichen wirksamen Leiter einer Phase in cm,

v_1 die lineare (synchrone) Umfangsgeschwindigkeit in cm in der Secunde.

Die Verlustspannung kann zwischen 5 vom Hundert der Spannung V bei kleinen Motoren und 3 vom Hundert bei grossen Motoren von 100 P aufwärts angenommen werden.

Wenden wir diese Formel an und setzen $\mathfrak{B}_{\max} = 3300$ ($= \mathfrak{B}_{\text{mitl. Werth}} \times 0,707 : 0,637$); $V - V_1 = 970$; $q = 0,96$; $v_1 = \pi d \cdot 10 = 1885 \text{ cm}$ in der Secunde, so wird

$$\lambda = \frac{970 \times 10^8}{0,96 \times 3300 \times 1885} = 16200 \text{ cm.}$$

Da die Länge des Kernes = 21,3 cm betrug, so wird die Zahl der wirksamen Leiter gleich 760. Hieraus ergibt sich die Zahl der Windungen jeder Phase zu 380, ein Werth, der praktisch mit dem auf dem ersten Wege ermittelten Werth 375 übereinstimmt.

Die Zahl der Windungen ist also auf 32 Leiter für jeden Schlitz festgestellt. Die Wickelung wird nach Fig. 91 oder nach Fig. V Tafel IV oder wie auf Tafel XI ausgeführt.

Oben haben wir l bestimmt mit Rücksicht auf die erforderliche Ständeroberfläche und den Durchmesser des Läufers. Es empfiehlt sich, diesen Werth noch daraufhin zu prüfen, ob hierbei genügend Raum zum Unterbringen der Leiter vorhanden ist.

Wir hatten λ , die Gesammtlänge der wirksamen Leiter für jede Phase, berechnet. Diese Länge hin und zurück durch den Ständer gewickelt setzt sich aus Z Einzelleitern zusammen, deren wirksame Länge je l cm beträgt. Wir müssen nun bestimmen, wie gross die Länge l und die Zahl Z sein soll. Wir haben zunächst $Zl = \lambda$. Z hängt ab von dem zum Unterbringen der Leiter verfügbaren Raum und von a , der Fläche, die jeder Leiter einschliesslich der Isolation und der Zwischenräume einnimmt. Wir können a bestimmen aus der uns schon bekannten Stromstärke, die auf jeden Leiter entfällt. Den Querschnitt wählen wir so, dass etwa 200 Ampere¹⁾ auf 1 cm² Kupfer entfallen. Der zum Unterbringen der Leiter verfügbare Raum hängt ab von dem Radius r des Läufers, der radialen Tiefe y der Wickelung und endlich von dem Verhältniss der Schlitzbreite zur Schlitztheilung. Ueber den vortheilhaftesten Werth dieses Verhältnisses sind die Ansichten verschieden. Vor einigen Jahren wurden die Schlitzgrade so breit gemacht als das zwischen ihnen stehende Eisen, also gleich der halben Schlitztheilung. Die spätere Praxis hat sie verbreitert, so dass sie in einzelnen Fällen doppelt so breit als die Zahnstärke gemacht wurden. Wenn der Luftzwischenraum sehr klein und die Kraftliniendichte sehr gross ist, sollte die Eisenstärke nicht zu sehr vermindert werden; geht die Kraftlinienzahl nicht über 3500 hinaus, so braucht die Zahnstärke beim Ständer nicht mehr als die Hälfte der Schlitzbreite zu sein. Bezeichnen wir das Verhältniss der Schlitzbreite zur Theilung mit b , so nehmen wir für gewöhnliche Fälle $b = 0,6$. Dann wird der gesammte für das

1) Bei Hochspannungsmaschinen nimmt die Isolation nahezu ebensoviel Raum ein als das Kupfer, so dass dann nur etwa 100 Ampere auf 1 cm² Kupfer zu rechnen ist.

Unterbringen der Leiter verfügbare Querschnitt durch $\frac{2\pi r y b}{f}$ ausgedrückt, wo f die Zahl der Phasen bezeichnet.

Wir haben nun y und l festzusetzen. Machen wir l klein, so muss die Zahl der Leiter, also auch y vermehrt werden, und mit ihr steigt die magnetische Streuung (vergl. S. 168). Ist y sehr klein, so muss l gross sein und es ist viel Eisen erforderlich, um die nothwendige Länge des Ständers zu bekommen. Wir können zwischen diesen äussersten Annahmen vermitteln, indem wir y durch l ausdrücken. Wir haben

$$\frac{2\pi r y b}{f} = Z a = \frac{\lambda}{l} a,$$

also

$$y = \frac{\lambda a f}{2\pi r b l}.$$

Hierin können wir für l den oben S. 287 abgeleiteten Werth einsetzen und sehen, was wir dabei für einen Werth von y erhalten. Bei kleinen Motoren kann l so gross wie r sein; bei Motoren von 200 P ist l meist nicht grösser als $r/2$. Wir machen y so klein als möglich, wobei jedoch l innerhalb passender Grenzen bleiben muss. Die schliessliche Berechnung von l ergibt sich aus der Gleichung $Zl = \lambda$, denn Z muss ein Vielfaches der Polzahl sein. Ist die Zahl der Leiter in einem Schlitz klein, so ist es zweckmässig, Z so zu wählen, dass die Zahl der auf einen Schlitz entfallenden Leiter grade ist. Wir können y jederzeit dadurch verkleinern, dass wir den Radius r , auf den wir den Entwurf aufgebaut haben, vergrössern. Bei ausgeführten Motoren liegt y zwischen $0,2r$ (bei kleinen Motoren) und $0,07r$ (bei Motoren über 200 P).

Bei der Bestimmung der Zahl der Schlitze müssen wir noch Folgendes berücksichtigen. Wo die Pole gering an Zahl sind und sich je über einen beträchtlichen Theil des Umfangs erstrecken, wird die Zahl der auf jeden Pol entfallenden Schlitze grösser sein als bei vergleichsweise schmalen Polen. Sie wird natürlich ein Vielfaches der Zahl der Phasen sein; wird die in Fig. 91 dargestellte Wickelungsart verwendet, so muss sie durch 4 theilbar sein. Haben wir auf dem oben angegebenen Wege einen angenäherten Werth für y ermittelt, so schreiten wir nun dazu, die für jeden Pol und jede Phase erforderliche Zahl der Schlitze festzustellen, indem wir die Breite jedes Schlitzes ungefähr gleich $\frac{1}{2}y$ machen und dabei das oben bestimmte Verhältniss zwischen der Breite des Eisens und der des Schlitzes festhalten. Wir können dann endlich y so berichtigen,

dass genügend Raum für die auf jeden Schlitz entfallende Zahl der Leiter und deren Isolation vorhanden ist.

Haben wir l , die wirksame Länge jedes Leiters, ermittelt, so kennen wir auch die Länge des geblättern Ständereisens, parallel der Achse gemessen. Dieses Maass kann in seiner Beziehung zu r beträchtlich geändert werden, ohne dass die Kosten der Maschine für jede Pferdestärke und der Wirkungsgrad sich ändern. Es wird indessen bei grossen Maschinen stets kleiner im Verhältniss zu r sein als bei kleinen Maschinen. Da die Bleche, aus denen der Ständer zusammengesetzt ist, fest mit einander verbunden werden müssen, ist es aus Gründen der mechanischen Festigkeit erwünscht, dass seine Breite im Vergleich zu seiner radialen Abmessung gering bleibt. Zum Theil aus diesem Grunde findet man bei ausgeführten Maschinen, dass der Radius des Läufers sich näher mit der Quadratwurzel als mit der 3. Wurzel aus der Zahl der Pferdestärken ändert. Die radiale Tiefe des Ständereisens kann berechnet werden, wenn die Breite eines Poles gegeben ist. Der Querschnitt, welcher sich bei einem durch die Achse geführten Schnitt ergibt, muss gross genug sein, dass er die Hälfte der gesammten auf einen Pol entfallenden Kraftlinien aufnehmen kann, ohne dass β über 6500 hinausgeht. Die Thatsache, dass die radiale Tiefe y der Ständerlöcher in dem Maasse abnimmt, als der Radius zunimmt, ist die Veranlassung, dass die Ständerlänge um einen entsprechenden Betrag sich vergrössert, wenn die Grösse der Maschine zunimmt; denn die Maschinenkraft ist angenähert proportional dem Kupfergewicht des Ständers.

Sind die Abmessungen des Ständers endgültig festgelegt, so ergeben sich hieraus auch sofort diejenigen des Läuferisens. Die Eisenbreite gemessen parallel der Achse ist die gleiche wie beim Ständer. Der Zwischenraum zwischen beiden ist möglichst gering zu nehmen, wie schon oben erwähnt. Bei dem in Fig. 162 dargestellten Motor beträgt der Luftzwischenraum nur 0,5 mm, d. h. der äussere Durchmesser des Läufers ist nur um 1 mm geringer als die innere lichte Weite des Ständers. Bei kleinen Motoren mit 4 oder 6 Polen wird der Läufer aus Scheiben aufgebaut, wie sie die Fig. 161 zeigt. Ist die Polzahl grösser, so würde der mittlere (Kern) Theil dieser Scheiben unthätig sein. In diesem Falle wird daher der geblättern Theil des Läufers als Ring ausgeführt, der aus einzelnen Eisenblättern in der Weise aufgebaut wird, dass die Fugen jeder jeder Schicht von den Blättern der nächsten überdeckt werden; das Ganze wird dann auf einem Stern montirt.

Wie wir schon gesehen haben, ist es wünschenswerth, wenn auch nicht durchaus nothwendig, dass die Zahl der Läuferleiter und die der Ständerlöcher keinen gemeinschaftlichen Theiler haben, damit weder beim Anlaufen noch bei irgend einer geringeren Geschwindigkeit, als dem Synchronismus entspricht, beide das Bestreben haben einander magnetisch festzuhalten. Sind die Läuferleiter an ihren Enden einfach durch einen kräftigen Kupferring kurzgeschlossen, entsteht erfahrungsgemäss keine Schwierigkeit passende Zahlen aufzufinden. Bei dem in Fig. 161/162 dargestellten Motor hat der Ständer 40 Löcher, der Läufer 37 Leiter. Wenn man die Läuferleiter zu einer regelmässigen Wickelung mit einander verbinden will, sei es um einen Anlasswiderstand einschalten zu können oder zu dem auf S. 225 angegebenen Zwecke, so muss bei der Bestimmung ihrer Zahl einige Vorsicht beobachtet werden. Wollen wir sie z. B. in 3 Stromkreise eintheilen und diese mit Schleifringen auf der Achse verbinden, um einen Anlaufwiderstand einschalten zu können, so theilen wir den vor einem Magnetpol liegenden Raum in 3 Theile, 1, 2 und 3. Alle Leiter, die in einer vor einem Nordpol liegenden Abtheilung 1 sich befinden, können mit solchen einer vor einem Südpol liegenden Abtheilung 1 verbunden werden, und so fort, wodurch eine Wellenwickelung rund um den Läufer hergestellt wird. In gleicher Weise werden die in den Abtheilungen 2 und 3 liegenden Leiter mit einander verbunden und bilden dann zwei weitere Wellenwickelungen. Diagramme solcher Wickelungen sind in Fig. 200 und Y Tafel IV dargestellt. Ist die Zahl der Leiter jeder Abtheilung gleich x , so ist die Gesamtzahl gleich $3xp$, wenn mit p die Zahl der einzelnen Pole bezeichnet wird. Diese Zahl wird gewöhnlich einen gemeinsamen Factor mit der Zahl der Ständerschlitze haben, aber an sich wird dies noch kein Hinderniss für das Anlaufen des Motors bilden, wenn die Leiter genügend zahlreich vorhanden sind, und besonders, wenn die Zahl der innerhalb einer Polbreite liegenden Leiter auf Läufer und Ständer keinen gemeinschaftlichen Theiler haben.

Bei der Bestimmung des Querschnitts der Läuferleiter muss man beachten, dass mit ihm der Wirkungsgrad wächst, vorausgesetzt, dass der Raum für das Eisen genügend ist. Man gewinnt nichts damit, dass man den Gesamtquerschnitt grösser macht, als den der Ständerwickelung; bei praktischen Ausführungen ist er im Allgemeinen ein wenig kleiner. Wenn die Leiter aus massiven, nur wenig isolirten Kupferstäben bestehen, ist zu ihrer Unterbringung sehr viel weniger Raum erforderlich als für die Ständerleiter, es sind daher die

Löcher im Läufer gewöhnlich nur halb so gross wie diejenigen des Ständers.

Wendet man Heyland's Diagramme Fig. 229 für die Berechnung der Drehmomente und Schlipfe bei verschiedenen Belastungen an, so sind drei Dinge erforderlich, nämlich die Kenntniss des Leerlaufstromes, der Streuungscoefficienten u_1 und u_2 , und des Coefficienten der Ausnutzung U . Die Coefficienten u_1 und u_2 können angenähert berechnet werden, wie auf S. 215 gezeigt wurde, und experimentell nach der auf S. 233 beschriebenen Methode bestimmt werden. Sie sind ziemlich constant bei bestimmten Maschinengattungen. Aus ihnen lässt sich U berechnen, wie auf S. 237 angegeben ist. Wie der Leerlaufstrom ermittelt wird, ist ebenfalls früher schon angegeben. Beispiele sind S. 220 und 248 gegeben. Er hängt wesentlich ab von der Zahl der Amperewindungen, die erforderlich ist, um die verlangte Kraftliniendichte im Luftzwischenraum zu erzeugen, und ist daher hauptsächlich direct proportional dem wirklichen Abstand von Läufer und Ständer und umgekehrt proportional der Fläche eines Poles. Er wird (bei neueren Maschinen) um etwa $\frac{1}{6}$ vergrössert durch die magnetomotorische Kraft, die erforderlich ist, um die Kraftlinienströmung durch die Eisenteile zu treiben.

Kapitel XII.

Mechanische Ausführung mehrphasiger Motoren.

Die drei wichtigsten Erfordernisse, denen die mechanische Ausführung eines Motors genügen muss, sind:

1. er muss beim Angehen eine genügende Zugkraft entwickeln,
2. er muss bei allen Belastungen mit annähernd derselben Geschwindigkeit laufen,
3. er muss einen möglichst grossen Theil der ihm gelieferten Energie in mechanische Arbeit umsetzen.¹⁾

Angehen der mehrphasigen Motoren.

Die Bedingungen, unter denen ein mehrphasiger Motor beim Angehen eine grosse Zugkraft äussern kann, haben wir in Kapitel VII betrachtet. Die thatsächlich erhaltene Zugkraft hängt natürlich von der Stärke des durch die Ständerspulen fliessenden Stromes ab; sie kann bis zum vier- und fünffachen der Zugkraft bei voller Belastung steigen. Bei grossen Motoren ist es nicht erwünscht, einen so starken Strom zu erhalten, als er im Motor allein, ohne weiteren Widerstand, beim Angehen fließen würde. Der in den Läuferkreis eingeschaltete Widerstand hat die Wirkung, den Strom im Ständer niederzuhalten, indem die Magnetbewicklung wie eine Drosselspule wirkt; denn ihre Selbstinduction wird nicht durch die im Läufer erzeugten Ströme

1) Der Leistungsfactor ist nicht nur für den Verbraucher, sondern auch für den Stromlieferer von Wichtigkeit, denn ein geringer Leistungsfactor verursacht in den Stromzuführungsleitungen einen ungebührlichen Verlust und eine Verzögerung der Stromphase. Der Durchschnittsverbraucher, der seine von einem Wattmeter angegebene Leistung bezahlt, kümmert sich um den Leistungsfactor nur in so weit, als dieser die Leistung seines Motors beeinflusst. Ein kleiner Leistungsfactor und grosser Stromverbrauch beim Angehen können aber einen sehr grossen Spannungsabfall in dem ganzen von demselben Transformator gespeisten Stromkreis verursachen.

vollständig ausgelöscht, wie es der Fall wäre, wenn kein Widerstand eingeschaltet wäre. Zur gleichen Zeit wird, wie in Kapitel VII gezeigt wurde, eine weit grössere Zugkraft ausgeübt, als wenn der Strom durch Widerstand im primären Kreise niedergedrückt würde.

Kleine Motoren haben gewöhnlich Käfiganker, grössere häufig Anlaufwiderstände, die im Körper des Läufers untergebracht sind und selbstthätig oder von Hand ausgeschaltet werden, wenn der Motor seine normale Geschwindigkeit erreicht hat. Grosse Motoren werden meist leer angelassen, und die Belastung wird durch Riemen- oder Reibungsübertragung nach und nach aufgelegt. Für Krane, Aufzüge u. s. w. werden besondere Motoren ohne Schleifringe, Bürsten oder andere zum Einschalten des Widerstandes in den Läuferkreis dienende Vorrichtung gebaut. Diese haben einen stark veränderlichen Schlupf (bis zu 12 %) und einen niedrigen Wirkungsgrad, aber sie gehen mit dem doppelten bis dreifachen der Zugkraft, die sie bei normaler Belastung besitzen, an. Die nachstehende Tabelle, welche Herr Kolben geliefert hat, gibt Strom- und Klemmenspannung eines gewöhnlichen neunpferdigen Kranmotors der Maschinenfabrik Oerlikon beim Angehen unter verschiedenen Belastungen. Der Zug zwischen Feld und Anker ist nicht bei allen Stellungen derselbe; es wird deshalb der kleinste und der grösste Werth angegeben.

Zugkraft eines neunpferdigen Dreiphasenmotors für einen Kran beim Anlassen.

Spannung zwischen dem neutralen Punkte und jeder Endklemme	Strom in jedem Zweige beim Anlassen	Zugkraft in kg an einem Hebelarm von 13 cm in der Ruhe
48,5	60	15—30
58	83	30—60
69	100	50—90
75	105	60—100
80	115	90—140

Derselbe Motor verbrauchte 20 Ampere bei einer Spannung von 110 Volt, wenn er mit 1000 Umdrehungen in der Minute leer lief. Bei normaler Belastung betrug der Strom 39 Ampere und die Geschwindigkeit 890, wobei 8,5 P entwickelt wurden.

Gleichbleibende Geschwindigkeit.

Was die Frage der gleichbleibenden Geschwindigkeit betrifft, so haben wir gesehen, dass in einem gut entworfenen Motor der Schlupf

5 % nicht übersteigt; die Geschwindigkeit wird demnach zwischen Leerlauf und voller Belastung sich nur um 3 bis 4 % ändern. In einem Beispiel, das Louis Bell¹⁾ anführt, zeigte eine Anlage mit 17 Drehfeldmotoren in Columbia, S. C., bei einer Aenderung der Leistung von 75 P bis herab zum Leerlauf nur 2,2 %, einzelne Motoren sogar nur 1,5 % Aenderung der Geschwindigkeit.

Wirkungsgrad.

Den hohen Wirkungsgrad mehrphasiger und einphasiger asynchroner Motoren erkennt man aus der nachfolgenden Zusammenstellung von Messungsergebnissen.

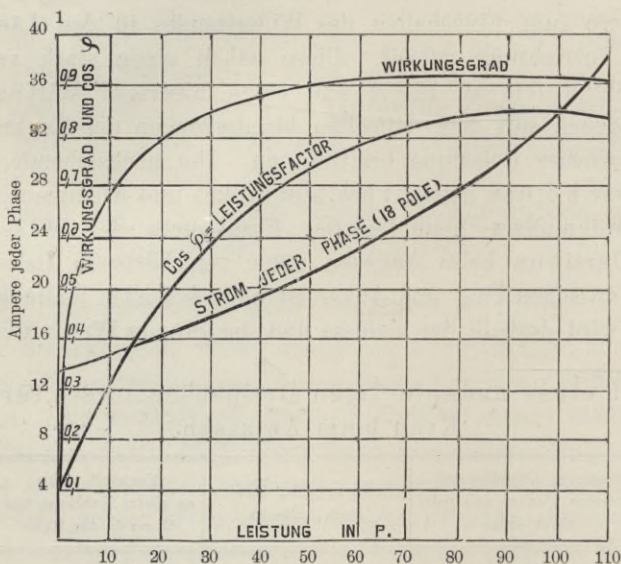


Fig. 252. Diagramm des Motors Fig. 253.

Herr Kolben hat die auf S. 299 gegebene Tabelle mitgeteilt, welche sich auf einfache Dreiphasenmotoren der Maschinenfabrik Oerlikon bezieht. Sie haben keine Schleifringe und Bürsten, für den Läuferkreis wird kein Widerstand benutzt. Alle Läufer haben Trommelwicklung mit 3, 5, 7 oder 11 in sich geschlossenen Phasen.

Ein 100pferdiger asynchroner Motor wurde von Kolben untersucht, das Ergebniss findet sich in graphischer Darstellung in Fig. 252, die Maschine selbst ist in Fig. 253 dargestellt.

1) Vortrag, gehalten vor dem American Institute of Electrical Engineers, veröffentlicht in Electrical World Bd. 23, S. 334—367, 400. 1894.

Ergebnisse von Bremsversuchen an Oerlikoner Dreiphasenmotoren.

Bezeichnung Nr.	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	
Leistung an der Riemenscheibe in P . . .	1/4	1/2	3/4	1 1/2	2	3	4 1/2	6	9	12	18	24	36	48	60	75	100	125	
Umdrehungen in der Minute bei { Leerlauf . . . halber Last voller Last	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	750	600	600	500	
Klemmenspannung (Sternschaltung) . . .	1460	1470	1470	1475	1475	1480	1480	985	985	988	990	990	990	990	740	742	595	496	
Perioden in der Secunde	1410	1420	1435	1440	1445	1450	1450	960	960	970	970	970	970	970	725	730	585	488	
Strom in jedem Zweig bei { Leerlauf . . . halber Last . . . voller Last . . .	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
Wirkungsgrad bei voller Last (Procent) . . .	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Cosinus des Verschiebungswinkels zwischen elektromotorischer Kraft und Strom (Leistungsfactor)	0,85	1,3	2,2	2,8	3,6	6	7,5	12	14	19	21	25	27	40	48	65	75	90	
Zahl der Pole	1	1,4	2,6	3,7	4,8	8	11	16	19	25	32	41	53	73	90	115	143	180	
Strom beim Anlassen bei gespanntem Riemen und ohne Last	1,5	2,3	3,3	5,8	7,5	11	14,5	20,5	28	35,5	53	70	100	130	160	200	265	330	
	55	65	68	72	75	78	80	82	87	88	90	91	92	92	93	93	93	94	
	0,67	0,75	0,75	0,8	0,8	0,8	0,86	0,8	0,82	0,85	0,85	0,85	0,88	0,9	0,9	0,9	0,91	0,91	
	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	8	8	10	10	12	
	4	6	11	16	30	36	55	65	75	80	85	90	100	105	112	120	150	220	
	Eingeschaltet ohne Widerstand												Angelassen mit gewöhnlichem Widerstand im primären Stromkreis						Besondere Anlassvorrichtung mit einspulischem Transformator

Der Wirkungsgrad eines einphasigen asynchronen sechspoligen Motors Brown'scher Bauart für 15 P wurde von Ricardo Arno¹⁾ gemessen. Der Motor war für eine Wechselgeschwindigkeit von

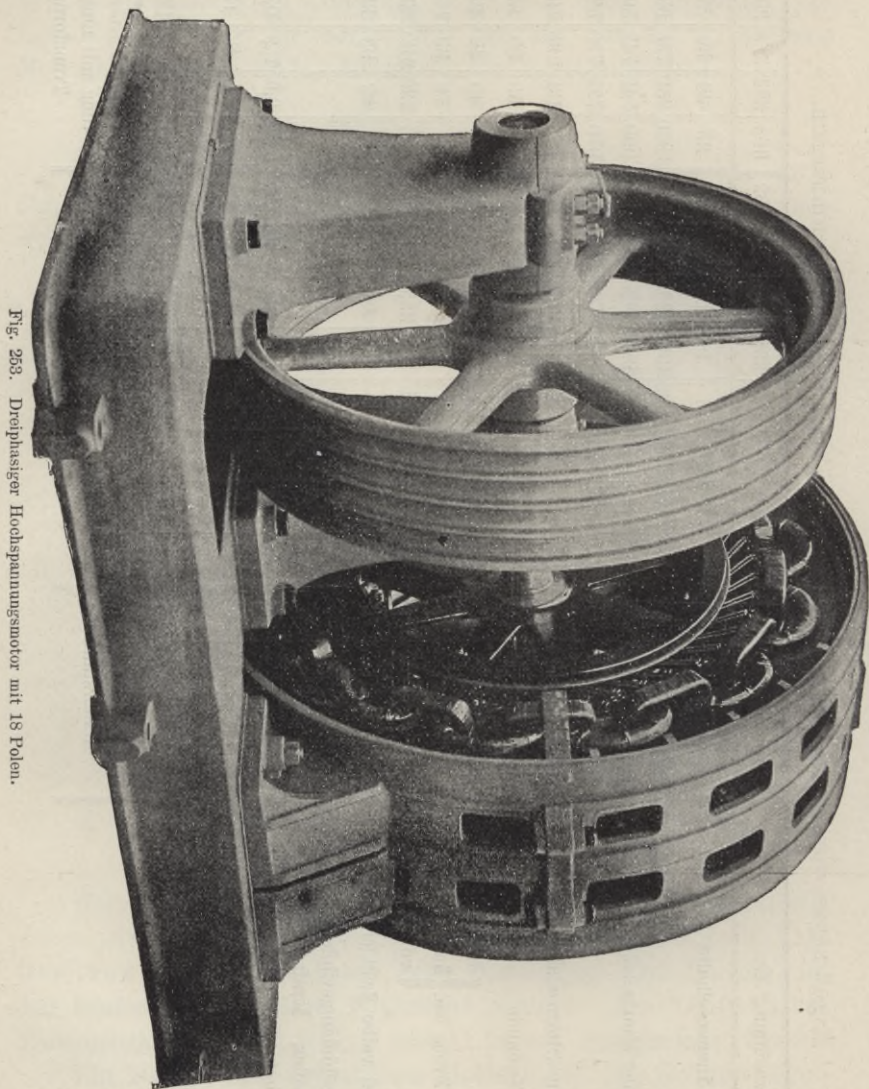


Fig. 253. Dreiphasiger Hochspannungsmotor mit 18 Polen.

40 Perioden in der Secunde gebaut, aber während der Messung war die Geschwindigkeit etwas höher, indem die Umdrehungszahlen zwischen 876 bei Leerlauf und 850 bei voller Last sich änderten.

1) L'Electricista Bd. 3, Nr. 7, S. 149.

Der Leistungsfactor ($\cos \varphi$) und die Leistung, wahre und scheinbare, die dem Motor zugeführt wurden, sind ebenfalls dargestellt.

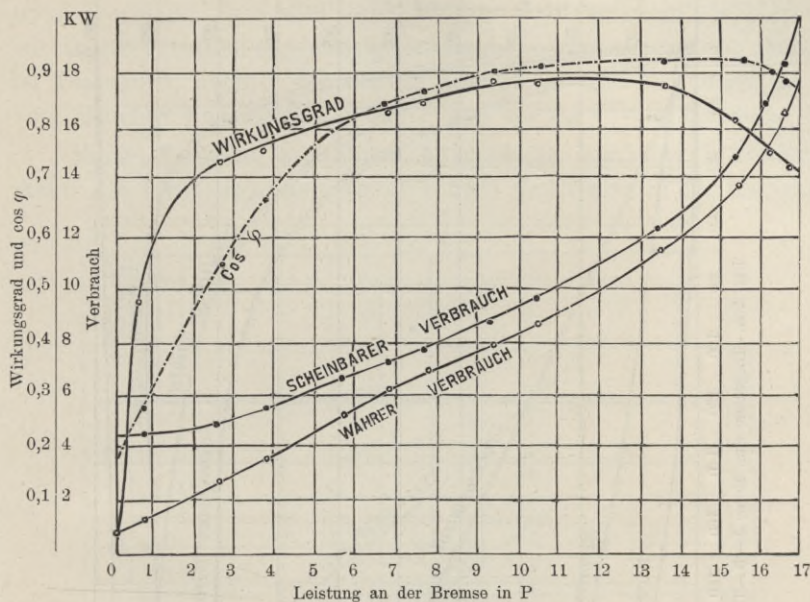


Fig. 254. Asynchroner einphasiger Motor für 6 P.

Dr. Louis Bell macht in dem oben erwähnten Vortrage folgende Angaben über die Gewichte von Inductionsmotoren:

Zahl der Pferdekräfte	Gewicht in kg für 1 P
5	47
10	30
15	31
20	33 (6polig)
100	30 (8polig)

Der 1000pferdige Motor von Brown, Boveri & Co. hatte ein Gewicht von etwa 27 Tonnen, das ist also 27 kg für 1 Pferd. Der 500pferdige Westinghouse Motor hatte ein Gewicht von etwa 19 Tonnen, also 38 kg für 1 P. Diese Gewichte stimmen mit solchen von Gleichstrommotoren recht gut überein.

Fig. 255 zeigt das Ergebniss von Versuchen, die an dem S. 212 beschriebenen Inductionsmotor von 150 P der General Electric Co. angestellt wurden. Der Motor wurde bei diesen Versuchen bis zum

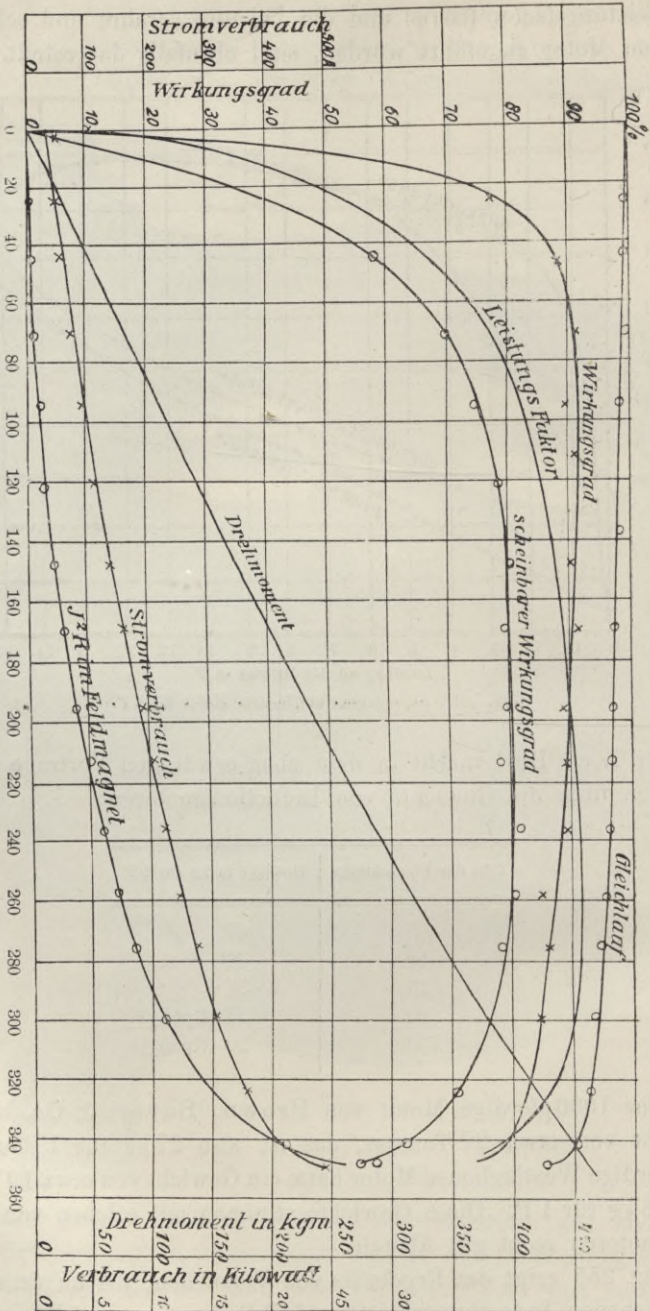


Fig. 255. Diagramm zum Motor J—8—150—600 der General Electric Co.

Doppelten der normalen Belastung beansprucht. Versuchsergebnisse mit kleineren Motoren derselben Firma sind in der Zeitschrift *Electrical World* Bd. 27 S. 429 veröffentlicht. Bemerkenswerth ist hierbei, wie ausserordentlich regelmässig die Geschwindigkeitscurve (die oberste im Diagramm) abfällt, der Schliff beträgt bei 150 P weniger als 3 vom Hundert und steigt bei 300 P nur bis zu 6 vom Hundert.

Einige Versuche mit einem 40 pferdigen normalen Inductionsmotor der Westinghouse Gesellschaft findet man in der *Electrical*

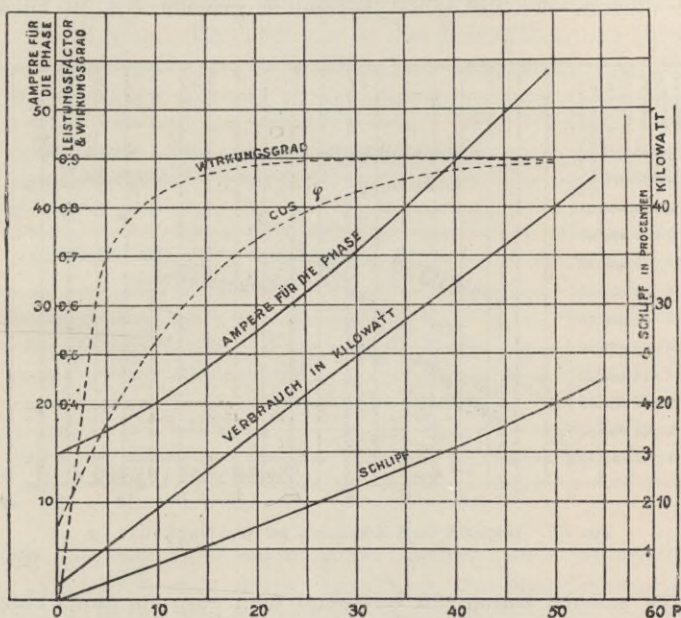


Fig. 256. Diagramm eines Drehstrommotors der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

World Bd. 26 S.16. Das Drehmoment beim Anlassen konnte gleich dem $1\frac{1}{2}$ fachen des Drehmoments bei voller Belastung gemacht werden, ohne dass die Stromstärke mehr als das $1\frac{1}{2}$ fache derjenigen bei voller Belastung betrug. Die Verminderung der Geschwindigkeit vom Leerlauf bis zur vollen Belastung betrug nur 2,4 vom Hundert. Der Wirkungsgrad betrug zwischen $\frac{3}{4}$ bis $1\frac{1}{4}$ der normalen Belastung durchweg 88 vom Hundert oder noch etwas darüber; bei $\frac{1}{4}$ der normalen Belastung betrug er noch 73 vom Hundert. Es folgt hieraus, dass der durchschnittliche Wirkungsgrad dieser Motoren im gewöhnlichen Betriebe wesentlich grösser ist als bei gleich grossen Gleichstrommotoren.

Fig. 256 zeigt die Prüfungsergebnisse eines 10 poligen Motors der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, von 50 P, 500 Volt Betriebsspannung, und einer Dreiphasenwicklung in Netzschaltung. Es ist dies ein Motor von normaler Bauart, mit einem Schliff von 4 vom Hundert und einem Wirkungsgrad von über 88 vom Hundert bei voller Belastung. Der Leistungsfactor war am grössten bei voller Belastung.

Zum Vergleich mögen die in Fig. 257 gegebenen Prüfungsergebnisse eines 10 pferdigen Kranmotors¹⁾ der Westinghouse Gesellschaft dienen, der für einen besonders grossen Schliff entworfen

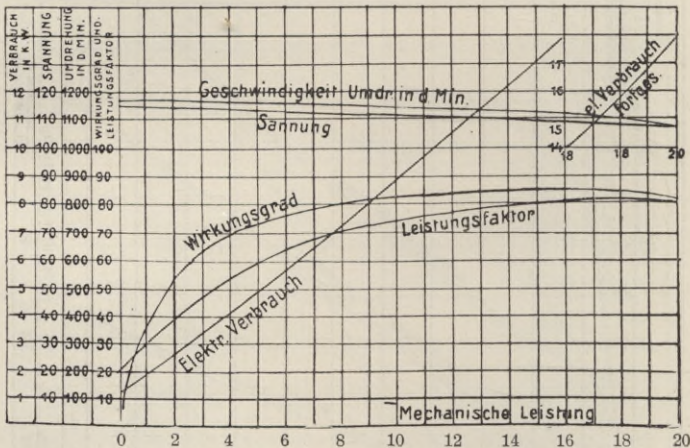


Fig. 257. Diagramm eines Kranmotors der Westinghouse Co.

war. Bei solchen Maschinen verzichtet man gern auf einen besonders hohen Wirkungsgrad zu Gunsten einer grossen Anzugskraft. Das maximale Drehmoment beim Anlaufen betrug hier 26 kgm oder nahezu das Dreifache des 9,6 kgm betragenden Moments bei voller Belastung. Der Wirkungsgrad betrug 77 vom Hundert bei halber Belastung und 81 vom Hundert bei voller Belastung.

Vorstehendes dürfte genügen, um die ausserordentlich werthvollen Eigenschaften der Inductionsmotoren darzulegen, ihren hohen Wirkungsgrad und ihr ausgezeichnetes Vermögen, bei allen Belastungen eine nahezu gleichmässige Umdrehungsgeschwindigkeit zu behalten.

1) Vgl. auch Electrical Review Bd. 42 S. 489, April 1898, wegen einiger Versuche mit Kranmotoren, von T. Hawkins.

Änderung der Geschwindigkeit.

Die grosse Gleichmässigkeit der Umdrehungszahl der Inductionsmotoren wird in einzelnen Fällen auch als Uebelstand empfunden, denn wenn sie nicht besonders dazu entworfen sind, können sie nicht mit halber oder auch nur mit $\frac{2}{3}$ der normalen Geschwindigkeit umlaufen. Dies spielt besonders eine Rolle bei ihrer Verwendung im Eisenbahnbetrieb, wovon im Kap. XVIII noch weiter die Rede sein wird. Das Einschalten von Widerstand in den Läuferkreis vermehrt allerdings den Schlipf, und bei einer gegebenen Belastung wird dasselbe auch erreicht, wenn die Spannung an den Primärklemmen durch Einschalten entweder von Widerständen oder von Drosselspulen zwischen die Hauptleitungen und die Ständerwicklung herabgesetzt wird.

Zahl der Pole	Umdrehungen in der Minute	Drehmoment in kgm	Wirkungsgrad in Procenten	Leistung in P	Ständer- strom
2	1700	0	—	—	9
2	2650	0,8	77	3	13
2	0	1,4	—	—	70
4	1350	0	—	—	9
4	1320	1,59	75	3	13
4	0	2,19	—	—	60
8	675	0	—	—	9
8	640	2,96	70	2,4	13
8	0	9,67	—	—	35

Eine für viele Fälle ausreichende Methode der Veränderung der Geschwindigkeit besteht darin, dass man die Ständerwicklung in der Weise ausführt, dass mit Hilfe eines Schalters die Polzahl verändert werden kann. Wird die Polzahl verdoppelt, so wird die synchrone Geschwindigkeit auf die Hälfte vermindert; bei einer bestimmten Belastung kann hierbei der Schlipf derselbe bleiben wie vorher. Behn-Eschenburg hat derartige an einem 3pferdigen Drehstrommotor von Oerlikon vorgenommene Versuche veröffentlicht.¹⁾ Die Ständerwicklung war derartig in 12 Spulen angeordnet, dass der Motor sowohl als 8polige, wie als 4- und 2polige Maschine geschaltet werden konnte. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in der vorstehenden Tabelle zusammengestellt.

1) Elektrotechnische Zeitschrift, Januar 1876, S. 12; vgl. auch Heldt, American Electrician, Juni 1896 und September 1896.

Eine bessere Methode der Geschwindigkeitsveränderung liefert die später im Kapitel XVIII beschriebene Schaltung zweier Motoren in Tandem.

Versuche an einphasigen Inductionsmotoren.

Inductionsmotoren, welche in der im nächsten Kapitel behandelten Weise gebaut und so gewickelt sind, dass sie nur mit Einphasenstrom gespeist werden, haben eine grosse Vollkommenheit erreicht. Gute Motoren dieser Art werden beim Anlaufen für ein Drehmoment gleich dem der vollen Belastung nur etwa 50 vom Hundert (oder weniger) des Vollaft-Stromes gebrauchen, ihr Wirkungsgrad ist sehr hoch. In Fig. 258 sind die Ergebnisse von Ver-

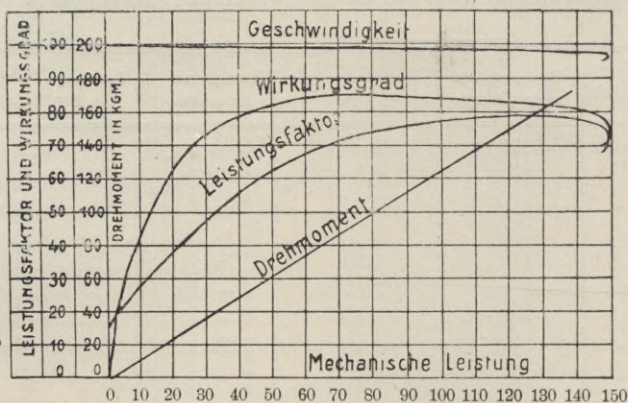


Fig. 258. Diagramm eines Einphasen-Inductionsmotors.

suchen dargestellt, welche Berg mit einem Einphasenmotor Muster J—12—100—600—2000 der General Electric Co. ausgeführt hat. Die Bezeichnung will sagen, dass der Motor 12 Pole hat und 100 Pferd bei 600 Umdrehungen in der Minute und 2000 Volt Spannung leistet. Die Curven zeigen, wie gleichmässig die Geschwindigkeit bei allen Belastungsänderungen blieb. Der Wirkungsgrad blieb über 80 vom Hundert zwischen halber Belastung und einer Ueberlastung von nahezu 50 vom Hundert.

Kleine Einphasenmotoren haben einen etwas geringeren Wirkungsgrad.

In Fig. 259 sind die Ergebnisse von Versuchen an einem 2pferdigen Motor dargestellt, der von Kolben & Co. gebaut ist. Er macht 1500 Umdrehungen in der Minute bei 110 Volt Spannung und 50 Perioden in der Secunde.

Professor E. Wilson hat eine interessante Untersuchung über die Vertheilung des Magnetismus und die Ankerreaction beim Anlaufen eines 15 pferdigen Einphasenmotors von Siemens Bros, London angestellt. Es wurden hierbei Drähte ausgespannt im Luftzwischenraum parallel zur Achse, so dass die Poloberfläche in Abtheilungen zerlegt wurde. Durch Beobachtung der in diesen Drähten inducirten Spannung wurde die eingeschlossene Kraftlinienmenge

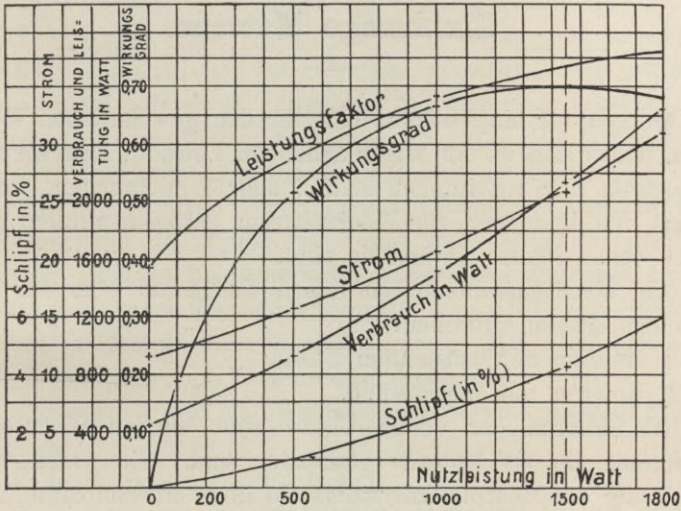


Fig. 259. Diagramm eines Einphasenmotors.

berechnet, und so das berechnete mit dem beobachteten Drehmoment verglichen. Wegen der sehr belehrenden Zusammenstellung der Ergebnisse und der daraus gezogenen Schlüsse wird auf den Bericht¹⁾ verwiesen. Curven über das Verhalten von Einphasenmotoren sind auch von Steinmetz und von Eborall veröffentlicht worden.²⁾

1) Proc. Inst. Electr. Eng. Bd. 28 S. 321, 1899; Electrician Bd. 42 S. 801, 824, 861.

2) Steinmetz, Amer. Inst. Electr. Eng. Bd. 15 S. 35; Eborall, Electr. Review Bd. 42 S. 432, 500, 1898.

Kapitel XIII.

Einphasige Motoren.

Motoren für einphasigen, d. i. für den gewöhnlichen Wechselstrom, haben den in die Augen fallenden Vortheil, dass sie für den Speisestrom nur 2 Leitungen statt 3 oder 4 gebrauchen, und dass sie aus den Leitungen für Wechselstrom gespeist werden können, die in vielen Städten vorhanden sind.

Alle Wechselstrommotoren lassen sich unter eine der beiden folgenden Classen einreihen:

1. Motoren mit constantem Felde,
2. Motoren mit Wechselfeld.

Die Motoren der ersten Classe sind einfach Wechselstrommaschinen, die als Motoren geschaltet sind. Sie waren vor der Einführung des Mehrphasensystems die allein anwendbaren Motoren. Sie haben die Eigenschaft des synchronen Ganges, aber sie laufen nicht ohne Weiteres an, sondern müssen durch irgend welche Hilfsmittel in Gang gesetzt und ungefähr auf Synchronismus gebracht werden, ehe sie an das stromliefernde Netz angeschlossen werden, und laufen unter keinen Umständen unter Belastung an. Dies sind sehr schwerwiegende Nachtheile, so sehr, dass solche Einphasenmotoren nur in isolirten Kraftanlagen benutzt werden, wo die Motoreinheiten so gross und so gering an Zahl sind, dass die eben erwähnten Uebelstände weniger in's Gewicht fallen. Es sind mehrere Methoden zur Anwendung gelangt um derartige synchrone Einphasenmotoren zum Anlaufen zu bringen. Der Motor und der Generator werden zusammen angelassen und der Erstere von Hand in Bewegung gesetzt, wobei seine Feldmagnete während des Anlassens von einigen Accumulatoren erregt werden, die später von der Erregermaschine wieder aufgeladen werden. Oder man benutzt die Accumulatoren zum Antrieb der Erregermaschine, die, ihrerseits mit dem Wechselstrommotor unmittelbar gekuppelt, ihn als Gleichstrommotor antreibt

und auf normale Geschwindigkeit bringt. Man kann auch einen jener gleich zu beschreibenden kleinen, selbst anlaufenden Wechselstrommotoren zum Anlassen benutzen.

Solche selbst anlaufende Motoren sind z. B. von Ferranti & Co. für ihre Gleichrichter und von der Fort Wayne Co. gebaut. Ueber diese beiden Maschinenformen sind in des Verfassers Werk: „Die Dynamoelektrischen Maschinen. 6. Aufl. Halle a. S. W. Knapp“ einige Angaben enthalten. Der Motor der Fort Wayne Co. kann unter voller Belastung anlaufen und verträgt auch eine ziemlich hohe Ueberlastung. Der Anker dieser Maschine ist sowohl mit Commutator als auch mit Schleifringen versehen. Der geblätterte Feldmagnet ist mit zwei getrennten Wicklungen versehen, von denen eine aus nur wenigen Windungen besteht. Die Verbindungen sind derart, dass beim Anlaufen die Maschine als Reihenmotor wirkt, indem die aus wenigen Windungen bestehende Wicklung durch die Bürsten und den Commutator mit dem Anker in Reihe geschaltet ist. Hat die Maschine die normale Geschwindigkeit erreicht, so erhält der Anker nur noch durch die Schleifringe Strom aus dem Netz, während die andere Wicklung auf dem Feldmagnet einen Erregerstrom vom Commutator erhält.

Die zweite Gruppe der Wechselstrommotoren umfasst folgende drei Classen:

1. Inductionsmotoren (einphasig),
2. Reihenmotoren mit geblätterten Felgmagneten,
3. Repulsionsmotoren.

Wir wollen diese Arten gesondert betrachten.

Einphasige Inductionsmotoren.¹⁾

Den Einphasenmotoren dieser Gattung gehören wahrscheinlich mehr als drei Viertel aller in Europa im Betriebe befindlichen Motoren an. Derartige Maschinen werden jetzt von allen grösseren

1) Eine Anzahl Bezugnahmen auf Artikel über die Theorie des Inductionsmotors sind auf S. 251/252 angegeben. Die folgenden neueren Artikel beziehen sich noch besonders auf einphasige Motoren.

Arno, Electrician Bd. 40 S. 254.

Wilson, Inst. Electr. Engin. Bd. 28 S. 321 und Electrician Bd. 42 S. 729, 801, 824, 861.

Leblanc, Bull. Soc. Inter. Électriciens Bd. 15 S. 488.

Steinmetz, Amer. Inst. Electr. Eng. Bd. 15 S. 35.

Maffiotti und Pescetto, Eletttricista (Rom) 7, 3 S. 53, 1898.

Field, Electr. Review Bd. 44 S. 271, 439, 492, 579.

Firmen angefertigt, so von der Oerlikon-Gesellschaft, Helios, Brown, Boveri & Co., Ganz & Co., der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Siemens & Halske, Kolben & Co., der Langdon-Davies Motor-Gesellschaft, ebenso auch von der General Electric Co. und der Westinghouse Co. in Amerika.

In ihrer Bauart gleichen diese Motoren sehr den normalen zweiphasigen Inductionsmotoren, da jedoch der Betriebsstrom ein einphasiger Wechselstrom ist, so geht dieser durch eine Wickelung, die geeignet sein muss, eine einfache wechselnde magnetomotorische Kraft hervorzubringen. Wenn der Motor in Bewegung ist, so ist die Gegenwirkung der Läuferströme derart, dass das resultirende Kraftlinienfeld sich dreht und ein Drehmoment erzeugt, welches fast ebenso wirksam ist als das Drehfeld eines Mehrphasenmotors. Wir wollen in diesem Kapitel diese Verhältnisse genauer behandeln und darlegen, in welcher Beziehung diese Motoren von den Mehrphasenmotoren abweichen.

Zunächst ist festzuhalten, dass bei Einphasenmotoren das Drehfeld und das Drehmoment erst dann entsteht, wenn der Motor in Bewegung gesetzt ist, so dass besondere Vorkehrungen für das Anlassen getroffen werden müssen. Die gebräuchlichste Methode zum Anlassen besteht darin, dass man einer Hilfwickelung des Motors einen Strom zuführt, dessen Phase von der des Speisestromes der Hauptwickelung abweicht. Der Phasenunterschied wird durch eine der verschiedenen Anordnungen zur Phasentheilung hervorgebracht, welche am Schlusse des Kapitels behandelt werden.

Die Untersuchung dieser Motoren wird sehr vereinfacht durch eine von dem verstorbenen Professor Galileo Ferraris¹⁾ herrührenden Methode. Er betrachtet das durch den Ständerstrom erzeugte einfache Wechselfeld als sei es in zwei in entgegengesetzten Richtungen umlaufende magnetische Felder zerlegt worden.

Wenn wir durch den Vector b_1 (Fig. 260), der sich in der Richtung des Uhrzeigers gleichmässig um O dreht, Grösse und Richtung eines magnetischen Drehfeldes bezeichnen, und durch b_2 Grösse und Richtung eines anderen Feldes von der gleichen Geschwindigkeit ω , das sich in der entgegengesetzten Richtung dreht, so erkennt man, dass die Richtung des resultirenden Feldes stets in die Linie B

1) Ferraris, A Method for the Treatment of Rotating or Alternating Vectors. with an Application to Alternate-current Motors. The Electrician Bd. 33 S. 110. 129, 152, 184. 1894, übersetzt aus Mem. Reale Acad. d. Sci. Torino, serie II. Bd. 44, 3. Dec. 1893.

hineinfällt und dass seine Grösse zwischen den Grenzen $+2b$ und $-2b$ nach einer Sinusfunction der Zeit schwingt, so dass wir schreiben können $\mathfrak{B} = 2b \sin 2\pi n t$.

Umgekehrt, wenn wir ein Wechselfeld haben, das der Formel $\mathfrak{B}_0 = 2b \sin 2\pi n t$ folgt, wie bei einem einphasigen Motor, so können wir es auflösen in zwei entgegengesetzt laufende Drehfelder derselben Drehungsgeschwindigkeit n , und können die Wirkung jedes Feldes auf den Läufer besonders betrachten.

Wenn der Läufer sich in der Richtung des Uhrzeigers mit der Geschwindigkeit m dreht, so ist die Drehungsgeschwindigkeit des mit dem Uhrzeiger laufenden Feldes mit Bezug auf den Läufer gleich $n - m$, die Geschwindigkeit des entgegengesetzt laufenden Feldes gleich $n + m$.

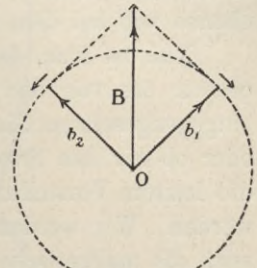


Fig. 260.

In der Theorie von Ferraris wird die Wirkung der beiden inducirten Felder auf das Drehmoment unter Berücksichtigung der Selbstinduction und des Widerstandes der Läuferleiter untersucht. Da wir aber nunmehr über eine so einfache Construction, wie die von Heyland in Fig. 228 S. 235 verfügen, aus der wir genau die Werthe des Läuferstromes und das Drehmoment ermitteln können, wenn wir gewisse einfache Constanten des Motors kennen, ist es am besten, diese Construction unmittelbar auch auf den einphasigen Motor anzuwenden.

Wir betrachten zunächst einen zweipoligen Motor, dessen Ständerstrom einer einfachen Sinusfunction der Zeit folgt, und wollen noch voraussetzen, dass die Wickelung so auf dem Motor vertheilt ist, dass die Kraftliniendichte im Luftzwischenraume ebenfalls nach einer Sinusfunction um den Umfang herum vertheilt ist. Diese Voraussetzungen werden bei den im Handel käuflichen Maschinen nicht immer erfüllt sein, wir werden daher später noch zeigen, wie irgend eine Form des Feldes oder Vertheilung des Magnetismus in Rechnung gezogen werden kann. Wir betrachten am besten zunächst den einfacheren Fall.

Es wird angenommen, dass der Motor mit voller Belastung läuft. Wir haben nun zu zeigen, warum er sich dreht, wie die Ströme und Magnetfelder vertheilt sind und wie das Drehmoment berechnet werden kann. Das erste Diagramm, das wir entwerfen, dient dem Zwecke, die Vorgänge klarzustellen, die im Motor vor

sich gehen. Wir müssen hierbei voraussetzen, dass der Werth des Ständerstromes, die im Kapitel VIII angegebenen Constanten und die Grösse des Schlipfes gegeben sind. Damit die im Kapitel VIII entworfenen Diagramme hier anwendbar sind, wählen wir $U = 12,3$ und den Schlipf bei voller Belastung gleich 2,5 vom Hundert. Die Läuferwiderstände und die magnetischen Verhältnisse wählen wir ebenso wie bei dem dort berechneten Motor.

Nun ist klar, dass es theoretisch keinen Unterschied ausmacht, ob wir das von den Ständerströmen erzeugte Feld als in zwei in entgegengesetztem Sinne sich drehende Componenten zerlegt denken, oder ob wir den Strom selbst als so getheilt ansehen. Wir wählen die letztere Vorstellung aus Gründen, die wir gleich kennen lernen werden. Wir werden sehen, dass das Stromdiagramm gleichzeitig auch als magnetisches Diagramm verwendbar ist, indem man es um einen rechten Winkel dreht und den Maassstab ändert.

Es stelle in Fig. 261 die senkrechte Linie den Ständerstrom dar, einen einfachen Wechselstrom, der stets durch dieselben Spulen des Ständers geht, so dass sein Magnetfeld an derselben Stelle bleibt. Wir wollen ein von einem solchen Strom hervorgebrachtes Magnetfeld ein einfaches Wechselfeld nennen, zum Unterschied von einem Drehfeld, das seine Richtung stetig ändert. Wenn der Ständerstrom sein positives Maximum erreicht hat, möge dies durch die senkrechte Linie 5 1 dargestellt werden; in dem Maasse, wie er harmonisch bis auf Null sinkt, wird er in aufeinander folgenden Zeitpunkten von den Punkten 2, 3, 4 und 5 in derselben Senkrechten begrenzt. Steigt dann der Strom zu seinem negativen Maximum, werden die aufeinander folgenden Werthe durch die Punkte 6, 7, 8 und 9 bestimmt. Die ganze Periode eines vollständigen Wechsels ist hier zum Zwecke der Darstellung im Diagramm in 16 Theile getheilt. Einen solchen einfachen Wechselstrom wollen wir nun als aus zwei Strömen vom halben Maximalwerth entstanden denken, die sich in entgegengesetzter Richtung drehen. Die Linien 5 P und 5 p seien zwei Vektoren jeder gleich der Hälfte der Linie 5 1. Der Vector 5 P drehe sich im Sinne des Uhrzeigers, der Vector 5 p entgegengesetzt. Sie sind dargestellt als im Zeitpunkt 2 befindlich, wo ihre Resultirende 5 2 ist. Jeder dieser beiden sich drehenden Ströme wird auf den Läufer genau so wirken, wie der Drehstrom eines dreiphasigen Motors, so dass die im Kapitel VIII gegebenen Diagramme ohne Weiteres anwendbar sind. Wir müssen nur erwägen, wie der Maassstab der Diagramme zu bestimmen ist. Wir

wollen voraussetzen, dass sich der Läufer mit einer Frequenz n_2 im Sinne des Uhrzeigers dreht und dass er nur um 2,5 vom Hundert sich langsamer dreht als der Vector $5P$, dessen Frequenz n_1 ist.

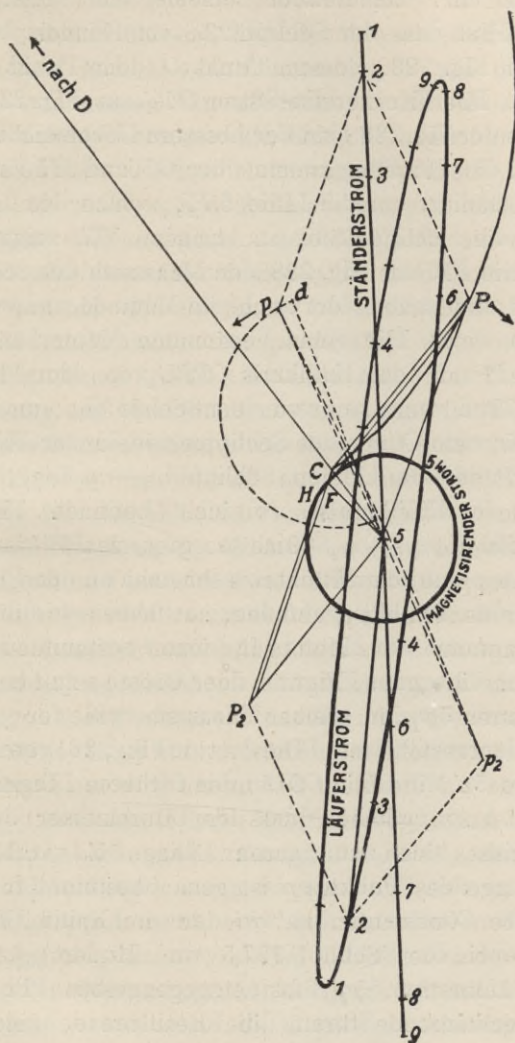


Fig. 261.

Die Frequenz des Vectors $5p$ gegenüber der des Läufers wird $n_1 + n_2$, also 197,5 vom Hundert sein.

Wir können nun ein Diagramm gleich dem der Figur 228 oder Fig. 229 für jeden der beiden Vektoren zeichnen gerade so, als wenn

jeder Vector den Ständerstrom eines mehrphasigen Motors bildete, dessen Schlipf in dem einen Falle gleich $n_1 - n_2$, im andern $n_1 + n_2$ ist. Es ist dabei zu beachten, dass nach der Voraussetzung in diesen beiden Diagrammen der Ständerstrom derselbe sein muss. Das Diagramm für den Fall, dass der Schlipf 2,5 vom Hundert beträgt, ist dasselbe wie in Fig. 228, dessen Punkt O dem Punkt 5 der Fig. 261 entspricht. Der Kernverlust-Strom OC_H aus Fig. 229 und einige andere Linien der Fig. 228 sind der besseren Uebersichtlichkeit halber weggelassen, die Parallelogramme über $C5$ und $H5$ sind wie in Fig. 228 vervollständigt, um die Linie $5P_2$, welche den Läuferstrom darstellt, an die richtige Stelle zu bringen. Wir zeigten auf S. 239, dass die Linie PB der Fig. 228 den Maassstab des Schlipfes des Motors darstellt und gaben dort auch die Methode an, wie der Maassstab gefunden wird. Für einen bestimmten Motor hängt die Lage des Punktes P auf dem Halbkreis CPD , von dem Fig. 261 nur einen kleinen Theil zeigt, nur von dem Schlipf ab; um ihn zu finden, zeichnen wir eine Curve des Schlipfes wie in der Fig. 229. Für den Strom $5P$ und den kleinen Schlipf $n_1 - n_2$ liegt P sehr nahe an dem Ende des Halbkreises, wo sich C befindet. Für den Strom $5p$, dessen Schlipf $n_1 + n_2$ 80mal so gross wie PB ist, rückt die Lage des Punktes p auf dem Halbkreis sehr nahe an den Punkt D heran. Haben wir den Punkt p gefunden, so haben wir die wirkliche Form des Diagramms des Motors für jenen bestimmten Schlipf und es ist dann nur die ganze Figur in der Grösse so zu bemessen, dass der Ständerstrom $5p$ im selben Maassstab wie der gleiche Ständerstrom $5P$ dargestellt ist. Dies ist in Fig. 261 geschehen, in welcher die Linie $5d$ die Linie OD in den früheren Diagrammen darstellt, und sie ist so getheilt, dass der Durchmesser des gestrichelten Halbkreises sich zur ganzen Länge $5d$ verhält wie $U:U+1$. Die Lage des Punktes p ist genau bestimmt für einen Motor, der dieselben Constanten hat wie der im Kapitel VIII betrachtete Motor, wobei der Schlipf 197,5 vom Hundert ist. Man sieht, dass der Läuferstrom $5p_2$ fast entgegengesetzte Phase hat wie $5p$; der magnetisirende Strom, die Resultirende beider, ist ausserordentlich klein.

Wenn wir $5P_2$ und $5p_2$ für den dem Punkte 2 entsprechenden Zeitpunkt zusammensetzen, wie in der Figur dargestellt ist, so erhalten wir in der Resultirenden 52 einen Radiusvector der gezeichneten langen Ellipse. Dieser Radiusvector der Punkte 1, 2 3 oder 4 gibt in jedem dieser Zeitpunkte die Grösse und Lage des Läufer-

stromes an. Die Ellipse ist dadurch entworfen, dass die Vektoren $5 P_2$ und $5 p_2$ in 16 aufeinanderfolgenden Lagen zusammengesetzt sind, während diese Vektoren eine Umdrehung in entgegengesetzten Richtungen machen.

Wir sehen hieraus, dass die Stromvertheilung im Läufer eines einphasigen Motors sehr verschieden ist von der im Läufer eines Mehrphasenmotors. Wir sahen auf S. 209, dass sich der Strom in einem Mehrphasenläufer mit einem Bande vergleichen lässt, dessen Maximum fast constant bleibt, und welches gleichmässig umläuft, so dass es durch einen Radiusvector von gleichbleibender Länge dargestellt werden kann. Im Einphasenläufer ändert sich der Radiusvector in weiten Grenzen, so dass er also einen Strom darstellt, der fast den Charakter eines einfachen Wechselstromes hat mit nur einer kleinen Componente im Sinne einer Drehung. Die Richtung dieses Stromes ist ungeachtet der Bewegung des Motors mit Bezug auf den Ständer eine bestimmte und fällt nahezu mit der Schwingungsrichtung des Ständerstromes zusammen. So sehen wir, dass der Ständerstrom sowohl bei mehrphasigen wie bei einphasigen Motoren mehr oder weniger vollkommen im Läufer wieder erscheint. Könnten die Widerstände des magnetischen Kreises und der Läuferleiter mehr und mehr vermindert werden, so würde auch die Wiedergabe mehr und mehr vollkommen werden, bis schliesslich die die Läuferströme darstellenden Radienvectoren genau gleich denen des Ständerstromes sein würden, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Thatsache, dass der Kraftlinienweg stets einen gewissen Widerstand bietet, ist Veranlassung, dass auch ein bestimmter Magnetisierungsstrom vorhanden ist, der die Kraftlinien erzeugt, die die gegenelektromotorische Kraft hervorbringen. Wesentlich ist dieser Magnetisierungsstrom die Veranlassung, dass das Bild des Ständerstromes im Läufer verzerrt und an Stärke vermindert ist. Der Magnetisierungsstrom ist in dem im Sinne des Uhrzeigers sich drehenden Diagramm durch den Vector $5 F$ dargestellt, der die Resultirende der Ständer- und Läuferströme $5 P$ und $5 P_2$ ist, entsprechend der Untersuchung über die Wirkungen der Streuung (vgl. S. 232). Die Linie $5 P$ stellt auch nach dem Maassstab des Feldes die Grösse des im Sinne des Uhrzeigers sich drehenden Feldes dar, dessen Richtung im rechten Winkel zu dieser Linie liegt, also fast parallel zu $5 P_2$. Der im entgegengesetzten Sinne umlaufende Magnetisierungsstrom ist sehr klein; er wird durch die Resultirende von $5 p$ und $5 p_2$ dargestellt. Er bringt auch nur ein sehr geringes Feld hervor,

das nur gerade genügt, den Strom $5 p_2$ in den Läuferleitern zu erzeugen, während es mit der grossen Geschwindigkeit $n_1 + n_2$ sich dreht. Demnach wird der resultirende Magnetisierungsstrom durch den Radiusvector der kleinen Ellipse im Mittelpunkt der Figur dargestellt, welche nur sehr wenig von dem durch den Punkt F gehenden Kreise abweicht.

Das resultirende Feld ist demzufolge fast ein einfaches Drehfeld und wird durch den Radiusvector dargestellt, welcher eine Ellipse von sehr geringer Excentricität beschreibt, deren grosse Achse im rechten Winkel zur grossen Achse der Ellipse des Magnetisierungsstromes steht.

So kommt es, dass der einfache Wechselstrom des Ständers combinirt mit den Strömen des sich drehenden Läufers nahezu ein einfaches Drehfeld erzeugt. Das wirkliche Vorhandensein dieses Feldes wird durch die Thatsache bewiesen, dass in Wickelungen, die auf dem Ständer in solchen Lagen aufgebracht werden, die von den Lagen der Hauptspulen des Ständers abweichen, eine elektromotorische Kraft erzeugt wird, die in der Phase von der Speisungsspannung abweicht, und dass die auf einen Läufer entfallende Spannung sehr wenig sich unterscheidet von der Spannung jedes Leiters der Hauptspule. Diese Verhältnisse werden noch später im Anfange des Kapitels XIV weiter behandelt.

Man sieht, dass dies Drehfeld, welches mit dem Strom $5 P_2$, mit dem es nahezu in Phase bleibt, zusammenwirkt, ein sehr beträchtliches Drehmoment erzeugen wird, das auf dem S. 218 und 245 dargelegten Wege ermittelt werden kann. Der Strom $5 p_2$ wirkt ebenfalls auf das Feld zurück und erzeugt ein Drehmoment, welches in seiner Richtung wechselt, je nachdem der Strom mit dem Felde in oder ausser Phase ist. Seine Wirkung während einer Umdrehung ist nahezu gleich Null, es bleibt nur ein kleines Drehmoment nach rückwärts übrig, das von der sehr geringen nach rückwärts sich drehenden Componente herrührt. Seine Grösse kann in genau derselben Weise berechnet werden. Das wirklich in Erscheinung tretende Drehmoment ist die Resultirende der einzelnen Momente, und ist daher nicht gleichförmig wie bei Mehrphasenmotoren, sondern pulsirend, wie das von einer einfach wirkenden Dampfmaschine. Die Pulsationen sind aber so häufig und folgen so rasch auf einander, dass sie praktisch nicht bemerkbar sind.

Fig. 261 kann noch weiter ausgedehnt werden, indem man noch Linien hinzufügt, welche elektromotorische Kräfte darstellen, wie

OE_1 in Fig. 228, um die Phasenverhältnisse und Werthe der gegen-
elektromotorischen Kräfte, die von der Drehung des Feldes her-
rühren, zu erhalten.

Es ist zu beachten, dass das Diagramm die Vertheilung und
Phasenverhältnisse der Ströme und der Kraftlinienzüge nur bei
einer bestimmten Belastung darstellt. Ändert sich die Belastung,
so ändert sich auch der Betrag des Schliffes, und mit ihm ändern
sich die Ströme von Läufer und Ständer. Die Art und Weise, in
welcher sich das Drehmoment mit dem Schlipf ändert, wird am
besten dadurch erläutert, dass wir ein Diagramm der Drehmomente,
wie das der Fig. 222, für das vorwärts rotirende Feld und ein
zweites für das rückwärts rotirende Feld aufzeichnen, indem wir
hierbei die Construction der Fig. 230 benutzen. Werden die beiden
Diagramme übereinandergelegt und das nach rückwärts wirkende

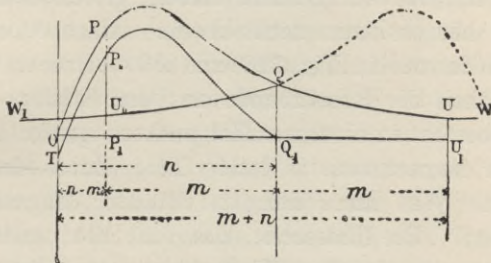


Fig. 262.

Drehmoment von dem nach vorwärts wirkenden abgezogen, so
erhalten wir eine Zeichnung, wie die in Fig. 262 dargestellte;
hierin stellen die Ordinaten der Curve $OPQW$ das Drehmoment
für die verschiedenen Werthe des vom vorwärts rotirenden Felde
herrührenden Schliffes dar, wenn die synchrone Geschwindigkeit n ,
und die Umdrehungszahl des Läufers m ist. Die Ordinaten der
Curve W_1QW stellen das vom rückwärts rotirenden Felde her-
rührende Drehmoment dar. Ziehen wir diese Ordinaten von denen
der ersten Curve ab, so erhalten wir in TP_1Q_1 die Curve des
wirklichen Drehmomentes. Diese Curve ist nicht nach dem Maass-
stab aufgezeichnet. Das nach rückwärts gerichtete Drehmoment
fällt bis auf ein Achtel des vorwärts gerichteten Drehmomentes bei
voller Belastung ab. Man sieht, dass das resultierende Drehmoment
gleich Null wird bei einer Geschwindigkeit, die ein wenig kleiner
als die synchrone ist; aber hierbei ist der Schlipf ein solch
kleiner Bruchtheil eines Procentes, dass dies praktisch kaum einen

Unterschied zwischen dem einphasigen und dem mehrphasigen Motor erkennen lässt. Aus der Fig. 261 sieht man, dass die J^2R -Verluste bei einem Einphasenmotor zweimal so gross sind, wie bei einem Mehrphasenmotor derselben Grösse, weil der rückwärts rotirende Strom des Läufers ebenso gross oder grösser ist als der vorwärts rotirende Strom, und ein kleines negatives Drehmoment erzeugt. Der Leistungsfactor ist nicht so hoch als bei einem Mehrphasenmotor und wir werden noch sehen (S. 330), dass wir noch auf mehr Verluste aus dem Umstande zu rechnen haben, dass das Feld nicht nach einer einfachen Sinusfunction vertheilt ist.

Bei der Anwendung der Fig. 228 auf den Einphasenmotor haben wir jedoch auf zwei Punkte zu achten. Erstens wird der Magnetisierungsstrom nicht gleich dem bei einem Mehrphasenmotor sein. Das gesammte rotirende Stromband, das durch $5F$ in Fig. 261 dargestellt wird, ist, wie wir gesehen haben, gleich dem eines Mehrphasenmotors, aber es kann nicht als eine einfache Componente des Ständerstromfeldes wie in Fig. 228 und 230 betrachtet werden. Es ist in Wirklichkeit die Resultirende aus den Ständer- und Läuferströmen und besteht in einzelnen Zeitpunkten nur im Läufer. Trotzdem muss der Magnetismus in letzter Linie durch den Ständer geliefert werden. Was kann denn im Ständer Magnetisierungsstrom genannt werden? Die Thatsache, dass das Feld umläuft, während der Ständerstrom ein einfacher Wechselstrom ist, lehrt uns, dass ein wirklicher Magnetisierungsstrom im Ständer nicht vorhanden sein kann; aber wenn wir den Motor mit synchroner Geschwindigkeit laufen lassen und messen den hierbei verbrauchten Strom, so erhalten wir das, was bisweilen Magnetisierungsstrom genannt wird. Besser ist hierfür die Bezeichnung Leerlaufstrom. Aus der Construction Fig. 261 sehen wir, dass dieser Leerlaufstrom oder Ständerstrom bei synchroner Geschwindigkeit genau zweimal so gross ist wie $5C$; denn wenn $5P$ so klein wird, dass es mit $5C$ übereinstimmt, so gibt es mit einem gleich grossen in entgegengesetzter Richtung umlaufenden Strom $5p$ eine Resultirende im Ständer gleich zweimal $5C$. Versuche haben den Beweis geliefert, dass der Leerlaufstrom eines Einphasenmotors genau doppelt so gross ist, wie der für einen Mehrphasenmotor gleicher Grösse erforderliche Magnetisierungsstrom. Natürlich muss beim Vergleichen beider Motorarten nach dieser Richtung hin die Zahl der Leiter in beiden Ständern, und der Phasenunterschied, wenn mehrere Phasen vereinigt sind, in Rücksicht gezogen werden (vgl. S. 244 und 248).

Zweitens ist zu beachten, dass mit zunehmendem Schlipf der gestrichelte Halbkreis, auf welchem p liegt, immer grösser wird, und dass das nach rückwärts drehende Feld nicht mehr klein und vernachlässigbar ist, sondern so stark wird, dass es das vom Motor gelieferte Drehmoment wesentlich vermindert. In Wirklichkeit tritt der Zeitpunkt des grössten Drehmomentes früher ein, beim Anlaufen ist überhaupt kein Drehmoment vorhanden. In dem Maasse, wie das rückwärts drehende Feld zunimmt, vermindert sich das vorwärts drehende Feld, so dass die elektromotorische Kraft in den Ständerleitern constant bleibt. Der vorwärts drehende Strom beim Anlaufen erreicht nur die Hälfte des Werthes, den er bei einem Mehrphasenmotor erreichen würde. Gleichzeitig ist ein gleich grosser rückwärts drehender Strom vorhanden.

Alle diese einzelnen Thatsachen — der doppelt grosse Leerlaufstrom, der kleinere Leistungsfactor, die kleinere Maximalzugkraft und die kleineren entsprechenden Werthe der Ständer- und Läuferströme — sind in einer sehr einfachen Construction berücksichtigt, die von Heyland herrührt, und, wie durch eine grosse Zahl von Versuchen an ausgeführten Motoren erwiesen ist, sehr genaue Ergebnisse liefert.

Aus einem Diagramm gleich dem der Fig. 261 können wir genau entnehmen, wie die Ströme im Läufer und Ständer bei synchroner Geschwindigkeit vertheilt sind. Zunächst wissen wir, dass der Ständer von einem einfachen Wechselstrom gespeist wird. Wir theilen diesen Strom in zwei gleiche entgegengesetzt sich drehende Theile. Die im Sinne des Uhrzeigers sich drehende Hälfte muss gleich $5C$ sein (Fig. 261), weil im Läufer kein im Sinne des Uhrzeigers sich drehender Strom vorhanden sein kann, wenn dieser synchron läuft; da CP nicht vorhanden ist, fällt der Läuferstrom $5P$ mit $5C$ zusammen, und dies ist der Strom, der nothwendig ist, um das vorwärts sich drehende Feld zu erzeugen. Der in entgegengesetztem Sinne sich drehende Ständerstrom muss dieselbe Stärke haben, aber seine magnetisirende Wirkung wird durch einen Läuferstrom von nahezu gleichem aber entgegengesetzten Werthe aufgehoben, wobei jedoch der Unterschied zwischen beiden genügt, um das schwache Feld zu erzeugen, das bei der Geschwindigkeit $2n_1$ den Läuferstrom erzeugt. Betrachten wir den Zeitpunkt, in welchem der Leerlaufstrom des Ständers seinen Scheitelwerth erreicht, so kann der in diesem Zeitpunkte vorhandene Zustand durch die Fig. 263 dargestellt werden.

Wenn wir nun den gestrichelten Halbkreis über DC_M beschreiben, so stellt dieser den geometrischen Ort für P bei einem Mehrphasenmotor dar, nicht dagegen bei einem Einphasenmotor. Um diesen zu finden, schneiden wir $C_M C_0 = OC_M$ ab, und beschreiben über DC_0 einen Halbkreis. Heyland hat nun durch Versuche an einer sehr grossen Zahl von Motoren nachgewiesen, dass dieser Halbkreis mit hinreichender Genauigkeit für alle praktischen Berechnungen mit dem wirklichen geometrischen Ort für P übereinstimmt. OP ist (im Maassstab der Stromstärke) die Grösse des Ständerstromes und PC_M die des Läuferstromes getheilt durch u_2 und das Umsetzungsverhältniss Z_1/Z_2 (S. 240 und 250). Die beiden entgegengesetzt umlaufenden Ströme finden wir, indem wir P mit C_0 verbinden und parallel hierzu die Linie $C_M R$ ziehen.

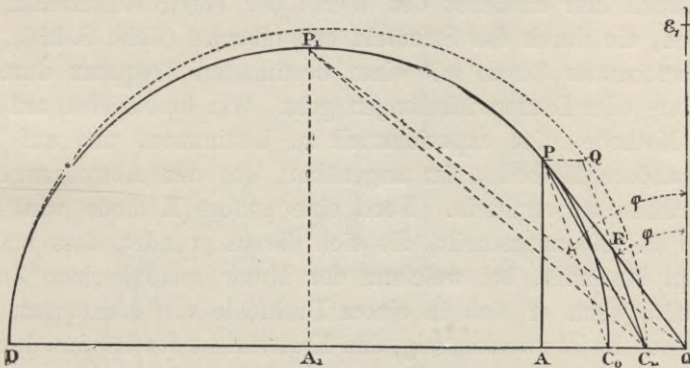


Fig. 264.

PO wird dann in R geschnitten. Für den Zeitpunkt, in welchem der Ständerstrom seinen Höchstwerth erreicht, stellt die Linie $C_M R$ die Phasen des vorwärts umlaufenden Läuferstromes gegenüber $O\mathcal{E}_1$ dar. Addiren wir hierzu OC_M , so erhalten wir in OR den vorwärts umlaufenden Ständerstrom. Für den Zeitpunkt, in welchem der Ständerstrom seinen Scheitelwerth erreicht, ist der sich rückwärts drehende Ständerstrom in gleicher Phase mit ihm und wird daher durch RP dargestellt. Man sieht, dass φ , der Winkel, um welchen der Strom hinter der elektromotorischen Kraft $O\mathcal{E}_1$ zurückbleibt, bei einem Einphasenmotor grösser ist als bei einem Mehrphasenmotor. Dies hat auch die Praxis erwiesen. Die Linie PA stellt die Zugkraft des Motors dar, jedoch in einem Maassstab, der von dem für die Zugkraft eines Mehrphasenmotors abweicht. Am leichtesten lässt sich dieser Maassstab ermitteln,

indem man die dem Motor bei einer bestimmten Stellung von P zugeführte Energie bestimmt, hiervon die J^2R -Verluste abzieht und die verbleibende Energie durch die Winkelgeschwindigkeit dividirt. Das Resultat ist die Zugkraft, welche der bestimmten Linie AP entspricht.

Eine andere Construction, um die Phasenbeziehungen und die Werthe der Ströme und elektromotorischen Kräfte bei einem Einphasenmotor zu erhalten, hat Field angegeben. Wir geben diese wieder mit einer Erläuterung und einer kleinen Abänderung der Entwicklung, die unserer Betrachtung besser angepasst ist. Es wird jedoch dem Leser gerathen, die ganz ausgezeichnete Abhandlung durchzulesen, auf welche unten verwiesen ist.¹⁾

Wie in allen diese Motoren betreffenden Constructions, muss man auch hier zunächst den Werth der elektromotorischen Kraft kennen, die durch das Streufeld erzeugt wird (siehe S. 230), wenn ein bestimmter Strom mit einer bestimmten Frequenz durch die Ständer- oder Läuferwickelungen geht. Wir beschrieben auf S. 233 eine Methode, dies experimentell zu bestimmen, und auf S. 217 eine andere Methode, ihn angenähert aus den Abmessungen der Eisentheile zu ermitteln. Noch eine andere Methode wird weiter unten (S. 329) mitgetheilt, die sich darauf gründet, dass man den Schlupf bestimmt, bei welchem der Motor seine höchste Zugkraft erreicht, wenn er sich in einem Drehfelde von constantem Werth befindet. Es ist zweckmässig, den Kraftverlust des Läufers durch die Spannung auszudrücken, die in einer Phase des Läufers von dem Streufelde erzeugt wird, das durch 1 Ampere für jede Phase hervorgebracht wird, und dessen Frequenz 1 Periode in der Secunde beträgt. Wir bezeichnen diesen Werth mit V_L . Dann ist die Spannung zwischen den Enden eines Zweiges der Wickelung, wenn ein Strom J_2 mit einer Frequenz von s Perioden in der Secunde hindurchgeht $= J_2 s V_L$. Die Phase der elektromotorischen Kraft, welche diese Reactanz überwindet, ist immer um 90° dem Strom voraus.

Fields Construction beruht auf folgender Thatsache: wenn wir eine die Frequenz n_1 darstellende horizontale Linie ziehen (siehe Fig. 265) — sagen wir, in dem Maassstabe von 1 cm für 1 Periode/Secunde — und dann im Endpunkte von n_1 ein Loth $N_1 O$ errichten, dessen Länge in demselben Maassstabe $= \frac{R}{V_L}$ ist — wobei

1) Field, On Oscillatory and Rotatory Magnetic Fields and the Theory of the Single-Phase Motor, Elec. Rev. Bd. 44 S. 194, 271, 439, 492, 579 (1899).

R den Widerstand eines Zweiges des Läuferstromkreises bezeichnet —, so wird der Winkel, um welchen der Läuferstrom hinter dem rotirenden

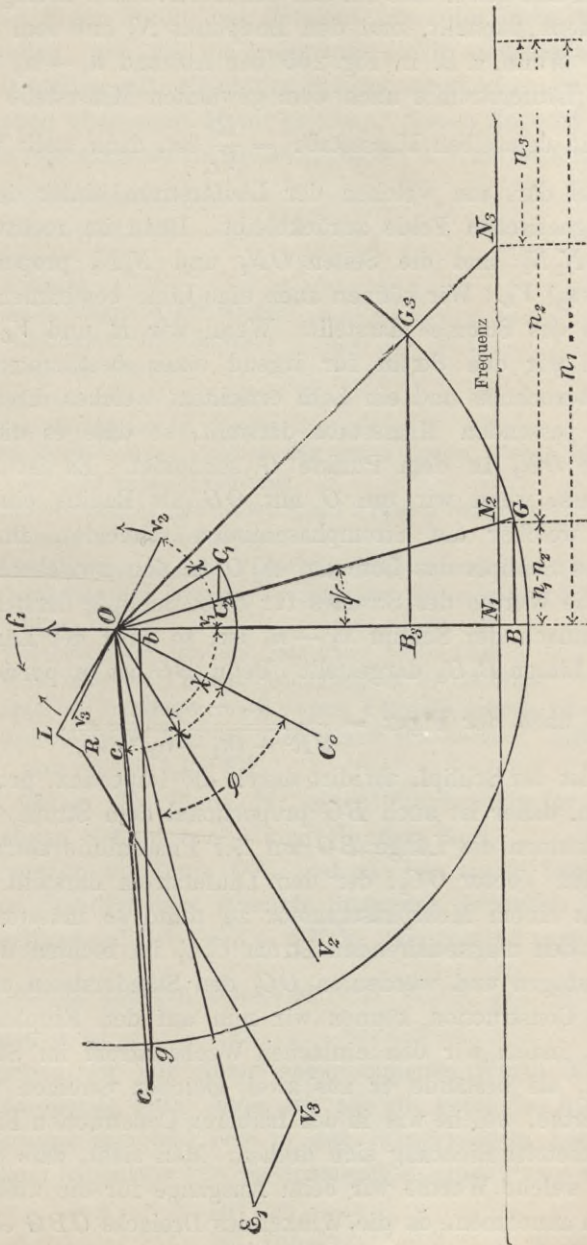


Fig. 265.

magnetischen Felde zurückbleibt, ohne Weiteres gefunden, indem man die Frequenz des Läuferstromes ($n_1 - n_2$) in demselben Maassstabe vom Fusse des Lothes aus auf der Horizontalen abträgt, welche jene Frequenz darstellt, und den Endpunkt N_2 mit dem Punkt O verbindet. Wenn z. B. in Fig. 265 der Abstand $n_1 - n_2$ die Frequenz des Läuferstromes nach dem gewählten Maassstabe darstellt, und $N_1 O$ in demselben Maassstabe $= \frac{R}{V_L}$ ist, dann stellt Winkel ψ

den Winkel dar, um welchen der Läuferstrom hinter dem wirk-
samen magnetischen Felde zurückbleibt. Denn im rechtwinkligen
Dreieck ON_1N_2 sind die Seiten ON_1 und N_1N_2 proportional R
und $(n_1 - n_2) V_L$. Wir können auch eine Linie bestimmen, welche
den Werth des Stromes darstellt. Wenn wir R und V_L kennen,
so können wir den Strom für irgend einen bestimmten Schlipf
($n_1 - n_2$) berechnen und ein Loth errichten, welches diesen Strom
in einem passenden Maassstabe darstellt, so dass es die Strom-
phasenlinie ON_2 in dem Punkte G schneidet. Es ist leicht zu
zeigen, dass, wenn wir um O mit OG als Radius einen Kreis
schlagen, welcher die Stromphasenlinien schneidet, für andere
Werthe des Schlipfs das Loth auf $N_1 O$ in den zwischenliegenden
Punkten die Werthe des Stromes für diese Schlipfe darstellen wird.
Wenn demnach der Schlipf $n_1 - n_3$ ist, so wird der Läuferstrom
durch die Linien $B_3 G_3$ dargestellt. Denn BG ist proportional dem
 $\sin \psi$ und nach der Figur $= \frac{(n_1 - n_2)V_L}{\sqrt{R^2 + (n_1 - n_2)^2 \cdot V_L^2}}$.

Nun ist der Schlipf, dividirt durch die Impedanz, proportional
dem Strom, daher ist auch BG proportional dem Strom.

Wir können die Länge BG auf der Phasenlinie abtragen und
erhalten den Vector OC_2 , der den Läuferstrom darstellt. Hätten
wir es mit einem Mehrphasenmotor zu thun, so müssten wir zu
 OC_2 noch den magnetisirenden Strom $C_2 C_1$ im rechten Winkel zu
 ON_1 hinzufügen und würden in OC_1 den Ständerstrom erhalten.

Diese Construction können wir nun auf den Einphasenmotor
anwenden, indem wir den einfachen Wechselstrom im Ständer so
betrachten, als bestände er aus zwei gleichen Strömen von dem
halben Werthe, welche wie in der früheren Construction Fig. 261 in
entgegengesetzter Richtung sich drehen. Man sieht, dass es gleich-
giltig ist, welche Werthe wir beim Ausgange für die umlaufenden
Kraftlinien annehmen, da die Winkel des Dreiecks OBG einzig und
allein durch die Werthe von $R V_L$ und den Schlipf bestimmt sind.

Wir legen das Verhältniss der beiden umlaufenden Felder durch die Bedingung fest, dass die Componenten des Ständerstromes gleich sein müssen, und wir bestimmen zugleich den wirklichen Maassstab der ganzen Figur durch den Umstand, dass die Linie, welche wir finden wollen, und die die gesammte elektromotorische Kraft im Ständer darstellen soll, gleich der Speisespannung ist. Im Folgenden sind Angaben über einen Motor gegeben, dessen Entwurf sowohl als Einphasen- als auch als Zweiphasenmotor von Field ausgearbeitet ist.

Leistung (geschätzt) in P	20
Spannung in Volt	500
Zahl der Pole	6
Frequenz	40
Umdrehungen in der Minute	800
Durchmesser des Läufers	350 mm
Länge des Läufers	200 „
Zahl der Löcher im Läufer	45
Zahl der Löcher im Ständer	60
Ständerwicklung, gleichwerthig mit 3 Spulen von je 78 Windungen auf jede Phase, zweiphasig.	
Läuferwicklung, gleichwerthig mit 3 Spulen von je 10 Windungen, dreiphasig in Sternschaltung.	
Leerlaufstrom in jeder Phase als Zweiphasenmotor = 9 Ampere.	
Coëfficient der Streuung des Ständers (gemessen) = 5 vom Hundert ($u_1 = 1,05$).	
Widerstand des Ständers, jede Phase = 0,5 Ohm.	
Widerstand des Läufers, jede Phase = 0,0112 Ohm.	
Spannung im Läufer für 1 Ampere 1 Periode/Secunde $V_L = 0,0028$.	
Gleichbleibende Verluste (herrührend von Reibung, Lüftung, Hysteresis u. a.) = 1,150 KW.	

Wir wollen die Figur für einen Einphasenmotor entwerfen, der mit einem Schlupf von 3 vom Hundert läuft.

Wir ziehen die Linie ON_1 und machen sie so lang, dass sie die in den Ständerleitern erzeugte Spannung darstellen kann. Ein passender Maassstab ist 1 mm = 5 Volt. Gleichzeitig entspricht diese Linie in einem anderen Maassstab dem Werth $\frac{R}{V_L}$, der in diesem Falle gleich 4 ist.

Beginnen wir mit einem angenommenen Werth für das sich vorwärts drehende Feld, sagen wir für ein Feld, das beim Umlauf eine Spannung von 500 Volt in den Ständerleitern hervorbringen würde, dann haben wir für die Spannung in einer Phase des Läufers

$$500 \cdot \frac{10}{78} \cdot \frac{3}{100} = 1,92 \text{ Volt.}$$

Hierin ist $\frac{10}{78}$ das Umsetzungsverhältniss zwischen den Läufer- und Ständerwickelungen.

Die Frequenz ($n_1 - n_2$) ist = 1,2; die Impedanz einer Läuferphase ist demnach

$$= \sqrt{(0,0112)^2 + (0,0028 \cdot 1,2)^2},$$

welche den Werth von 31,7 Ampere im Ständerkreise ergeben. Wir errichten das Loth BG und machen es so gross, dass es diesem Werthe nach dem gewählten Maassstabe entspricht, und tragen die gleiche Länge OC_2 von O aus auf ON_2 ab. Hierzu addiren wir den magnetisirenden Strom $C_2 C_1$. Um den rückwärts sich drehenden Strom zu finden, betrachten wir den Zeitpunkt, in welchem das rückwärts sich drehende Feld dem vorwärts umlaufenden gerade entgegengesetzt ist, so dass es durch die Linie Of_1 dargestellt wird. Das Band oder die Welle der elektromotorischen Kraft (vgl. S. 167 und Fig. 216), welche dieses Feld im Läufer erzeugt, wird durch die entgegengesetzt gerichtete Linie ov_1 dargestellt, da die Richtung der Bewegung mit Bezug auf die Leiter der Bewegung von ON_1 entgegengesetzt gerichtet ist. Der rückwärts sich drehende Strom wird hinter dieser Richtung zurückbleiben. Wenn nun das rückwärts umlaufende Feld gleich wäre im Werthe dem vorwärts sich drehenden Felde, so würde man den Werth des rückwärts umlaufenden Ständerstromes erhalten, indem man einen Kreis um O mit OG als Radius schlägt, der die Stromphasenlinie für den Schlipf von 197 % in g schneidet und uns in gb den Werth des Stromes gibt. Hierzu würden wir den Magnetisierungsstrom gc zu addiren haben und in Oc den gesammten Strom erhalten. Da wir aber wissen, dass der gesammte rückwärts umlaufende Strom dem gesammten vorwärts umlaufenden gleich ist, so schneiden wir einfach $Oe_1 = OC_1$ ab.

Wenn ON_1 die durch das vorwärts umlaufende Feld erzeugte Spannung darstellt, ist ov_1 die durch das rückwärts laufende Feld erzeugte Spannung. Wir haben

$$ON_1 : ov_1 = Oc : Oc_1$$

gemacht. Denn wir wissen, dass, welches auch die absoluten Werthe der beiden rotirenden Felder sein mögen, ihr Verhältniss stets gleich $Oc : OC_1$ ist. Halbiren wir den Winkel zwischen Oe_1 und OC_1 , so erhalten wir OC_0 in der Richtung ihrer Resultante. Diese Linie stellt also den Ständerstrom dar, dessen Höchstwerth natürlich gleich

der Summe der Componenten, also gleich dem doppelten Werth jeder Componente ist. Wir bezeichnen den halben Winkel mit χ . Jedes der beiden umlaufenden Felder wird sich um diesen Winkel χ von seiner augenblicklichen Stellung gedreht haben, wenn der Ständerstrom seinen Höchstwerth erreicht hat, so dass die elektromotorische Kraft, die in jenem Augenblick durch jedes der beiden Felder in den Ständerleitern erzeugt wird, durch die Vektoren OV_2 und ov_2 dargestellt wird. OV_2 ist gerade so lang wie ON_1 . Wir können nicht alle elektromotorischen Kräfte in den Ständerleitern durch ein Uhrdiagramm zu einer Vectorsumme $O\mathcal{E}_1$ summiren, da nicht alle Componenten in derselben Richtung umlaufen. ov_2 dreht sich entgegengesetzt zu OV_2 , aber es ist leicht einzusehen, dass, soweit der äussere Stromkreis in Betracht kommt, die Wirkung des sich gegen den Uhrzeiger drehenden Vectors ov_2 genau dieselbe wie die eines anderen sich im Sinne des Uhrzeigers drehenden Vectors ov_3 ist, wenn wir nur den Winkel $C_0 ov_3$, um welchen der neue Vector von OC_0 abweicht, gleich dem Winkel $C_0 ov_2$ machen, den ov_2 in dem Augenblicke mit OC_0 einschliesst, wenn der Ständerstrom seinen Höchstwerth erreicht; denn wenn wir die Richtung von OC_0 zur Basis unseres Uhrdiagramms machen, so ist die Wirkung des rückwärts umlaufenden Feldes auf den äusseren Stromkreis in jedem Augenblicke gleich der Projection von ov_2 auf die Basis OC_0 und diese ist gleich der Projection von ov_3 . Wir sind also nun im Stande, alle elektromotorischen Kräfte in den Ständerleitern zu summiren. Rechtwinklig zu OC_0 steht die Spannung OL der Selbstinduction. Diese lässt sich aus dem Streuungscoefficienten des Ständers berechnen. Ist der Stromkreis des Läufers offen, so finden wir, dass 25 Volt (oder 5 vom Hundert der Betriebsspannung von 500 Volt) durch das Streufeld erzeugt werden, wenn der Magnetisirungsstrom 9 Ampere beträgt. Das ist also 2,78 Volt für 1 Ampere. Nun gilt OC_0 gleich 71 Ampere (aus Fig. 265 abzugreifen), also bedeutet OL $71 \cdot 2,78 = 197$ Volt. Hierzu addiren wir den Ohmischen Verlust $71 \times 0,5 = 31,5$. Die Linie LR stellt dies dar. Wir fügen noch die durch OV_2 oder OV_3 dargestellten 500 Volt und die 150 Volt geltende Linie ov_3 hinzu, und erhalten schliesslich $O\mathcal{E}_1$ als gesammte elektromotorische Kraft, die der Ständerwicklung zugeführt werden muss. Diese Linie gilt nach dem Spannungsmaassstab 769 Volt. Das Diagramm würde im richtigen Maassstab hergestellt sein, wenn die Betriebsspannung auch 769 Volt betrüge, sie ist aber nur 500 Volt, also müssen wir alle Vektoren im Diagramm

in dem Verhältniss 769 : 500 kürzen. Dann erhalten wir folgende Werthe:

Zugeführte elektromotorische Kraft	500 Volt
Ständerstrom	46,3 Ampere
Leistungsfactor ($\cos \varphi$)	0,615
Zugeführte Energie	14,26 KW
J^2R Ständerverluste	1,07 „
Läuferstrom (vorwärts laufende Welle)	107,5 Ampere
Läuferstrom (rückwärts laufende Welle)	108,5 „
Gesamte J^2R -Verluste im Läufer	0,785 KW
Gleichbleibende Verluste, angenommen zu	1,150 „
Gesamtverluste	3,0 KW
Leistung	15,1 P
Wirkungsgrad	79 v. H.

Die Leistung ist leicht zu berechnen aus folgender Betrachtung. Für das vorwärts umlaufende Feld ist

$$\frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\text{verlorene Energie im Läufer}}{\text{gesamte der Läufer zugeführte Energie}} \quad (\text{vgl. S. 247}).$$

Nun ist der von dem vorwärts umlaufenden Feld herrührende Verlust im Läufer = 0,385 KW.

Daher ist die dem Läufer mitgetheilte Energie

$$0,385 \cdot \frac{100}{3} = 13,0 \text{ KW.}$$

Der vom rückwärts umlaufenden Felde herrührende Verlust im Läufer ist gleich 0,395 KW. Die dem Läufer durch dieses Feld mitgetheilte Energie (die vollständig in den Leitern in Wärme umgesetzt wird) ist

$$0,395 \cdot \frac{100}{197} = 0,2 \text{ KW.}$$

Der J^2R -Verlust im Ständer ist = 1,07 KW.

Hiernach beträgt die gesammte dem Ständer zugeführte Energie

$$13,0 + 0,2 + 1,07 = 14,27 \text{ KW.}$$

Von den 13 KW, die dem Läufer durch das vorwärts umlaufende Feld mitgetheilt werden, gehen 3 vom Hundert in J^2R -Verlusten verloren, die von dem vorwärts gerichteten Läuferstrom herrühren. Ferner sind dann noch J^2R -Verluste, die davon herrühren, dass das vorwärts umlaufende Feld den Läufer gegen das rückwärts laufende Feld dreht. Die Geschwindigkeit des Motors ist 97 % des Synchronismus, der gesammte Schlipf 197 %, so dass der auf den Läufer entfallende Theil von den 0,395 KW gleich ist

$$\frac{97}{197} \cdot 0,395 = 0,195 \text{ KW.}$$

Mit andern Worten: der $J^2 R$ -Verlust, der von dem rückwärts umlaufenden Strom herrührt, beträgt im Ganzen 0,395 KW, und zwar setzt sich dieser Verlust aus zwei getrennten Quellen zusammen. Zunächst liefert das rückwärts rotirende Feld mit einer Geschwindigkeit von 100 einen Verlust von 0,2 KW und der Läufer mit einer Geschwindigkeit von 97 einen Verlust von 0,195 KW. Aber diese vom Läufer gelieferte Energie muss in Wirklichkeit von dem vorwärts drehenden Feld geleistet und daher von den 13 KW abgezogen werden. Demnach beträgt die nutzbare Leistung des Läufers $13,0 - (0,385 + 0,195 + 1,15) = 11,27$ KW oder 15,1 Brems-Pferdestärken.

Field gibt eine Methode zur Bestimmung des Werthes der Grösse V_L an, welche leicht dort angewendet werden kann, wo ein mehrphasiger Ständer von derselben Grösse wie der des besprochenen Einphasenmotors erhältlich ist. Der Läufer wird in dem Mehrphasenständer montirt, der mit Mehrphasenströmen gespeist wird von einer Spannung, welche ein Feld von derselben Grösse erzeugt wie bei dem Einphasenmotor. Der Läufer wird belastet und gleichzeitig die Spannung so vermehrt, dass das Feld constant bleibt. Die Belastung wird vergrössert, bis die Zugkraft ihr Maximum erreicht und abzunehmen beginnt. Hierbei wird der Schlipf des Läufers und der Strom, der von dem Ständer bei diesem Maximum aufgenommen wird, beobachtet.

Nun ist die Zugkraft des Läufers proportional $\frac{s}{R^2 + s^2 V_L^2}$ (vgl. S. 227), und dies wird ein Maximum, wenn der Schlipf $s = \frac{R}{V_L}$.

Wir wissen daher, dass in dem Zeitpunkt, wenn die Zugkraft ihr Maximum erreicht, der Schlipf so gross ist, dass $s V_L = R$ ist, so dass wir durch Messen von R den Werth V_L finden. Die Construction Fig. 265 ist ebenfalls sehr vereinfacht, weil wir nur den Schlipf $n_1 - n_3$ für die Maximalzugkraft abzutragen haben, dann $N_3 O$ unter 45° ziehen, um O zu finden. Der Strom $B_3 G_3$ ist der bei der Maximalzugkraft gemessene Strom, reducirt auf seinen, durch die besondere Einphasenwicklung bestimmten Werth.

Bei diesen Betrachtungen haben wir aus Gründen der Einfachheit einen zweipoligen Motor vorausgesetzt mit einem Feld, das nach einer einfachen Sinusfunction rund um den Zwischenraum herum vertheilt ist. Nun wollen wir den Fall eines unregelmässig geformten Feldes betrachten, d. h. also anstatt $B = B_0 \cdot \sin \vartheta$

nehmen wir $B = f(\vartheta)$, wobei $f(\vartheta)$ irgend eine beliebige Function von ϑ ist. Nach Fouriers Theorie kann eine beliebige Function von ϑ ausgedrückt werden durch die Summe einer Anzahl von Ausdrücken wie

$$B_1 \cdot \sin(\vartheta + \varphi_1) + B_2 \cdot \sin(2\vartheta + \varphi_2) + B_3 \cdot \sin(3\vartheta + \varphi_3) + \dots$$

Der erste Ausdruck gibt uns ein zweipoliges Feld, der zweite ein vierpoliges, und der m te ein Feld von $2m$ Polen. Es sei nun p die Zahl der Polpaare eines Einphasenmotors und n die Frequenz des Speisestromes. Dann kann das Feld, wie es auch zusammengesetzt sein mag, betrachtet werden als aus den folgenden Componenten bestehend:

Ein sinusoidales	Feld von p Polpaaren,	das sich vorwärts dreht mit	$\frac{n}{p}$ Umdreh.	} in der Secunde
„ gleichmässiges	„ „ p „ „	„ rückwärts	„ „ $\frac{n}{p}$ „	
„ sinusoidales	„ „ $2p$ „ „	„ vorwärts	„ „ $\frac{n}{2p}$ „	
„ gleichmässiges	„ „ $2p$ „ „	„ rückwärts	„ „ $\frac{n}{2p}$ „	

u. s. w.

Diese harmonisch gebildeten Glieder, welche Feldern höherer Ordnung entsprechen, sind mehr oder weniger stets vorhanden, sie spielen eine wichtige Rolle in der Theorie der Einphasenmotoren. Ihnen ist es zuzuschreiben, dass bei solchen Motoren die Neigung besteht, zuweilen mit einem Bruchtheil ihrer eigentlichen Geschwindigkeit umzulaufen. Wir werden sehen, dass die Felder höherer Ordnung mit einer geringeren Geschwindigkeit sich drehen wie die Grundfelder. Sie alle laufen nach rückwärts um gegenüber einem mit voller Geschwindigkeit sich drehenden Läufer und sind also schädlich, insofern sie J^2R -Verluste und rückwärts gerichtete Drehmomente hervorrufen. Ihre Wirkung ist aber gering, selbst für Felder, deren Form beträchtliche Abweichungen von dem sinusoidalen Feld aufweist. Field behandelt in seiner oben erwähnten Abhandlung den Fall, dass das Feld eine stumpfeckige Form hat, und zeigt, dass das zweite Glied der Reihe, welches das bei weitem wichtigste ist, nur einen J^2R -Verlust hervorrufft, der gleich $\frac{1}{9}$ des vom Grundglied der Reihe verursachten ist, und bei einem Schlupf von 6 vom Hundert nur ein Drehmoment von $\frac{1}{90}$ des Drehmomentes des Hauptfeldes verursacht.

Analytische Theorie.

Interessant ist die Beobachtung, dass bei der analytischen Behandlung des Einphasenmotors der Begriff der zwei in entgegengesetzter Richtung umlaufenden Felder nicht wie vorher durch blosse theoretische Erwägungen, sondern auch durch die gewöhnliche trigonometrische Behandlung eingeführt wird.

Die folgende von De Bast¹⁾ herrührende analytische Theorie wird für Manchen Interesse haben, obwohl die quantitative Berechnung eines Motors einfacher durch die eben beschriebenen graphischen Darstellungen auszuführen ist.

Es möge zuerst angenommen werden, dass ein zweipoliger Motor angelassen wird, und dass er mit einer constanten Geschwindigkeit von m Umdrehungen in der Secunde läuft; er werde gespeist von einem Wechselstrome von gleichbleibender Stärke, der einer einfachen Sinusformel folgt und eine Wechselgeschwindigkeit von n Perioden in der Secunde besitzt. Dann ist die Dichte \mathfrak{B} des Feldes, das vom Ständer erzeugt wird, in irgend einem Augenblicke

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_0 \sin 2\pi n t,$$

worin \mathfrak{B}_0 den höchsten Werth der Felddichte während jeder Periode darstellt, während μ (die magnetische Permeabilität oder Durchlässigkeit) als constant angesehen wird. Ein Draht möge den Läufer in einem Durchmesser umfassen, welcher mit der zur Richtung des ursprünglichen Feldes senkrechten Ebene den Winkel α einschliesst; dieser Draht umschliesst die Fläche S . Die ganze Kraftlinienmenge ist dann

$$\mathfrak{C} = S \cos \alpha \cdot \mathfrak{B}_0 \sin 2\pi n t,$$

wobei die Dichte des Feldes als gleichmässig angenommen wird.

Da der Läufer sich mit m Umläufen in der Secunde dreht, so ist

$$\alpha = 2\pi m t.$$

Die elektromotorische Kraft im Leiter ist

$$\begin{aligned} E &= - \frac{d\mathfrak{C}}{dt} \\ &= - S\mathfrak{B}_0 [-2\pi m \sin 2\pi n t \sin 2\pi m t \\ &\quad + 2\pi n \cos 2\pi m t \cos 2\pi n t] \\ &= - \frac{S\mathfrak{B}_0}{2} [2\pi (n + m) \cos 2\pi (n + m) t \\ &\quad + 2\pi (n - m) \cos 2\pi (n - m) t]. \end{aligned}$$

1) De Bast, Bull. de l'Assoc. des Ingénieurs Électriciens, Aug. 1893.

So ergibt sich, dass die elektromotorische Kraft die Summe zweier einfacher harmonischer elektromotorischer Kräfte ist, deren Wechselgeschwindigkeiten $(n + m)$ und $(n - m)$ sind.

Wenn wir den Widerstand des Leiters mit r bezeichnen und seinen Selbstinductionscoefficienten mit L , so erhalten wir für die Impedanzen R'_1 und R'_2 gegen die zwei elektromotorischen Kräfte

$$R'_1 = \sqrt{r^2 + 4\pi^2(n + m)^2 L^2},$$

$$R'_2 = \sqrt{r^2 + 4\pi^2(n - m)^2 L^2}.$$

Der Augenblickswerth des Stromes im Leiter ist

$$I = -\frac{S\mathfrak{B}_0}{2} \left[\frac{2\pi(n + m)}{R'_1} \cos \left\{ 2\pi(n + m)t - \varphi_1 \right\} + \frac{2\pi(n - m)}{R'_2} \cos \left\{ 2\pi(n - m)t - \varphi_2 \right\} \right].$$

Die Verzögerungswinkel φ_1 und φ_2 genügen den Gleichungen:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r}{R'_1},$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r}{R'_2}.$$

Die potentielle Energie des Leiters ist

$$V = -I\mathfrak{C} = IS\mathfrak{B}_0 \cos \alpha \sin 2\pi nt$$

und während der Bewegung durch den kleinen Winkel $d\alpha$ wird die Arbeit (ohne Rücksicht auf das Vorzeichen) geleistet:

$$dV = IS\mathfrak{B}_0 \sin 2\pi nt \sin \alpha d\alpha.$$

Indem wir hierin den oben gegebenen Werth von I einsetzen und $2\pi m dt$ statt $d\alpha$ schreiben, erhalten wir

$$dV = \frac{S^2 \mathfrak{B}_0^2}{2} \left[\frac{2\pi(n + m)}{R'_1} \cos \left\{ 2\pi(n + m)t - \varphi_1 \right\} + \frac{2\pi(n - m)}{R'_2} \cos \left\{ 2\pi(n - m)t - \varphi_2 \right\} \right] \cdot 2\pi m \sin 2\pi nt \sin 2\pi mt \cdot dt.$$

Durch Integration dieses Ausdruckes zwischen den Grenzen $t = 1$ und $t = 0$ erhalten wir die Arbeit in 1 Secunde oder in anderen Worten die mittlere Leistung für einen Leiter:

$$P = \frac{2\pi m S^2 \mathfrak{B}_0^2}{8} \cdot \left[\frac{2\pi(n - m)}{R'_2} \cos \varphi_2 - \frac{2\pi(n + m)}{R'_1} \cos \varphi_1 \right]$$

$$= \frac{2\pi m r S^2 \mathfrak{B}_0^2}{8} \left[\frac{2\pi(n - m)}{R'_2{}^2} - \frac{2\pi(n + m)}{R'_1{}^2} \right].$$

Die ganze mittlere Leistung wird gefunden, indem man mit der Zahl N der Leiter multiplicirt, und das Drehmoment erhält man durch Division der ganzen mittleren Leistung mit der Zahl der in der Secunde zurückgelegten Radianen $2\pi m$

$$\text{Drehmoment} = \frac{NP}{2\pi m};$$

wir bekommen demnach als endgültigen Ausdruck¹⁾ die Formel:
Drehmoment

$$= \frac{rNS^2\mathfrak{B}_0^2\pi}{4} \left[\frac{(n-m)}{r^2 + 4\pi^2(n-m)^2L^2} - \frac{(n+m)}{r^2 + 4\pi^2(n+m)^2L^2} \right].$$

Wir fanden oben (S. 227), dass ein Feld, das sich mit der Geschwindigkeit g gegen den Läufer bewegt, ein Drehmoment

$$D = Q \cdot \frac{rs}{r^2 + 4\pi^2L^2s^2}$$

hervorbringt. Das Drehmoment, welches von den beiden entgegengesetzt sich drehenden Feldern erzeugt wird, ist

$$\text{Drehmoment} = Qr \left[\frac{n-m}{r^2 + 4\pi^2L^2(n-m)^2} - \frac{n+m}{r^2 + 4\pi^2L^2(n+m)^2} \right]$$

und dies ist dasselbe wie der oben abgeleitete Ausdruck, worin

$$Q = \frac{NS^2\mathfrak{B}^2\pi}{4}.$$

Es ist nicht nöthig, das Drehmoment zu betrachten, welches dadurch entsteht, dass die Ströme, die von dem einen Drehfeld herrühren, in Leitern fließen, die sich in dem entgegengesetzt laufenden Drehfeld befinden; denn die Wechselgeschwindigkeit dieser Ströme unterscheidet sich um $2m$ von der des entgegengesetzten Feldes, und demnach ändert dieses Drehmoment sehr rasch seine Richtung.

Das Anlaufen von einphasigen Inductionsmotoren.

Dass ein einphasiger Inductionsmotor nicht von selbst anlaufen kann, ist leicht einzusehen, wenn man sich die Verhältnisse klar macht, die obwalten, wenn der Läufer feststeht und die Ständerwicklung mit der Speiseleitung verbunden ist. Wir sahen, dass das einfache Wechselstromfeld gleichwerthig mit zwei sich mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung drehenden

1) Vgl. Hutin u. Leblanc, La Lumière Electrique. Bd. 40, S. 418. 1891.

Feldern ist. Die im feststehenden Läufer inducirten Ströme werden mit den beiden gleichen umlaufenden Feldern zwei gleiche und entgegengesetzte Drehmomente erzeugen. Es kann daher keine Anzugskraft vorhanden sein. Sobald aber der Läufer in Bewegung gesetzt wird und sich seine Geschwindigkeit allmählich von Null bis zu einer Geschwindigkeit nahe dem Synchronismus steigert, wird das nach rückwärts wirkende Drehmoment schwächer und schwächer, und sobald das resultirende vorwärts gerichtete Drehmoment stark genug ist die Reibungswiderstände zu überwinden, wird der Motor seine volle Geschwindigkeit zu erreichen streben, wenn nicht die Felder höherer Ordnung so gross sind, dass er mit der Hälfte oder dem Drittel seiner eigentlichen Normalgeschwindigkeit umläuft. Man muss also den Läufer durch künstliche Mittel auf eine gewisse Geschwindigkeit bringen, die der Regel nach über der Hälfte des Synchronismus liegt. Das stets hierzu verwendete Mittel besteht in der Anordnung eines beliebigen Phasentheilers, d. h. der Ständer wird mit zwei Wickelungen versehen, einer Arbeits- und einer Anlaufwicklung, die um 90° gegen einander versetzt sind, wie die beiden Phasen eines Zweiphasenmotors. Beim Anlassen wird die eine Wickelung unmittelbar an die Speiseleitung gelegt, die andere mit ihr unter Zwischenschaltung einer Drosselspule oder einer Capacität verbunden. Hierdurch wird in beiden Wickelungen ein Phasenunterschied erzeugt, dessen Grösse von der Art der Anlassvorrichtung und von der Anordnung der Wickelungen abhängt, und der stets wesentlich kleiner als 90° ist. Natürlich wird hierdurch ein mehr oder weniger unregelmässiges Feld erzeugt, welches auf den Läufer in genau der gleichen Weise wirkt, wie das Feld eines Zweiphasenmotors, nur nicht gleich günstig, und das den Läufer in Bewegung setzt und auf seine normale Geschwindigkeit bringt. Wie bei allen Motoren mit umlaufendem Feld wird die Anzugskraft durch Einschalten von Widerstand in den Läuferstromkreis erheblich vermehrt, da hierdurch die Phase des Läuferstromes mehr in Uebereinstimmung mit dem vorwärts umlaufenden Felde gebracht wird. Zur Ermittlung des vortheilhaftesten Werthes des Widerstandes haben Maffiotti und Pescetto¹⁾ eine Formel aufgestellt nach Versuchen, die sie mit vielen Einphasenmotoren angestellt haben (vgl. S. 228); sie lautet:

$$r = 0,4 \cdot 2\pi nL.$$

1) Maffiotti und Pescetto, Circa il motore asincrono monofase del Brown. Rivista d'Artiglieria e Genio, 1897. Bd. 55.

Die Anlaufwicklung nimmt etwa ein Drittel des Ständerumfangs ein. Die Wicklungen sind stets von Eisen umgeben in Löchern oder Schlitzen eingebettet, wie bei den Mehrphasenmotoren, und immer als Trommelwicklung ausgeführt, um Streuverluste zu vermeiden. Jede Spule der Arbeitswicklung wird also in der praktischen Ausführung ganz grade gewickelt, so dass ihre Form ein Rechteck darstellt, während die Spulen der Anlaufwicklung aufgebogen und über die andern weggeführt sind. Da die Anlaufwicklung nur kurze Zeit in Benutzung ist, kann die Stromdichte in ihr sehr hoch sein und dadurch die Kleinheit des verfügbaren Wicklungsraumes ausgeglichen werden.

Die Läufer der Einphasenmotoren werden in genau der gleichen Art aufgebaut wie die der Mehrphasenmotoren. Aber während bei diesen die Käfig- oder eine dieser ähnliche Form bei allen Grössen bis zu 8—10 P gleich gut ist, muss diese Form bei Einphasenmotoren schon bei Grössen von 5 P verlassen werden; und wenn die Frequenz über 60 Perioden in der Secunde hinausgeht, muss selbst bei Motoren von noch kleinerer Leistung der Läufer gewickelt werden. Dies liegt daran, dass durch die Methode der Phasentheilung nur ein sehr unvollkommenes Drehfeld erzeugt wird, wodurch es unmöglich ist, einen Einphasenmotor beliebiger Grösse mit genügend grossem Anlaufstrom zu versehen, wenn nicht vorübergehend ein inductionsfreier Widerstand in die Läuferwicklung eingeschaltet wird.

Die Figuren 266—269 zeigen vier verschiedene Schaltungen für die Phasentheilung beim Anlaufen. Die erste ist nur brauchbar für kleine Motoren der Brown'schen Art. Beim Anlaufen werden beide Wicklungen hinter einander an die Speiseleitungen gelegt, die Anlaufwicklung ist aber durch einen inductionsfreien Widerstand kurzgeschlossen. Der Strom wird daher in der einen Wicklung mehr verzögert wie in der anderen, und dieser Phasenunterschied genügt, um ein unregelmässiges Drehfeld zu erzeugen. Hat der Motor nahezu seine volle Geschwindigkeit erreicht, so werden Anlaufwicklung und Widerstand ausgeschaltet und die Arbeitswicklung unmittelbar an die Leitung gelegt. Die in den drei übrigen Figuren dargestellten Anordnungen stammen ebenfalls von der Firma Brown, Boveri & Co. Fig. 267 unterscheidet sich von der vorhergehenden nur dadurch, dass an Stelle des inductionsfreien Widerstandes ein Condensator tritt. Die Verzögerung des Stromes in der Anlaufwicklung wirkt genau so wie im vorigen Fall und

veranlasst ein rasches Anlaufen des Läufers. Diese Anordnung ist recht geeignet, Motoren bis zu 5 P zum Anlaufen zu bringen, bei grösseren ist die Schaltung nach Fig. 268 mit einem inductionsfreien Widerstand im Läufer geeigneter. Der Läuferwiderstand wird eingeschaltet und der Speisestrom in die Arbeitswicklung gelassen, zu welcher die Anlaufwicklung in Hintereinanderschaltung mit dem Condensator parallel liegt. Wenn der Läufer sich dreht, wird der Läuferwiderstand allmählich ausgeschaltet, und wenn etwa zwei Drittel der normalen Geschwindigkeit erreicht ist, die Anlauf-

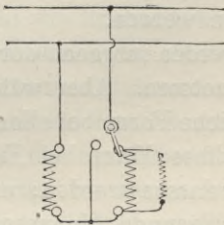


Fig. 266.

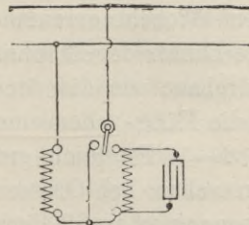


Fig. 267.

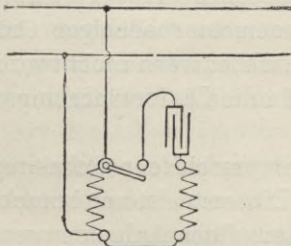


Fig. 268.

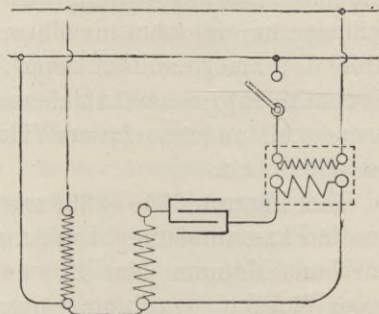


Fig. 269.

wicklung und der Condensator abgeschaltet. In Fig. 269 ist die Anordnung dargestellt, welche Brown zum Anlassen der 70 pferdigen einphasigen Hochspannungsmotoren in Frankfurt verwendete. Die Arbeitswicklung ist unmittelbar an die Speisespannung von 2800 Volt gelegt, die mit der Anlaufwicklung und dem Condensator durch einen kleinen Transformator in Verbindung steht, der die Hochspannung auf einen geringeren, für den Condensator geeigneteren Werth herabsetzt. Bei etwa $\frac{2}{3}$ der normalen Geschwindigkeit wird die primäre Wicklung des Transformators abgeschaltet und der Läuferwiderstand kurzgeschlossen.

Die von Brown zum Anlassen der Einphasenmotoren benutzten Condensatoren waren sämtlich Flüssigkeitscondensatoren und daher von sehr einfacher Form. Jeder Condensator bestand aus einer Anzahl dünner durch dünne Fiberstreifen von einander isolirter Eisenplatten, die in ein emaillirtes, mit Sodalösung gefülltes Eisengefäß eingetaucht waren. Es ist nothwendig jeden einzelnen Fall für sich zu behandeln, da gar nicht zu vermeidende ganz geringe Unterschiede im Luftzwischenraum und in den zur Hervorbringung der verschiedenen Spannungen und Frequenzen dienenden Wickelungen es hindern, dass die Condensatoreinrichtungen für alle Fälle genau gleich gemacht werden können.

In Fig. 270 ist ein Diagramm einer älteren Methode zum Anlassen eines Motors durch einen elektrolytischen Condensator dargestellt, der in der Figur mit *K* bezeichnet ist. Die dünne punktirte

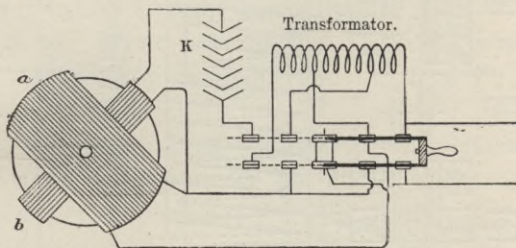


Fig. 270.

Linie zeigt die Verbindungen des Schalters beim Anlassen, die dickere ausgezogene die Schaltung bei voller Belastung. Wenn der Motor nicht läuft, steht der Hebel senkrecht. Die Spule *a* bezeichnet die gewöhnliche Arbeitswicklung und *b* die Hilfswickelung, welche in diesem Falle ganz ausgeschaltet wird, wenn der Motor angelassen ist. Die Figur zeigt einen einpoligen Transformator (vgl. S. 371).

Im britischen Patente 24098 vom Jahre 1892 beschreibt Brown eine Anzahl Methoden zum Anlassen einphasiger Motoren, unter anderen auch solche, welche Hilfswickelungen mit Selbstinduction und Kapazität benutzen und ferner noch einige Methoden, in welchen die Leiter des Läufers derart verbunden sind (wie durch Bürsten und Commutator), dass die in ihnen kreisenden Ströme eine Polarität hervorbringen, die zur Polarität des Ständers geneigt ist. In diesem ist der Läufer wie ein Gramme- oder Siemensanker gewickelt mit Verbindungen nach einem Commutator, wie ihn Gleichstrommaschinen

besitzen. Ferner sind noch zwei entgegengesetzt liegende Punkte der Wickelung an zwei Schleifringe geführt. Soll der Motor anlaufen, so wird ein Widerstand zwischen die Bürsten auf den Schleifring geschaltet, und die Bürsten auf dem Commutator werden so gestellt, dass sie einige Wickelungen des Läufers kurz schliessen, welche schräg zur Richtung des Wechselfeldes liegen, das vom Ständer hervorgebracht wird. Der starke Strom in der kurz geschlossenen Spule ruft in ihr das Bestreben hervor, sich so zu drehen, dass sie dem Wechselfelde parallel wird, und da die Bürsten in ihrer schrägen Lage zum Wechselfelde verbleiben, wird ein gleichmässiges Drehmoment hervorgebracht. Wenn der Motor all-

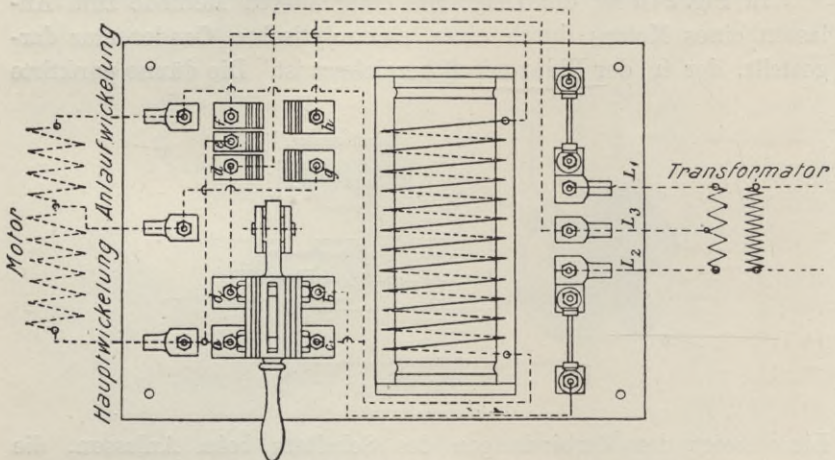


Fig. 271. Anlassschaltung für Einphasenmotoren.

mählich seine Geschwindigkeit erreicht, werden die Bürsten weiter von einander entfernt, bis sie endlich einander diametral entgegengesetzt stehen. Die Bürsten auf den Schleifringen werden dann ebenfalls kurz geschlossen. Brown beschreibt noch einige Methoden, in welchen der Wechselstrom von der Speiseleitung dem Läufer beim Anlassen durch einen Commutator zugeführt wird.

Der Phasenunterschied der Ströme in beiden Wickelungen des Ständers kann durch die Wickelungen selbst auch hervorgebracht werden, indem man ihnen ungleiche Coëfficienten der Selbstinduction gibt, oder indem man mit der einen Widerstand oder Capacität und mit der andern Inductanz in Reihe schaltet. Es kann auch irgend eine Combination dieser Methoden angewandt werden, wie auf S. 335 beschrieben ist.

Fig. 271 zeigt eine Schaltung, die von der Oerlikon-Gesellschaft zum Anlassen ihrer Einphasenmotoren entworfen ist. Der Hebel des Schalters ist in der Lage gezeichnet, die er einnimmt, wenn der Motor seine volle Geschwindigkeit erreicht hat. In der Anlassstellung verbinden die Schneiden des Schalters die Stücke d , e und f mit einander, und ebenso g mit h . Die Punkte L_1 und L_2 erhalten die volle Spannung des Transformators, während L_3 an einen mittleren Punkt des Transformators gelegt ist, so dass zwischen L_1 und L_3 eine geringere Spannung als zwischen L_1 und L_2 herrscht und mehr Strom entnommen werden kann, ohne dass die Zuleitungen zu sehr beansprucht werden. Betrachten wir nun den Schalter in der Anlaufstellung, so geht der Strom von L_1 nach d , von dort zum Theil durch e nach den Hauptspulen, zum anderen Theil durch f , den Widerstand und die Anlaufspulen, und sodann beide Theile durch die Stücke g und h nach L_3 . Wenn der Motor seine Geschwindigkeit erreicht hat, wird der Schalter umgelegt, so dass a mit d und c mit b verbunden ist. Wie man sieht, sind dann beide Wickelungen in Reihe und erhalten die volle Speisenspannung.

Die von Kolben in Prag benutzte Anlaufvorrichtung für Einphasenmotoren ist derjenigen der Fig. 268 ähnlich. Sie weicht nur insofern ab, als ein inductionsfreier Widerstand statt des Condensators benutzt wird. Die besondere Einrichtung des Widerstandes lässt ein Regeln für verschiedene Anlaufströme und auch (innerhalb gewisser kleiner Grenzen) für verschiedene Anlaufdrehmomente zu.

Die in Fig. 259 dargestellten Curven zeigen die Charakteristiken kleiner Motoren dieser Firma. Das dargestellte Diagramm bezieht sich auf einen zweipferdigen Motor, der bei 1500 Umdrehungen in der Minute und 50 Perioden in der Secunde einen 110 voltigen Lichtstromkreis betreibt. Kolbens Anlaufvorrichtung ist in Fig. 272 dargestellt.

Die General Electric Company in Shenectady benutzt¹⁾ eine Widerstandsspule, die in Reihe mit einer Drosselspule in Brücke zu den Hauptleitungen liegt. Von dem Vereinigungspunkt beider Spulen wird durch einen dritten Draht eine Verbindung an einem passenden Punkt der Ständerwickelungen hergestellt. Der Motor läuft an wie eine unsymmetrische Dreiphasenmaschine und verbraucht zunächst durch diese dritte Verbindung nutzlos einige

1) Vgl. Fig. 303, S. 366; und Berg, American Electrician Bd. 9, S. 204, 1897.

Energie, läuft aber, wenn die Geschwindigkeit erreicht ist, als Einphasenmotor weiter und gibt dann an diese dritte Leitung etwas Energie wieder zurück.

Fig. 273 zeigt ein Schema der von der British Thomson-Houston Company angewandten Verbindungen und lässt die Art und Weise erkennen, wie ein gewöhnlicher Drehstrommotor von einem einfachen Wechselstrom gespeist und angelassen werden kann. Zwei Klemmen des Motors werden direkt mit den Hauptzuleitungen verbunden. Die dritte Klemme ist mit der einen oder anderen Hauptleitung durch einen einspuligen Transformator verbunden,

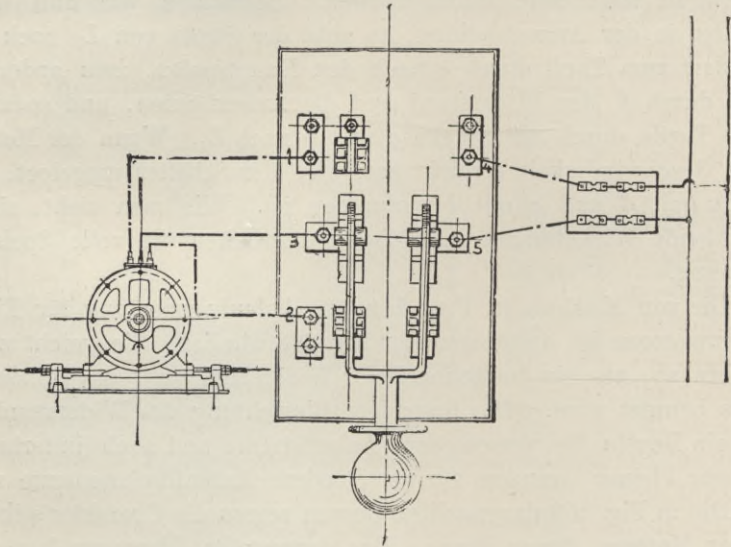


Fig. 272.

dessen Hochspannungsklemmen an einen trockenen Condensator geführt sind. Bei einem neuerlichen Versuch mit dieser Methode fand man es vortheilhaft, den Transformator und den Condensator immer im Kreise zu belassen, da der grössere Leistungsfactor und Wirkungsgrad, wenn der Motor unter diesen Bedingungen leicht belastet lief, den geringen Verlust im Tranformator reichlich aufwog.

Einen Wechselstrommotor mit Hilfsphase der Firma Siemens & Halske zeigt Fig. 274. Der feststehende Theil hat eine Arbeits- und eine Hilfswicklung, beide sind als Einphasenwickelungen ausgeführt, doch räumlich nach Art der Zweiphasenmotoren angeordnet. Die Hilfsphase wird durch eine mit einer Inductionsspule versehene Abzweigung von den Hauptleitungen erzeugt. Von den 4 Klemmen

des Ständers sind 2 mit der Arbeitswicklung und 2 mit der Hilfswicklung verbunden. Letztere wird nur beim Anlassen zur Herstellung eines Drehfeldes benutzt. Der Läufer (Fig. 275) ist mit normaler Drehstromwicklung versehen, welche durch 3 Schleifringe mit den 3 Anlasswiderständen verbunden ist. Das Ausschalten der Hilfsspule wird durch den Anlasser bewirkt.

Von Zeit zu Zeit hat man auch den Versuch gemacht, Einphasenmotoren herzustellen, die ohne Condensator oder besondere Anlassvorrichtungen unter Belastung anlaufen. Heyland hat einen sehr erfolgreichen Motor dieser Art erdnen, dessen Princip aus Fig. 276 zu ersehen ist. Die Hauptwicklung ist in den kleineren Löchern untergebracht, die Selbstinduction ist soweit wie möglich verringert, indem besondere Zähne, die über eine beträchtliche Länge des Umfangs vertheilt sind, vorgesehen sind. In diesen Zähnen ist je eine grössere Nut von quadratischem Querschnitt vorgesehen, in welchen die kurz geschlossene Anlaufwicklung untergebracht ist. Sie besteht nur aus wenigen Windungen, trotzdem tritt hier die grössere Phasenverschiebung auf, weil die magnetische Verkettung dieser Wickelung mit den Windungen des Kurzschlussankers bei ihrer Anordnung in nur einer einzigen Nute unvollkommen ist und deshalb grosse magnetische Streuung verursacht. In diesen geschlossenen Windungen werden Ströme inducirt, welche sehr bedeutend in der Phase zurückbleiben und ein ebenso kräftiges Querfeld hervorbringen, wie es eine zweite Phasenwicklung thun würde. Das Anlaufdrehmoment ist selbst grösser als der maximalen Leistungsfähigkeit im Betriebe überhaupt entspricht und der Stromverbrauch hierbei nur 1,7 mal der Stromstärke bei voller Belastung. Eine weitere Beschrei-

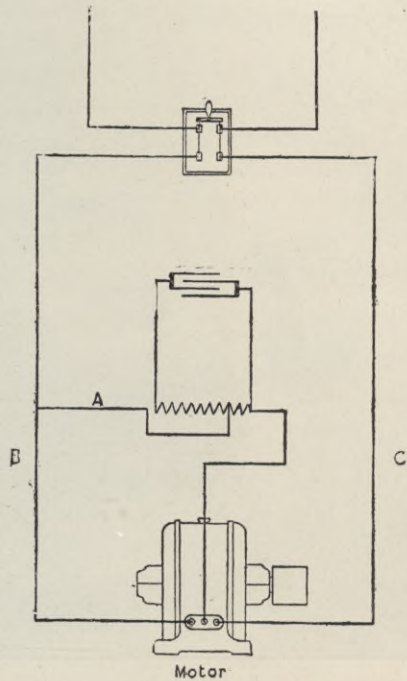


Fig. 273.

bung dieses Motors ist in der unten angegebenen Veröffentlichung zu finden.¹⁾

Eine sehr einfache Methode, Einphasenmotoren anzulassen, wird von Arno²⁾ verwendet. Der Motor ist nur mit einem einzigen Satz von Wickelungen versehen und keine Phasenteilung vorgesehen. In den Stromkreis des Läufers wird während des Anlaufens ein Widerstand eingeschaltet, der gross genug ist, dass die Stromstärke beim Anlaufen nicht über das doppelte Maass der

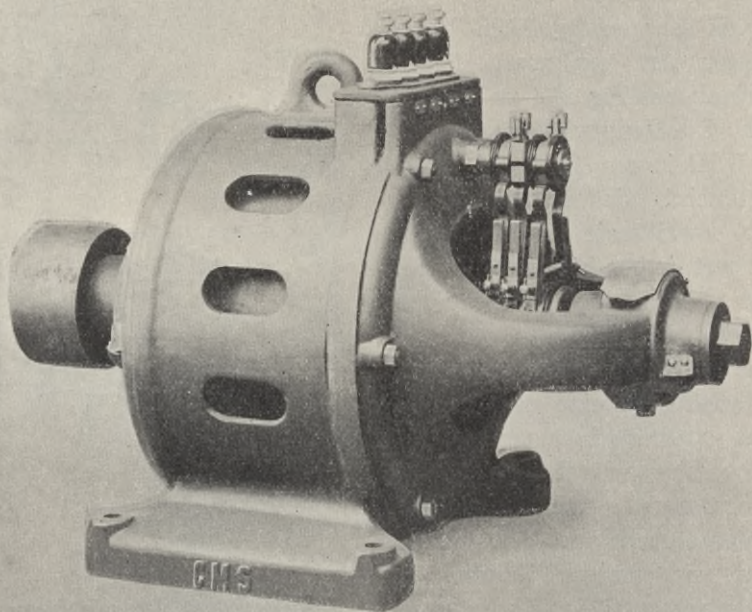


Fig. 274. Drehstrommotor mit Hilfsphase und Schleifriegen von Siemens & Halske.

Stromstärke bei voller Belastung hinausgeht. Wird dann dem Läufer von Hand eine kleine Anfangsgeschwindigkeit gegeben, so läuft er in der Richtung, in welcher er bewegt ist, vorwärts, wobei sich seine Zugkraft in dem Maasse vermehrt, als die Geschwindigkeit steigt. Der eingeschaltete Widerstand wird allmählich in dem Maasse ausgeschaltet, wie der Motor seine Geschwindigkeit vermehrt.

1) Elektrot. Zeitschr. 1897, S. 523.

2) Bulletin de la Société Internationale des Electriciens. 1. Dec. 1897.

Bemerkenswerth sind noch die Einphasenmotoren einer englischen Firma, der Langdon-Davies Motor Company. Langdon-Davies hat sehr eingehende Versuche angestellt über die Vertheilung des magnetischen Feldes bei Motoren, die in verschiedener

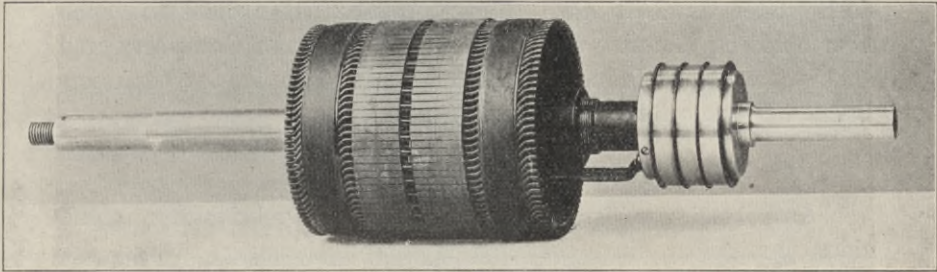


Fig. 275. Anker des Drehstrommotors Fig. 274.

Weise mit Spulen gewickelt waren und mit Strömen von verschiedenen Phasen gespeist wurden, um die beste Wicklungsmethode ausfindig zu machen, durch die ein grosses Anlaufdrehmoment, ein

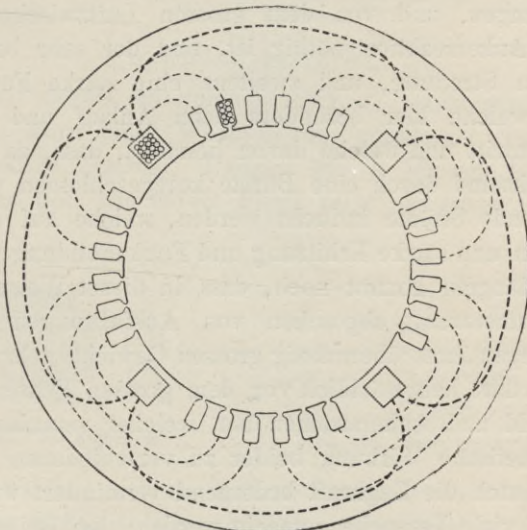


Fig. 276. Ständer des selbstanlaufenden Heylandmotors.

gleichförmiges Feld und ein hoher Wirkungsgrad erreicht wird. Auf Grund seiner Versuche hat er einen äusserst wirksamen selbstanlaufenden Motor auf den Markt gebracht, der jetzt in grossem Umfange in Einphasenstromkreisen Verwendung findet. Eine Veröffent-

lichung über diese Motoren findet man in der Zeitschrift „Electrician“ vom 19. Juni 1896 und ebenso im „Engineering“ von demselben Datum. Es sind indessen in neuerer Zeit noch Verbesserungen an diesem Motor angebracht, welche sich auf besondere Methoden der Wickelung des Läufers beziehen, wodurch das Anlaufdrehmoment noch weiter vermehrt wird. Einige Angaben über diese wie auch über ähnliche Motoren von der Wagner Electric Company und andere einphasige Inductionsmotoren findet man in des Verfassers Buch: „Dynamoelektrische Maschinen“.

Gebblätterte Reihenmotoren.

Ausgehend von der Thatsache, dass die Drehrichtung irgend eines unmittelbar eingeschalteten Motors unabhängig ist von der Richtung des in ihn hineingesandten Stromes, wurden schon früh Versuche gemacht, diese Motoren für den Betrieb mit Wechselströmen geeignet zu machen, indem man die Feldmagnete blättert. Die hauptsächlichsten Schwierigkeiten bot diese Art von Motoren insofern, als erstens ein grosser Anlaufstrom und sehr kleiner Leistungsfactor damit verbunden waren, herrührend von der Art der Wickelungen, und von dem grossen Luftzwischenraum, der wegen der Ankerreaktion nöthig ist, und der sehr beträchtlichen magnetischen Streuung, und zweitens eine starke Funkenbildung stattfindet, welche hier besonders beim Anlauf und bei Ueberlastungen eintritt und welche davon herrührt, dass, da jede Ankerspule abwechselnd durch eine Bürste kurzgeschlossen wird, in ihr sehr bedeutende Ströme inducirt werden, welche auf die Magnete zurückwirken und starke Erhitzung und Funkenbildung verursachen. Zu diesen Mängeln kommt noch, dass in dieser Weise construirte Nebenschlussmotoren, abgesehen von Ausführungen für kleine Leistung, wegen ihres übermässig grossen Gewichts sehr unpraktisch sind. Dies rührt hauptsächlich von dem grossen Phasenunterschied zwischen Feld und Ankerströmen her, welcher veranlasst, dass die grösste magnetische Wirkung beider zu verschiedenen Zeitpunkten eintritt, wodurch die Zugkraft bedeutend vermindert wird.

Es sind viele Versuche gemacht worden, den Reihenmotor mit geblättern Feldmagneten zu verbessern, aber es hat sich herausgestellt, dass diese Art Motoren praktisch nicht über 5 Pferd stark und über 50 Perioden in der Secunde gebaut werden können. Um den scheinbaren Widerstand der Windungen zu vermindern, werden Condensatoren eingeschaltet oder es sind kurzgeschlossene, ent-

magnetisirende Spulen in die Polstücke eingelassen (Stanley und Kelly). Um die Funkenbildung zu verringern, sind Anker mit doppelter Wickelung benutzt worden, die so angeordnet waren, dass niemals eine Spule durch eine Bürste vollständig kurzgeschlossen wurde, sondern dass die letztere bloss den Widerstand des Ankers während der Drehung vermindert in dem Maasse, als eine Spule oder zwei parallel geschaltete von ihr berührt werden (Hutin und Leblanc). Am meisten haben sich die Motoren mit geblätternen Motoren von Ganz eingeführt, der sie bis zu 5 P baute. Sie liefen durchaus funkenfrei und verhielten sich, was Zugkraft und Geschwindigkeit anbelangt, genau wie Gleichstrommotoren mit Reihewickelung. Sie haben in beträchtlichem Maasse auf dem Continent Anwendung gefunden für Pumpen, Ventilatoren, Aufzüge und ähnliche Betriebe, wo es auf gleichmässige Geschwindigkeit nicht so sehr ankommt, dagegen grosse Zugkraft beim Anlaufen und beim Betriebe von der grössten Bedeutung sind. Der Wirkungsgrad eines dreipferdigen Motors dieser Art bei voller Belastung ist ungefähr 77 vom Hundert. Für grössere Leistungen als 5 P baut diese Firma ihre Einphasenmotoren nur nach der unten beschriebenen Inductionstypen.

Repulsionsmotoren.

Lassen wir durch ein Solenoid (Fig. 277) mit einem Bündel Eisendraht als Kern einen Wechselstrom gehen, so wird ein einfaches Wechselfeld erzeugt. Hängen wir in diesem Felde einen kupfernen Ring auf, wie es die Figur zeigt, so sehen wir¹⁾, dass

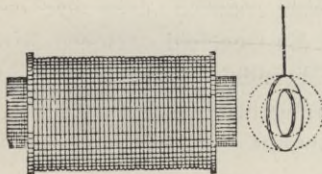


Fig. 277. Solenoid mit Kupferring.

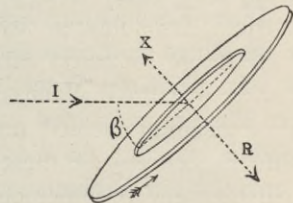


Fig. 278. Kupferring im Wechselfeld.

der Ring bestrebt ist, sich zu drehen, bis seine Ebene parallel zu den Kraftlinien steht, so dass er keine magnetischen Kraftlinien mehr einschliesst. Nur wenn der Ring in einer schrägen Lage aufgehängt wird, ist er bestrebt, sich zu drehen. Wenn er mit seiner Ebene genau im rechten Winkel zu den Kraftlinien steht, so bleibt

1) Elihu Thomson, Novel Phenomena of alternating Currents, Electrical World (N. Y.). 28. Mai 1887.

er stehen; aber die kleinste Verschiebung nach links oder rechts verursacht eine weitere Drehung, bis er parallel zu den Kraftlinien steht. Ist β der Winkel zwischen der Ebene der Spule und der Richtung des magnetischen Feldes (Fig. 278), so ist die elektromotorische Kraft, und also auch der Strom, der durch die Aenderung in der Feldstärke im Ring erzeugt wird, proportional mit $\sin \beta$. Nun ist das Drehmoment, welches auf die Spule wirkt, proportional ihrem Strom, der Feldstärke und dem Cosinus von β . Demnach ist es proportional dem Product $\sin \beta \cos \beta$. Das Bestreben, sich zu drehen, ist = 0 sowohl bei 0 Grad und bei 90 Grad; im ersteren Falle, weil kein Strom da ist, im zweiten, weil er keinen Hebelarm hat. Sein grösster Werth entspricht dem Winkel $\beta = 45$ Grad.

Auch in dieser Lage würden wir keine Drehung erhalten, wenn nicht die Ströme der Spule und des Ringes in der Phase gegen einander verschoben wären; denn die inducirte elektromotorische Kraft steht in Quadratur mit dem Felde. Wenn das Feld seinen höchsten Werth erlangt, so ist keine elektromotorische Kraft vorhanden, und wenn die elektromotorische Kraft ihren höchsten Werth besitzt, so ist kein Feld da. Aber wenn der Ring Selbstinduction besitzt, welche den Strom verzögert, so wird ein Drehmoment entstehen, welches β zu verkleinern strebt. Die grösste Zugkraft erhält man, wenn die Selbstinduction und der Widerstand des Ringes gegenüber der Wechselgeschwindigkeit des Stromes so abgeglichen sind, dass $2\pi nL = r$ ist, oder wenn die Verzögerung des Stromes im Ringe 45 Grad beträgt.

Diese Erscheinung lässt sich dadurch erklären, dass man sagt, der im Ringe inducirte Strom erzeuge ein Querfeld, welches gegen das vom primären Wechselstrom herrührende, ursprüngliche Feld einen Phasenunterschied und eine Drehung besitzt, und deshalb ein Drehfeld erzeugt; da dieses nun seinerseits auf den Leiter wirkt, so entsteht ein Drehmoment.

Ein genauerer Weg, die Vorgänge darzustellen, ist der folgende¹⁾: Wir nehmen an, der Ring schliesse mit der Richtung des vom Solenoid erzeugten ursprünglichen Feldes den Winkel β ein. Das den Ring thatsächlich durchsetzende Kraftlinienbündel ist die Resul-

1) Eine vollständige analytische Behandlung des Gegenstandes findet man bei G. T. Walker, Repulsion and Rotation produced by Alternating Electric Currents, Phil. Trans. Royal Society. 1892. A. S. 279. Vgl. auch J. A. Fleming, Electromagnetic repulsion, Proc. Royal Institution. Bd. 13, S. 296 (6. März 1891) und Journal of the Society of Arts. 14. Mai 1890.

tirende aus (1) der Componente des ursprünglichen Feldes, die zur Ebene des Ringes senkrecht steht, und (2) dem Querfeld, das die Ströme im Ring erzeugen. Das resultirende Feld gehorcht dem Sinusgesetz und kann durch die Curve *RR* (Fig. 279) dargestellt werden. Der Strom im Ring steht zu diesem der Phase nach im rechten Winkel und kann durch die punktirte Curve *II* angegeben werden, wobei der positive Sinn in der Richtung der Pfeile der Fig. 278 genommen wird. Das Querfeld lässt sich dann darstellen durch die Curve *XX*, und die zur Ringebene normale Componente des ursprünglichen Feldes wird von der Wellenlinie *UU* beschrieben, welche durch Subtraction der Curve *XX* von denen der Curve *RR* erhalten wird. Man sieht, dass das ursprüngliche Feld, welches natürlich seiner normalen Componente proportional ist, zu einem Theil mit dem Strom nahezu gleiche Phase hat, so dass ihr Product im Ganzen positiv ist; wendet man Fleming's Regel auf Fig. 278 an, so sieht man, dass die Zugkraft solche Richtung hat, dass sie β zu verkleinern bestrebt ist.

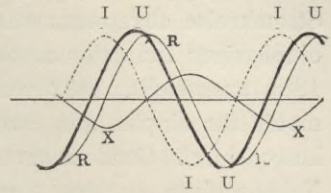


Fig. 279.

Elihu Thomson's Motor. Während seiner Untersuchung über die Wirkungen der Wechselströme¹⁾ beobachtete Elihu Thomson (1886—1887), dass ein kupferner Ring, der in ein magnetisches Wechselfeld gebracht wird, entweder das Bestreben zeigt, aus dem Felde zu gelangen, oder sich in gleiche Richtung mit den magnetischen Linien zu stellen. Es folgt hieraus, dass ein gewöhnlicher (z. B. ein Trommel-) Anker, der in ein Wechselfeld gebracht wird, und dessen Bürsten im Sinne der Voreilung in eine schräge Stellung gebracht und kurz geschlossen werden, sich drehen und eine bedeutende Kraft äussern wird. Einmal in Drehung versetzt, wird der Anker darin verbleiben, selbst wenn die Bürsten getrennt oder weggenommen werden, vorausgesetzt, dass die Wickelung in sich

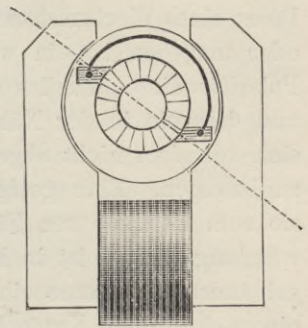


Fig. 280.

Elihu Thomson's Motor.

1) Elihu Thomson, Novel Phenomena of Alternating Currents. Electrical World (New York). 28. Mai 1887.

kurzgeschlossen ist. Indem er diese Anordnung weiter verfolgte, baute er Motoren (Fig. 280), bei denen Bürsten und Commutatoren nur zum Zwecke des Anlaufens benutzt und abgeschaltet wurden, wenn der Motor seine Geschwindigkeit erreicht hatte, wobei dann der Anker vollständig in sich kurzgeschlossen und vom übrigen Stromkreise abgetrennt war. Die Maschine arbeitete dann als reiner einphasiger Inductionsmotor. Ein Motor dieser Bauart war in Paris 1889 ausgestellt. 1892 wurde Elihu Thomson ein Wechselstrommotor für einphasigen Strom patentirt, in dem die drehende Wirkung durch Condensatoren zu Stande gebracht wurde, die im Nebenschluss zu den Spulen auf entgegengesetzten Magnetpolen geschaltet waren.

Motoren mit abgedeckten Polen. Durch eine weitere Untersuchung wies Elihu Thomson nach, dass, wenn die Hälfte des

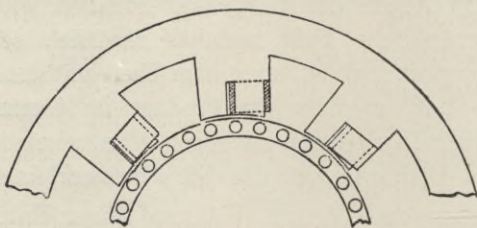


Fig. 281. Fächermotor mit abgedeckten Polen.

Poles eines Wechselstrommagnetes von einem Kupferblatt abgedeckt oder umgeben ist, in welchem Wirbelströme kreisen können, die Polarität dieses Theiles des Feldes in der Phase verzögert wird, und dass ein in der Nähe befindlicher Leiter das Bestreben erhält, sich von dem nicht abgedeckten Theile nach dem abgedeckten hin zu bewegen. Eine geeignete Einrichtung für kleine Motoren, wie sie zum Betriebe von Fächern oder für andere leichte Arbeit Verwendung finden, ist in Fig. 281 dargestellt. Eine Nut wird in die geblätternen Polkerne eingeschnitten und die Hälfte des Pols mit einem kräftigen Kupferband umgeben, das als Abdeckungsspule dient. In diesen Spulen werden Wirbelströme inducirt, welche fast genau um 90 Grad hinter der Phase des resultirenden Magnetfeldes, das sie durchdringt, zurückbleiben. Augenscheinlich muss daher dies resultirende Feld selbst hinter dem inducirten Felde zurückbleiben. Das letztere wird in zwei offenbar in Quadratur befindliche Componenten zerlegt, nämlich in das resultirende Feld und in das von der Gegenwirkung dieser Ströme herrührende Querfeld.

Es besteht also die Wirkung dieser Schutzspulen darin, dass sie um etwa 30 Grad oder mehr die Phase des Feldes verzögern. Die Wirkung ist demnach so, als wie wenn der Pol von dem ungeschützten zu dem geschützten Theile in regelmässiger Folge bei jedem Wechsel hingedrängt würde; der Läufer, der von einfacher Käfigform ist, wird daher fortwährend in Drehung gehalten.

Ferranti und Wright's Motor. Wenn das eine Ende eines zertheilten Eisenstabes in eine mit Wechselstrom gespeiste Magnetisierungsrolle gesteckt wird, so erfährt der Stab eine wechselnde Magnetisierung. Wenn aber der Stab an einem Punkte in einiger Entfernung von der Spule von einem dicken Kupferring oder einer kupfernen Fassung umgeben wird, so wirken die in letzterem erzeugten Wirbelströme, welche andere Phase als der primäre Strom haben, in ihrer nächsten Umgebung auf die wechselnde Magnetisierung und verzögern die Phase der magnetischen Polarität an allen Punkten jenseits des Ringes.

Wenn also zwei oder drei solcher geschlossenen Ringe oder Bänder aus Kupfer den Eisenkern an verschiedenen Punkten umgeben, so wird die Wirkung dieselbe sein, als wenn die Pole längs des Eisens mit einer begrenzten Geschwindigkeit wandern, als wenn auf einen Nordpol ein Südpol und wieder ein Nordpol folgte, jeder nach dem Ende wanderte und dort verschwände.

Auf dieser Erscheinung ist der Ferranti-Wright'sche Motor gegründet; er wird benutzt in Ferranti's Wechselstromzählern. Eine drehbar gelagerte eiserne Scheibe befindet sich zwischen zwei gebogenen Polschuhen aus zertheiltem Eisen, von denen jeder von Verzögerungsringen aus Kupfer umgeben ist, wie Fig. 282 zeigt.

Shallenberger's Motor. Dieser Motor, der gleichfalls in einem Wechselstromzähler verwendet wird, versetzt eine eiserne Scheibe in Drehung durch eine sehr hübsche Methode, einen Wechselstrom unter Phasenverschiebung zu theilen.

Die Scheibe wird zwischen zwei Spulen mit rechteckiger Oeffnung gebracht, innerhalb deren sich eine geschlossene Spule befindet, die gleichfalls über und unter der Scheibe herumgreift; diese geschlossene Spule besteht aus gestanzten kupfernen Spangen und wird unter etwa 45 Grad schräg gegen die Hauptspulen gesetzt, von denen sie inducirte Ströme empfängt. Läge sie parallel zur

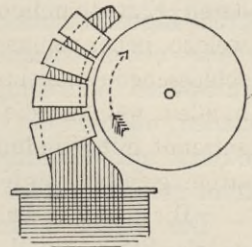


Fig. 282. Ferranti und Wright's Motor.

Hauptspule, so würde sie stärkere inducirte Ströme erhalten, aber keine drehende Wirkung hervorbringen; läge sie senkrecht zur Hauptspule, so würden keine Ströme in ihr inducirt werden und sie würde demnach auch keine drehende Wirkung haben. Da ihre Ströme ein wenig hinter der vollständig entgegengesetzten Phase verzögert sind, so gibt ihre schräge Stellung eine Componente zu dem Felde, welche Drehung hervorruft; das resultirende Drehfeld ist aber in Wirklichkeit ein elliptisches (vgl. S. 312).

Bei einer neueren Form dieser Zähler besteht der Motor aus einer Kupferscheibe, die zwischen Spulen liegt, die versetzt gegen einander sind und von Strömen verschiedener Phase gespeist werden (vgl. Patentbeschreibung).

Atkinson's Motoren. Llewellyn B. Atkinson (von der Firma Goolden & Co.) erfand 1888¹⁾ einige Wechselstrommotoren, deren Eigenthümlichkeit in zwei Läufern (oder Ankern) bestand, welche neben einander auf der Achse befestigt waren; ihre geschlossenen Wickelungen waren unter einander über Kreuz verbunden, während die beiden feststehenden Feldmagnete von einander getrennt mit Windungen versehen waren, durch die der Wechselstrom geleitet wurde.

Die beiden Anker dienten abwechselnd als Transformatoren, welche Ströme in die Windungen des Nachbarankers sendeten und auf diese Weise eine Drehung erzeugten, ohne dass ein Drehfeld vorhanden war. Später hat Atkinson diese und einige andere Formen in einem Vortrag²⁾ vor der Institution of Civil Engineers beschrieben.

T. Duncan's Motor. Dies ist eine zwischen Shallenberger's und Ferranti's Motor liegende Form, indem die schräge Spule des ersteren durch einen schrägen Eisenkern ersetzt wird, dessen Enden mit drosselnden Kupferringen umgeben sind. Er lässt sich in dreiphasigen Stromkreisen verwenden und ist zum Gebrauche in Elektricitätsmessern bestimmt.

1) Englische Patente Nr. 16852 von 1888 und Nr. 7895 von 1889.

2) Atkinson, Proc. Inst. Civil Eng. Bd. 133, Th. III; Engineer Bd. 80, S. 218, 1898.

Kapitel XIV.

Mehrphasige Transformatoren.

Die Gesetze, nach denen mehrphasige Ströme in solche höherer oder niederer Spannung umgewandelt werden, unterscheiden sich wenig von denen, die für einphasige Ströme gelten. Die Regel,

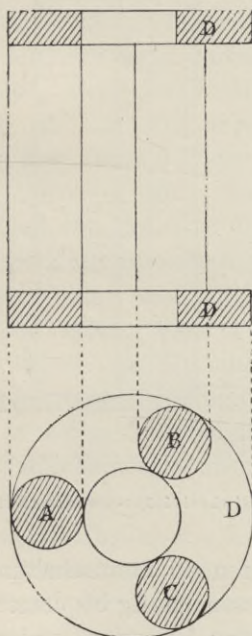


Fig. 283.

Dreiphasen - Transformator.

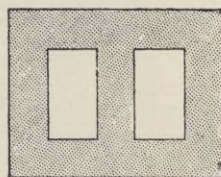


Fig. 284.

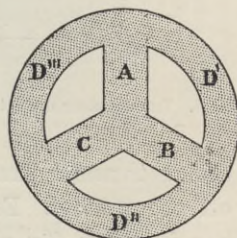


Fig. 284.

wonach das Verhältniss E_1/E_2 zwischen den elektromotorischen Kräften im primären und secundären Kreise gleich dem Verhältniss der Windungszahlen N_1/N_2 ist, lässt sich natürlich auf jeden Fall anwenden, wo Spulen auf denselben magnetischen Kreis aufgewickelt

sind, und die Regeln über die Verluste im Kupfer und Eisen gelten ebenso für mehr- wie für einphasige Ströme. Thatsächlich liesse sich (und es geschieht auch sehr oft) die Umwandlung mehrphasiger Ströme gänzlich mit gewöhnlichen einphasigen Transformatoren ausführen; es wäre nur nöthig, in jeden der mehrphasigen Stromkreise einen Transformator zur Erhöhung oder Erniedrigung der Spannung bis zum gewünschten Betrage einzuschalten. Eine derartige Anord-

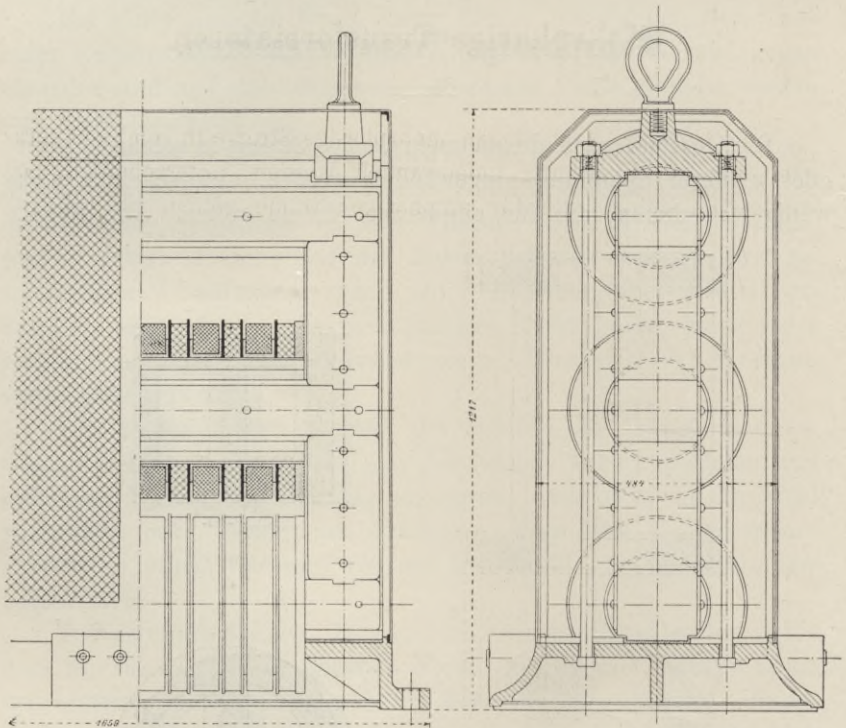


Fig. 286/87. Transformator der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

nung mit drei getrennten Transformatoren (in Sternschaltung) wird jetzt sehr oft angewendet. Es ist indessen häufig bequemer, einen einzigen Transformator für alle Kreise zu benutzen, und zugleich wird hierdurch eine Ersparniss an Material erzielt. Wie beim dreiphasigen Betriebe drei von den sechs zu Anfang gebrauchten Drähten weggelassen werden können und eine Ersparniss an Kupfer erzielt wird, indem man die drei Drähte in einem Punkte verbindet, so wird beim Transformator dadurch eine entsprechende Ersparniss an Eisen erzielt, dass die Kerne, um die die verschiedenen Stromkreise

herumführen, an jedem Ende eine gemeinsame Verbindung haben. Fig. 283 zeigt schematisch einen Transformator, in dem die Kerne ABC in dieser Weise an jedem Ende mit einer gemeinsamen Verbindung versehen sind. Um die Kerne in geeigneter Weise zertheilen zu können, ist es üblich, sie aus gestanzten Eisenblechen der in Fig. 284 und 285 gezeichneten Form aufzubauen. Wenn die Spulen um A , B und C gewickelt werden, so werden die Kraftlinien in diesen Kernen einer Formel folgen, die derjenigen der erzeugenden Ströme ähnlich ist; d. h. es wird ein dreiphasiges Kraftlinienbündel entstehen, dessen drei Zweige einen Phasenunterschied von 120 Grad anweisen. Man sieht, dass die Theile D' , D'' und D''' in Fig. 285 eine Netzschaltung für die Wege A , B und C bilden; es wird also ein Unterschied von 120 Grad in den Phasen der Kraftlinien eines jeden von ihnen sein; und allgemein kann man sagen, dass Fig. 55 (S. 54), welche die Beziehungen der Grösse und der Phase der Ströme in einem Netzstromkreise darstellt, sich auch anwenden lässt auf die Kraftlinienbündel in den verschiedenen Theilen des Kernes, den Fig. 285 zeigt, wo A , B und C die Stelle der Leitungen und D' , D'' und D''' die Verbindungsmaschen einnehmen. Wir können D' , D'' und D''' als Kerne des Transformators statt A , B und C nehmen, oder wir können beide Sätze oder nur einen mit primären oder secundären Spulen bewickeln, diese Spulen können in Stern- oder Netzschaltung vereinigt werden, und so ist eine grosse Zahl verschiedener Zusammenstellungen möglich.

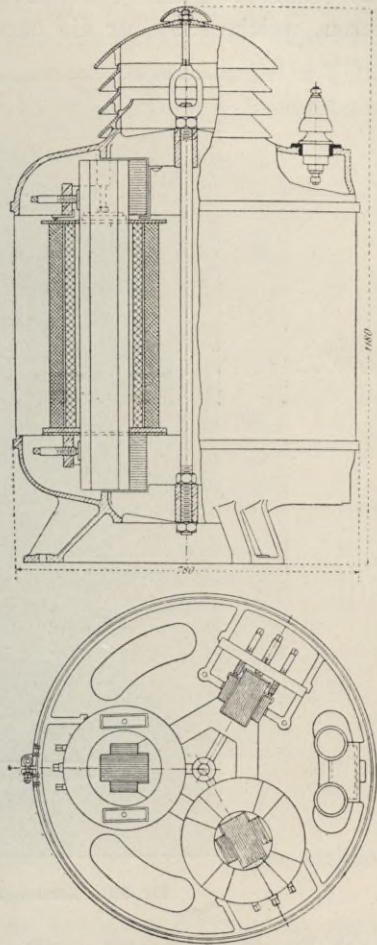


Fig. 288/89. Transformator im Gehäuse, von Siemens & Halske.

Die wirklich im Dreiphasensystem gebrauchten Transformatoren bestehen gewöhnlich aus drei senkrechten Säulen von zertheiltem Eisen, deren Enden durch gemeinsame Jochstücke verbunden sind; die primären und secundären Spulen sind in der üblichen Art auf die senkrechten Theile des Kernes aufgewickelt. Die Transformatoren, welche 1891 für die berühmte Kraftübertragung von Lauffen

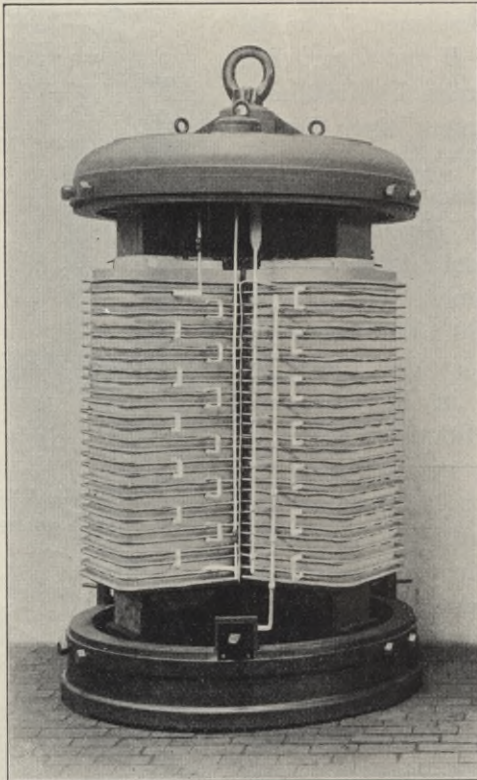


Fig. 290. Kerntransformator von Schuckert.

nach Frankfurt benutzt wurden, und die noch jetzt der Stromversorgung von Heilbronn dienen, sind auf S. 386 des Amtlichen Berichtes abgebildet, auf den später im Kap. XX Bezug genommen wird. Sie waren bestimmt, von 15000 auf 100 Volt oder umgekehrt zu transformiren, erlaubten aber verschiedene Schaltungen. Die Anordnung der Stromkreise wird in Kap. XX gezeigt. Die gemeinsame Verbindung der Hochspannungs- und der Niederspannungsspule war in jedem Falle an Erde gelegt.

Einige neuere Formen von Dreiphasen-Transformatoren sind in den Fig. 286—293 dargestellt.

Fig. 286 und 287 ist ein Transformator liegender Bauart der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft in Berlin. Derselbe ist für eine Leistung von 100 KW bei 50 Perioden in der Secunde gebaut. Die Wicklungen sind auf einzelnen Spulen in cylindrischer Form hergestellt und werden sorgfältig von einander isolirt auf die langen Kerne geschoben; erst dann werden die mit bearbeiteten

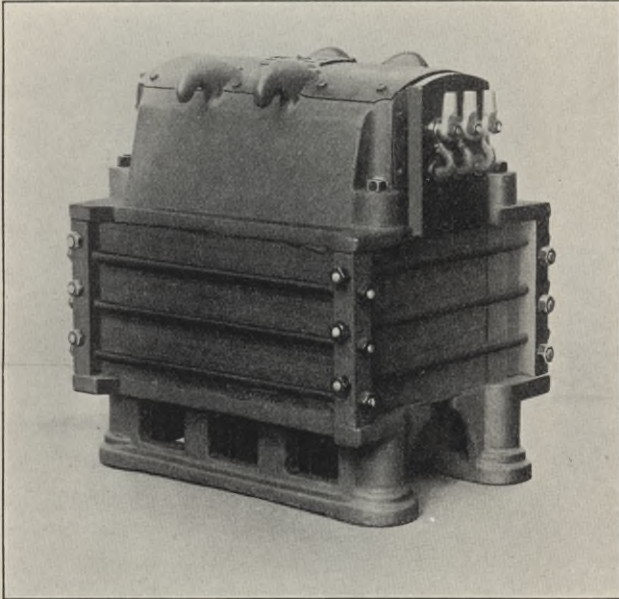


Fig. 291. Manteltransformator von Schuckert.

Flächen versehenen Jochstücke eingesetzt und dadurch der magnetische Kreis geschlossen.

Die Fig. 288 und 289 zeigen im Aufriss und Grundriss teilweise geschnitten einen Drehstrom-Transformator von Siemens & Halske in Berlin, der für eine Aufstellung im Freien bestimmt und daher in ein verschliessbares Gehäuse eingesetzt ist. Er ist für eine Leistung von 20 KW bei 50 Perioden in der Secunde bestimmt.

Fig. 290 zeigt einen Kerntransformator der Electricitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. für mittlere Leistung. Für kleinere und für ganz grosse Leistungen bevorzugt diese Firma

die Mantelform, und zwar werden die grösseren Transformatoren normal als Oeltransformatoren gebaut. In besonderen Fällen werden diese grösseren Transformatoren mit Wasserkühlung versehen. Die Fig. 291 zeigt einen solchen Manteltransformator in Ansicht, Fig. 292 in zerlegtem Zustande. In dieser letzteren Figur ist die Anordnung der Wickelung ersichtlich. Die Kammer im oberen Theile dient zur Aufnahme der Verbindungen der einzelnen Spulen.

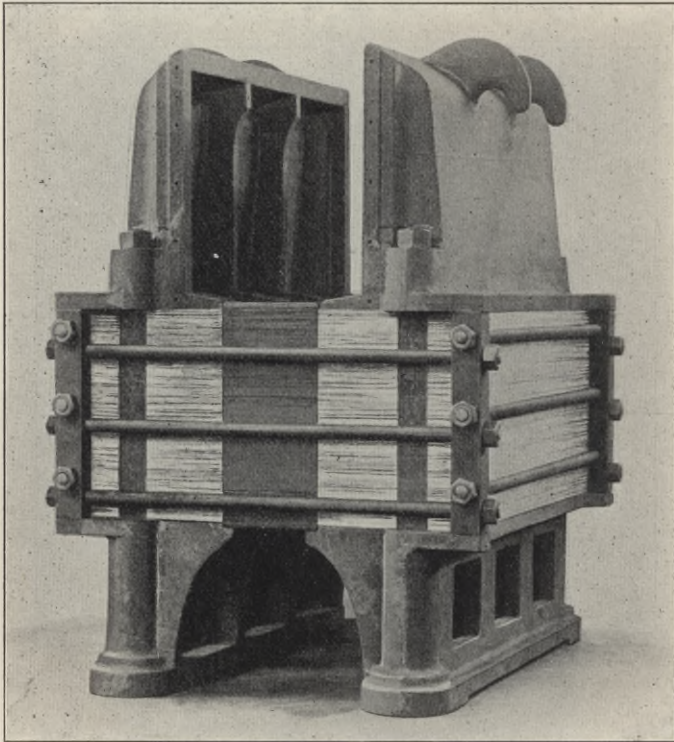


Fig. 292. Manteltransformator von Schuckert, zerlegt.

Fig. 293 zeigt einen Drehstrom-Transformator der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M. Die drei Kerne haben einen nahezu kreisförmigen Querschnitt, sie sind aus dünnen Eisenblechen mit isolirenden Zwischenlagen aufgebaut und werden in senkrechter Anordnung zwischen zwei horizontal liegenden Platten von gleicher Zusammensetzung eingepresst. Die Kerne sind von je einer primären und secundären Wickelung umgeben.

Die Niederspannungswickelung besteht bei den Transformatoren für hohe Stromstärke aus einer Flachkupferspirale, welche auf eine starke Hülse aus einem Glimmerpräparat gewickelt ist. Ueber die Niederspannungswindungen ist wiederum ein Hohleylinder aus einem vorzüglich isolirenden Glimmerpräparat geschoben, wodurch die Hoch-

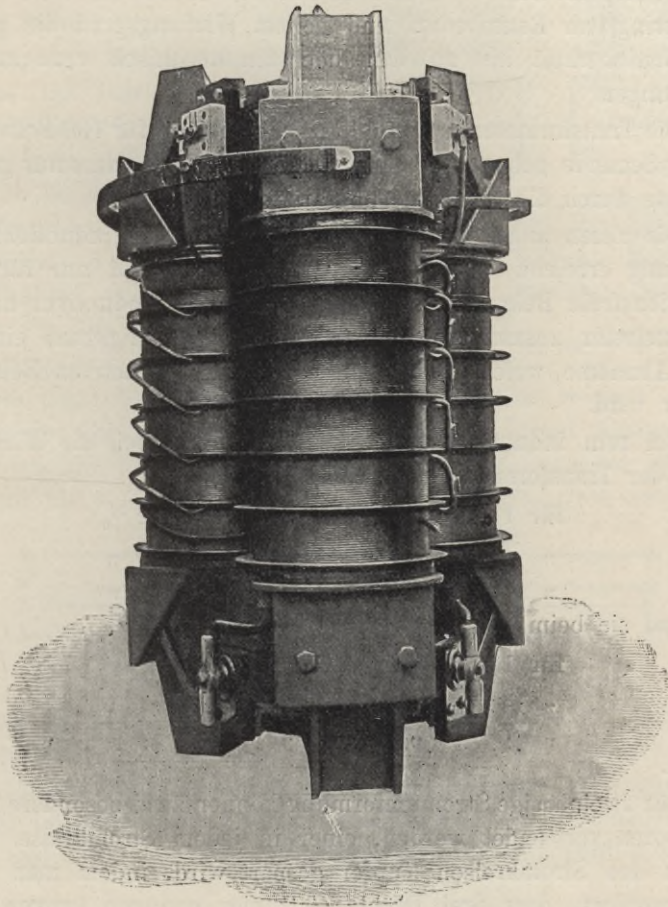


Fig. 293. Transformator von Lahmeyer.

spannungsspulen von den Niederspannungswindungen getrennt sind und ein Ueberschlagen des Hochspannungs- zum Niederspannungs-Stromkreise ausgeschlossen ist. Die Hochspannungswindungen sind auf mehrere hinter einander geschaltete Spulen aufgewickelt, deren jede für sich abnehmbar ist. Die Anzahl der Spulen ist derart gewählt, dass an den Enden jeder Spule eine Spannung von nicht

mehr als 300—400 Volt herrscht, also ein Durchschlagen der Spule in sich kaum vorkommen kann. Die Spulen sind von einander gut isolirt, wodurch eine hohe Betriebssicherheit erreicht wird.

Die vorstehend beschriebene Anordnung ermöglicht es, den Transformator ohne Schwierigkeit auseinander zu nehmen, wodurch etwaige Reparaturen wesentlich erleichtert werden; sie bietet ferner bei geringstem Raumbedarf und hohem Wirkungsgrad die grösste Betriebssicherheit bis zu den höchsten technisch verwendbaren Spannungen.

Die Transformatoren werden im Allgemeinen für 100 Polwechsel in der Secunde gebaut und sind derart berechnet, dass nur geringe Verluste durch die Magnetisirungsarbeit entstehen.

Die unten angegebene Leistung wird nur bei inductionsfreier Belastung erreicht. Ebenso gilt der Wirkungsgrad nur für volle inductionsfreie Belastung; setzt sich diese aus inductiver und inductionsfreier zusammen, so erleidet der Wirkungsgrad eine geringe Abnahme, welche mit dem Antheile der inductiven Belastung grösser wird.

Bei rein inductionsfreiem Betriebe stellen sich die Wirkungsgrade der Transformatoren bei voller Belastung

für 1—2 KW	zwischen	91	und	92 %
„ 2—7 „	„	93	„	95 „
„ 7—100 „	„	96	„	97 „

während sie beim Betriebe asynchroner Motoren

für 1—2 KW	um	3 %
„ 2—7 „	„	etwa 2 „
„ 7—100 „	„	1 „

sinken.

Für zweiphasige Stromumformung können zwei besondere Transformatoren verwendet werden, einer in jedem Stromkreise. Aber wie in den Stromkreisen Kupfer gespart wird, indem man sie so zusammenlegt, dass drei Drähte statt vier genügen (wovon einer als gemeinsame Rückleitung für die beiden anderen etwas grösseren Querschnitt hat), so wird auch Material gespart, indem man die beiden eisernen Kreise vereinigt, so dass sie einen Theil gemeinsam haben. Die richtige Anordnung und Schaltung der Spulen zeigt schematisch Fig. 294.

Der geeignete Querschnitt für den gemeinsamen Theil des Eisens ist $\sqrt{2}$ mal so gross wie derjenige der getrennten Theile, wenn

dieselbe höchste Kraftliniendichte im Eisen erreicht werden soll; bei dreiphasiger Anordnung würde der Querschnitt $\sqrt{\frac{3}{2}} = 1,23$ mal so gross sein müssen.

In solchen Fällen, wo in einem zweiphasigen Stromerzeuger die Netzschaltung verwendet wird, kann man keine gemeinsame Rückleitung benutzen; für jeden der beiden Stromkreise müssen zwei Leitungen hergestellt werden. Aber wenn an beiden Enden der Leitung Transformatoren eingeschaltet werden, so braucht man nur drei Drähte. Diese Anordnung, welche Fig. 295 darstellt, ist von Schuckert & Co. 1891 in Frankfurt bei einer Kraftübertragungsanlage ausgeführt worden.

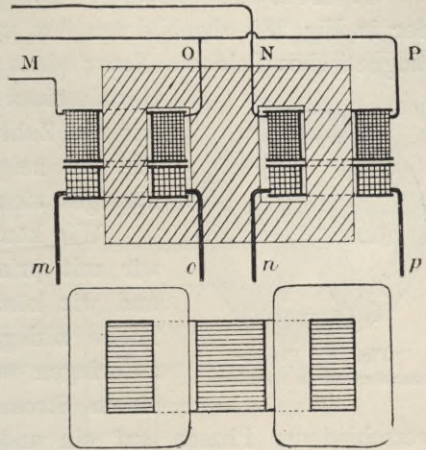


Fig. 294.

Neuere Erfahrungen scheinen indessen darauf hinzuweisen, dass man am besten beide Phasen völlig von einander getrennt hält und für jede Phase einen besonderen Transformator verwendet,

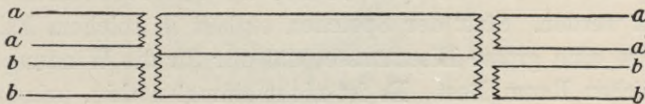


Fig. 295. Zweiphasen - Uebertragung mit drei Drähten.

da sonst die Spannungsregelung Schwierigkeiten bietet. Nur wenn die Stromstärke sehr klein ist, wenn also z. B. ein einzelner Motor seine eigenen Transformatoren erhält und die Länge der secundären Leitung bedeutend ist, können die Rückleitungen mit einander vereinigt und dem Motor der Strom durch drei Drähte zugeführt werden.

Phasentransformation.

Bisher hat es sich um die Umwandlung der Spannung eines gegebenen Systems von Strömen gehandelt. Aber wir haben noch einen anderen Gegenstand zu behandeln, nämlich die zweiphasigen Ströme in dreiphasige und umgekehrt zu verwandeln.

Wie einfach diese Aufgabe zu lösen ist, werden wir leicht verstehen, wenn wir die oben begonnenen Gedanken weiter führen.

Es gibt mehrere Methoden, durch die man das gewünschte Resultat erhalten kann.

1. Methode von S. P. Thompson. Wenn ein Transformator der in Fig. 285 abgebildeten Art in Thätigkeit ist, so besitzt sein magnetisches Feld die Natur eines Drehfeldes. Der Kern hat die Gestalt eines Rades mit drei Speichen. Wenn wir die Zahl der Speichen vermehren, wie Fig. 296 zeigt, so erhalten wir ein gleichmässiges sich drehendes magnetisches Feld.

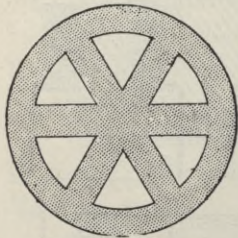


Fig. 296. Phasen-
transformator in Sternform.

Wir können so viel Speichen haben, als wir mit primären Spulen bewickeln wollen und wir können den Radreifen in so viele Theile zerlegen, als wir secundäre Spulen aufbringen wollen, und so können wir von einem Stromsystem mit irgend einer Zahl

verschiedener Phasen auf ein anderes System mit einer anderen Phasenzahl übergehen, vorausgesetzt, dass wir mit mehr als einer Phase anfangen, damit wir ein Drehfeld und nicht nur ein Wechselfeld erhalten.

Denselben Erfolg können wir auch erzielen, indem wir den Radreifen in eine bestimmte Zahl Theile zerlegen, die mit primären Spulen, und eine andere Zahl Theile, die mit secundären Spulen bewickelt werden. Statt der Speichen enthält in solchem Falle der Innenraum eine grosse Eisenmasse, die nur für die Windungen den erforderlichen Raum lässt. Es ist nicht einmal nöthig, primäre und secundäre Spulen zu verwenden; wenn auf dem Radreifen sich eine geschlossene Wicklung, wie die eines Gramme'schen Ringes befindet, und Drähte des einen Stromsystemes in gleichen Abständen rings um diese Wicklung angelegt werden, so kann man ein Stromsystem von einer anderen Phasenzahl abnehmen, indem man nur die entsprechende Zahl Drähte in der gleichen Weise an die Wicklung legt. Nach dieser Methode wurde zuerst vom Verfasser die Umwandlung vom dreiphasigen auf zweiphasigen Strom in einem vor der Royal Institution am 23. Februar 1894 gehaltenen Vortrage über die Umwandlung elektrischer Ströme gezeigt. Bei jener Gelegenheit wurde ein Ringtransformator (Fig. 297) mit zwölf zu einem geschlossenen Kreise in Reihe geschalteten Spulen mit einer dreiphasigen Speiseleitung an drei gleichweit von einander entfernten Punkten *P*, *Q* und *R* verbunden. Ein Wechselstrom konnte von den beiden Enden jedes beliebigen Durchmessers abgenommen

werden, z. B. von AA , während zur gleichen Zeit ein anderer, an Spannung gleicher Wechselstrom an den Enden eines zweiten, zum ersten senkrechten Durchmesser BB weggeleitet wurde. Da hier die zweiphasigen Spulen 180 Grad überspannen, die dreiphasigen nur 120 Grad, so stehen die Spannungen im Verhältniss $1:0,75$; sie sind (wenn die Vertheilung der Kraftlinien um den Rand einer Sinusformel folgt) proportional mit $1 - \cos \beta$, worin β die Winkelbreite bedeutet.

Durch einen derartigen Apparat kann jede beliebige Phasentransformation ausgeführt werden. Der magnetische Kreis wird be-

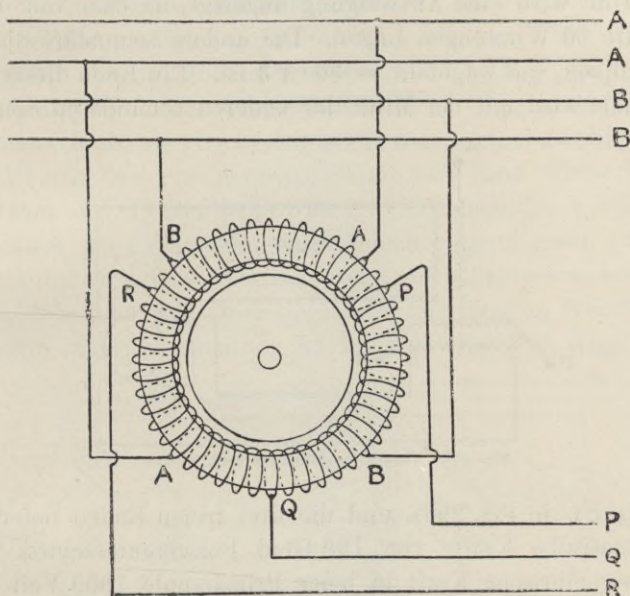


Fig. 297. Phasentransformation nach S. P. Thompson.

deutend verbessert, wenn man dem Ring ein eisernes, gehörig zertheiltes Mittelstück einsetzt, das entweder umläuft oder feststeht.¹⁾

Wenn ein zweiphasiger Motor mit einem dreiphasigen Läufer versehen ist, der zur Einschaltung von Widerständen beim Anlaufen mit Schleifringen ausgerüstet ist, so bietet eine solche Anordnung ein praktisches Beispiel für die Umwandlung von Zweiphasenstrom in Drehstrom. Ein solcher Apparat kann als Stromumwandler dienen, und an den Schleifringen dreiphasige Ströme abgeben.

1) Vgl. des Verfassers brit. Pat. 10565 von 1894, und eine ähnliche Anordnung von Potier in L'Industrie Electrique vom 10. Mai 1896, S. 197.

2. Methode von Scott. Wenige Tage später, am 1. März 1894, schlug C. F. Scott, Elektriker der Westinghouse Company, auf der amerikanischen National Electric Light Association zu Washington eine andere Lösung für dieselbe Aufgabe vor, wobei zwei Transformatoren gebraucht wurden. Die Anordnung, welche nöthig ist, um vom Zweiphasen- auf Dreiphasenstrom überzugehen, wird, wie folgt, beschrieben: Die primären Spulen zweier Transformatoren werden mit einem Stromerzeuger verbunden, der Zweiphasenstrom gibt. Die elektromotorischen Kräfte haben demnach 90 Grad Phasenunterschied. Eine secundäre Spule bekommt 100 Windungen, und in der Mitte wird eine Abzweigung angelegt, so dass von da nach jeder Seite 50 Windungen liegen. Die andere secundäre Spule hat 87 Windungen, was ungefähr $= 50 \cdot \sqrt{3}$ ist. Ein Ende dieser secundären Spule wird mit der Mitte der anderen secundären Spule ver-

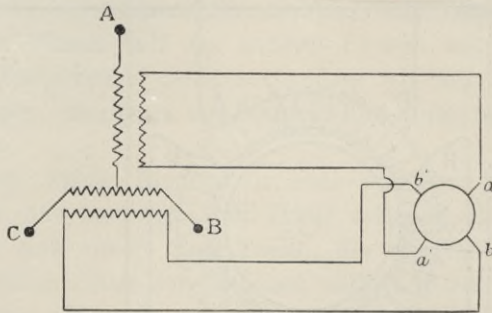


Fig. 298. Phasentransformation nach Scott.

bunden (ABC in Fig. 298), und die drei freien Enden liefern dann elektromotorische Kräfte von 120 Grad Phasenunterschied. Wenn die elektromotorische Kraft in jeder Primärspule 1000 Volt ist, in der einen Secundärspule 100, in der anderen 87 Volt, so ist die elektromotorische Kraft zwischen irgend zwei Enden der secundären Spulen 100 Volt. Von dieser Methode ist bei der Niagara-Buffalo und der Chambly-Montreal Kraftübertragung (vgl. Kap. XVII) Gebrauch gemacht worden. Der am Niagara erzeugte zweiphasige Strom wird in einen dreiphasigen umgewandelt und auf drei Drähten nach Buffalo geleitet, wodurch eine beträchtliche Ersparniss an den Kosten der Leitung erzielt wurde.

3. Methode von Ferraris und Arno. Diese Methode der Phasenumwandlung schliesst sich an die unter 1. erwähnte an. Wenn ein einphasiger Motor oder ein zweiphasiger, bei welchem nur einer von den zwei Stromkreisen benutzt wird, von einem

einphasigen Wechselstromkreise gespeist wird, ist sein Läufer (von Käfigform) gleichwerthig einem umlaufenden Magnete und drängt das magnetische Feld im gleichen Maasse seitwärts, wie er sich selbst dreht. Wenn dann, wie in Fig. 299 dargestellt ist, die zu einem Stromkreis einer solchen Anordnung gehörigen Spulen *AA* mit den Hauptleitungen eines Wechselstromkreises verbunden werden und der Läufer in Bewegung gesetzt wird, so werden in den Spulen *BB* des zweiten Kreises elektromotorische Kräfte erzeugt, welche praktisch gegen die des Stromkreises *AA* in Quadratur stehen, so dass, während die Maschine als Einphasenmotor läuft, sie gleichzeitig als Erzeuger eines zweiten Stromes wirkt, der mit dem ersten ausser Phase ist. Eine solche Maschine kann daher als Phasentheilertransformator benutzt werden. Sie könnte auch ganz allgemein dazu dienen, irgend einen gegebenen Wechselstrom in andere Wechselströme mit beliebiger anderer Phase umzuwandeln oder mit einer gegebenen einphasigen Wechselstromquelle eine Mehrphasenleitung zu speisen. Fig. 300 zeigt, wie die

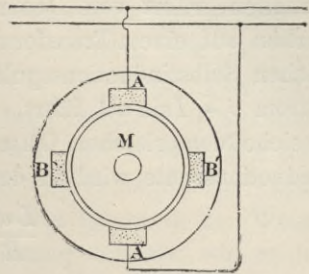


Fig. 299. Phasentransformation nach Ferraris & Arno.

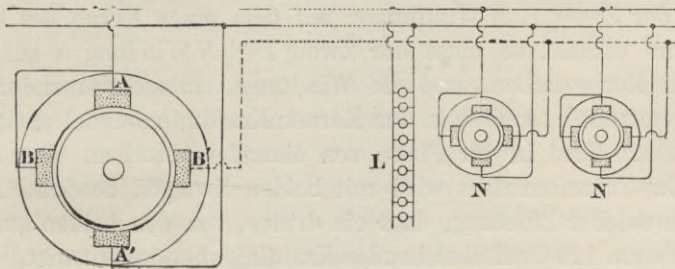


Fig. 300.

Anordnung zu treffen ist, um Zweiphasenmotoren aus einem einphasigen Stromkreise zu speisen.

Methoden zur Umformung gewöhnlicher einphasiger Wechselströme in zwei- oder dreiphasige. Wenn der Läufer eines einphasigen Motors so gebaut ist, dass seine in Stern geschaltete Wickelung an drei Schleifringe geführt ist, wie es oft zum Zwecke des Einschaltens von Anlaufwiderständen geschieht, werden die Ströme im Läufer Dreiphasenströme sein. Wenn aber der Läufer synchron liefe, so würde die elektromotorische Kraft

in seinen Leitern gleich Null sein. Die beste Anordnung besteht darin, eine zweite Wickelung auf dem Ständer anzubringen.

Die folgende Methode, dreiphasige Ströme aus einphasigen zu erhalten, rührt von Désiré Korda her. Sie beruht im Wesentlichen auf einem Transformator mit drei Kernen und einer beweglichen Selbstinductionsspule. Der Stromkreis, der den einphasigen Strom $i = I \sin \omega t$ führt, wird in zwei Zweige I und II geteilt, welche den gleichen Ohm'schen Widerstand haben. Eine Selbstinductionsspule wird in den Zweig II eingeschaltet, so dass

$$\frac{L\omega}{R} = \sqrt{3} = \operatorname{tg} 60^\circ \quad \dots \quad (1)$$

Der Strom im Zweige I lässt sich ausdrücken durch

$$i_1 = \frac{E}{R} \sin \omega t,$$

der Strom in II durch

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi) \\ &= \frac{E}{2R} \cdot \sin(\omega t - \varphi), \end{aligned}$$

d. h. i_2 ist die Hälfte von i_1 , so lange Gleichung (1) erfüllt ist. Wenn der Zweig II N Windungen auf dem einen Kerne des Transformators enthält, so muss der Zweig I $\frac{1}{2}N$ Windungen auf dem anderen Kerne haben, und die Windungen müssen einander entgegengesetzt sein, so dass in den Kernen Kraftlinienbündel entstehen, die um 120 Grad in der Phase von einander abstehen. Der dritte Kern des Transformators wird mit beiden Zweigen bewickelt, und zwar in solcher Richtung, dass ein drittes, von den beiden anderen abermals um 120 Grad abstehendes Kraftlinienbündel entsteht. Dann erhält man Dreiphasenstrom aus den Secundärspulen, die auf die drei Kerne aufgewickelt sind.

Bradley¹⁾ hat ebenfalls verschiedene Methoden erdacht, um mehrphasige Ströme aus einphasigen zu erhalten. Wir wollen eine dieser Methoden genauer beschreiben. Sie besteht darin, dass man zwei Transformatoren anwendet, von denen wir den einen den einfachen, den anderen den zusammengesetzten Transformator nennen wollen. Diese werden in Fig. 301 als S bzw. C bezeichnet. A ist der Wechselstromerzeuger, D ein Condensator und M ein Drehstrom-

1) Amer. Inst. Electr. Eng. Sept. 1895; Electr. World, Bd. 26, S. 372. 1895.

motor. Der Strom der Wechselstrommaschine durchläuft zunächst die Primärwicklung r von S und geht dann durch den einen Theil l der Primärwicklung von C , und in Parallelschaltung hierzu über den Theil n und den Condensator D zur Maschine A zurück. Die Capacität des Condensators D wird so bemessen, dass das Feld im Kern von C um annähernd 90 Grad in der Phase von demjenigen in S abweicht. Dies wird wie folgt erreicht. Der Strom von r theilt sich in zwei Theile. Der Theil in l wird wegen der Inductanz verzögert, der Theil in D läuft voraus wegen der Capacität (beide zusammen ergeben natürlich den Strom in r). Wenn nun der Strom in n in umgekehrter Richtung verläuft, wie es in der That der Fall sein muss, wenn man ihn als einen durch die Gleichstromspule nl verlaufenden Strom betrachtet, so haben wir einen Strom in der Primärwicklung nl , der um 90 Grad gegen den in r zurückbleibt. Um Dreiphasenströme aus den beiden Trans-

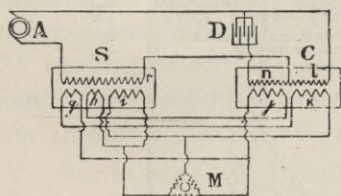


Fig. 301.

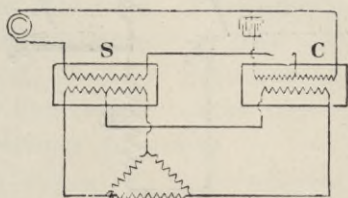


Fig. 302.

formatoren zu erhalten, sind verschiedene secundäre Spulen, die mit g , h , i , j und k bezeichnet sind, auf diese Transformatoren aufgebracht und in der Weise, wie es die Figur zeigt, geschaltet. Diese besondere Methode, die secundären Spulen auf Kernen zu wickeln und zu schalten, deren Felder um 90 Grad in der Phase von einander verschieden ist, rührt von Hunting her. Die Spule i liefert eine von den drei Wechselstromspannungen. Die Spule k liefert eine elektromotorische Kraft, die um 90 Grad voraus ist und die mit der elektromotorischen Kraft von g vereint eine Gesamtphasenverschiebung von 120 Grad gibt. In ähnlicher Weise ist die Spule j , welche eine um 90 Grad hinter i zurückbleibende elektromotorische Kraft liefert, in Reihe mit der Spule h geschaltet, welche gerade so viele Windungen hat, dass die gesammte elektromotorische Kraft um 120 Grad nach rückwärts verschoben ist.

Die Schaltung der secundären Wickelungen von Scott, auf Bradley's Schaltung der Primärspulen angewendet, ist in Fig. 302 dargestellt. Der Condensator erfüllt bei dieser Anordnung zwei

sehr wichtige Aufgaben. Er unterstützt zunächst die Phasenverschiebung und verhindert zweitens eine Verzögerung im Stromkreise. Bei einem Motor von $\frac{1}{2}$ P, den Bradley nach dieser Methode betrieb, war der Leistungsfactor sehr gross. Der Strom in der den Transformator speisenden Hauptleitung war bei voller Belastung um 90 Grad voraus, bei Leerlauf um 35 Grad zurück. Hierbei war die Leistung des Motors beim Anlaufen dieselbe wie bei voller Belastung. Die Phasenverhältnisse waren also in beiden Fällen gleich gut. Die Capacität des Condensators für einen $\frac{1}{2}$ P-Motor war bei 1000 Volt Speisespannung des Transformators ungefähr 2,4 Mikrofarad.

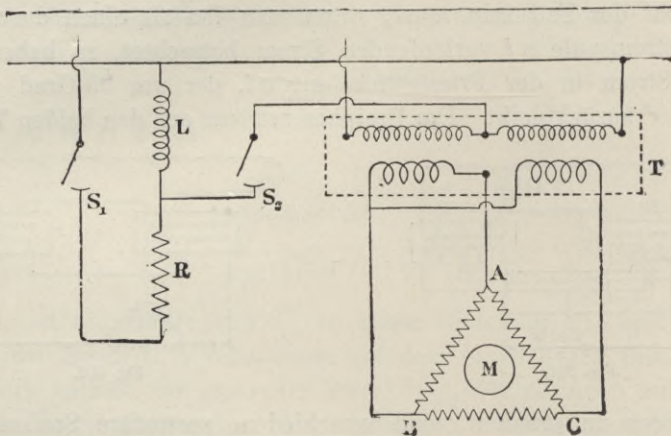


Fig. 303.

Der Condensator erforderte ohne die Verbindungen einen Raum von 11 cm Seite und konnte 3000 Volt aushalten.

Wenn ein Condensator in dieser Weise in einem Hochspannungsstromkreis verwendet werden kann, braucht seine Capacität nicht so gross zu sein, wie wenn er bei einem Motorstromkreis von geringerer Spannung gebraucht wird, weil die Leistung des Condensators bei gegebener Capacität proportional dem Quadrate der Spannung ist.

Eine andere sinnreiche Methode, Einphasen- in Mehrphasenstrom umzuwandeln, ist der Union-Elektricitätsgesellschaft in Berlin patentirt. Der Gedanke ist aber schon ziemlich alt. Die Methode besteht darin, dass ein Vielphasenmotor aus einem Einphasenstromkreis gespeist wird, indem der Druck der gleichen Phase nach rückwärts benutzt wird.

In Fig. 303 ist M ein Drehstrommotor, dessen Läufer gewöhnliche Dreiphasenwicklung trägt, T ein Einphasentransformator, dessen Primärwicklung in Brücke zu den Zuleitungen liegt und deren Mitte durch einen Schalter S_2 mit dem inductionsfreien Widerstand R und der Drosselspule L verbunden werden kann, welche durch den Schalter S ebenfalls in Brücke zu den Zuleitungen gelegt werden können. Die secundäre Wickelung besteht ebenfalls aus zwei Hälften und ist mit der netzgeschalteten Ständerwicklung verbunden, wie die Figur zeigt. Beim Anlaufen wird der Mittelpunkt der Primärwicklung an den Verbindungspunkt von L und R gelegt, indem die Schalter S_1 und S_2 geschlossen werden. Dadurch entsteht eine Phasenverschiebung, welche den Motor anzulaufen befähigt, worauf die Schalter geöffnet werden. Die Gegenwirkung des Läufers auf den Ständer des Motors bei dessen Umlauf inducirt eine elektromotorische Kraft in dem Theile der Wickelung, der mit BC bezeichnet ist, so dass der Motor nun als Dreiphasenmaschine weiterläuft, obwohl er mit Einphasenstrom gespeist wird. So kann entweder von den Punkten A , B und C Drehstrom abgenommen werden, oder es kann die Einrichtung benutzt werden, um Drehstrommotoren mit Einphasenströmen zu speisen.

Benutzung von Drehstrom in einphasigen Stromkreisen. Eine sinnreiche Methode, für Beleuchtungszwecke Einphasenstrom einem Drehstromnetz zu entnehmen, ist von Ulbricht in Dresden angegeben. Es ist natürlich ohne Weiteres möglich, einen oder zwei der Stromkreise eines Drehstromtransformators hierfür zu be-

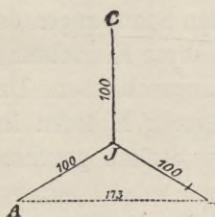


Fig. 304.

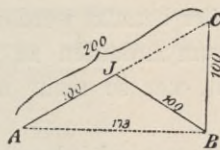


Fig. 305.

nutzen. Aber hierbei findet eine ungleiche Erwärmung statt, und es besteht die Neigung, die Regelmässigkeit der Spannungen zu stören. Die gestellte Aufgabe besteht darin, alle drei Wickelungen zu benutzen und doch Einphasenstrom zu erhalten. Diese Aufgabe wurde auf folgende einfache Weise gelöst. Nehmen wir an, die drei secundären Wickelungen eines Drehstromtransformators geben

jede 100 Volt; wenn sie so wie in Fig. 304 in Sternschaltung vereinigt sind, beträgt die Spannung zwischen zwei Klemmen, z. B. zwischen *A* und *B*, 173 Volt. Wenn wir nun einen von drei Stromkreisen, z. B. *C*, von dem Mittelpunkte *J* abtrennen und ihn in Reihe mit einem der beiden andern, z. B. *B*, schalten, dann wird wegen der Phasenbeziehungen zwischen ihnen die Spannung von *A* bis *C* = 200 Volt sein, und da die drei Stromkreise alle in Reihe sind, so wird auch die Erwärmung gleichmässig sein und wird genau die gleichen Wirkungen hervorrufen.

Drehstrommotoren als Phasenteiler. Wenn ein Drehstrommotor angelassen und einer seiner drei Stromkreise dann geöffnet wird, so wird er als Einphasenmotor weiterlaufen, indem er für dieselbe Leistung doppelt so viel Strom verbraucht in jedem der beiden verbleibenden Stromkreise, wie er früher bei drei Strom-

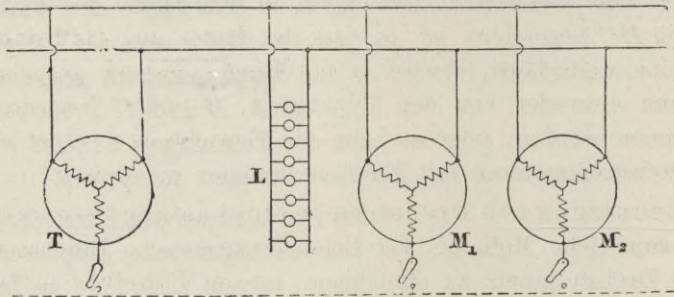


Fig. 306. Drehstrommotoren von Einphasenstrom gespeist.

kreisen beanspruchte, aber die Spannung an seiner dritten Klemme wird ihre eigene Phase in Beziehung zu den Spannungen der beiden anderen Klemmen behalten. Daher kann diese Einrichtung als ein Phasenteiler benutzt werden, um andere angeschlossene Drehstrommotoren zum Anlaufen zu bringen. Je mehr Motoren im Stromkreise sind, um so mehr werden sie ihre Ströme gegenseitig ausgleichen.

Phasenverschiebung in einem Dreileitersystem. In den Fällen, wo (wie in der City von London) einphasiger Strom ein Dreileitersystem speist, ist es sehr einfach, in dem Mittelleiter eine wechselnde elektromotorische Kraft hervorzubringen, die eine Phasenverschiebung gegenüber jedem der beiden Aussenleiter aufweist. Wenn ein Drehstrommotor mit den Aussenleitern verbunden und seine dritte Klemme an den Mittelleiter gelegt ist, werden in diesem Ströme mit Phasenverschiebung entstehen, welche

die beiden Spannungen auf jeder Seite zu steigern streben, so dass deren Summe etwas grösser sein wird, als zwischen den beiden Aussenleitern. Solche phasenverschobene Ströme können sehr gut dazu benutzt werden, andere Motoren dieses Systems zum Anlaufen zu bringen. Diese Schaltung nähert sich ihrer Natur nach dem monocyclischen System von Steinmetz (vgl. S. 147).

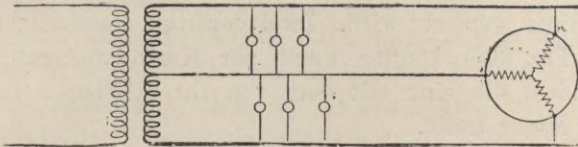


Fig. 307.

Atkinson hat vor einiger Zeit eine sinnreiche Methode beschrieben, einen phasenverschiebenden Transformator als Stromerzeuger zu verwenden. Wenn ein gewöhnlicher Wechselstromgenerator (Fig. 308) dazu benutzt wird, um einen einzelnen Stromkreis *AA* eines oder mehrerer Zweiphasen-Inductionsmotoren mit Erregerstrom zu versehen, bei denen ein zweiter Stromkreis *BB* abgetrennt

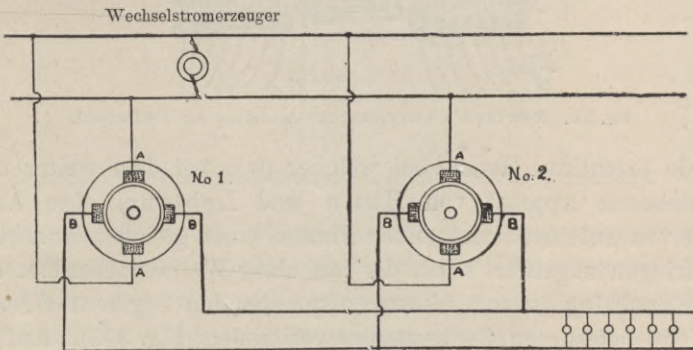


Fig. 308. Schaltung von Atkinson.

ist, so wird der Läufer des Motors, wenn man ihn frei laufen lässt, im Stromkreis *BB* Ströme erzeugen auf Kosten der dem Kreise *AA* zugeführten Energie. Wird aber der Läufer mechanisch angetrieben, so wird er diese mechanische Energie im Stromkreise *BB* in elektrische Energie umsetzen, und wenn er mit synchroner Geschwindigkeit umgetrieben wird, so wird dem *AA*-Kreise keine Energie mehr entnommen; die Erregermaschine dient dann nur dazu die Wechselgeschwindigkeit gleichmässig zu halten. Eine mit solchen Generatoren ausgerüstete Centrale würde den Vortheil bieten, dass,

da alle Stromerzeuger von einem einzigen Generator erregt werden, der die Wechselgeschwindigkeit gleichmässig hält, jede Maschine beliebig parallel geschaltet werden kann, ohne dass es nöthig ist, erst das Eintreten des Synchronismus abzuwarten. Indem man jede einzelne Maschine vor dem Ein- und Ausschalten etwas langsamer laufen lässt, kann man den Strom auf Null bringen, bevor der Schalthebel umgelegt wird, gerade so wie es gewöhnlich bei Gleichstrommaschinen gemacht wird. Zwei derartige Maschinen (wie Nr. 1 und 2 in Fig. 308) können auch zur Kraftübertragung benutzt werden, indem die eine mit dem von ihr gelieferten Strome die andere als Motor treibt.

Transformatoren zur Aenderung der Wechselzahl. Um einen ein- oder mehrphasigen Strom von gegebener Periodenzahl in einen Strom von einer anderen Periodenzahl umzuwandeln, sind umlaufende Vorrichtungen erforderlich. Rowland hat sich eine

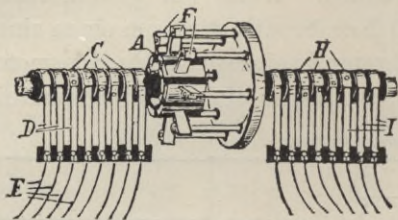


Fig. 309. Rowland's Vorrichtung zur Aenderung der Wechselzahl.

Methode patentiren lassen, bei welcher (wie bei dem weiter unten beschriebenen Apparat von Hutin und Leblanc) eine Anzahl Ströme von aufeinanderfolgenden Phasen einer gleichen Anzahl von Schleifringen zugeführt wird, die auf einer Welle angeordnet sind; jeder Schleifring ist mit einem entsprechenden Segment eines auf der Welle befestigten Commutators verbunden (Fig. 309). Auf dem Commutator schleift eine entsprechende Zahl von Bürsten, deren jede wiederum mit einem Schleifring und einer Bürste auf einer zweiten Achse in Verbindung steht. Drehen sich beide Achsen mit gleicher Geschwindigkeit, so ist die Frequenz die gleiche; drehen sich aber beide in derselben Richtung mit verschiedener Geschwindigkeit, so ändert sich die Frequenz proportional dem Unterschied der Geschwindigkeiten.

Eine von Steinmetz ¹⁾ angegebene Methode besteht darin, dass der mit Drehstromwicklung versehene Läufer eines Inductions-

1) Vgl. American Electrician, Bd. 11, S. 177. April 1899.

motors elektrisch und mechanisch mit einem Synchronmotor verbunden wird, welcher von ersterem mit Strom versehen und mit welchem er mechanisch zusammengekuppelt ist. Wenn die Zahl der Pole beim Synchronmotor und dem Läufer gleich ist, werden beide mit der halben Geschwindigkeit des Drehfeldes umlaufen, und die in ihnen kreisenden Ströme werden genau die halbe Frequenz des Speisestromes haben. Die Anordnung kann daher dazu benutzt werden, einen Drehstrom mit geringerer Frequenz zu liefern. In Fig. 310 wird die Primärwicklung eines Inductionsmotors von den Hauptleitungen a, b, c gespeist, dessen Läufer durch den Riemen B mechanisch den Synchronmotor G antreibt. Die Transformierung ist eine doppelte, denn der Läufer überträgt die halbe Energie mechanisch an G , der dann als Stromerzeuger arbeitet und die andere Hälfte der Energie elektrisch als Transformator aufnimmt.

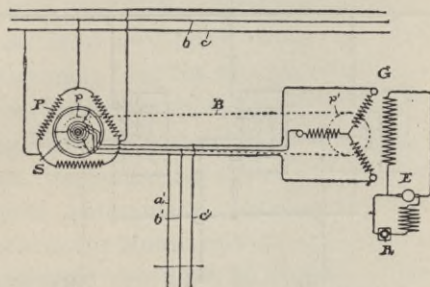


Fig. 310. Schaltung von Steinmetz zur Aenderung der Wechselzahl.

So wird die ganze dem Stromkreis abc mit einer bestimmten Frequenz entnommene Energie (abzüglich der Uebertragungsverluste) auf den Kreis $a'b'c'$ mit einer geringeren Frequenz übertragen. Selbstverständlich kann die Anordnung auch umgekehrt dazu dienen, die gegebene Frequenz zu erhöhen.

Einspulige Transformatoren. Die Betrachtung der Transformatoren würde nicht auf Vollständigkeit Anspruch machen können, ohne die Erwähnung der einspuligen Transformatoren, die zuweilen Verwendung finden, wenn man für kurze Zeit eine kleinere elektromotorische Kraft braucht wie beim Anlassen eines Motors. Der einspulige Transformator besteht aus nur einer Drahtspule auf einem Eisenkern, die in Brücke zu den Hauptleitungen geschaltet ist. An irgend einem Punkte der Spule, näher oder ferner dem einen Ende, je nach der benötigten Spannung, wird ein Abzweigdraht angelegt, und es wird Strom abgenommen zwischen dieser Abzweigung

und dem einen Ende. Man sieht, dass auf diese Weise ein weit stärkerer Strom den Hauptleitungen entnommen wird, als thatsächlich die Hauptleitungen liefern, da das Stück zwischen der Abzweigung und dem benutzten Ende wie die secundäre Spule eines Transformators wirkt. Fig. 311 zeigt drei solcher einspulgiger Transformatoren, die zum Anlassen eines Drehstrommotors benutzt werden. Sie sind in Sternschaltung mit den drei Hauptleitungen verbunden, der Motor erhält hierbei eine Spannung von $\frac{2}{5}$ der Hauptspannung bei entsprechend grösserer Stromstärke. Der den Motor speisende Theil des Transformators kann mit Draht von entsprechend stärkerem Querschnitt bewickelt werden, je nach der Grösse des Motors und der zum Anlassen erforderlichen Zeit. Derartige Vorrichtungen können

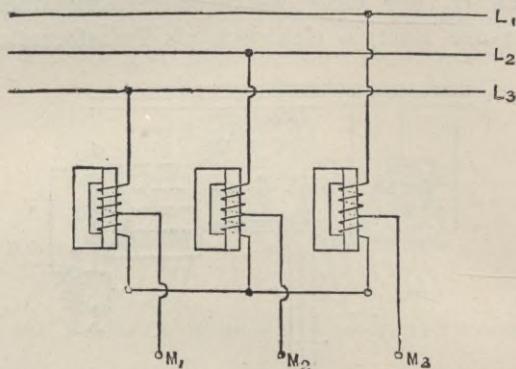


Fig. 311. Anlasser aus einspulgigen Transformatoren.

nur bei Motoren mit Losscheibe angewendet werden, da naturgemäss die Anzugskraft hierbei nur gering ist.

Mehrphasige Drosselspulen. Mehrphasige Drosselspulen können nach Art der mehrphasigen Transformatoren gebaut werden, indem man einen Satz Spulen (in zwei oder in drei Phasen) auf den Kernen anbringt an Stelle der primären und secundären Spulensätze. Die gewöhnlichen Regeln für die Wickelung von Drosselspulen gelten auch hier, wobei auf die Anordnung der Phasen gehörig Rücksicht zu nehmen ist.

Umformer. Diese Maschinen dienen zum Umwandeln von Ein-, Zwei- oder Dreiphasenstrom in Gleichstrom oder umgekehrt. Sie werden in elektrischen Betrieben vielfach gebraucht. Kraftübertragung auf weite Entfernungen bedingt die Verwendung hoher Spannungen, für welche Wechselstrom die geeignetste Form ist. Nun hat die Entwicklung der mit Gleichstrommotoren betriebenen elek-

trischen Bahnen die Nothwendigkeit gezeitigt, das Netz an verschiedenen Punkten durch besondere Leitungen unmittelbar von der Centrale aus mit Strom zu versorgen. Haben diese Leitungen eine grössere Länge, so empfiehlt sich die Kraftübertragung mittels Wechselstromes, und dieser ist dann an Ort und Stelle durch Umformer in Gleichstrom passender Spannung umzuwandeln. Derartige Maschinen sind auch erforderlich zum Laden von Accumulatoren, die an Wechselstromnetze angeschlossen sind. Umgekehrt wird vielfach zum elektrischen Betriebe von Fabriken Drehstrom bevorzugt, und wenn die Anlage nur Anschluss an ein Gleichstromnetz haben kann, sind Gleichstrom-Drehstrom-Umformer nothwendig. In allen diesen Fällen könnte natürlich auch ein mit einem Stromerzeuger gekuppelter Motor benutzt werden, und thatsächlich ist dies auch in älteren Anlagen, z. B. in Cassel, geschehen. Dort wurde hochgespannter Wechselstrom von der entfernten Kraftstation zur Stadt geleitet und vermitteltst Synchronmotoren, die mit Gleichstromdynamomaschinen gekuppelt waren, in Gleichstrom niedriger Spannung umgewandelt, der das Stadtnetz speiste. Auch heute noch empfehlen manche Ingenieure bei Drehstromübertragung und Gleichstromvertheilung Gleichstrommaschinen mit nicht synchronen Drehstrommotoren zu kuppeln. Es ist jedoch der Wirkungsgrad eines solchen Aggregats naturgemäss kleiner wie der jedes einzelnen Theiles; denn wenn der Motor und die mit ihm gekuppelte Maschine je einen Wirkungsgrad von 90 v. H. haben, so kann der Wirkungsgrad des Aggregats eben nicht höher als 81 v. H. sein.

Für die Lösung des allgemeinen Problems der Stromumwandlung stehen noch zwei andere Wege offen. Der eine besteht darin, dass man den umlaufenden Anker mit zwei Wicklungssätzen versieht, von denen der eine den Primärstrom empfängt, der andere den Secundärstrom erzeugt. Da hierbei nur ein Feldmagnet und zwei Lager erforderlich sind, so lässt sich auf diesem Wege schon eine Ersparniss an Material erreichen, aber der Wirkungsgrad ist nicht wesentlich besser. Eine andere Lösung, die allerdings sich nicht in allen Fällen anwenden lässt, aber neben einer Ersparniss an Material noch den grossen Vortheil eines höheren Wirkungsgrades bietet, besteht darin, dass man den Anker mit nur einem Spulensatz versieht und an der einen Seite einen Commutator, an der anderen passende Schleifringe anordnet, wobei dieselbe Wicklung den Primärstrom aufnimmt und den Secundärstrom erzeugt. Es ist dies die besondere Maschinenform, die den Hauptgegenstand

dieses Kapitels ausmacht und die speciell als Umformer oder als rotirende Umformer bezeichnet werden.

In ganz einfacher Form sind solche Umformer schon seit Jahren bekannt. Eine derartige Maschine ist im Technical College in Finsbury seit 1885 im Gebrauch; sie besteht aus einer gewöhnlichen Gramme'schen zweipoligen Maschine, welche am anderen Ende der Achse zwei isolirte Schleifringe trägt, die mit zwei entgegengesetzt liegenden Punkten der Ankerwicklung verbunden sind. Wenn man drei Schleifringe aufsetzte und diese mit drei um 120 Grad von einander abstehenden Punkten der Wickelung verbinden, so würde man einen Gleichstrom-Drehstrom-Umformer erhalten.

Die Grundsätze für die Umwandlung von Mehrphasenströmen in Gleichströme und umgekehrt sind allgemein bekannt. Die Beziehungen zwischen den Spannungen auf der Wechselstromseite und denen der Gleichstromseite sind seit langer Zeit¹⁾ bekannt, es sind auch Ausdrücke für ihre Werthe in den verschiedenen vorkommenden Beispielen aufgestellt unter der Voraussetzung, dass 1. die Wechselströme einfache Functionen der Zeit sind, und dass 2. das Feld nach einer Sinusfunction in dem Raum um den Umfang des Ankers herum vertheilt ist. Werden Gleichströme von der constanten Spannung 100 Volt in den Umformer hineingeleitet, so werden die Ablesungen des Spannungsmessers auf der Wechselstromseite die in nachstehender Tabelle enthaltenen Werthe ergeben:

Zahl der Schleifringe	Winkel zwischen den Anschluss-punkten der Ringe	Erzeugte Stromart	Spannungs-verhältniss	Spannung (virtuelle Volt)
2	180°	Einphasiger Wechselstrom	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	70,71
3	120°	Drehstrom	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$	61,23
4	90°	Zweiphasiger Wechselstrom	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	70,71
4	90°	Vierphasiger Wechselstrom	$\frac{1}{2}$	50,00
6	60°	Drehstrom	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$	61,23
6	60°	Sechshephasenstrom	$\frac{1}{2\sqrt{2}}$	35,35

1) Vgl. Ayrton im Journal of the Instit. of Electr. Engineers, Bd. 22, S. 340. 1893.

Auf theoretischem Wege lassen sich die einander entsprechenden Werthe der Ströme im Anker und dem Netz ebenfalls leicht berechnen.¹⁾ Nehmen wir die obigen Werthe für die Spannungen als gegeben an, und berechnen wir die Ströme für eine Leistung von 10 KW, so ergeben sich folgende Werthe für die erzeugten Ströme unter der Annahme, dass die Leitungen keine Selbstinduction erhalten. Es sind sowohl die maximalen als auch die virtuellen Werthe gegeben. Die Spalten 4 und 5 enthalten die Werthe der Ankerströme, Spalte 6 und 7 die Linienströme. Sternschaltung ist hier nicht berücksichtigt, da sie bei den Ankern von Umformern nicht anwendbar ist. Der einzige mögliche Fall der Zweiphasenwicklung ist in Wirklichkeit vierphasig.

Arbeitsströme in Wechselstromankern.

Zahl der Schleifringe	Winkel zwischen den Verbindungen der Ringe	Zahl der Phasen	Ankerstrom		Linienstrom	
			Virtuell	Maximal	Virtuell	Maximal
2	180°	1	70,7	100,0	141,4	200,0
3	120°	3	54,5	77,0	94,3	133,3
4	90°	2 (4 Drähte)	50,0	70,7	70,7	100,0
6	60°	6	47,2	66,7	47,2	66,7

Enthalten die Stromkreise inductiven Widerstand, so tritt eine Phasenverzögerung bei den Strömen ein, und zwar sowohl bei den wattlosen als bei den Arbeitsströmen. Für eine gleiche Leistung müssen hier die Zahlen der Spalten 4 bis 7 der obigen Tabelle vergrößert werden, indem man sie durch den Cosinus des Verzögerungswinkels dividirt.

Betrachten wir den allgemeinen Fall, dass ein sich drehender Anker gleichzeitig von Gleichströmen, die ihn als Motor treiben, und von Wechselströmen, die er als Generator erzeugt, durchflossen

1) Eine sehr eingehende Erörterung über die Spannungsbeziehungen mit brauchbaren Formeln für offene und geschlossene Wicklungen hat Friese in der Elektrotechnischen Zeitschrift vom 15. Februar 1894 veröffentlicht. Er geht immer von der Voraussetzung aus, dass die Vertheilung des Feldes um den Anker herum nach einer Sinusfunction stattfindet. Später hat Steinmetz in derselben Zeitschrift 3. und 10. März 1898 eine Abhandlung über denselben Gegenstand veröffentlicht.

wird. Es ist klar, dass die Ströme, die der Anker als Motor empfängt, im Allgemeinen entgegengesetzt verlaufen, wie die elektromotorischen Kräfte, die in ihm durch die Drehung erzeugt werden, während die von ihm als Generator hervorgebrachten Ströme mit diesen elektromotorischen Kräften gleich laufen. Da ferner in jedem Augenblick (unter constanten Betriebsbedingungen) der Werth des Gleichstromes als unveränderlich anzunehmen ist, dagegen der Augenblickswerth des Wechselstromes sich stetig ändert, so ist klar, dass in einzelnen Zeitpunkten der Motorstrom grösser ist als der Generatorstrom, während in anderen Zeitpunkten das Umgekehrte stattfindet. Da die Durchschnittsgeschwindigkeit der Ankerdrehung gleichmässig bleibt, wird während jeder Umdrehung eine positive und eine negative Beschleunigung vorhanden sein. Im Ganzen genommen muss der Motorstrom wegen der nicht vermeidlichen

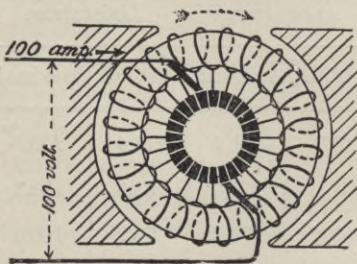


Fig. 312.

Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer.

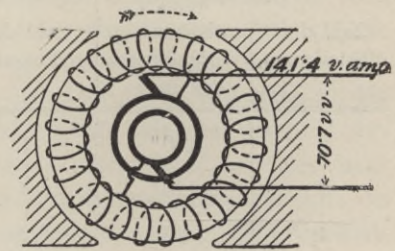


Fig. 313.

Energieverluste durch Reibung, Hysteresis und Wirbelströme grösser sein als sonst nothwendig wäre, und demgemäss die dem Anker als Motor zugeführte Energie grösser als die Leistung als Generator sein, und zwar um die Summe aller in der Maschine entstandenen Verluste.

Betrachten wir einen zweipoligen Ringanker von 10 KW, an dessen Umfang 96 Leiter liegen, die symmetrisch an die 48 Stäbe eines Commutators herangeführt sind. Die Drehungszahl betrage 1200 Umdrehungen in der Minute, also 20 in der Secunde. Zwischen jedem Commutatorstab und dem benachbarten liegen also 2 Windungen (bei einem Trommelanker mit Schleifenwicklung würden zwei Leiter ein Wickelungselement bilden). Damit der Anker als 100 voltige Gleichstrommaschine wirkt, muss die Zahl der Kraftlinien, die den Anker durchsetzen, etwas über $5 \cdot 10^6$ sein. Fig. 312 zeigt schematisch diesen Anker, der mit 100 Ampere Strom von 100 Volt Spannung als Motor läuft. In jeder Windung jeder Ankerhälfte fliesst demnach ein Strom von 50 Ampere.

Nehmen wir nun an, dass in dem gleichen Felde ein ganz gleicher Anker gedreht wird, dessen Wicklung an zwei entgegengesetzt liegenden Punkten an 2 Schleifringe geführt ist, so wird dieser Anker einen Wechselstrom erzeugen, dessen Stärke, da die Maximalspannung zwischen den mit den Ringen verbundenen Punkten 100 Volt und die durch ein Voltmeter gemessene virtuelle Spannung zwischen den Schleifringen 70,7 Volt beträgt, bei 10 KW zugeführter Energie gleich $10000 : 70,7 = 141,4$ virtuelle Ampere ist, vorausgesetzt, dass der Stromkreis inductionsfrei ist. Wenn der Widerstand jedes Ankers vernachlässigbar klein ist und keine Reibungs- oder sonstige Verluste vorhanden sind, so wird die Leistung des als Motor dienenden Ankers gerade genügen, die Drehung des als Generator dienenden Ankers zu bewirken. Setzen wir nun beide

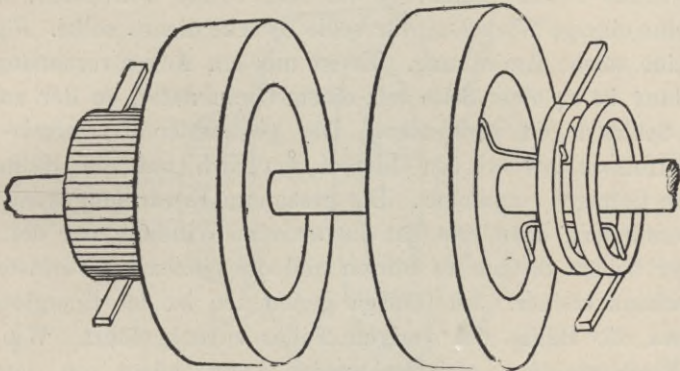


Fig. 314. Schema eines Umformers.

Anker so auf dieselbe Welle (Fig. 314), dass sich beide in einem gleichartigen und gleichstarken zweipoligen Felde drehen, so haben wir die bekannte Anordnung des Motorgenerators. In Wirklichkeit sind nun stets Verluste 1. durch Reibung, Hysterisis, Wirbelströme und 2. durch Erwärmung infolge der Widerstände in den Ankern vorhanden. Den Ersteren ist Rechnung zu tragen durch entsprechende Vergrößerung des Motorstromes. Nehmen wir an, dass sie im vorliegenden Falle 4 vom Hundert betragen für jeden Anker, so müssen 108 statt 100 Ampere zugeführt werden. Die Wärmeverluste zeigen sich elektrisch durch einen Spannungsabfall an den Klemmen des Generators an, und durch eine Verminderung der Geschwindigkeit des Motors, wenn die Primärspannung nicht entsprechend erhöht wird. Setzen wir voraus, dass die Primärspannung um den geringen Betrag erhöht wird, der erforderlich ist, um die secundäre Spannung

auf der Generatorseite auf 70,7 Volt zu erhalten, so wird der Generator 10 KW liefern, während dem Motor 10 KW + den für die verschiedenen Verluste erforderlichen Watt zugeführt werden müssen. Obwohl hier beide Anker von gleichem Widerstand sind und (annähernd) die gleiche elektrische Energie aufnehmen bzw. abgeben, so wird sich doch der Anker der Wechselstromseite (ganz gleich, ob er als Motor oder als Generator dient) mehr erwärmen, als der der Gleichstromseite, denn er führt $\sqrt{2}$ mal so viel Strom als der Letztere, und da die ohmische Erwärmung proportional dem Quadrate der Stromstärke ist, so wird die Erwärmung das Doppelte von derjenigen des Gleichstromankers sein. Die Wärme wird in beiden Ankern gleichmässig in allen Windungen des Ringes erzeugt. Da die Anker gleich sind und gleichliegende Theile der Wickelung durch gleich starke Felder laufen, so ist kein Grund vorhanden, warum nicht eine einzige Wickelung für beide Zwecke dienen sollte. Fig. 315 zeigt eine solche Anordnung. Es ist nur ein Anker vorhanden; die Wickelung ist an einer Seite mit einem Commutator, an der anderen mit 2 Schleifringen verbunden. Die gesammten Hysteresis- und Wirbelstromverluste werden hierbei natürlich auf die Hälfte des früheren Betrages vermindert. Die gesammte Erwärmung wird ebenfalls vermindert, denn nun hat die einzelne Windung nur die Differenz der beiden Ströme zu führen und die ohmischen Verluste sind entsprechend kleiner. Im Ganzen genommen ist der Energieverlust auf etwa die Hälfte des vorigen Falles zurückgeführt. Wie weit diese Kraftersparniss getrieben werden kann, hängt von der Zahl der Phasen des Wechselstromes ab. Hierbei ist noch die Frage der Ankerrückwirkung und der funkenlosen Stromcommutirung zu betrachten. Bei zwei als Motordynamo mit einander verbundenen Maschinen müssen die Bürsten auf der Gleichstromseite genau wie bei jeder Gleichstrommaschine mit einer negativen oder positiven Verschiebung eingestellt werden, je nachdem der Anker als Motor oder Generator arbeitet. Bei den Umformern braucht den Bürsten keine Verschiebung gegeben zu werden, denn die Ankerrückwirkung des Motortheiles ist entgegengesetzt der des Generatortheiles, beide gleichen sich zu einem grossen Theile aus. Diese Eigenschaft ist übrigens allen Motorgeneratoren eigen, auch denen mit zwei Wickelungen, bei welchen ein gemeinsamer Kern in seinem gemeinsamen Felde umläuft. Die Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Feld müssen besonders untersucht werden. Bei den gekuppelten Maschinen oder Motorgeneratoren (Fig. 314), bei welchen jeder Anker sich in

seinem besonderen Felde dreht, sind diese Beziehungen andere als bei den Umformern (Fig. 315), wo nur ein Feld vorhanden ist. Wenn die Gleichstromseite die primäre (d. h. die Motorseite) ist, hängt die Umlaufgeschwindigkeit vom Feldmagnet ab, dessen Schwächung die Geschwindigkeit vergrößert. Die Frequenz des secundären Wechselstromes wird demgemäss ebenfalls sich ändern. Das Verhältniss zwischen primärer und secundärer Spannung wird jedoch unabhängig von der Geschwindigkeit sein, wenn die Felder gleich sind oder nur ein Feld vorhanden ist. Die secundäre Spannung kann nicht geändert werden, so lange die Primärspannung constant bleibt, wofern nicht getrennte Felder und Wicklungen verwendet werden.

Wird dagegen die Wechselstromseite als primäre verwendet, so läuft die Maschine, ganz gleich, ob es sich um eine Motordynamo

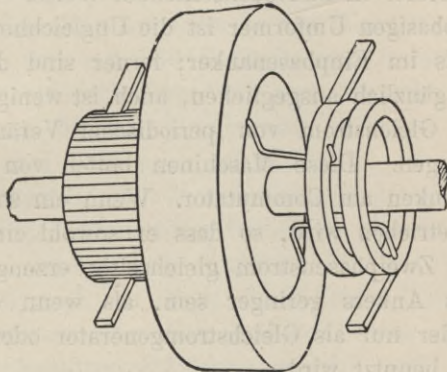


Fig. 315. Einanker-Umformer.

oder einen Umformer handelt, als Synchronmotor mit einer bestimmten gleichbleibenden Geschwindigkeit. In diesem Falle bleibt das Verhältniss der Spannungen ebenfalls nahezu gleich, selbst wenn die Felderregung vermehrt oder vermindert wird.¹⁾ Dies rührt von den besonderen Phasenbeziehungen her, welche bekanntlich bei den Strömen der Synchronmotoren eintreten, wenn diese über- oder untererregt werden.

Wenn eine derartige Maschine dazu benutzt wird, einen Einphasenstrom in einen Gleichstrom umzuwandeln, sind die Form der Spannungscurve und die Vertheilung des Feldes um die Peripherie

1) Diese Frage und die Mittel, das Feld der Gleichstromseite in Reihe oder im Nebenschluss zu erregen, oder die Maschine ohne Erregung laufen zu lassen, sind von Berg in der Zeitschrift Amer. Electrician vom Februar 1897 behandelt.

herum von grösserer Wichtigkeit. Der gelieferte Strom, obwohl Gleichstrom, ist doch nicht gleichmässig, sondern wechselt in Bezug auf seine Stärke wegen seiner Abhängigkeit vom Sinusgesetz. Die Gegenwirkungen des Ankers bewirken Schwellungen des Stromes, deren Frequenz doppelt so gross ist wie die des zugeführten Primärstromes.

In der That ist der einphasige Umformer in jedem Falle eine weniger befriedigende Vorrichtung als der zwei- oder dreiphasige. Er besitzt eine viel grössere Veränderlichkeit der Ankergewirkung, eine grössere und ungleiche Erwärmung und erfordert ein genaueres Einstellen der Commutatorbürsten als die Mehrphasenumformer. Dazu kommt, dass er nicht von der Wechselstromseite ohne Weiteres anläuft. Trotz dieser Nachtheile arbeiten in besonderen Fällen auch einphasige Umformer in zufriedenstellender Weise.

Beim zweiphasigen Umformer ist die Ungleichheit der Erhitzung viel geringer als im Einphasenanker; ferner sind die Ankergewirkungen fast gänzlich ausgeglichen, auch ist weniger Neigung vorhanden, einen Gleichstrom von periodischer Veränderlichkeit der Stärke zu erzeugen. Diese Maschinen laufen von selbst an und geben wenig Funken am Commutator. Wenn ein solcher Umformer mechanisch angetrieben wird, so dass er sowohl einen Gleichstrom als auch einen Zweiphasenstrom gleichzeitig erzeugt, so wird die Erwärmung des Ankers geringer sein, als wenn er bei gleicher Leistung entweder nur als Gleichstromgenerator oder nur als Zweiphasengenerator benutzt wird.

Ein grosser 100 KW-Umformer, der von Alioth für Genf gebaut wurde, ist im Electrician vom 8. Januar 1897 in mehreren Schnittzeichnungen dargestellt. Es ist eine 14 polige Ringankermaschine, deren Anker 1 m Durchmesser hat und mit 388 Umdrehungen in der Minute umläuft. Da er einem Dreileiternetze Gleichstrom zuführen soll, ist er mit zwei von einander unabhängigen Umformwickelungen versehen, deren jede 450 Ampere bei 110 Volt zu liefern im Stande ist. Sie hat dementsprechend vier Schleifringe und an jedem Ende einen Commutator. Der Wirkungsgrad beträgt 90 v. H.

Das Problem, die zum Theil ungeschickten Prozentzahlen der Spannungen, welche auf beiden Seiten eines Umformers bestehen, in einfache und passende Verhältnisse umzuwandeln, ist von mehreren Ingenieuren bearbeitet worden. Heldt¹⁾ hat eine geistreiche Methode

1) Vgl. Electrical World, Bd. 28, S. 68. 18. Juli 1896.

beschrieben, jedes gewünschte Verhältniss durch Einschalten von Wickelungen zwischen die Schleifringe und deren Anschlusspunkte an die eigentliche Ankerwicklung zu erzielen.

Eine andere Lösung dieses Problems von allerdings begrenzter Anwendbarkeit besteht darin, die Vertheilung oder die Dichte des Magnetfeldes derart zu verändern, dass die unregelmässigen Verhältnisse in regelmässiger umgeändert werden. Jede Zusammendrückung des Magnetfeldes ändert das Umsetzungsverhältniss. Ist zum Beispiel dieses Verhältniss bei einem Dreiphasenumformer mit Sinusvertheilung 61,23 v. H., so kann es, wenn die Pole ein wenig enger gestellt werden, auf 66,6 v. H. gebracht werden, so dass eine Maschine, welche auf der Gleichstromseite 300 voltig ist, auf der Drehstromseite eine 200-Voltmaschine ist. Ein solcher 4 poliger Umformer mit einer Leistung von 55 KW wurde von der Oerlikongesellschaft gebaut. Nach dem Entwurf sollte er mit Gleichstrom von 300 Volt gespeist werden und mit 600 Umdrehungen in der Minute laufen. Der Anker war ein vielpoliger mit zwei Stromkreisen bewickelter Trommelanker von 522 mm Durchmesser, 630 mm Länge, mit 117 Schlitzten und zwei Leitern in jedem Schlitz. Er hatte vier Sätze von Kohlenbürsten, die ohne Verschiebung eingestellt waren, und lief bei allen Belastungen vollständig funkenlos. Zuerst waren die Pole mit Polstücken versehen, die ungefähr 72 Grad umspannten und demnach etwa 80 v. H. der Breite des Polfeldes besaßen. Die Sehne zwischen den Spitzen eines Pols betrug 417 mm. In dieser Gestalt wurde das Umsetzungsverhältniss zu 57,7 v. H. gefunden gegen 61,23 v. H., wenn Sinusvertheilung stattfand. Wurden auf der Gleichstromseite 300 Volt zugeführt, so betrug die Spannung des offenen Drehstromkreises nur 173 Volt. Die Polspitzen wurden dann weggeschnitten, so dass der Bogen der Polspannung auf etwas unter 50 Grad herabgemindert wurde. Die Sehne zwischen den Spitzen betrug nun 228 mm und die Polbreite 54 v. H. des Polstandes. Dies hatte die gewünschte Wirkung, indem das Umsetzungsverhältniss auf 66,6 gebracht wurde, so dass die Spannung im offenen Drehstromkreise nunmehr 200 Volt betrug. Das Umsetzungsverhältniss blieb bei allen Leistungen constant innerhalb der Grenzen von 2 v. H. Fig. 316 gibt eine Darstellung des Verhaltens der Maschine bei verschiedenen Erregungen. Man sieht, dass das Verhältniss der Ordinate annähernd wie 3:2 ist. Zwei andere Curven zeigen die entmagnetisirenden Wirkungen der wattlosen Ströme. Sie beeinflussen natürlich die Geschwindigkeit und die Erwärmung der Maschine,

haben aber praktisch keine Einwirkung auf das Umsetzungsverhältniss, wenn die Erregung der Feldmagnete normal ist. Bei der ersten Polform lief die Maschine, wenn sie als Gleichstrommotor mit 300 Volt betrieben wurde, mit einer Erregung von 2,1 Ampere, ohne Belastung auf der Drehstromseite, mit ungefähr 470 Umdrehungen in der Minute. Wurde sie so durch einen inductionsfreien Stromkreis belastet, dass sie 153 Ampere in jeder Phase lieferte, so fiel die Geschwindigkeit infolge der Gegenwirkungen auf 440 Umdrehungen in der Minute. Bei dieser Geschwindigkeit ergaben die Messungen auf der Gleichstrom-

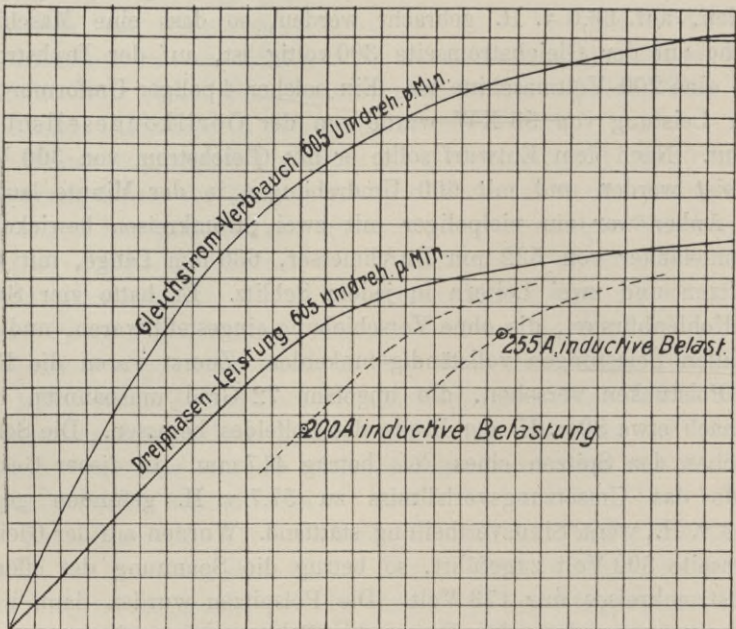


Fig. 316. Diagramm über das Verhalten eines Umformers bei verschiedener Erregung.

seite 295 Volt und 160 Ampere, auf der Drehstromseite 165 Volt und 3×153 Ampere. Dann wurde die Leistung verändert auf 235 Ampere in jeder Phase unter Verzögerung des Stromes durch eine Belastung von leerlaufenden Inductionsmotoren. Die Geschwindigkeit stieg auf 640 Umdrehungen in der Minute (wobei das Feld geschwächt war), und die Messungen ergaben: Gleichstromseite 298 Volt, 32 Ampere; Drehstromseite 157 Volt, 3×235 Ampere. Um die Geschwindigkeit und daher auch die Frequenz unter solchen Bedingungen constant zu erhalten, brauchte die Nebenschlusserregung nur entsprechend der Belastung und ihrer Verzögerung geregelt zu werden.

Die Pole, die Kerne und das Joch dieser Maschine bestanden aus Stahlguss; jeder Pol war mit 3200 Windungen eines Kupferdrahtes von 2 mm² Querschnitt umwickelt. Der gesammte Widerstand der Nebenschlusswicklung betrug 80 Ohm. Der Ankerwiderstand von Bürste zu Bürste 0,028 Ohm. Die Maschine lief funkenfrei ohne Verstellung der Bürsten. Sie konnte auch als synchroner Motor laufen und Gleichstrom funkenfrei abgeben mit oder ohne Erregung des Feldmagnets und ohne oder mit sehr grosser Vorwärts- oder Rückwärtseinstellung der Bürsten. Mit sehr grosser Rückwärtseinstellung lieferte sie synchron laufend ohne Erregung bei 627 Umdrehungen in der Minute einen Strom von 46 Ampere und 100 Volt. Sie verbrauchte dabei auf der Drehstromseite drei Ströme von 155 virtuellen Ampere (grösstentheils wattlos) zu ungefähr 100 virtuellen Volt. Die Gegenwirkungen waren in diesem ungewöhnlichen Falle ausserordentlich verwickelt.

Später hat Kapp¹⁾ die Frage untersucht, welchen Einfluss auf das Umsetzungsverhältniss und auf den Wirkungsgrad eine Veränderung in der Vertheilung des Feldes ausübt. Mit dem theoretischen Falle einer Vertheilung nach dem Sinusgesetz vergleicht er analytisch andere Fälle, die alle in der Wirklichkeit nicht vorkommen, nämlich diejenigen einer Vertheilung, bei welcher eine gleichmässige Dichte über eine begrenzte Polspannung vorausgesetzt ist. Aus seinen Berechnungen leitet er ab, dass das Umsetzungsverhältniss das gleiche sein wird wie bei einer Vertheilung nach dem Sinusgesetz, wenn die Pole derartig bemessen sind, dass die Breite ihrer Oberfläche ungefähr 70 v. H. des Polstandes beträgt. Werden die Oberflächen breiter, so wird das Spannungsverhältniss für eine Einphasenmaschine niedriger als 70,7 v. H. und das Stromverhältniss höher als 141,4 v. H. Wenn die Polbreite auf zwei Drittel oder die Hälfte des Polstandes vermindert wird, so werden die entsprechenden Spannungsbeträge wie folgt:

Spannung für	Sinusgesetz	Polverhältniss	
		$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
Gleichströme	100	100	100
Einphasige Ströme . .	70,7	75	82
Zweiphasige „ . .	70,7	75	82
Dreiphasige „ . .	61,2	65	71
Vierphasige „ . .	50,0	53	58
Sechshephasige „ . .	35,35	37	42

1) Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 19, S. 621, vom 15., 22. und 29. Sept. 1898.

Kapp hat ferner die Frage untersucht, in welchen Grenzen sich die Leistung bei gleicher Erwärmung für verschiedene Polbreiten und verschiedene Winkel der Phasenverschiebung in den Strömen bewegt. Wenn die Phasenverschiebung gleich Null war, so wurde die Grenze der Leistung eines einphasigen Umformerankers zu 85 v. H. derjenigen gefunden, die der Anker als einfacher Gleichstromanker leistete unter der Annahme einer sinusförmigen Vertheilung. Für Polbreiten von $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{2}$ findet Kapp die Leistung vermehrt auf 88 und 95 v. H. Dies ist gleichbedeutend mit der Behauptung, dass, wenn man durch Zusammendrängung des Feldes die in der Mitte liegenden Spulen verhältnissmässig thätiger macht, für gleiche Leistung eine geringere Erwärmung der Spulen, die den Verbindern am nächsten liegen, und also auch eine geringere Gesammterwärmung stattfindet. Bei einer Phasenverschiebung von $\cos \varphi = 0,8$ ($\varphi = 35^\circ$) ist die Leistung für sinusförmige Vertheilung 69 v. H. und für Polbreiten von $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{2}$ gleich 73 bzw. 80 v. H. In der Praxis werden sich diese letzteren Werthe etwas vermindern. Günstiger sind die Fälle bei zwei- und dreiphasigen Umformern. Die Leistungen für gleiche Erwärmung des Ankers sind bedeutend höher. Ein Drehstromumformer hat unter Annahme einer sinusförmigen Vertheilung und keiner Phasenverschiebung eine Maximalleistung von 134 v. H. derjenigen eines einfachen Drehstromankers. Bei Polbreiten von $\frac{2}{3}$ und $\frac{1}{2}$ steigert sich die Leistung auf 138 bzw. 144 v. H., und wenn eine Phasenverschiebung von $\cos \varphi = 0,8$ stattfindet, wird sie gleich 117 bzw. 126. Für einen Zweiphasenumformer wird die Maximalleistung 164 v. H. für den Fall der sinusförmigen Vertheilung und $\cos \varphi = 1$. Sie wird 167 bzw. 170 v. H. für Polbreiten von $\frac{2}{3}$ bzw. $\frac{1}{2}$, während, wenn $\cos \varphi = 0,8$, diese Zahlen auf 144 bzw. 153 v. H. fallen.

Bei den Umformern von Siemens & Halske besteht das Joch aus Gusseisen mit angesetzten untertheilten schmiedeeisernen Polen, welche mit einer Einrichtung für eventuell nachträglich anzubringende Dämpfungswicklung versehen sind; es ist dies zur Verhinderung des Pendelns unter Umständen nöthig. Der Anker besitzt auf dem wie üblich untertheilten Eisenkörper eine Gleichstromwicklung, die wegen der hohen Umfangsgeschwindigkeit der Umformer in den Nuten durch Keile festgehalten wird, und die ausserdem noch sehr sorgfältig bandagirt ist.

Kleinere Umformer besitzen nur einen einzigen Commutator, auf dem die positiven und negativen Bürsten schleifen; bei Um-

formern für grössere Leistungen sind dagegen 2 Commutatoren vorgesehen (Fig. 317), die auf beiden Seiten des Ankers angeordnet sind, so dass die + Bürsten auf der einen Seite des Ankers und die — Bürsten auf der anderen Seite liegen. Es hat diese Einrichtung den Vortheil, dass trotz der hohen Periodenzahl und der dadurch bedingten grossen Polzahl ungleichnamige Bürsten sich wegen des verhältnissmässig grossen Abstandes nicht berühren können und ein Ueberspringen der Spannung und somit Kurzschlüsse von + Bürste zur — Bürste unmöglich werden. Gleichfalls ist die Bedienung hierdurch wesentlich erleichtert. Symmetrisch zu den beiden Commutatoren sind zweimal 3 Schleifringe angeordnet, über welche der Drehstrom als aufgelöster Dreiphasenstrom mittelst 6 Leitungen dem Anker zugeführt wird.

Bei dieser Anordnung der unverketteten Phasen treten gegenüber dem verketteten Drehstrom geringere Kupferverluste auf und wird der Umformer hiedurch bei grosser Leistungsfähigkeit und gutem Wirkungsgrad verhältnissmässig klein.

Für den Anker des Umformers Fig. 317, der für die Beleuchtung des Personenbahnhofes in Mannheim dient, gelten folgende Daten. Er hat 12 parallele Stromkreise, so dass sechsmal dasselbe Potential wiederkehrt. Deshalb ist jeder Schleifring an 6 äquipotentialen Punkten der Wicklung angeschlossen. Zur Erzielung des Sechshephasenstromes wird der Nullpunkt des Transformators eines gewöhnlichen Dreiphasennetzes in 3 Punkte aufgelöst, die mit den 3 Endpunkten durch je eine Leitung an die 6 Schleifringe geführt sind. Im Ganzen sind 378 Ankerwindungen vorhanden. Nummerirt man die oberen Stäbe fortlaufend, so ergeben sich folgende Verbindungen:

Schleifring I mit Anfang von	Stab 1	64	127	190	253	316
„ III „ „ „ „	28	85	148	211	274	337
„ V „ „ „ „	43	106	169	232	245	358
„ II „ Ende „ „	11	74	137	200	263	326
„ IV „ „ „ „	32	95	158	221	284	347
„ VI „ „ „ „	53	116	179	242	305	368

Es liegen zwischen je zwei auf einander folgenden Anschlüssen je 10 1/2 Windungen. Jeder Commutator erhält 378 Segmente, d. h. jede Windung ist an beide Commutatoren angeschlossen. Die 12 Magnetspulen haben je 550 Windungen von 11 mm² Draht und sind sämmtlich hinter einander geschaltet.

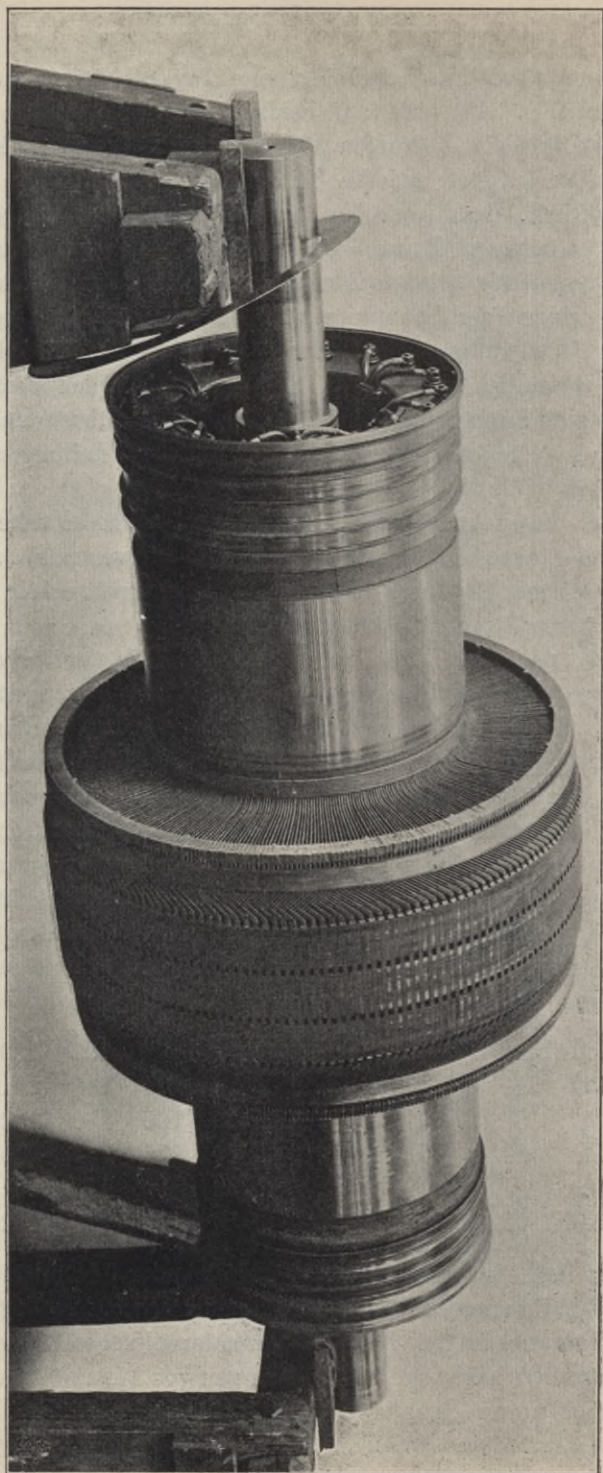


Fig. 317. Drehstrom - Gleichstrom - Umformer von Siemens & Halske.
Die positiven und negativen Bürsten auf getrennten Commutatoren.

Zweckmässig benutzt man den Umformer nur zur Umwandlung von Drehstrom in Gleichstrom. Bei Umformung von Gleichstrom in Drehstrom müssen Vorkehrungen getroffen werden, z. B. durch Centrifugalausschalter, die das Durchgehen der Maschine verhindern. Infolge der Ankerrückwirkung kann nämlich besonders bei Entnahme von Drehstrom von grosser nachteiliger Phasenverschiebung (Anlassen von Motoren) eine starke Schwächung des Schenkelfelds hervorgerufen werden, wodurch der von der Gleichstromseite betriebene Umformer die Tendenz hat, durchzugehen.

Bezüglich der Behandlung des Umformers gilt im Allgemeinen das gleiche, wie für Gleichstrommaschinen. Da die Commutatoren mit Kohlenbürsten besetzt sind, müssen sie sehr gut sauber und glatt gehalten, dürfen aber nicht geschmiert werden. Hingegen ist es sehr zweckmässig, die Schleifringe, auf denen Kupferbürsten schleifen, öfter einzufetten, damit die Kupferbürsten nicht fressen und die Wicklung sich nicht voll Kupferstaub setzt, wodurch die Isolation leidet.

Das Anlassen des Umformers geschieht am besten von der Gleichstromseite aus in der üblichen Art des Anlassens eines Gleichstrommotors. Ist der Umformer auf die richtige Geschwindigkeit gebracht, so ist er mit dem Drehstromnetz parallel zu schalten. Es gelten hierbei die gleichen Bestimmungen, wie für das Parallelschalten von Drehstrommaschinen. Es ist erforderlich, dass die Phasenfolge im Umformer der des Drehstromnetzes entspricht. Ferner müssen vor dem Einschalten des Umformers an das Drehstromnetz Spannung und Phase übereinstimmen, was am Spannungszeiger und Phasenzeiger in der üblichen Weise festgestellt werden kann. Für das erstmalige Bestimmen des Drehsinns der Felder benutzt man vortheilhaft einen kleinen asynchronen Motor, den man etwa das eine Mal an das Drehstromnetz, das andere Mal an den Umformer an einander entsprechende Klemmen des Ausschalters anschliesst. Der Motor muss in beiden Fällen in gleicher Richtung laufen.

Eine zweite Art des Anlassens ist die mittelst eines kleinen mit dem Umformer gekuppelten Asynchronmotors.

Von der Drehstromseite den Umformer anzulassen, ist nicht empfehlenswerth, weil beim Anlassen des Umformers als asynchroner Drehstrommotor nur geringe Anzugskräfte zu erreichen sind, während ein grosser Stromverbrauch auftritt, der zu starken Spannungsschwankungen im Netz Veranlassung geben kann und weil ausserdem hohe Spannungen in den Schenkeln auftreten können, wenn nicht besondere Vorsichtsmaassregeln getroffen sind.

In grossem Maassstabe haben die Umformer in Amerika Anwendung gefunden, um die aus entfernten Kraftstationen durch hochgespannte Mehrphasenströme hergeleitete Energie zum Betriebe von Bahnen, elektrischen Lichtanlagen und für elektrolytische Zwecke in Gleichstrom umzuwandeln. Diese hochgespannten Ströme werden im Verwendungsgebiete zunächst durch Transformatoren auf eine passende niedrigere Spannung gebracht und dann in Umformern umgewandelt. Die ersten grösseren Umformer der General Electric Co. waren von Parshall nach dem Muster der gewöhnlichen vielpoligen Gleichstrommaschinen entworfen, sie waren mit besonders kräftigen Feldmagneten versehen und entsprachen ihrem Zwecke ganz gut. Später wurden Entwürfe mit schwächeren Feldmagneten versucht in der Annahme, dass wegen der geringeren Ankerrückwirkung die Commutierung auch bei einer leichteren Bauart genügend von Statten ging. Es zeigte sich aber, dass, obwohl ein dreiphasiger Umformer auch ohne eine Wickelung auf dem Feldmagnet durch die dem Synchronmotor eigenen Ankergewirkungen arbeitet, doch die Regelung dieser Maschinen viel zu wünschen liess, und die späteren Entwürfe gingen daher wieder auf die für vielpolige Gleichstromgeneratoren übliche Bauart zurück.

Am Niagara werden Umformer zur Umwandlung der von der Cataract Co. gelieferten zweiphasigen Wechselströme von 5000 Volt in Gleichstrom für elektrolytische Prozesse verwendet, z. B. zur Herstellung von Soda und Aluminium. Auch für die Aluminiumwerke der Pittsburg Reduction Co. lieferte die General Electric Co. mehrere grosse Umformer. Der zweiphasige Wechselstrom wird zunächst durch Transformatoren auf 115 Volt gebracht und mit dieser Spannung den Umformern zugeführt, welche ihn in Gleichstrom von 160 Volt umwandeln. Die Anlage hat eine Leistungsfähigkeit von über 10000 Ampere, was einer Kraft von 2000 P entspricht. In Schenectady wurden auch die sechs grossen dreiphasigen Umformer von je 200 KW gebaut, welche in der Centrale in Brooklyn aufgestellt sind. Da diese Maschinen ein gutes Bild amerikanischer Bauart geben, mögen einige Angaben von Interesse sein. Die Maschinen sind 8 polig, laufen mit 375 Umdrehungen in der Minute, die Frequenz beträgt 25. Die Spannung auf der Drehstromseite beträgt 82,8 Volt, auf der Gleichstromseite 125 Volt mit einer Leistung von 1600 Ampere. Der Anker hat 1220 mm Durchmesser, seine Kernlänge zwischen den Endplatten beträgt 178 mm; dies ergibt etwa 32 cm² Umfangsfläche für jedes Kilowatt. Die Kernscheiben haben 240 Schlitze, in jedem

Schlitz liegen 2 Leiter. Jede Schleife der Trommelwicklung reicht über 30 Zähne. Der Luftzwischenraum ist 6,35 mm von Eisen zu Eisen. Der Commutator von 914 mm Durchmesser hat 240 Stäbe. Die 3 Schleifringe haben einen Durchmesser von je 457 mm, sie sind 89 mm breit und 25,4 mm stark. Es sind 8 Sätze von je 9 Kohlenbürsten vorhanden, jede Bürste hat eine Contactfläche von 8 cm². Die Bürsten auf der Drehstromseite sind aus Kupfer. Die Kraftlinienzahl ist für jede Poloberfläche auf 4380000 Linien bei voller Belastung berechnet, dabei würde die Kraftliniendichte in den gussstählernen Polkernen 12400 auf das cm² betragen. Im Luftzwischenraum ist die Dichte an den Poloberflächen bei voller Belastung nicht weniger als 8000 auf jedes cm², in den Zähnen erreicht sie 21000, und im Kernkörper 9500. Läuft die Maschine als Umformer, so haben die Bürsten keine Voreilung. Wurde sie versuchsweise als Gleichstromerzeuger betrieben, so mussten die Bürsten um 4 Commutatorstäbe verstellt werden. Die Polbreite ist 64,7 v. H. des Polstandes und das Uebersetzungsverhältniss 63,3 v. H. Der Wärmeverlust im Umformeranker beträgt bei voller Belastung 3500 Watt; er würde 6250 betragen, wenn die Maschine als Gleichstromgenerator benutzt würde. Der gesammte Ankerverlust beträgt beim Umformer 6005 Watt, beim Generator 9130 Watt. Die Erwärmung des Ankers bei voller Belastung ist bei Umformerbetrieb 27 Grad, bei Generatorbetrieb 47 Grad; die Erwärmung des Commutators ist bei voller Last 36 Grad bzw. 52 Grad.

Ein anderer ebenfalls in den Schenectady-Werken gebauter dreiphasiger Umformer ist eine 16 polige Maschine von 600 KW, die mit 188 Umdrehungen in der Minute umläuft. Bei dieser Maschine beträgt die Polbreite 72 v. H. des Polstandes, das Umsetzungsverhältniss ist 71,8, die Spannung an beiden Seiten 115 bzw. 160. Der Ankerdurchmesser ist 254 cm, die Kernlänge 21 cm, also die Oberfläche gleich 27,7 cm² für jedes Kilowatt. Die Temperatur stieg nach 17 stündigem Betrieb um 15 Grad im Anker und 23 Grad in den Feldmagneten bei einer Leistung von 575 KW. Die durchschnittliche Kraftliniendichte im Luftzwischenraum betrug 10750 Linien auf 1 cm². In Amerika werden diese Umformer fast nur mit 25, höchstens mit 30 Perioden in der Secunde gebaut.

Zu derselben Maschinengattung zählen die 4 dreiphasigen Umformer, die neuerdings für die Central London Eisenbahn gebaut sind, deren eine in Fig. 318/319 dargestellt ist. Es sind 12 polige Maschinen von 900 KW und 250 Umdrehungen in der Minute; jede

wiegt etwa 30 000 kg und soll bedingungsgemäss bei voller Last einen Wirkungsgrad von 95 v. H., bei halber Last einen solchen von 93 v. H.

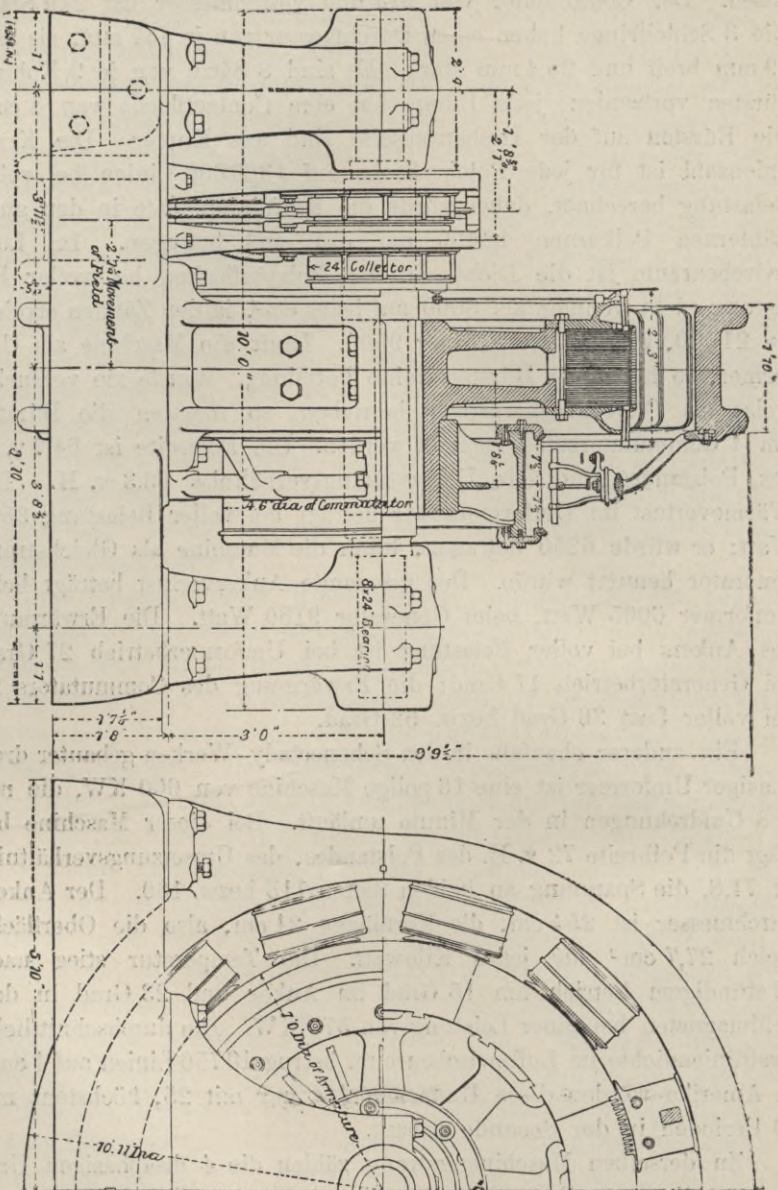


Fig. 318/319. Drehstrommotor von Parshall.

besitzen. Die Maschinen sollen 3 Wechselströme von je 1800 Ampere virtuell bei 310 Volt virtuell aufnehmen und einen Gleichstrom von

550 Volt liefern. Der Anker ist eine vielpolige Trommel mit 432 Schlitten, in jedem Schlitz liegen 2 Leiter. Die Wickelung ist eine Schleifenwicklung mit 24 parallelen Stromkreisen; sie ist an 18 symmetrisch liegenden Punkten mit den 3 Schleifringen verbunden, also liegen an jedem Ring 6 Verbindungen.

In Dublin wird eine elektrische Strassenbahn mit 500 Volt Gleichstrom betrieben, der von Unterstationen einer Drehstromcentrale mit 3500 Volt geliefert wird. Diese Unterstationen sind mit Motordynamos zur Stromumwandlung ausgerüstet, die aus einem dreiphasigen Synchronmotor bestehen, der mit einem Gleichstrom-generator mechanisch gekuppelt ist.

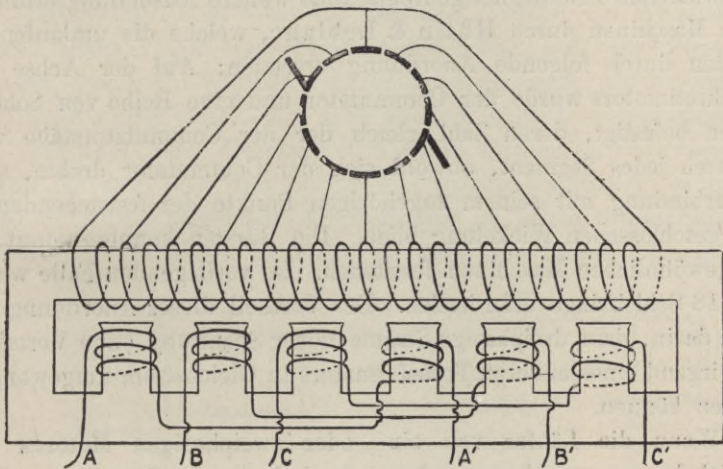


Fig. 320.

Permutatoren. Es gibt noch eine andere Art umlaufender Maschinen, die denselben Zweck verfolgen, und die wir zur Unterscheidung von den eben beschriebenen Umformern als Permutatoren bezeichnen wollen. Hierunter sind Maschinen zu verstehen, welche in einem feststehenden Theile, einer Art Transformator, den zugeführten ein-, zwei- oder dreiphasigen Wechselstrom mittelst einer in sich geschlossenen Wickelung in eine Reihe von Wechselströmen auflösen, die von einander in der Phase um einen kleinen Winkel abweichen. Diese Ströme werden dann einem Commutator zugeführt und durch letzteren abtheilungsweise in Gleichstrom umgewandelt. Fig. 320 zeigt schematisch das Princip. Der untere Theil der Zeichnung stellt den feststehenden Transformator dar, der in diesem Falle 3 Polpaare hat, die mit 3 Leitungen AA' , BB' und CC' bewickelt sind, denen

die primären dreiphasigen Ströme zugeführt werden. Diese Ströme erzeugen in der Polreihe ein Wanderfeld und induciren elektromotorische Kräfte in der Spule, die auf dem oberen Kern sich befindet. Diese Spule ist elektrisch offenbar gleichwerthig mit einem Gramme'schen Ring. Bei einer gewöhnlichen Gramme'schen Maschine dreht sich der Ring zwischen zwei Polen, hier bewegen sich die Pole an der geschlossenen Wicklung entlang. Da nun der Commutator feststeht, müssen sich die Bürsten synchron drehen, damit Gleichstrom von ihnen abgenommen werden kann. Eine auf diesem Princip beruhende Anordnung wurde Zipernowsky & Deri schon 1888 patentirt¹⁾, hierbei wurden die Bürsten von einem synchron laufenden unbewickelten Feldmagnet gedreht. Eine weitere Ausbildung erfuhren diese Maschinen durch Hutin & Leblanc, welche die umlaufenden Bürsten durch folgende Anordnung ersetzten: Auf der Achse des Synchronmotors wurde der Commutator und eine Reihe von Schleifringen befestigt, deren Zahl gleich der der Commutatorstäbe war, wodurch jedes Segment, obwohl sich der Commutator drehte, stets in Verbindung mit seinem zugehörigen Punkte der feststehenden in sich geschlossenen Wicklung blieb. Die Bürsten konnten somit wie bei gewöhnlichen Maschinen feststehen. Im vorliegenden Falle waren also 18 Schleifringe erforderlich. Der Vortheil dieser Anordnung besteht darin, dass dreiphasige Ströme hoher Spannung ohne Vermittelung irgend eines anderen Transformators in Gleichstrom umgewandelt werden können.

Wenn die Läufer von ein- oder zweiphasigen Motoren mit 3 Wicklungen versehen werden, so sind die Läuferströme selbstverständlich dreiphasig. Solche Maschinen können, wenn sie ohne mechanische Belastung laufen, als Umformer benutzt werden und die in einer oder zwei Phasen zugeführten Wechselströme in Drehstrom umwandeln.

1) Brit. Pat. 12856/88, D. R. P. 51596.

Kapitel XV.

Messung mehrphasiger Leistung.

Bekanntlich lässt sich die Leistung, welche ein Wechselstrom irgend einem Theile eines Stromkreises liefert, auf verschiedene Art messen, durch ein Wattmeter (Arbeitsmesser), nach der Methode der drei Spannungsmesser, oder nach anderen ähnlichen Methoden.¹⁾

Bei zwei- oder dreiphasigen Strömen entsteht eine Schwierigkeit. Wenn die zwei oder drei Stromkreise getrennt gehalten werden, genügt es, einen passenden Arbeitsmesser in jedem Stromkreise einzuschalten, die ganze Leistung ist dann die Summe der getrennt

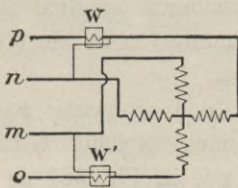


Fig. 321.

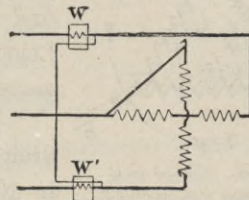


Fig. 322.

gemessenen Beträge. Fig. 321 zeigt die Art und Weise, wie zwei Wattmesser, W und W' , verbunden werden, um die einem Stromkreise in Sternschaltung zugeführte Arbeit zu messen. Die dünnen Linien stellen Nebenschlüsse dar, in welche ein inductionsfreier Widerstand einzuschalten ist, wenn der Stromkreis Hochspannung führt. Wenn der zweiphasige Stromkreis mit nur drei Leitungen betrieben wird (vgl. S. 52), so können die Wattmesser wie in Fig. 322 geschaltet werden.²⁾ Ist die Belastung gleichmässig, so kann derselbe

1) Wegen der letzteren wird auf Werke wie Fleming's Alternate Current Transformer, oder Blakesley's Alternating Currents of Electricity verwiesen.

2) Wegen Abänderungen dieser Methode und über den Gegenstand allgemein vgl. Jackson, Electr. World, Bd. 28, S. 351.

Wattmesser nacheinander in die beiden Kreise eingeschaltet werden.¹⁾ Bei einem dreiphasigen System, sei es Stern- oder Netzschaltung, kann jeder Zweig für sich gemessen werden.

Es ist klar, dass bei dreiphasigen Motoren diese Messmethode äusserst unbequem wäre, und es lässt sich leicht zeigen, dass sie sich vereinfachen lässt.²⁾

Wo in den drei Kreisen vollkommene Symmetrie herrscht, genügt es offenbar, mit einem Arbeitsmesser die in einem der drei Kreise verbrauchte Leistung zu bestimmen und mit drei zu multiplizieren, um die ganze Leistung zu erhalten. Aber in einer Anlage kann man im Allgemeinen solche Gleichheit des Verbrauches nicht voraussetzen.

Messung dreiphasiger Leistung.

Wenn wir drei Ströme in drei Leitern haben, von denen der eine die Resultierende der beiden anderen ist, und wir haben eine dementsprechende Beziehung für die Spannungen, die zwischen den drei Leitern herrschen, so leuchtet ein, dass diese sechs Grössen nicht von einander unabhängig sind, und es müsste demnach möglich sein, die *Leistung zu bestimmen, ohne sie alle sechs gemessen zu haben.*

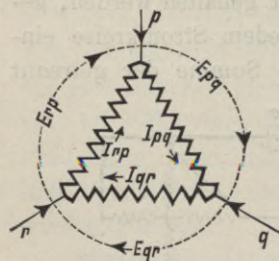


Fig. 323. Schema einer dreiphasigen Netzschaltung.

Nehmen wir den einfachen Fall eines dreiphasigen Stromes, welcher Glühlampen in Netzschaltung wie in Fig. 323 zu speisen hat, wo I_{pq} , I_{qr} , I_{rp} die Lampenstromkreise

sind. Wir bezeichnen mit I_{pq} , I_{qr} , I_{rp} die Ströme in diesen Kreisen, mit E_{pq} , E_{qr} , E_{rp} die Spannungen zwischen deren Enden und erhalten als ganze Leistung

$$P = I_{pq} E_{pq} + I_{qr} E_{qr} + I_{rp} E_{rp}.$$

Der positive Sinn möge derjenige sein, der von den Pfeilen in der Figur angegeben wird; dann haben wir in irgend einem Augenblicke:

$$E_{pq} + E_{qr} + E_{rp} = 0 \text{ oder } E_{pq} = -E_{qr} - E_{rp},$$

1) Vgl. Mc Kissick, Americ. Electrician, Bd. 9, S. 261.

2) Ueber die Theorie der Messung der Arbeit bei beliebiger Phasenzahl vgl. Blondel, Proc. Elec. Congress in Chicago. 1893. S. 112.

dies setzen wir oben ein:

$$P = -I_{pq} E_{qr} - I_{pq} E_{rp} + I_{qr} E_{qr} + I_{rp} E_{rp} \\ = E_{qr} (I_{qr} - I_{pq}) + E_{rp} (I_{rp} - I_{pq}).$$

Wenn p , q , r die Ströme in den Hauptzuleitungen des Netzes sind, so ist

$$I_{qr} - I_{pq} = q, \quad I_{rp} - I_{pq} = -p,$$

also

$$P = q E_{qr} - p E_{rp}.$$

Dieser Ausdruck sieht aus wie die Differenz zweier Leistungswerthe; dies rührt her von der Wahl der positiven Richtung in der Figur; wir wollen den Sinn der Spannung zwischen r und p umkehren und schreiben

$$E_{rp} = -E_{pr},$$

wonach

$$P = q \cdot E_{qr} + p \cdot E_{pr}.$$

D. h. wir schicken den Strom q durch die Hauptstromspule des Arbeitsmessers und verbinden die Nebenschlusspule mit den Leitungen q und r ; den Strom p senden wir durch die Hauptstromspule eines zweiten Arbeitsmessers und legen dessen Nebenschlusspule zwischen p und r an; dann ist die Summe der von beiden Instrumenten angegebenen Leistungen die ganze in den Zweigen I verbrauchte Leistung.

Wenn die Stromkreise in Sternschaltung verbunden sind, so lässt sich eine ähnliche Formel ableiten. Unter Benutzung der Bezeichnungen der Fig. 53 (S. 52) erhalten wir für die ganze Leistung

$$P = E_{jm} a + E_{jn} b + E_{jo} c.$$

Nunmehr nehmen wir die Ströme statt der Spannungen im Falle der Netzschaltung:

$$a + b + c = 0; \quad a = -b - c.$$

Indem wir wie vorher einsetzen und beachten, dass

$$E_{jn} - E_{jm} = E_{mn} \quad \text{und} \quad E_{jo} - E_{jm} = E_{mo}$$

ist, erhalten wir:

$$P = b E_{mn} + c E_{mo}.$$

Zwei Arbeitsmesser geeigneter Bauart genügen demnach, um die Leistung zu messen, wie verschieden auch die Phasen und Belastungen der Stromkreise sein mögen.¹⁾

Ist der Stromkreis ausgeglichen und die Belastung gleichmässig, genügt auch ein einziger Wattmesser, indem man die Hauptstromspule in die eine Leitung schaltet und das freie Ende der Nebenschlusspule abwechselnd an die anderen beiden Leitungen legt (Fig. 324), die

1) Wegen vollständiger Theorie und praktischer Diagramme vgl. Lunt, *Electr. World*, Bd. 23, S. 804, 832. 1894; Blondel, *Lumière Electr.*, 21. Januar 1893. S. 139; Görge's, *Elektrot. Zeitschr.* 1891. S. 212.

Summe der beiden Ablesungen ergibt die Arbeit. Denn die Ablesung des Wattmessers ist in der ersten Stellung gleich $\sqrt{3}JV \cos(\varphi + 30^\circ)$, in der anderen $\sqrt{3}JV \cos(\varphi - 30^\circ)$, die Summe beider ergibt $3JV \cos \varphi$, wo J , V und φ Strom, Spannung und Verzögerung in einer der Zweige des Netzes bedeuten. Da die Arbeit in einem Zweige gleich $JV \cos \varphi$ ist, ist die ganze Arbeit bei einem ausgeglichenen System gleich $3JV \cos \varphi$, wenn φ den gleichen Werth in allen Zweigen des Netzes hat.

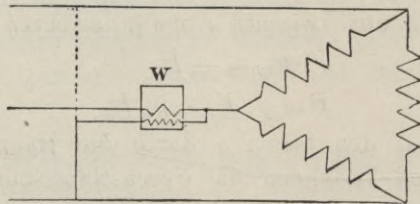


Fig. 324.

Wenn zwei im Verhältniss zu dem Widerstand der Nebenschlusspule sehr grosse Widerstände r und r_1 mit dem Wattmesser wie in Fig. 325 verbunden sind, können auch mit einem einzigen Wattmesser direkte Ablesungen gemacht werden.¹⁾ Aron²⁾ hat einen Verbrauchsmesser angegeben, dessen Ausführung eine Abänderung seines bekannten uhrförmigen Elektrizitätsmessers mit Differentialwerk darstellt.

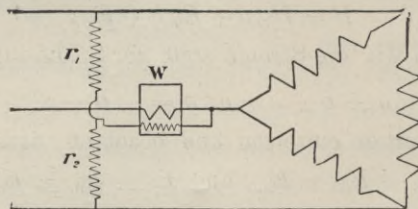


Fig. 325.

Das Pendel des dreiphasigen Verbrauchsmessers wird beschleunigt durch die beiden beweglichen Spulen der beiden Arbeitsmesser, wobei jede bewegliche Spule innerhalb der zugehörigen festen Spule schwingt.

Andere Formen mehrphasiger Verbrauchsmesser sind von T. Duncan³⁾ und von Shallenberger⁴⁾ vorgeschlagen worden.

1) Behn-Eschenburg, Elektrot. Zeitschr. 19. März 1896; Dobrowolsky und Bauch, ebenda, 2. April 1896.

2) Elektrot. Zeitschr. Bd. 13, S. 193. April 1892.

3) Englisches Patent Nr. 6241 von 1893.

4) Englisches Patent Nr. 148 von 1895.

Shallenberger hat eine Anzahl von Mehrphasenmessern construirt mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Niagara-Anlage.¹⁾

Bei dem Integrations-Mehrphasen-Wattmesser bildet eine dünne Aluminiumscheibe, die am Rand durch einen Kranz oder Flansch versteift ist, das bewegliche Element, in welchem Wirbelströme durch die Ströme erzeugt werden, welche die über und unter der Scheibe angebrachten Spulen durchlaufen. Bei den Zweiphasenmessern sind die oberen Spulen wie in Fig. 326 geschaltet. *A* und *B* sind zweiphasige Stromkreise. Die Hauptspulen sind in den Kreis *A* geschaltet und die Nebenspulen durch einen inductionsfreien Widerstand in Brücke zu *B*. Die Ströme in den beiden Spulensätzen sind daher in Quadratur, wenn keine Verzögerung im Arbeitskreis vorhanden ist, und würden genau miteinander in Phase sein bei einer Verzögerung von 90 Grad im Arbeitsstrom. Die Phasendifferenz zwischen

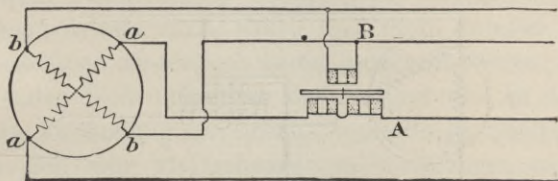


Fig. 326. Schaltung des Zweiphasenmessers von Shallenberger.

den Strömen in den Messerspulen ist daher complementär zum Verzögerungswinkel des Arbeitsstromes. Die Einrichtung des Messers ist nun derart, dass der auf die Scheibe ausgeübte Zug proportional dem Sinus des Winkels ist, der die Phasendifferenz zwischen den Nebenschluss- und Hauptströmen darstellt, und demnach auch proportional dem Cosinus des Verzögerungswinkels des Stromes im Arbeitskreise, d. h. gleich dem Leistungsfactor.

Die Zugkraft ist also direkt proportional dem Produkt aus Nebenschluss- und Reihenströmen, so dass sie sich genau wie die übertragene Kraft ändert.

U-förmige Dauermagnete umgeben die Scheiben mit ihren Polen und üben eine verzögernde Kraft aus, die der Anzahl der Umdrehungen direkt proportional ist, so dass die Geschwindigkeit der Kraft proportional ist. Das der Anordnung zu Grunde liegende Princip ist das gleiche wie bei dem Siemens'schen Dynamometer, kann jedoch in diesem Instrument mit grösserer Genauigkeit aus-

1) Vgl. Electrician, Bd. 34, S. 368. 1895.

geführt werden, da bewegliche Contacte fehlen. Die Genauigkeit der Messung ist in weiten Grenzen sehr gross wegen der Leichtigkeit der beweglichen Theile und der im Verhältniss zu den arbeitenden Kräften geringen Reibung, so dass noch ein Betrag von 1 v. H. oder weniger der maximalen Leistung genau abgelesen werden kann. Die Geschwindigkeit bei voller Belastung ist niedrig und geht nicht über 40—50 Umdrehungen in der Minute hinaus.

Das geringe Gewicht der Scheibe, die kleine Geschwindigkeit und die Verwendung besonderer Lager, die von Shallenberger für seinen vorerwähnten Messer erfunden sind, all das trägt dazu bei, die Reibung sehr klein zu machen.

Dieser Messer kann ebensowohl bei Drei- wie bei Zweiphasenströmen verwandt werden. Fig. 327 zeigt die einfachste Form einer Verbindung bei Dreiphasenstrom. Die Nebenschlusspule ist in Brücke zu zwei Zweigen des Stromkreises und die Hauptstromspule in den

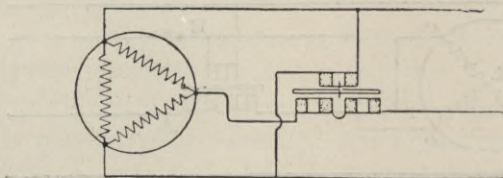


Fig. 327. Schaltung des Dreiphasenmessers von Shallenberger.

dritten Zweig geschaltet, so dass wie im vorigen Falle der Strom in den Nebenschlusspulen in Quadratur mit den elektromotorischen Kräften des Hauptstromes ist, obwohl die Ströme in den drei Zweigen um 120 Grad voneinander abweichen.

Da die Widerstände im Nebenschlusskreise entsprechend den neuen Bedingungen und einer Correctionsconstante bemessen sind, so geschieht die Messung genau wie im vorigen Falle. Zur grösseren Genauigkeit sind zwei oder mehr Zweige eines mehrphasigen Stromkreises an die entsprechenden Hauptpulen des Messers angeschlossen und die Nebenschlusspulen besonders mit jeder verbunden. Jedoch ist für Betriebszwecke die einfache Form vollständig genau genug, wenn sie in gleichmässig belasteten Stromkreisen wie bei einem mehrphasigen Motor gebraucht wird.

Shallenberger hat nach ähnlichen Grundsätzen auch einen einphasigen Messer construirt, wegen dessen Einzelheiten der Leser auf *The Electrician*, Bd. 34, S. 369 vom 25. Januar 1895 verwiesen wird.

Kapitel XVI.

Mehrphasiger Betrieb von industriellen Anlagen.

Auf dem ganzen Continent von Europa werden neue Fabriken, welche früher mit langen Wellen- und Riemenleitungen zur Vertheilung der Kraft ausgerüstet waren, jetzt wegen der grösseren Oekonomie vielfach mit elektrischer Kraft eingerichtet, selbst wenn die Kraft durch Dampfanlagen erzeugt wird. Nicht ebenso häufig, aber doch auch in sehr vielen Fällen sind ältere Anlagen, die früher mit Dampfmaschinen ausgerüstet waren, umgebaut worden; die langen, kraftverzehrenden Wellenleitungen sind entfernt und an deren Stelle ist elektrische Vertheilung eingerichtet worden. In England, wo die Fabrikanten sich sehr viel schwerer zu Neuerungen entschliessen, ist bis jetzt nur in wenigen Fabriken diese Einrichtung getroffen. Die Werke der Electric Construction Company in Wolverhampton waren die ersten, welche elektrisch eingerichtet wurden. Dann wurden auch die Fabriken von Siemens Brothers, deren Betriebskraft früher aus zwölf kleinen Dampfmaschinen bestand, die in verschiedenen Theilen des Werkes aufgestellt waren, so umgebaut, dass jetzt das ganze Werk von einer grossen centralen Dampfanlage elektrisch mit Kraft versorgt wird, wodurch eine grosse Ersparniss im wöchentlichen Kohlenverbrauch erzielt wurde. Die jährliche Gesamtersparniss betrug über 2000 t Kohlen. In diesen beiden Fällen wurde die Einrichtung jedoch getroffen, bevor mehrphasige Systeme in Aufnahme gekommen waren; die grosse Umwandlung, welche im continentalen Fabrikbetriebe stattgefunden hat, ist aber in der Hauptsache eine direkte Folge der besonderen Ausbildung der mehrphasigen Methoden für diesen Zweck.

Es ist unnöthig, hier im Einzelnen auf die grossen Vortheile einzugehen, welche die elektrische Kraftvertheilung in Fabriken bietet. Die Ursache der dadurch bewirkten grösseren Ersparniss kann unter folgende zwei Rubriken gebracht werden:

1. Ursachen, welche unmittelbar eine Ersparniss an Ausgaben bewirken,

2. Ursachen, die eine vermehrte Arbeitsleistung einer gegebenen Anlage bewirken und somit indirekte Vortheile bieten.

1. Direkte Ersparnisse:

a) Die Vereinigung der Dampferzeugung in eine oder zwei grosse Einheiten von hohem Wirkungsgrad anstatt einer Anzahl kleiner verstreuter Einheiten vermeidet die sonst grossen Verluste für Dampfleitungen und lange Wellen und gestattet die Verwendung grösserer und besserer Maschinen. Daraus entsteht eine direkte Ersparniss an Kohlen, Wasser, Oel und Arbeit. Bei den meisten Fabriken beträgt die in den langen Wellenleitungen verbrauchte Kraft bis zu 40 v. H. der ganzen Leistung und geht manchmal über 50 v. H. hinaus.

b) Bei allen Belastungen und ganz besonders bei halben und noch kleineren Belastungen hat die elektrische Anlage einen viel höheren Wirkungsgrad.

c) Die Kosten der Erneuerung und Wiederherstellung der elektrischen Kabel und Motoren sind sehr viel geringer, als die der Wellen und Riemen.

d) Die Erweiterung einer solchen neuen Anlage ist viel weniger kostspielig, als bei Verwendung von Wellenleitungen und Riemen.

e) Da der elektrische Betrieb viel gleichförmiger ist, leidet auch die Betriebsmaschine weniger.

f) Man spart an Raum bei der Vertheilung der Arbeitsmaschinen, da man nicht nöthig hat, sie nach den langen geraden Wellenleitungen zu gruppieren.

2. Indirekte Ersparnisse:

a) Selbst bei grossen Schwankungen in der Belastung kann die Geschwindigkeit sehr gleichmässig gehalten werden, so dass Störungen, Brüche und Kraftverluste vermieden werden.

b) Maschinen mit sehr grosser und solche mit kleiner Geschwindigkeit können, wenn gewünscht, in unmittelbarer Nähe von einander aufgestellt und betrieben werden, da die Motoren von einander unabhängig sind.

c) Da der Raum über den Arbeitsmaschinen durch keinerlei Antriebsvorrichtungen in Anspruch genommen wird, so können die Werkstücke leicht von einem Theil der Werkstatt zum andern transportirt werden, wodurch in vielen Fabriken die Leistungsfähigkeit ganz ausserordentlich vermehrt wird.

d) Die hervorragende Schmiegsamkeit der elektrischen Kraftübertragung vermeidet die Schwierigkeiten, welche bei Riemen- und Wellenleitungen eintreten, wenn die Werkstätten in mehreren Stockwerken über einander liegen.

e) Der Betrieb ist ausserordentlich reinlich und nimmt weniger Licht weg.

Als Beispiel für die Kraftvergeudung bei gewöhnlichem Fabrikbetriebe mag die folgende Tabelle dienen, die von Richardson in Hartlepool aufgestellt ist und die im Einzelnen die Reibungsverluste für verschiedene Maschinen und Wellenleitungen seines eigenen Werkes angibt.

Nr.	Länge		Zahl der Riemen- scheiben	Indicirte Pferdestärken		Verlust v. H.
	der Wellen- leitung in m	der Riemen in m		Belastet	Leerlaufend	
1	112,7	1308	153	48,7	17,4	35,8
2	238,4	690	113	95,2	23,7	25
3	157	1092	283	44,6	20,5	46,2
4	174	1472	335	29,3	15,2	52
5	210,6	427	79	57	20,2	35,6
6	116	142	22	76,7	23,1	30
7	35,6	369	49	9,4	6,6	69,9
8	73,8	436	70	15,8	7,9	50

Der durchschnittliche Kraftverlust ist über 40 v. H. Wo nur zeitweise Kraft gebraucht wird, ist im Allgemeinen elektrische Uebertragung vortheilhafter als mechanische. Die elektrische Kraft ist stets bereit und der Kraftverlust während der Ruhepausen praktisch gleich Null. Eine der wichtigsten Anwendungen elektrischer Kraft ist die bei Laufkränen, für welche besondere Vortheile darin liegen, dass die ungeschickten vier- oder sechseckigen Wellen und Seilübertragungen wegfallen. In den Vereinigten Staaten von Amerika werden jetzt kaum noch Laufkräne anders als mit elektrischem Antrieb ausgerüstet. Der elektrische Laufkran bietet auch noch den Vortheil einer grösseren Geschwindigkeit und grösseren Gleichmässigkeit beim Anlaufen und Anhalten, wodurch die Schnelligkeit des Kranbetriebes ganz wesentlich vermehrt wird.

Bis jetzt haben wir nur die Vortheile des elektrischen Betriebes von Fabriken allgemein beschrieben, ohne Rücksicht auf die besondere Art des zugeführten elektrischen Stromes zu nehmen.

Unter den verschiedenen für diesen Zweck in Betracht kommenden Stromarten bieten die mehrphasigen Ströme im Vergleich zu Gleichstrom und auch Einphasenstrom wesentliche Vortheile. Wie im Kapitel III beschrieben wurde, ist in den Fällen, in denen eine bestimmte Spannungsgrenze vorgeschrieben ist, die Verwendung einer dreiphasigen Vertheilung zur Uebertragung einer bestimmten Kraft mit einem gegebenen Wirkungsgrade schon in Bezug auf die Kosten der Kupferleiter von grossem Vortheil. Ferner sind Drei- und Zweiphasenmotoren für gleiche Leistung weniger massig und schwer als Einphasen- oder Gleichstrommotoren. Ihre Anlaufvorrichtung ist ebenso einfach oder noch einfacher als die der letzteren. Gegenüber Gleichstrommotoren bieten sie noch ausserdem einige bemerkenswerthe Vortheile. Beim Gleichstrommotor muss der sich drehende Anker für die volle Spannung gebaut sein, und ist diese hoch, so muss er mit feinem Draht bewickelt und sehr sorgfältig isolirt werden. Beim Inductionsmotor ist im Gegentheil der Läufer stets niedrigvoltig, so dass er wenig oder gar keiner Isolation benöthigt und weit mehr Festigkeit in mechanischer Hinsicht besitzt. Der Gleichstrommotor erfordert zudem noch einen Commutator, welcher den Gleichstrom während der Umdrehung in einen Wechselstrom verwandelt. Ferner müssen die Bürsten des Commutators sehr sauber gehalten und von Zeit zu Zeit richtig eingestellt werden. Das Fehlen des Commutators beim Inductionsmotor bietet noch den Vortheil, dass eine Funkenbildung gänzlich ausgeschlossen ist, und dies ist sehr wesentlich für alle Anlagen, in denen Staubexplosionen vorkommen oder entflammbare Gase erzeugt werden können. In Mühlen, Baumwollfabriken, Trockenräumen u. dgl. ist ein Motor mit Commutator nicht am Platze. Es werden zwar auch für solche Anlagen und sogar auch für Kohlengruben Gleichstrommotoren gebaut, doch werden sie dann gänzlich in ein Gehäuse eingeschlossen, was nicht nur wegen der schlechteren Zugänglichkeit aller Theile, sondern auch wegen der mangelhafteren Lüftung unvortheilhaft ist. Bei Inductionsmotoren, besonders solchen mit Käfigläufern, ist jede Möglichkeit der Funkenbildung vermieden, ausgenommen beim Ausschalter, der aber (wie auch jeder Blitzableiter) abseits oder ausserhalb des gefährlichen Raumes angebracht oder mit einer geeigneten Schutzhülle umkleidet werden kann. Inductionsmotoren brauchen also in solchen Räumen nicht eingekapselt zu werden. Die Gleichstromanker brennen leichter durch wie die Läufer von Mehrphasenmotoren. Der diesen Motoren zugeführte, unter Umständen hochgespannte Strom durchläuft die Ständerwicke-

lungen unmittelbar, ohne Vermittelung von Bürsten und Commutatoren. Ferner sind die feststehenden Ständerwickelungen sicherer vor mechanischen Beschädigungen, es ist daher ihre Isolation ebenso zuverlässig wie die eines gewöhnlichen Transformators, der bekanntlich eine viel höhere Spannung aushält, als bei einem Gleichstrommotor zulässig wäre. Diese grössere Betriebsicherheit in elektrischer und mechanischer Hinsicht ist ein grosser Vorzug des Inductionsmotors. Die Sicherheit, welche er in Bezug auf Feuersgefahr bietet, sollte die Feuerversicherungsgesellschaften veranlassen, die Prämie bei Verwendung von Inductionsmotoren niedriger zu bemessen als bei Gleichstrommotoren. Der Inductionsmotor ist einfacher im Bau und kann daher leichter den Händen gewöhnlicher Arbeiter überlassen werden. In der That wird jeder Arbeiter, der im Stande ist, einen Riemen von der festen zur losen Rolle zu bringen, die Handhabung der Steuerung eines Drehstrommotors ebenso einfach finden.

Bei diesen mannigfachen Vorzügen ist es nicht zu verwundern, dass Fabriken, die früher mit langen Wellen- und Riemenleitungen betrieben wurden, jetzt mit elektrischer Ausrüstung versehen werden, und dass in einzelnen Fällen sogar mit Gleichstrom betriebene Anlagen nach wenigen Jahren für Drehstrom umgeändert wurden.

Nachstehend sollen einige für Mehrphasenbetrieb eingerichtete Anlagen genannt werden. Die mit Drehstrom versehenen Werke der Oerlikon Gesellschaft wurden schon S. 262 erwähnt. Die Fabrik von Brown, Boveri & Co. ist mit Zweiphasenmotoren ausgerüstet. Die Schuhfabrik von Bally & Sohn in Schönenwert (Canton Aargau) wird mit Drehstrommotoren betrieben, die mit der niedrigen Frequenz von 20 Perioden in der Secunde arbeiten. Diese für Beleuchtungszwecke zu niedrige Frequenz wurde wegen der geringen Geschwindigkeit des Stromerzeugers gewählt, die ihrerseits wieder die Folge des sehr kleinen Gefälles für die Jonvalturbine war. Der Generator ist in Fig. 99 und 100 dargestellt. Erst die Einführung des elektrischen Betriebes ermöglichte es der Firma, mit den Schuhfabriken in Leicester und Bristol in erfolgreichen Wettbewerb zu treten. In Grossbritannien ist die Anlage von Richardson & Son in Hartlepool die bedeutendste. Sie wurde von Brown, Boveri & Co. eingerichtet. Es sind zwei Schwungradgeneratoren von je 300 KW vorhanden, die von zwei horizontalen Compound-Dampfmaschinen direkt angetrieben werden, die durch einen Seiltrieb auch noch einen kleineren Generator von 80 KW drehen. Die grösseren Generatoren haben eine Geschwindigkeit von 125 Umdrehungen in der Minute und erzeugen

einen Drehstrom von 200 Volt mit einer Frequenz von 41 Perioden in der Secunde. Die umlaufenden Feldmagnete haben die gewöhnliche vielpolige Schwungradform. Die feststehenden Anker werden derart von Schildzapfenlagern getragen, dass sie nach Entfernen eines kleinen Stückes der Fundamentplatte langsam um eine mit der Maschinenachse zusammenfallende Achse gedreht werden können, so dass jede einzelne Spule zwecks Besichtigung und Reinigung leicht zugänglich ist. In der Fabrik sind im Ganzen 13 Motoren vorhanden, die zusammen über 500 P leisten. 5 von ihnen haben je 65 P, die Leistung der übrigen geht herab bis auf 10 P. Wie gross hierbei die Raumersparniss ist, sieht man daraus, dass 2 Marinekessel von 13 Atmosphären für diese Anlage genügen, während früher, wo nicht weniger als 31 einzelne Dampfmaschinen von 94 P abwärts vorhanden waren, 8 Haupt- und 23 Hilfskessel erforderlich waren. Der Dampfverbrauch allein für diese Maschinen, abgesehen von den Verlusten in den langen Dampfleitungen betrug etwa 25 kg Dampf für jede indicirte Pferdekraftstunde. Die Kohlenersparniss belief sich auf 100 Tonnen in der Woche.

Die General Electric Co.¹⁾ von Manchester hat ihre Werke theilweise mit Drehstrom ausgerüstet; der von Oerlikon gelieferte Stromerzeuger von 115 P läuft mit 400 Umdrehungen in der Minute und hat 45 Perioden in der Secunde.

In Liverpool wurde die erste Licht- und Kraftanlage durch die eben erwähnte General Electric Co. für die Liverpool Grain Storage and Transit Co.²⁾ eingerichtet. Der Drehstromgenerator ist von der General Electric Co. nach dem Muster der Oerlikon'schen Inductormaschinen gebaut, bei welchen sowohl der Anker als auch die Erregerspulen feststehen. Er ist direkt mit einer Bellis'schen Compound-Dampfmaschine gekuppelt, welche 180 indicirte P bei 375 Umdrehungen in der Minute liefert.

Die Speicher der Gesellschaft bedecken ein Areal von 10000 m² und bestehen aus parallelen Shedbauten, an deren Stirnwänden zwei von einem Ende des Speichers bis zum andern laufende, 760 mm breite Förderbänder das aufzuspeichernde Getreide zuführen. Von diesen Förderbändern, von je einem 18 pferdigen Motor getrieben, wird das Getreide auf kleine bewegliche Hilfsbänder abgeworfen, welche innerhalb der Shedbauten angeordnet sind, und durch welche das Getreide an jeden beliebigen Punkt des Gebäudes befördert wird.

1) Electrician, Bd. 41, S. 677, vom 16. September 1898.

2) Electrical Review, Bd. 41, S. 117, 23. Juli 1897.

Es wird hierbei ein Kraftvertheilungssystem erforderlich, das sich über einen grossen Raum erstreckt, und hierfür ist die elektrische Kraftvertheilung besonders geeignet. Da bei der Vertheilung des Getreides viel Staub entsteht, sind hier besonders Inductionsmotoren am Platze. Die Hauptvertheilungsleiter sind dreifache concentrische Kabel. Licht und Kraft wird von denselben Stromkreisen entnommen, und es haben sich dabei keinerlei Schwierigkeiten bemerkbar gemacht. Die Motoren sind praktisch selbstregelnd in Bezug auf Geschwindigkeit, der Unterschied zwischen Leerlauf und voller Belastung beträgt nur 3 v. H. Eine genaue Beschreibung der Anlage findet man in der *Electrical Review* vom 23. Juli 1897.

Die Wagenfabrik in Bristol hatte früher an verschiedenen Stellen des Werkes 5 horizontale Dampfmaschinen von 10 bis zu 100 P, welche von 5 Lancashire-Kesseln gespeist wurden, wobei die Länge der Dampfleitungen 222,5 m betrug. Der durchschnittliche Dampfverbrauch für jede indicirte Pferdekraftstunde schwankte zwischen 20 und 26 kg. Der Kraftverlust in den Maschinen und den Wellenleitungen betrug 0,592 der ganzen Leistung. Der Verlust durch Condensation des Dampfes wurde auf 1300 Tonnen Dampf, also etwa 400 Tonnen Kohle, im Jahre geschätzt. Die Maschinen- und Wellenleitungsverluste stellen weitere 1350 Tonnen Kohle dar, so dass im Ganzen jährlich etwa 1750 Tonnen Kohle zuviel verbraucht wurden. Der jährliche Speisewasserverbrauch betrug früher 18900 m³, während die Kessel der neuen Anlage nur 2140 m³ verdampften, so dass 16100 m³ Wasser weniger verdampft wurde. Die Gesamtersparniss an Brennmaterial und Wasser wurde auf jährlich 20000 Mark geschätzt. Die neue Anlage hat nur eine horizontale Compound-Dampfmaschine, von einer Maximalleistung von 400 P indicirt, und einen Lancashire-Kessel mit automatischer Feuerung und Economiser. Der von dem Schwungrad der Maschine durch ein Seil angetriebene Generator von Brown, Boveri & Co. erfordert 275 P. Es sind ausser 8 Stromkreisen für die Beleuchtung noch 7 getrennte Stromkreise für Kraft vorhanden, einer für jeden Speicher, und zunächst 10 Motoren aufgestellt von 65 P bis zu 2 P herab. Soweit zugänglich, sind Theile der alten Wellenleitung mitbenutzt. Der Strom für die Motoren wird durch 3 Drähte den Zweigleitungen unmittelbar entnommen. Die Beleuchtungs-Stromkreise sind nach dem Zweileitersystem angeordnet, indem sie zwischen eine der 3 Phasenleitungen und eine vierte neutrale Leitung geschaltet sind, die an den Nullpunkt der zu diesem Zweck in Stern geschalteten Ankerwicklung

geführt ist. Die Spannung der Motoren ist etwas kleiner als 200 Volt, die der Lichtstromkreise 110 Volt. Es sind 750 Glühlampen und 32 Bogenlampen vorhanden.

Fig. 328 stellt das von Geipel & Lange für die Anlage gelieferte Schaltbrett dar. Vom Generator zum Schaltbrett führen 3 Phasen-

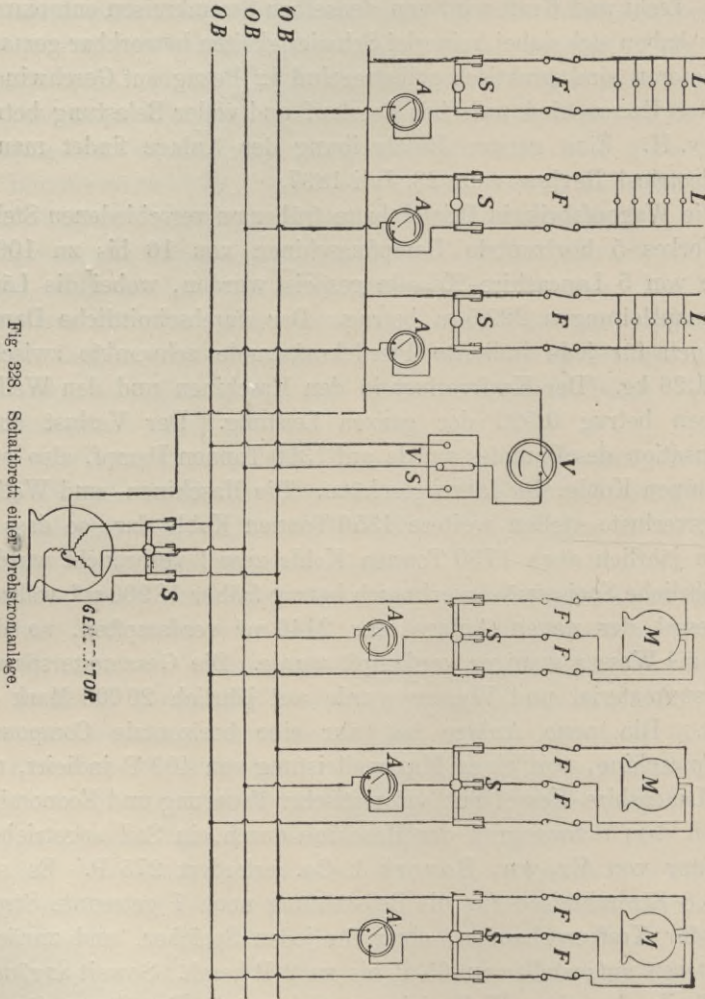


Fig. 328. Schaltbrett einer Drehstromanlage.

leitungen von je $3,87 \text{ cm}^2$ Querschnitt und 1 Hilfsleitung von $1,29 \text{ cm}^2$. Mit der letzteren ist ein Pol jeder Lichtleitung verbunden, die anderen Pole sind auf die Phasenleitungen so vertheilt, dass die Belastung möglichst gleichmässig ist. Die Querschnitte der Kabel für die Motorstromkreise liegen zwischen 129 und 22 mm^2 je nach der Motor-

leistung. Die Schalttafel enthält noch einen Spannungsmesser, der zwischen die neutrale Leitung und jede der Phasenleitungen eingeschaltet werden kann, und einen Widerstand zum Regeln des Erregerstromes und damit der Spannung des Generators.

Nachstehend mögen noch einige Angaben über die Drehstromanlage der Anglo-Swiss Condensed Milk Co. in Aylesbury folgen. Der Stromerzeuger ist 8polig, mit umlaufendem Anker und feststehenden Magneten, und besteht grösstentheils aus Stahlguss. Die Erregermaschine sitzt fliegend auf der Welle der Hauptmaschine. Die Motoren sind von Brown, Boveri & Co., es sind 2 zu je 10 P, 1 zu 8 P, 4 zu $1\frac{1}{2}$ P und 1 zu 6 P vorhanden. Die beiden 10 pferdigen Motoren sind an der Decke befestigt und treiben mittels kleiner Vorgelegewellen Gruppen von Maschinen. Auch der 8 pferdige und der 6 pferdige Motor treiben kleine Wellen zum Gruppenantrieb. Mit dem Anker der ersteren ist während der Anlaufperiode eine Drosselspule hinter einander geschaltet, die nach erreichter Geschwindigkeit ausgeschaltet wird. Auf dem Schaltbrett ist ein Strommesser in eine der 3 Hauptleitungen und ein Spannungsmesser zwischen eine der Phasenleitungen und die neutrale Leitung geschaltet. Die Spannung in jeder Phase ist 112 Volt. Um die scheinbaren Watt zu erhalten, braucht man nur die Phasenspannung mit der gemessenen Stromstärke und mit 3 zu multipliciren.

Ein anderes Beispiel liefert die zweiphasige Vertheilungsanlage in den ausgedehnten Maschinenwerken von Weyher und Richemond in Pantin bei Paris. Dort waren früher drei getrennte Dampfmaschinen von 120, 80 und 50 P in Gebrauch; diese sind jetzt durch eine einzige liegende Dampfmaschine von 200 P (die bis zu 400 P belastet werden kann) und 60 Umdrehungen in der Minute ersetzt worden. Die neue Maschine treibt drei zweiphasige Stromerzeuger, jeden von 88 Kilowatt Leistung, mit drehbarem Trommelanker und feststehendem achtpoligen Feldmagnet. Die Wechselgeschwindigkeit beträgt 40 Perioden in der Secunde. Gewöhnlich laufen nur zwei dieser Stromerzeuger, während der dritte als Reserve dient. Bis jetzt sind in den verschiedenen Räumen der Fabrik 17 Motoren aufgestellt worden, die zusammen 119 Kilowatt verbrauchen und etwa 150 P leisten; die Vertheilung im Einzelnen ist die folgende: ein Motor von 33 Kilowatt dient zur Kohlenförderung; zwei Motoren verbrauchen 22 Kilowatt, je einer 14,5 — 9,5 — 5,8 Kilowatt, die übrigen 2 Kilowatt oder weniger. Nach Boucherot, der eine genaue Beschreibung der Anlage mit Abbildungen der Fabrikräume und der

Motoren geliefert hat¹⁾, beträgt der Wirkungsgrad der grösseren Motoren 0,94, der des kleinsten (1,1 Kilowatt) 0,74; der mittlere Wirkungsgrad der Motoren ist im Durchschnitt über 0,89. Boucherot meint, dass diese Maschinen äusserst vortheilhaft gegen Gleichstrommaschinen derselben Leistung abstechen. Die Zweiphasenmotoren (einschliesslich Anlassvorrichtung) kosten nicht mehr als Gleichstrommotoren gleichen Wirkungsgrades und laufen mit geringerer Geschwindigkeit. Die Stromerzeuger kosten bei gleichem Wirkungsgrad etwa 15 Procent weniger als Gleichstromerzeuger derselben Leistung.

In Berlin hat die Allgemeine Electricitätsgesellschaft den Dreiphasenmotor für mancherlei Zwecke vervollkommnet, besonders zum Betriebe von Werkzeugmaschinen, Centrifugen und Aufzügen; sie hat den Bau der Centrifugen im Grossen von 1 bis 7 P zu ihrer Specialität gemacht. Sie werden in grossem Umfange in Zuckerraffinerien verwendet. So ist z. B. die Zuckerraffinerie von P. Schwenger's Söhne in Uerdingen am Rhein durchaus mit elektrischen Motoren ausgerüstet; ihre Zahl beträgt 91, und sie leisten im Ganzen etwa 490 P. In den Breitenburger Cementwerken in Lägerdorf stehen zwei dreiphasige Stromerzeuger in Betrieb, jeder von 110 P, um Kraft für Aufzüge, Pumpen, Stampfen u. dergl. zu erzeugen. Die Maschinenwerke von Colonna in Russland besitzen eine dreiphasige Anlage von 600 P, um Werkzeugmaschinen und Krane in ihren Werkstätten zu betreiben.

Die neuen Anlagen der Westinghouse Gesellschaft in East Pittsburg sind durchweg mit elektrischem Betrieb versehen. Ein Theil ist einschliesslich der Laufkrane für Gleichstrombetrieb eingerichtet, der grössere Theil wird jedoch durch Tesla'sche Zweiphasenmotoren angetrieben. Einzelne Motoren dienen zum Gruppenantrieb mittels Transmissionswellen, andere zum Einzelantrieb von Arbeitsmaschinen, Aufzügen, Bogenlichtmaschinen u. dergl. Drei 500 pferdige zweiphasige Generatoren mit Dampftrieb liefern die erforderlichen Ströme (vgl. Fig. 144). Sie haben ein äusseres feststehendes Feld mit 14 geblättern Polen und eine auf 92 Schlitz vertheilte Ankerwicklung. Sie laufen mit 215 Umdrehungen in der Minute und liefern hierbei 2 Wechselströme von 400 Ampere bei 240 Volt; die Frequenz beträgt 25 Perioden in der Secunde. Die folgende Tabelle zeigt die Vertheilung der Motoren innerhalb des Werkes. Es sind 17 elektrische Aufzüge vorhanden, die zuerst durch

1) Bulletin de la société internationale des Electriciens, Bd. 11, S. 482. Dec. 1894.

Gleichstrom betrieben wurden, nun aber fast durchweg für Zweiphasenmotoren von 20—30 P umgeändert sind. Eine ausführliche

Abtheilung	Leistung der Motoren in P								Zahl der Motoren	Gesamtleistung in P
	10	15	20	25	30	40	60	75		
Dreherei	2	1	4	1	9	8	1	—	26	790
Schlosserei	2	—	4	—	—	—	—	—	6	100
Schmiede	1	2	3	—	—	1	—	—	7	140
Stanzwerk	2	—	2	—	1	—	—	—	5	90
Messinggiesserei . .	2	—	1	—	—	—	—	—	3	40
Holzbearbeitung . .	1	—	2	—	1	—	—	1	5	155
Anstreicherei . . .	2	1	2	—	—	—	—	—	5	75
Insgesamt	12	4	18	1	11	9	1	1	57	1390

Beschreibung der elektrischen Ausrüstung ist in der *Electrical World*, Bd. 25, S. 745, vom 29. Juli 1895 veröffentlicht.

In den Vereinigten Staaten von Amerika benutzen jetzt zahlreiche Anlagen Drehstrom als Betriebskraft. Die Pelzer Manufacturing Co., South Carolina, haben in ihrer Spinnerei und Weberei 3000 P installiert; drei horizontale Victoria-Turbinen treiben drei 1000 pferdige Drehstromerzeuger. Der erzeugte Drehstrom wird mit einem Wirkungsgrad von 80 v. H. 4,2 km weit durch eine oberirdische Leitung den Werken zugeführt. Die Motoren geben durchweg ihre Kraft an Transmissionsleitungen ab; Einzelantrieb findet, abgesehen von einzelnen Pumpen und Fächern, nicht statt.

Die Columbia Cotton Co. hat zwei direkt mit Turbinen von 680 P gekuppelte Drehstrommaschinen, welche bei 108 Umdrehungen in der Minute 20 Transmissionsmotoren von je 65 P mit Strom von 575 Volt und 36 Perioden versehen und ausserdem noch Kraft für Beleuchtung abgeben. Der Wirkungsgrad für die Uebertragung von der Maschinenwelle zur Motorwelle beträgt 82 v. H.

An der Pacifischen Küste sind seit der Vollendung der grossen Drehstromübertragungen viele Fabriken elektrisch eingerichtet worden, besonders fast alle grösseren Mühlen, wo neben der grösseren Feuer-sicherheit noch der Vortheil gefunden wurde, dass an Ausgaben für Löhne bedeutend gespart wurde, weil die Bedienung der einfachen Drehstrommotoren durch ungelernete Arbeiter erfolgen konnte.

Die Frage nach der günstigsten Frequenz der Wechselströme steht in innigster Beziehung zu der Frage, ob der Strom für die Beleuchtung unmittelbar den Kraftleitungen entnommen werden soll

oder nicht. Bei Bogenlampen darf die Frequenz nicht unter 40—42 sinken und selbst bei dieser Zahl flackert das Licht leicht und die Lampen brummen. Umgekehrt ist diese Frequenz wieder zu hoch für den Betrieb kleiner Motoren, bei denen sonst die Polzahl sehr gross genommen werden muss, um die Geschwindigkeit auf ein brauchbares Maass zu bringen; dieses Mittel ist immer noch besser als Riemen oder Rädervorgelege zu verwenden. Aus diesem Grunde verwenden viele der grössten Anlagen Strom von niedriger Wechselzahl für den Kraftbetrieb und legen eine besondere Leistung für die Beleuchtung an. Die ebenerwähnte Westinghouse Co. in Pittsburg hat die Frequenz zu 25 gewählt und betreibt mehr als 1000 Werkzeugmaschinen durch zweiphasige Motoren von 200 Volt. Zur Beleuchtung dient eine besondere Anlage mit einer Frequenz von 60 Perioden. Die Kraftanlage am Niagara hat ebenfalls 25 Perioden in der Secunde.

Die Columbia Cotton Co. verwendet Strom von 36 Perioden, da sie nur Gruppenantrieb hat, was auch offenbar in dem Falle, wenn eine Anzahl gleicher Maschinen fast beständig läuft, am vortheilhaftesten ist.

Auf dem Continent von Europa ist die Frequenz fast ausnahmslos 50 Perioden, nur in besonderen Fällen werden 40—42 Perioden verwendet.

In Stromkreisen, die für Kraft und Licht gleichzeitig Strom liefern, ist als äusserste Grenze eine Periodenzahl von 80 in der Secunde zulässig; bei ausschliesslichem Kraftbetrieb sollte sie wesentlich niedriger gewählt werden. Die im Einzelfalle zu wählende Periodenzahl hängt natürlich auch von der Art des Betriebes ab, für welchen die Anlage bestimmt ist. Es ist jedoch auch nicht rätlich, mit der Periodenzahl allzusehr herunterzugehen, da dadurch in Bezug auf die Regelung der Generatoren Schwierigkeiten entstehen, welche leicht die Vortheile aufwiegen, die mit der vergleichsweise geringeren Polzahl und im Allgemeinen einfacheren Bauart bei kleiner Wechselzahl verbunden sind.

Kapitel XVII.

Vertheilung mehrphasiger Ströme aus Centralstationen.

Für die Zwecke elektrischer Beleuchtung allein ist kein grosser Vortheil in der Verwendung mehrphasiger Ströme gegenüber dem gewöhnlichen einphasigen Wechselstrom zu finden. Aber wo auch andere Zwecke vorliegen, besonders die elektrische Kraftvertheilung, oder wo die Entfernung der Kraftstation von der Verbrauchsstelle bedeutend ist, da überwiegen die Vortheile der mehrphasigen Systeme.

Die Entwicklung ist in den letzten Jahren ganz bedeutend vorgeschritten, mit kaum einer einzigen Ausnahme sind alle grösseren elektrischen Kraftwerke in der ganzen Welt für Mehrphasenströme eingerichtet, und ihre Zahl vermehrt sich noch von Jahr zu Jahr.

Bei derartigen grösseren Anlagen pflegt man mehrere Generatoren aufzustellen, die je nach Bedürfniss in Betrieb genommen und parallel geschaltet werden. Dazu ist erforderlich, dass ihre Geschwindigkeit möglichst gleichförmig ist. Der Ungleichförmigkeitsgrad der Antriebsmaschine sollte, abgesehen von dem z. Th. nicht unerheblichen Trägheitsmoment der Läufer, möglichst unter $\frac{1}{150}$, jedenfalls nicht mehr als $\frac{1}{120}$ betragen. Die Empfindlichkeit der Regulatoren dagegen darf nicht zu gross sein, da sonst die Gefahr vorliegt, dass die Geschwindigkeit der einzelnen Maschinen beständig wechselt und dadurch die Belastung bald von der einen, bald von der anderen Maschine übernommen wird. Man lässt daher zwischen Leerlauf und Vollbelastung zweckmässig einen Tourenunterschied von etwa 5 v. H. zu, und richtet die Regulierung so ein, dass die Umdrehungszahl bei voller Belastung etwas über und bei Leerlauf etwas unter die normale Grösse gebracht werden kann. Unter diesen Bedingungen werden die Maschinen, einmal

parallel geschaltet, im Tritt bleiben, dauernd mit genau gleicher Periodenzahl umlaufen und jede den ihr zugewiesenen bestimmten Betrag der Gesamtleistung übernehmen. Um nun zwei Maschinen parallel schalten zu können, müssen sie auf annähernd gleiche Klemmenspannung gebracht, und auf genau gleiche Periodenzahlen und gleiche Phasen eingestellt werden. Hierzu dienen verschiedene Vorrichtungen, von denen der von der Firma Schuckert verwendete sog. Synchronismusanzeiger nachstehend beschrieben werden soll. Der Synchronismusanzeiger besteht aus einer Anzahl von Glühlampen, welche im Kreise angeordnet und an die secundären

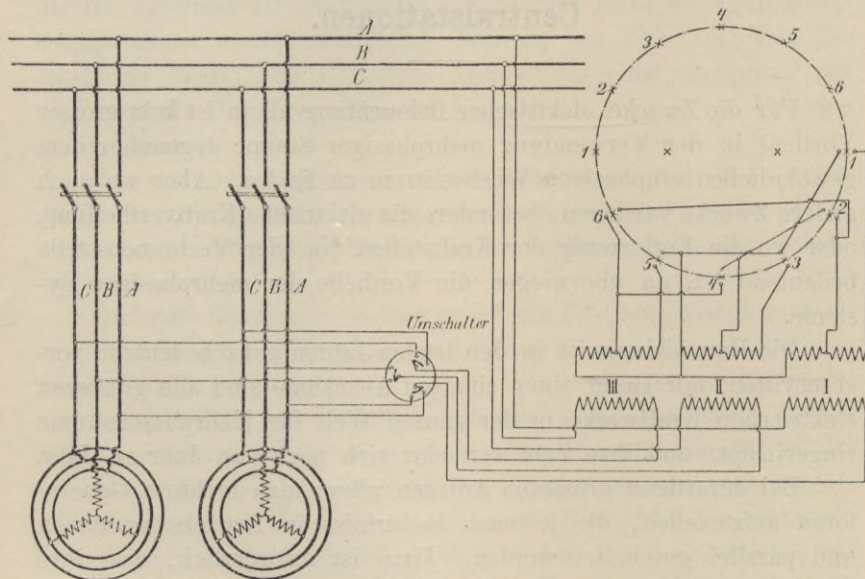


Fig. 329. Synchronismusanzeiger zum Parallelschalten von Wechselstromquellen.

Wicklungen eines Dreiphasentransformators angeschlossen sind. Jede der primären Spulen des letzteren ist mit einer Sammelschiene und einer Klemme der neu anzuschliessenden Maschine in Verbindung. Die Schaltung der primären Spulen sowie der Anschluss der Glühlampen an die in Sternschaltung mit einander verbundenen Secundärspulen ist aus Fig. 329 ersichtlich. Der besseren Uebersicht halber ist nur die Hälfte der Lampenanschlüsse gezeichnet; die übrigen Lampen sind je einer der ersteren parallel geschaltet. Durch die Anschlüsse der Glühlampen wird jede Secundärspule in zwei Theile getheilt. Der Anschlusspunkt ist nun so gewählt, dass die Windungszahl des zwischen diesem Punkte und dem Verbindungs-

punkte der drei Spulen liegenden Theiles sich zur Windungszahl der ganzen Spule verhält wie $\frac{\sin 30^\circ}{\sin 60^\circ} = \frac{1}{\sqrt{3}}$. Die Spannung in den primären Transformatorspulen ist die geometrische Differenz der von den Sammelschienen und Maschinenklemmen gelieferten Spannungscomponenten. Die Spannung in den secundären Spulen ist der primären Spannung proportional und wird ihr gleich, wenn die Windungszahlen der primären und secundären Spulen dieselben sind, was im Folgenden, um die Darstellung zu vereinfachen, angenommen werden soll.

Ist zwischen den bereits im Betriebe befindlichen Maschinen und der neu hinzuzuschaltenden Synchronismus vorhanden, womit noch keine Phasengleichheit verbunden zu sein braucht, so ist die Spannungsvertheilung über alle drei Spulen stets dieselbe, und

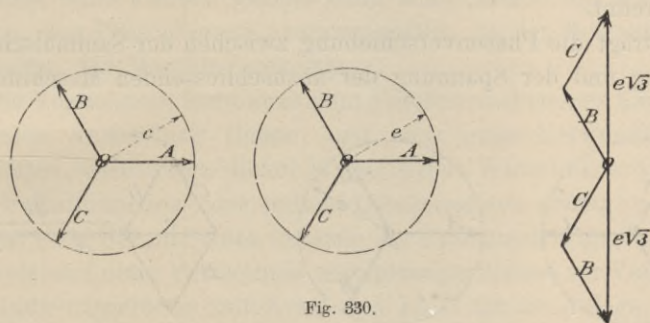


Fig. 330.

infolgedessen stehen auch die an die Spulen angeschlossenen Lampen stets unter derselben Spannung. Die Vertheilung der Spannung auf die einzelnen Lampen ist jedoch verschieden. Gewisse Lampen erhalten ein Maximum von Spannung und leuchten hell, während andere Lampen unter geringerer Spannung dunkler brennen und an einzelnen die Spannung Null ist. Die Vertheilung der Spannung auf die Lampen hängt von der Phasenverschiebung der primären Spannungscomponenten ab. Ist Phasengleichheit vorhanden, so werden die Spannungscomponenten der drei Spulen und deren geometrische Subtraktion durch die Diagramme Fig. 330 dargestellt. Die Spannung an einer der Sammelschienen bzw. Maschinenklemmen gegen den neutralen Punkt werde mit e bezeichnet; dann ergibt sich für die Spannung in Spule I der Werth Null, während die Spannung der Spulen II und III $e\sqrt{3}$ beträgt. Daraus ergeben sich für die einzelnen Lampen folgende Spannungen:

Lampe 1 0

Lampe 2 und 6 . . $e\sqrt{3} \frac{\sin 30^\circ}{\sin 60^\circ} = e$

Lampe 3 und 5 . . $e\sqrt{3}$

Lampe 4 $e + e = 2e$.

Nun ist

$$0 = 2e \cdot \sin 0^\circ,$$

$$e = 2e \cdot \frac{1}{2} = 2e \cdot \sin 30^\circ,$$

$$e \cdot \sqrt{3} = 2e \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} = 2e \cdot \sin 60^\circ,$$

$$2e = 2e \cdot \sin 90^\circ.$$

Die Spannung an jeder Lampe ist also dem Sinus ihres Winkelabstandes von der Linie 1 1 proportional. Dementsprechend brennt Lampe 4 mit der grössten Lichtstärke, während Lampe 1 überhaupt nicht brennt.

Beträgt die Phasenverschiebung zwischen der Sammelschienen-spannung und der Spannung der anzuschliessenden Maschine 160° ,

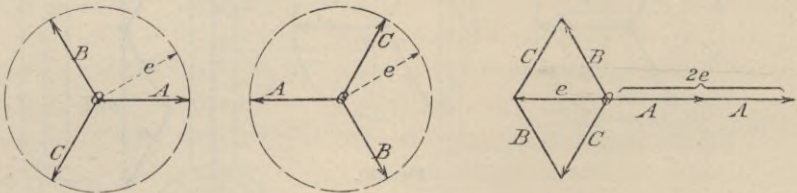


Fig. 331.

so stellt Fig. 331 die Spannungskomponenten und deren geometrische Subtraction dar. Die Letztere ergibt für Spule I den Werth $2e$, für Spule II und III e . Es herrschen daher jetzt an den Lampen folgende Spannungen:

an Lampe 1 $2e$

an Lampe 2 und 6 . . $\frac{2e}{\sqrt{3}} + \frac{e}{\sqrt{3}} = e\sqrt{3}$

an Lampe 3 und 5 . . e

an Lampe 4 $e - e = 0$.

Die Spannungen an den Lampen stehen also in demselben Verhältnisse wie vorher, nur hat sich die Spannungsvertheilung so geändert, dass das aus der ersteren Vertheilung resultirende Lichtbild um 90° gedreht erscheint.

Für Phasenverschiebungen zwischen 0° und 180° hat das Lichtbild eine entsprechende mittlere Lage.

Nun lassen sich zwei Wechselströme, zwischen denen kein Synchronismus besteht, deren Periode also von verschiedener Dauer ist, auffassen als Ströme, deren Phasenverschiebung in jedem Augenblicke wechselt. Dementsprechend wird also, so lange die anzuschliessende Maschine noch nicht synchron läuft, das Lichtbild des Synchronismusanzeigers rotiren. Je nachdem die Periodenzahl der neu zuzuschaltenden Maschine zu hoch oder zu niedrig ist, rotirt das Lichtbild in verschiedenem Sinne, und nach der Geschwindigkeit der Drehung lässt sich der jeweilige Unterschied der Periodenzahlen beurtheilen.

Um den Apparat zur Parallelschaltung von Maschinen zu benutzen, hat man also zu warten, bis das rotirende Lichtbild dem Stillstande nahe kommt. Sobald dann das Lichtbild mit bestimmten Lampen, den Phasenlampen, zusammenfällt, ist der Moment für das Einschalten der Maschine gekommen.

Die Vorrichtung kann auch zum Parallelschalten von Einphasenmaschinen Anwendung finden, und zwar unter Verwendung von Hilfsphasen, welche in üblicher Weise mittels Wicklungen verschiedener Selbstinduction oder mittels Condensatoren erzeugt werden.¹⁾

Das erste Beispiel einer Centrale zur Kraftübertragung in grösserem Style und einer Vertheilung mehrphasiger Ströme zur Versorgung eines Industriegebietes mit Kraft und Licht ist die Anlage, welche in Lauffen am Neckar errichtet wurde, und die die 14 km entfernte Stadt Heilbronn mit Drehstrom versorgt. Zwar waren schon früher in kleineren Anlagen einzelne Versuche der Kraftübertragung angestellt worden, wovon der bekannteste der von Marcel Deprez ist, der 1886 zwischen Creil und Paris 116 P auf 15 km übertrug, jedoch betrug hier das Güteverhältniss nur ca. 45 v. H., ein wenig ermuthigendes Ergebniss. In diese Zeit (1891) fällt aber die genauere Erforschung des Wechselstromgebietes und im Besonderen der Mehrphasenströme, durch die die Energievertheilung erst praktisch ausführbar erschien. Die Lauffener Anlage sollte den Beweis für die Ausführbarkeit erbringen. Der Erbauer dieser Anlage ist Herr Oscar von Miller in München, dessen Güte wir die nachfolgenden Mittheilungen verdanken.

1) Weiteres über diesen Gegenstand ist in des Verfassers Werk: Die Dynamoelektrischen Maschinen, 6. Aufl. Kap. XXIV enthalten.

Die Stromerzeuger in Lauffen, dieselben, die bei der berühmten Kraftübertragung nach Frankfurt benutzt worden sind (Fig. 381 bis 386), geben jeder 4000 Ampere bei 50 Volt. Durch einen Transformator wird der Strom in einen solchen von 40 Ampere und 5000 Volt verwandelt und nun auf drei 6 mm starken Kupferdrähten oberirdisch auf Oelisolatoren an hohen Pfosten fortgeleitet. In Heilbronn wird der Strom von einem zweiten Transformator aufgenommen, der ihn auf etwa 133 Ampere und 1500 Volt umwandelt; mit dieser Zwischenspannung wird dann der Strom auf die verschiedenen Stadtviertel vertheilt. Es werden hierzu im Ganzen verwendet: drei Turbinen (eine zur Reserve), zwei Stromerzeuger, zwei Transformatoren zur Erhöhung und zwei zur Erniedrigung der Spannung. Die letzte Umwandlung in Heilbronn von 1500 auf 100 Volt wird mittels kleiner Transformatoren von 5 und 10 KW ausgeführt, welche an etwa 25 geeigneten Stellen in besonderen Transformatorenhäuschen untergebracht sind; diese speisen das Niederspannungsnetz, welches den Strom den Lampen und Motoren der Abnehmer zuführt. Dreifach concentrische bewehrte Kabel vertheilen den Strom über etwa 8 km Strassen. Bogenlampen, Glühlampen und Motoren werden in allen drei Kreisen verwendet. Bis Ende 1894 war der Stromwerth von 11000 achtkerzigen Glühlampen nebst 25 Motoren für zusammen 53 P angeschlossen. Seitdem ist der Bedarf derart gestiegen, dass noch eine Dampfcentrale in der Stadt Heilbronn errichtet werden musste. Die kleinen Motoren bis herauf zu 3 P sind so eingerichtet, dass sie ohne besondere Anlassvorrichtung unmittelbar eingeschaltet werden können. Sie sind von der gewöhnlichen dreiphasigen Art mit Trillerkäfigläufer. Die grösseren Motoren bis zu 8 P sind mit einer Anlassvorrichtung versehen, welche Flüssigkeitswiderstände enthält, so dass der volle Strom erst nach Verlauf von etwa 15 bis 20 Secunden aufgenommen wird; in dieser Zeit erlangt der Motor seine volle Geschwindigkeit und wird nun unmittelbar an die Hauptleitungen gelegt. Etwa in der Mitte zwischen Lauffen und Heilbronn, bei Sontheim, werden einige Lampen zur Strassenbeleuchtung aus einem Transformator gespeist, der die Hochspannung von 5000 Volt sogleich auf 100 Volt umwandelt. Die Spannung konnte bisher ohne Störung in allen drei Kreisen auf der vorgeschriebenen Höhe gehalten werden. Die Motoren sind bestrebt, die Spannungen und Ströme in den drei Kreisen gleich zu machen, auch wenn die Zahl der Lampen ungleich ist.

Die nächsten mehrphasigen Centralstationen, die in Betrieb genommen wurden, sind die der Dresdener Bahnhofsanlage, von Chemnitz, Budapest, Strassburg und Bockenheim.

In Chemnitz ist 1894 von Siemens & Halske eine städtische Anlage errichtet worden, bei der ein dreiphasiges System verwendet wurde. Die Stromerzeuger (Modell R, Tafel I) besitzen eine Leistung von 52 Ampere bei 2000 Volt. Sie haben einen äusseren feststehenden Anker, dessen Kern aus Blechringen aufgebaut ist, und einen inneren, drehbaren, sternförmigen Feldmagnet mit 40 Polen abwechselnder Polarität. Bei 150 Umdrehungen in der Minute beträgt die Wechselgeschwindigkeit 50 Perioden in der Secunde. Am inneren Umfang des Ankerringes sind 120 Schlitze zur Aufnahme der Wickelung angebracht, also drei Schlitze auf jeden Pol. Die Schlitze verengen sich an ihrer Oeffnung, um hölzerne Keile zur Befestigung der Windungen aufzunehmen. Die letzteren sind nach Fig. 90 (S. 92) angeordnet, wobei die gebogenen äusseren Theile in zwei Ebenen liegen, und alle Spulen derselben Phase in Reihe geschaltet sind. Ein Ende jeder der drei Reihen ist zu einem gemeinsamen Verbindungspunkt geführt und die anderen drei freien Enden sind mit den drei Klemmen der Maschine verbunden; dies ist also eine Sternschaltung (Fig. V, Tafel IV). Eine Hilfsspule auf jedem Stromerzeuger liefert Strom mit 25 Volt Spannung für den Apparat, der den Synchronismus erhält. Die drei Stromerzeuger werden jeder von einer Dreifach-Expansionsmaschine mit Condensation in direkter Kuppelung getrieben. Wenn die Erregung der Feldmagnete constant erhalten wird, so ist der Spannungsabfall bei voller, inductionsfreier Last etwa 7 Procent; wenn aber Motoren an die Leitungen angeschaltet werden, so kann ein weit grösserer Spannungsabfall eintreten, so dass man zum Ausgleich den Erregungsstrom um 20 bis 30 Procent erhöhen muss. Von den Stromerzeugern werden die Ströme durch Schmelzsicherungen, Schalter und Messapparate zu drei Sammelschienen am Schaltbrett geführt, von wo die Hochspannungsleitungen zu den Vertheilungsleitungen gehen. Dreifach concentrische Kabel, mit Blei umpresst und bewehrt, leiten den Strom mit 2000 Volt zu Transformatoren, die an 24 Punkten über die Stadt vertheilt sind, und die den auf 120 Volt umgeformten Strom dem Niederspannungsnetz zuführen. Es sind etwa 10 km Hochspannungskabel, 19 km dreifach concentrisches Niederspannungskabel und etwa 6,5 km nackte Leitung verwendet worden. Der äusserste Punkt des Netzes ist etwa 3 km von der Stromerzeugungsanlage entfernt, die selbst etwa

1,5 km ausserhalb des Mittelpunktes der Stadt liegt. Ende 1894 war der Stromwerth von etwa 11000 achtkerzigen Glühlampen, 160 Bogenlampen und 30 Motoren von durchschnittlich 2 P angeschlossen. Die Motoren haben als Ständer einen Ring, der mit Spulen in Schlitzen bewickelt ist, ähnlich wie die Stromerzeuger. Der Läufer ist aus eisernen Blechringen, die am äusseren Umfange geschlitzt sind, zusammengesetzt und mit Spulen bewickelt, die gleichfalls in Sternschaltung verbunden sind und in drei Schleifringen endigen. Die letzteren erlauben beim Anlassen Widerstände einzuschalten, welche allmählich ausgeschaltet werden, wenn die Geschwindigkeit des Motors wächst. Bei voller Geschwindigkeit wird der Läufer kurz geschlossen. Eine ausführliche mit Abbildungen ausgestattete Beschreibung gibt die Elektrotechnische Zeitschrift vom Februar 1895.

Für die Stadt Strassburg wurde auf Empfehlung von v. Miller ein dreiphasiges System angenommen. Die Stromerzeuger mit eisernem unbewickelten Anker wurden von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin erbaut und brauchen jeder 400 P. Diese Maschinen hat v. Dobrowolsky in der Elektrotechnischen Zeitschrift vom 7. Februar 1895 beschrieben.

In Bockenheim (Frankfurt a. M.) ist eine Dreiphasenanlage von W. Lahmeyer & Co. errichtet worden. Es stehen dort mehrere Dreiphasen-Stromerzeuger für direkten Antrieb, jeder von etwa 150 KW, von derselben Bauart wie die in Lauffen gebrauchten (Fig. 381), mit feststehendem Anker und drehbarem Feldmagnet, aber mit nur acht Polen. Sie arbeiten mit 80 Volt und ihre Ströme werden unmittelbar in dreiphasige Transformatoren geleitet, in denen sie auf 660 Volt umgeformt werden; mit dieser Spannung werden sie durch Kabel zu den verschiedenen Vertheilungspunkten fortgeleitet. Die Dreiphasenmotoren werden zum Betriebe unmittelbar an die Hochspannungsleitungen angeschlossen. Für die Beleuchtung werden Transformatoren dazwischen geschaltet, welche die Spannung erniedrigen und ein Vertheilungsnetz speisen. Dreifach concentrische Kabel liefern den Strom in die Häuser. Die an die Hochspannungsleitung angeschlossen Motoren sind bis zu einer Grösse von 20 P asynchron. Sie gehen unter Last an, ja sogar bei Ueberlastung. Die Motoren über 8 P werden indessen mit Leerscheiben ausgerüstet, so dass sie nur mit leichter Last anzugehen haben. Zu den Anlassvorrichtungen werden Wasserwiderstände benutzt. Als Verbrauchsmesser dient der Aron'sche Apparat für Mehrphasenstrom. Eine

unabhängige Gleichstromvertheilung für Beleuchtung allein besteht neben der beschriebenen Anlage. Der ganze Verbrauch an Strom für Motoren übersteigt 200 P.

Die Regulirung der Spannung in den drei Kreisen hat keinerlei Schwierigkeiten dargeboten. Wenn eine Sternschaltung (wie Fig. 328) in einer Dreiphasenanlage verwendet wird, so dient der vierte Draht, der zu dem gemeinsamen Verbindungspunkt der drei Stromkreise des Stromerzeugers zurückführt, dazu, die Spannungen auszugleichen, wenn die Zahl der Lampen in den drei Zweigen ungleich ist. Aber Görges hat bei einer Besprechung der Chemnitzer Vertheilungsanlage gezeigt, dass dies nicht nöthig ist. Ein dreiphasiger Ausgleicher kann in Gestalt eines dreiphasigen Transformators an irgend einem bequem gelegenen Punkte des Netzes eingefügt werden; jeder Schenkel des Transformators ist mit nur einer Spule bewickelt. Dies ist eigentlich eine dreiphasige Drosselspule oder ein Auto-Transformator. Die drei Spulen werden in Sternschaltung verbunden, und der vierte Draht der Stromkreise wird an den gemeinsamen Verbindungspunkt der Spulen gelegt. Görges zeigte bei einem Versuche, bei welchem in dem einen der drei Kreise 100, im zweiten 20 und im dritten 1 Lampe eingeschaltet, also die Spannungen sehr ungleich waren, dass durch die Verbindung des vierten Drahtes mit dem Mittelpunkt des Ausgleichers plötzlich alle drei Spannungen gleich wurden. Dreiphasenmotoren, die in den Kreis geschaltet werden, haben in ähnlicher Weise eine Ausgleichswirkung auf die drei Spannungen. Vor einigen Jahren berichtete v. Dolivo-Dobrowolsky über die Thatsache, dass auch Dreiphasentransformatoren eine ebensolche ausgleichende Wirkung äussern.

In Budapest haben Schuckert & Co. eine Zweiphasenanlage ausserhalb der Stadt erbaut, deren Strom in mehreren über die Stadt vertheilten mit Motorgeneratoren ausgerüsteten Unterstationen auf die Gebrauchsspannung umgewandelt wird.

Eine ähnliche Anlage ist von Kolben & Co. in Prag errichtet, deren Unterstationen mit Dreiphasen-Synchronmotor-Generatoren ausgerüstet sind. Eine Beschreibung derselben befindet sich in der Zeitschrift *The Electrician* 1901 S. 906 und 949.

Niagara. Von allen grossen elektrischen Unternehmungen zur Erzeugung elektrischer Kraft in grossem Maassstabe und deren Vertheilung in den umgebenden Distrikten ist die der Cataract-Co. am Niagara bei weitem die grösste. Einzelne Angaben sind bereits auf S. 140—145 über die dort aufgestellten 5000-pferdigen zwei-

phasigen Stromerzeuger gegeben. Es sind zur Zeit von diesen Maschinen 12 im Betrieb. Eine Darstellung der Anlage findet man in der *Electrical World*, Bd. 33, S. 3 vom 7. Januar 1899. Abgesehen von der Aufstellung neuer Stromerzeuger ist das wichtigste Ereigniss neueren Datums die Ausdehnung des Systems auf die Stromlieferung nach der Stadt Buffalo, 25 km weit. Zu diesem Zwecke wird der Strom, der mit 5000 Volt erzeugt wird, auf 11000 Volt durch Transformatoren umgeformt, von denen jeder eine Leistung von 975 KW hat. Diese Transformatoren sind nach Scotts System angeordnet und verwandeln den zweiphasigen in einen dreiphasigen Strom. Von den Transformatoren sind sechs Drähte nach Buffalo geführt, deren Querschnitt so bemessen ist, dass der Spannungsabfall auf den Leitungen nur 5 v. H. beträgt. Einen Begriff von der Bedeutung der durch diese grosse Centrale mit Strom versorgten Unternehmungen erhält man aus der nachfolgenden Beschreibung, die dem oben erwähnten Artikel der *Electrical World* entnommen ist. Die tägliche Belastung beläuft sich auf über 15000 KW oder 20000 P; die am Orte verbrauchte Kraft, deren Höhe ausserordentlich regelmässig¹⁾ ist, beträgt ungefähr 12000 KW, während die nach Buffalo übertragene Leistung etwa 1700 KW ausmacht; der Leistungsfactor für die ganze Belastung erreicht den überraschend hohen Durchschnittswerth von 95 v. H. Ausser der in dieser Weise elektrisch vertheilten Kraft liefert die Cataract Co. auch Kraftwasser für die Turbinen der Niagara Falls Paper Co. im Werthe von ungefähr 8000 P. In unmittelbarer Nachbarschaft verbraucht die Carborundum Co. ungefähr 2000 elektrische P für ihre Oefen. Die Aluminiumwerke verbrauchen etwa 3750 KW zum Antriebe ihrer rotirenden Umformer, welche die elektrolytische Anlage mit Gleichstrom von 160 Volt versorgen. Diese Werke gehören der Pittsburg Reduction Co., welche auch noch weiter abwärts eine Fabrik hat, die aus einem anderen Wasserkraftwerk 3000 P verbraucht. Die Union Carbide Co. verwendet 1000 P zur Herstellung von Calciumcarbid. Die Nachfrage nach diesem Produkt war so gross, dass die Gesellschaft schon eine weitere Anlage baut, welche noch 15000 P verbrauchen wird. Die Mathieson Alkali Co. verbraucht 1500 KW zum Betriebe der rotirenden Umformer zur elektrolytischen Herstellung von caustischer

1) Sie wechselte beispielsweise am 28. December 1898 nur zwischen 11500 und 11700 KW, während der Verbrauch in Buffalo am selben Tage sich zwischen 500 und 3140 KW bewegte.

Soda. Ausser diesen Anlagen sind dort noch Fabriken der Niagara Electrochemical Co., der Lead Reduction Co. und der Old-bury Chemical Co. Die Niagara Falls Electric Light and Power Co. entnimmt Kraft für zwei 400-pferdige Inductionsmotoren. Diese Station versieht auch die am Ort befindlichen Strassenbahnen und die zwischen Buffalo und den Niagarafällen verkehrende Bahn mit Gleichstrom. Die hochgespannten Ströme von 10 000 Volt werden nach Buffalo, nach Tonawanda und Lockport geleitet. Am letzten Orte ist eine Unterstation, wo durch feststehende Transformatoren und rotirende Umformer eine Gleichstrombelastung von ungefähr 800 KW verbraucht wird. In Tonawanda werden für ähnliche Zwecke 2000 KW verbraucht.

Die Anlage wird noch fortwährend weiter ausgebaut. Anfang 1901 waren bereits 10 Generatoren von 5000 P im Betrieb. Die Uebertragungslinie nach Buffalo wird jetzt mit 22 000 Volt betrieben, auch ist eine neue Uebertragungslinie aus Aluminiumdraht errichtet worden. Ein neuer Schacht für weitere 10 Einheiten ist bereits fertiggestellt. Ausser dieser Gesellschaft haben sich noch zwei andere an der Ausnutzung der Wasserkraft des Niagara betheligt, welche ebenfalls bereits bedeutende Energiemengen nutzbar gemacht haben und sich noch stetig vergrössern. Weitere Angaben sind in der Zeitschrift *Electrical World and Engineer* 1901, S. 94 zu finden (vgl. auch *Elektrot. Zeitschr.* 1901, S. 790).

Eine durch die Höhe der Spannung und durch die Entfernung der Kraftübertragung bemerkenswerthe Anlage ist die der Bay Counties Power Co. in Californien, welche den Bezirk Oakland und die östliche Küste der Bai von St. Francisco auf 225 km Entfernung mit Drehstrom versorgt, der mit 60 000 Volt übertragen wird. Die Gesellschaft hat drei Centralen, von denen die grösste in Colgate am nördlichen Yubaflusse 1899 eröffnet wurde und eine Leistung von 15 000 P hat. Die Wasserkraft wird durch Wasserräder nutzbar gemacht, welche direkt mit Stanley'schen Dreiphasengeneratoren von 2400 Volt gekuppelt sind. Die Transformatoren für die Uebertragung nach Oakland haben Sternschaltung mit geerdetem neutralen Leiter. Die Schaltung ist derart eingerichtet, dass die Spannung 40 000, 50 000 oder 60 000 Volt betragen kann. Weitere Einzelheiten über diese Anlage findet man in der *Elektrot. Zeitschr.* 1901, S. 240. Ebenda S. 260 findet man Angaben über Versuche an einer ähnlichen Drehstromfernleitung in Kanada von 250 km Länge und einer Spannung bis zu 30 000 Volt.

Rheinfelden. Die grossen Wechselstromerzeuger der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft in Rheinfelden sind schon auf S. 132 ff. beschrieben worden. Die am Rhein etwa 19 km ober-

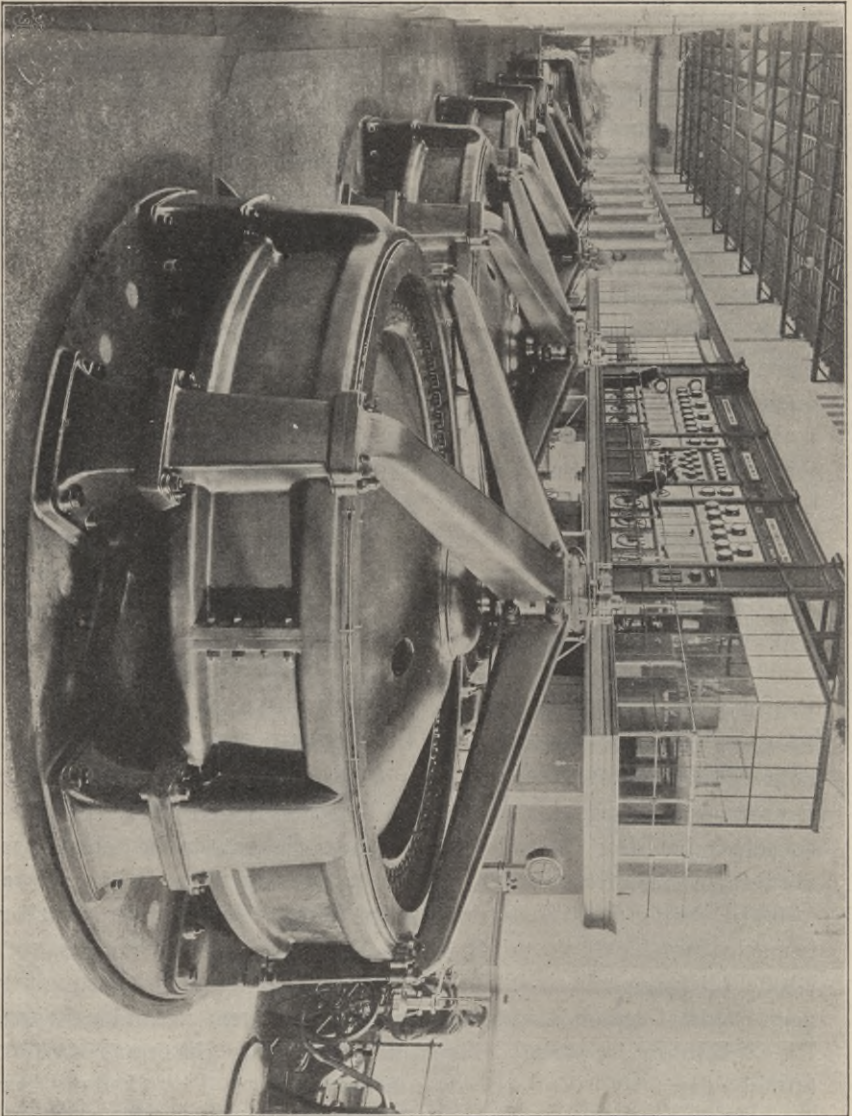


Fig. 332. Kraftübertragungswerke Rheinfelden. Drehstrom.

halb Basel gelegene Kraftstation, von der Fig. 332 eine innere Ansicht des Maschinenraumes gibt, ist für 8 Drehstromgeneratoren von je 570 KW und für 12 Gleichstrommaschinen gleicher Leistung

entworfen, von denen zwei in Reserve stehen. Die Wasserkraft beträgt im jährlichen Durchschnitt etwa 15000 P, kann aber in un günstigen Jahreszeiten bis auf 12000 P fallen. Beim Drehstromsystem ist ein neutraler Nulleiter vorhanden, die Spannung zwischen den drei Liniendrähten beträgt 6800 Volt oder 3900 Volt zwischen jedem Linienleiter und dem neutralen Draht. Die Anlage versorgt ein Areal von etwa 700 km² mit Strom. Sicherungen sind in die Leitungen nicht eingeschaltet. Die Erregung wird von 3 Motorgeneratoren von je 150 P, wovon einer in Reserve steht, geliefert, welche ihren Betriebsstrom den 6800-voltigen Hauptleitungen entnehmen und Gleichstrom von 120 Volt liefern. Eine genaue Beschreibung mit Plänen ist von der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft veröffentlicht worden.¹⁾ Es sind schon viele Fabriken zur Ausnutzung der Kraft errichtet worden. Ein Zweigwerk der Neuhausener Aluminium-Gesellschaft und eine Calcium-Carbid-Fabrik sind gebaut, welche die Leistung von 10 Turbinen, also etwa 8400 P, übernehmen. Dies ist aber nur der Anfang einer grossen industriellen Entwicklung.

Luzern. In Rathausen, etwa 8 km unterhalb Luzern, wird der Reuss durch einen 1,2 km langen Canal eine Wasserkraft, die ungefähr 1500 P im Maximum beträgt, entnommen. Es sind hier 3 Turbinen von je 300 P aufgestellt, die mit 60 Umdrehungen in der Minute laufen. Die senkrechte Welle jeder dieser Turbinen trägt den umlaufenden Feldmagnet eines zweiphasigen Wechselstromerzeugers der Brown'schen Schirmgattung (Fig. 99 und 100), der 80 getrennt gewickelte Pole besitzt. Die feststehenden Anker geben zweiphasigen Strom zu 3300 Volt, der durch drei Drähte fortgeleitet wird.

An der Sihl. Die Sihl, ein Flüsschen in der Nähe von Wädensweil liefert eine verfügbare Wasserkraft von 1200—1600 P, die durch fünf 400-pferdige Turbinen, eine als Reserve, nutzbar gemacht wird, von denen jede 5 zweiphasige Stromerzeuger mit 5000 Volt in jeder Phase antreibt. Ungefähr 500 P werden für Motoren verbraucht. Der Rest dient zur Beleuchtung der industriereichen Städte auf dem linken Ufer des Züricher Sees.

Paderno. Die Adda liefert eine Wasserkraft von etwa 17300 P, von denen durch Turbinen etwa 13000 P elektrisch nutzbar gemacht und nach Mailand 33 km weit übertragen werden. Die Cen-

1) Die Kraftübertragungswerke Rheinfelden. H. S. Herman. Berlin 1896.

trale ist für 6 Einheiten entworfen, deren jede 1590 KW leistet. Die von Brown, Boveri & Co. gebauten Wechselstrommaschinen machen 180 Umdrehungen in der Minute. Die Frequenz beträgt dabei 42 Perioden in der Secunde. Die Ströme sind dreiphasig. Die Spannung beträgt von Leitung zu Leitung 13500 Volt. Der umlaufende Feldmagnet hat 28 Pole, deren Wickelung aus hochkantig gestellten Kupferstreifen besteht. Der feststehende Anker ist zum Zwecke leichterer Besichtigung in Schildzapfenlagern montirt und in der für Hochspannungsmaschinen dieser Firma gebräuchlichen Weise aufgebaut. Die Wickelungen liegen in kreisrunden Löchern, die mit auf jeder Seite etwas vorstehenden Mikanitröhren ausgefüllt sind. Jede Maschine hat ihre eigene Erregermaschine, die auf dem Ende ihrer Welle sitzt. Eine ähnliche Hochspannungsmaschine von Siemens & Halske ist in den Fig. 110 und 111 dargestellt.

Lyon. Die Rhône hat bei Lyon ein sehr starkes Gefälle. Die Bevölkerung von Lyon und seinen Vorstädten beträgt etwa $\frac{1}{2}$ Million. Um die Stadt mit Licht und Kraft zu versorgen, ist eine Centrale erbaut, die der Rhône eine Wasserkraft von 12—20000 P entnimmt und zwar durch einen Canal von etwa 17 km Länge. Die Centrale liegt etwa 5 km vom Centrum der Stadt und hat vier Stockwerke. Im untersten befinden sich 29 Ausflusskammern der Turbinen, im zweiten stehen die Turbinen selbst, die, von Escher, Wyss & Co. erbaut, 120 Umdrehungen in der Minute machen. Ihre oberen Theile erstrecken sich bis in das dritte Stockwerk, wo die Regulirvorrichtungen und die Oelpumpen aufgestellt sind. Das vierte Stockwerk, eine Halle, 143 m lang und 12 m breit, enthält die Wechselstromerzeuger. Es sind 16 Gruppen Generatoren vorgesehen von je 1250 P und 3 Erregermaschinen von je 250 P. Vorerst sind 8 Generatoren und 2 Erregermaschinen (eine zur Reserve) aufgestellt. Die grossen Drehstromgeneratoren der Schirmgattung sind von Brown, Boveri & Co. gebaut. Sie liefern 3500 Volt mit einer Frequenz von 50 Perioden in der Secunde. Der umlaufende Feldmagnet ist ein zehnmarmiges Schwungrad von Stahlguss, das 50 nach aussen vorstehende Pole trägt, von denen jeder für sich gewickelt ist. Der Entwurf ist im grossen Ganzen derselbe, wie der der Chèvres-Maschine auf Tafel VII. Die Erregerwicklung auf jedem Pol besteht aus 61 Windungen aus Kupferstreifen. Der Strom wird durch zwei Schleifringe auf der Welle zugeführt. Der feststehende Anker ist aus Kernringen aufgebaut und enthält Ventilations-schlitzte. Die Wickelungen sind durch 150 mit Mikanitröhren ausgekleidete

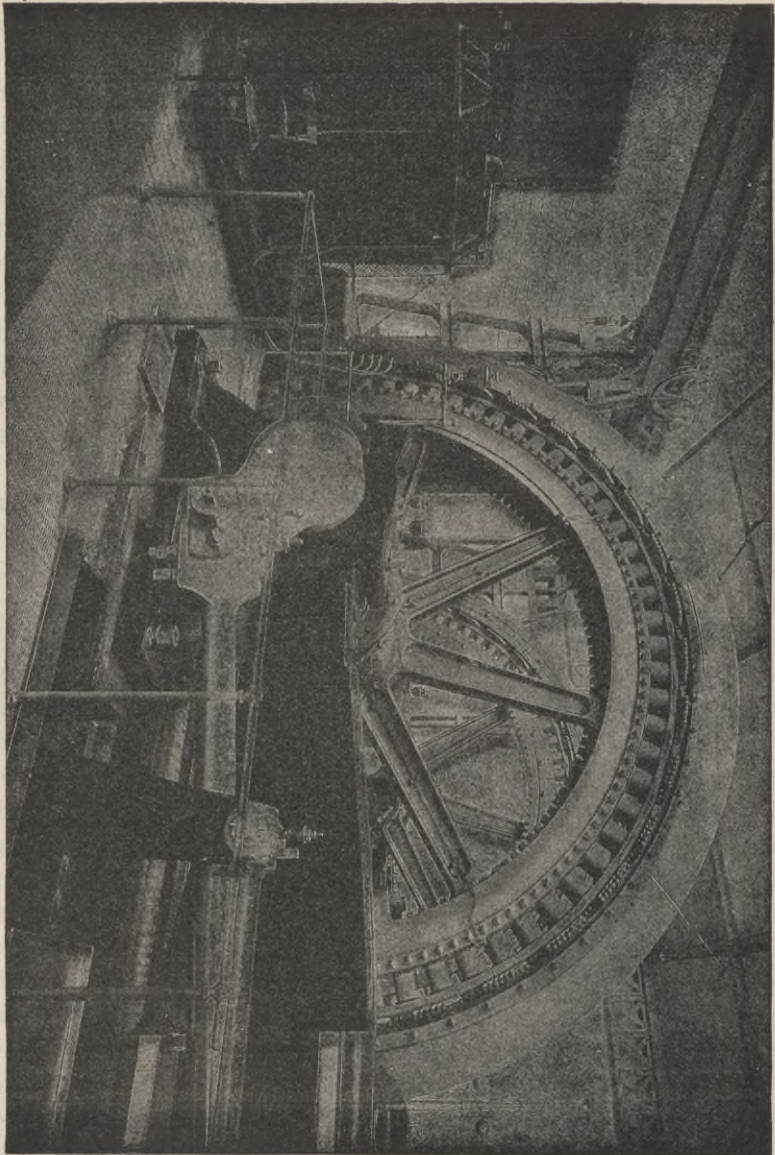
Löcher geführt. Die Erregermaschinen sind vierpolig mit cylindrischen Trommelankern, und geben 1400 Ampere bei 120 Volt. Das sehr sorgfältig entworfene Schaltbrett trägt drei elektrostatische Voltmeter, die zugleich als Erdschlussanzeiger dienen. Eine Klemme jedes Voltmeters ist mit den entsprechenden Hauptleitern verbunden. Die drei andern Klemmen sind mit einander vereinigt und an Erde gelegt. Wenn die Isolation einer der drei Leitungen schadhafte wird, so zeigt das betreffende Voltmeter eine niedrigere Spannung. Die sechs Zuführungskabel sind aus drei mit Ozokeritpapier isolirten Leitern zusammengesetzt, und nebeneinander in einer doppelten Bleihülle untergebracht. Das Ganze trägt eine äussere doppelte Stahldrahtbewicklung. Die Vertheilung in der Stadt Lyon wird durch Transformatoren bewirkt, die in kleinen eisernen Häuschen in den Strassen aufgestellt sind. Die Société Lyonnaise, von welcher diese Werke errichtet worden sind, hat zeitweilig noch zum Betriebe von Lampen und Motoren eine kleine mit Dampf betriebene Drehstromcentrale von 900 P bei 3500 Volt im Betrieb.

Genf. Die Stadt Genf wird aus den Werken in Chèvres mit zweiphasigem Strom versorgt. Diese Anlage ist für 16 von Turbinen getriebene Generatoren berechnet, deren jeder 800—1200 P leistet. Es waren dort zuerst Inductormaschinen nach Thury's Entwurf aufgestellt, bei denen aber die Ankergegenwirkung bei weitem zu gross war. Bei diesen war der Inductor eine aussen umlaufende Glocke von Stahlguss, welche innen zwei Reihen von vorstehenden Polmassen trug. Die beiden Anker, einer über den andern gelegt, waren gegen einander verdreht, so dass sie Ströme lieferten, die um $\frac{1}{4}$ Periode in der Phase von einander verschieden waren. Die Spannung betrug 2700 Volt. Die neuen Stromerzeuger von der Brown'schen Schirmgattung sind auf Tafel VII dargestellt. Der auf Taf. XII abgebildete 1000-pferdige Inductionsmotor mit Pumpenantrieb wird mit Strom von Chèvres versorgt. Ein Theil der Kraft wird durch doppelt gewickelte Umformer, von Alioth & Co. gebaut, in Gleichstrom umgewandelt und dient zum Betriebe von elektrischen Bahnen nach dem Dreileitersystem.

Saint Ouen (Frankreich). Fig. 333 stellt eine Zweiphasen-Kraftstation mit Dampftrieb zu Saint Ouen dar, welche von der Firma Farcot ausgeführt ist, und zwei Wechselstromerzeuger von je 250 KW enthält, die nach dem System von Hutin und Leblanc mit Dämpfungsstromkreisen (Amortisseurs) versehen sind, die in die Polstücke der Feldmagnete eingebettet sind (Fig. 334 und 335). Diese

Maschinen machen 67 Umdrehungen in der Minute. Sie laufen beide parallel; um die genaueste Uebereinstimmung in der Frequenz

Fig. 333. Zweiphasige Wechselstrommaschine von Hutin und Leblanc. Kraftstation St. Ouen.



der Ströme zu erreichen (von denen ein Theil rotirende Umformer speist), ist Vorsorge getroffen, dass die Wechselstrommaschinen

stets dann parallel geschaltet werden, wenn die Kurbeln der beiden Dampfmaschinen im rechten Winkel zu einander stehen. Die Frequenz ist dann so genau übereinstimmend, als wenn nur eine grosse Wechselstrommaschine vorhanden wäre, die durch eine Zweicylindermaschine getrieben würde. Eigenartig ist die von Hutin und Leblanc verwendete Einrichtung, an den Polkernen der Feldmagnete ein System von geschlossenen Stromkreisen anzubringen, die als Dämpfung gegen die Phasenschwingungen¹⁾, welche zuweilen synchrone Maschinen ausser Tritt setzen, dienen sollen. Die Pol-

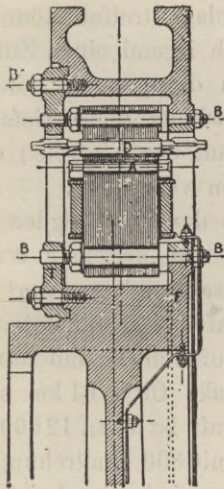


Fig. 334.

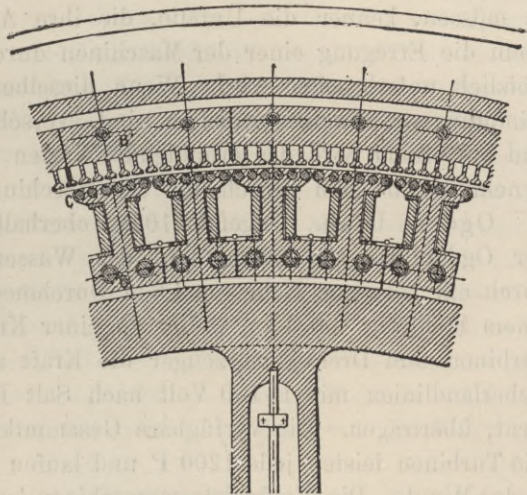


Fig. 335.

oberflächen sind zu diesem Zwecke mit einer Anzahl von Kanälen versehen, durch welche kräftige Stromleiter geführt sind, deren Enden an beiden Stirnflächen kurz geschlossen sind und so eine Art Käfigwicklung bilden. Die nachstehenden überraschenden Versuche, die mit Erfolg zu wiederholten Malen zu St. Ouen ausgeführt sind, beweisen den wirklichen Nutzen dieser Anordnung.

Die beiden Wechselstrommaschinen wurden erregt und auf den Stromkreis parallel geschaltet, alsdann wurde der Erregerstrom von der einen abgeschaltet, die auf diese Weise augenblicklich in einen asynchronen Inductionsgenerator mit Kurzschlussanker verwandelt wurde (vgl. S. 137), und ein wenig rascher lief als die andere. Sodann wurde der Dampf von der Maschine, welche erregt blieb,

1) Vgl. Dynamoelektrische Maschinen, 6. Auflage, S. 627 u. f.

abgestellt. Diese lief nun weiter und drehte ihre Dampfmaschine mit sich. Sie wurde also als synchroner Motor durch den Käfiganker-generator umgetrieben. Unter diesen Umständen lieferte die synchrone Maschine den gesammten Arbeitsstrom, der zum Antrieb der zweiten Maschine nöthig war, die erregt blieb, während die letztere die zur Erregung des synchronen Generators durch Induction erforderlichen wattlosen Ströme lieferte.

Die ausserordentliche Wichtigkeit dieses Versuches braucht kaum noch hervorgehoben zu werden. Alle Ingenieure, welche häufig in der Lage sind, Wechselstrommaschinen parallel schalten zu müssen, kennen die Unfälle, die ihre Anlage treffen können, wenn die Erregung einer der Maschinen durch irgend einen Zufall plötzlich unterbrochen wird. Wenn dieselben dagegen mit einem Dämpfungsstromkreise versehen sind, verschwindet diese Gefahr, und ausserdem wird das ermüdende Warten auf das Eintreten des Synchronismus zum Einschalten der Maschinen vermieden.

Ogden, Utah. Ungefähr 10 km oberhalb der Stadt Ogden ist der Ogdenfluss abgedämmt und das Wasser auf ungefähr 9 km durch ein hölzernes Rohr von 1,8 m Durchmesser, und von dort in einem Stahlrohr um 1 km weiter zu einer Kraftstation geleitet, wo Turbinen und Drehstromerzeuger die Kraft aufnehmen und durch Ueberlandlinien mit 16100 Volt nach Salt Lake City, 61 km entfernt, übertragen. Die verfügbare Gesamtkraft ist etwa 12500 P. Die Turbinen leisten jede 1200 P und laufen mit 300 Umdrehungen in der Minute. Die Wechselstrommaschinen haben jede eine Leistung von 750 KW bei 2300 Volt und einer Frequenz von 60 Perioden in der Secunde. Die Turbinen haben horizontale Achsen und sind jede mit zwei schweren Schwungrädern versehen; sie treiben die mit 24 Polen besetzten Feldmagnete unmittelbar an. Die Kraft wird durch zwei Stromkreise von je drei Drähten nach Salt Lake City übertragen, die derartig bemessen sind, dass sie 3000 P mit einem Energieverlust in der Leitung von ungefähr 10 % übertragen.

Montreal. Montreal hat eine Dampfkraftstation für Beleuchtung mit Zweiphasenströmen und eine andere zur Erzeugung von Gleichstrom für ein ausgedehntes Strassenbahnnetz. In der Nähe sind jedoch zwei grosse Wasserkraftstationen, eine an den Lachine-Fällen, 11 km, die andere in Richelieu, ungefähr 40 km entfernt. In Lachine sind 12 Drehstromgeneratoren von je 750 KW vorgesehen, von denen 4, von der General Electric Co. gebaut, bereits aufgestellt sind. Sie laufen mit 175 Umdrehungen in der

Minute und arbeiten mit 4400 Volt bei einer Frequenz von 60 Perioden in der Secunde. In Richelieu beträgt die verfügbare Wasserkraft 20000 P und der Entwurf sieht 8 Generatoren von je 2200 KW vor, von denen 4 bereits fertig sind. Die Turbinen haben horizontale Achsen; 4 Turbinen von je 660 P sind mit einem Generator gekuppelt. Die Generatoren sind zweiphasige Inductionsmaschinen der Stanley-Kelly-Type. Ihr umlaufender Inductor hat ungefähr 3 m Durchmesser. Sie arbeiten mit 12000 Volt und einer Frequenz von 66 Perioden in der Secunde. Die doppelt vorgesehenen Ueberlandlinien führen die Kraft mit dieser Spannung nach Montreal. Diese Anlage ist vor zwei Jahren umgebaut, indem 4 Generatoren der General Electric Co. mit 2200 KW und 2200 Volt Phasenspannung aufgestellt wurden. Diese Maschinen erzeugen ebenfalls Zweiphasenstrom, sie besitzen rotirende Felder, deren Spulen aus hochkantig gewickeltem Flachkupfer bestehen. Die Erzeugungsspannung wird durch 10 Transformatoren mit Scott-Schaltung auf 25000 Volt herauftransformirt und die Kraft als Dreiphasenstrom nach Montreal geleitet. Weiteres siehe Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 876. Für die Versorgung des Bezirks Quebec-Montreal werden neuerdings auch die Shawinigan-Fälle mit etwa 200000 P nutzbar gemacht, es werden dort Turbinen von je 6000 P aufgestellt, welche mit zweiphasigen Generatoren von je 3750 KW direkt gekuppelt sind. Die Maschinen sind mit rotirendem Felde von der Westinghouse Co. gebaut.

Sofia. Diese von Oerlikon hergestellte Anlage benutzt eine 22 km von der Stadt entfernte Wasserkraft in Pantcharevo in den Ausläufern des Vitosgebirges, von welcher z. Z. 2000 P ausgenutzt werden. Die Turbinen sind für ein Gefälle von 52—55 m, einen secundlichen Wasserverbrauch von ca. 950 Liter und eine Leistung von 500 P bei 400 Umdrehungen in der Minute (bei einem Wirkungsgrade von 75 %) gebaut. Die Turbinen sind Jonval-Turbinen mit innerer Beaufschlagung. Zwischen Laufrad und Leitrad befindet sich ein Ringschieber zur Regelung der Leistung, der durch das Wasser so ausbalancirt wird, dass er mit geringer Kraft von Hand oder einem Hilfsmotor mit Sperrklinkenwirkung bewegt werden kann. Die direkt gekuppelten Generatoren sind ganz ähnlich den in Fig. 104 dargestellten, sie leisten 425 KW und erzeugen Drehstrom von 8000 Volt verketteter Spannung bei 53 Perioden in der Secunde. Die in 48 offenen Nuten liegenden auf Schablonen gewickelten Ankerspulen bestehen aus 65 Windungen von 3,4 mm

Kupferdraht, welcher von nahtlosen Mikanitrohren umschlossen ist. Das Magnetrad besitzt 16 aus gestanzten Blechen hergestellte Pole.

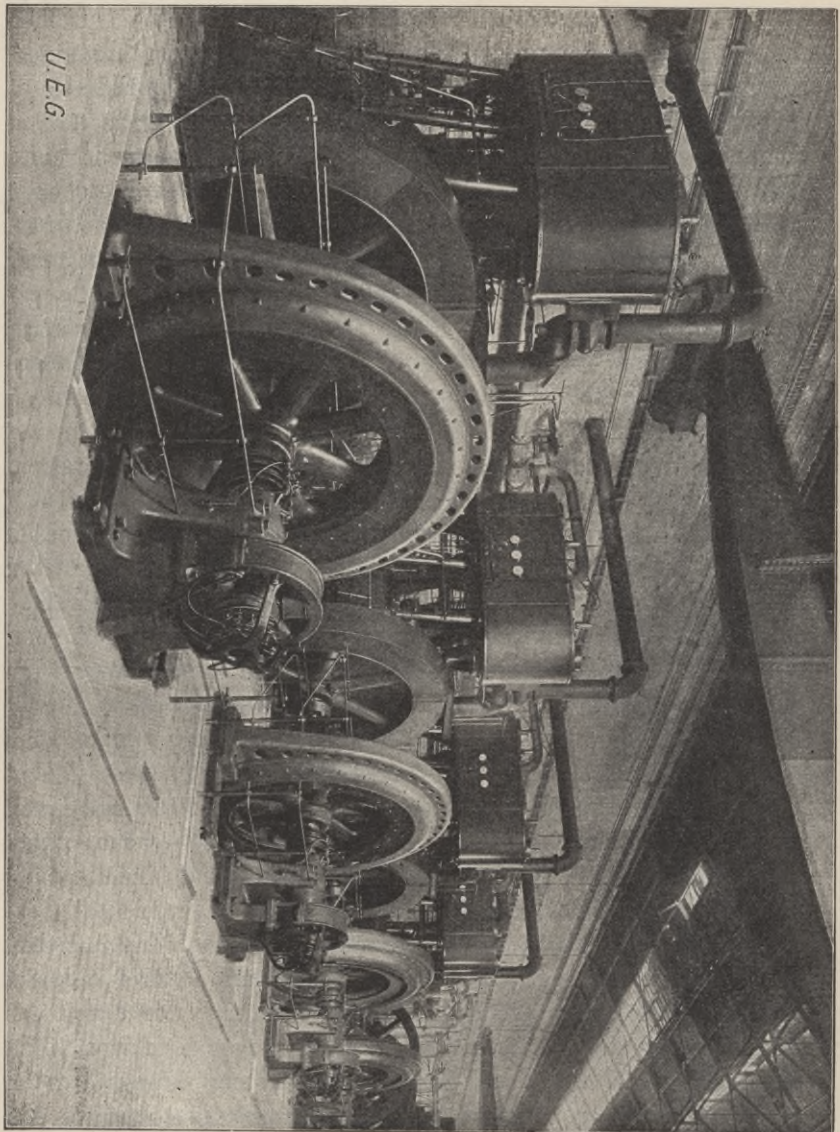


Fig. 336. Union, Centrale Madrid.

Die Magnetspulen bestehen aus 110 Windungen von 7 mm Kupferdraht. Zur Erregung dient eine vierpolige Gleichstrommaschine von 9 KW Leistung bei 50 Volt, deren Anker auf der Generatorwelle

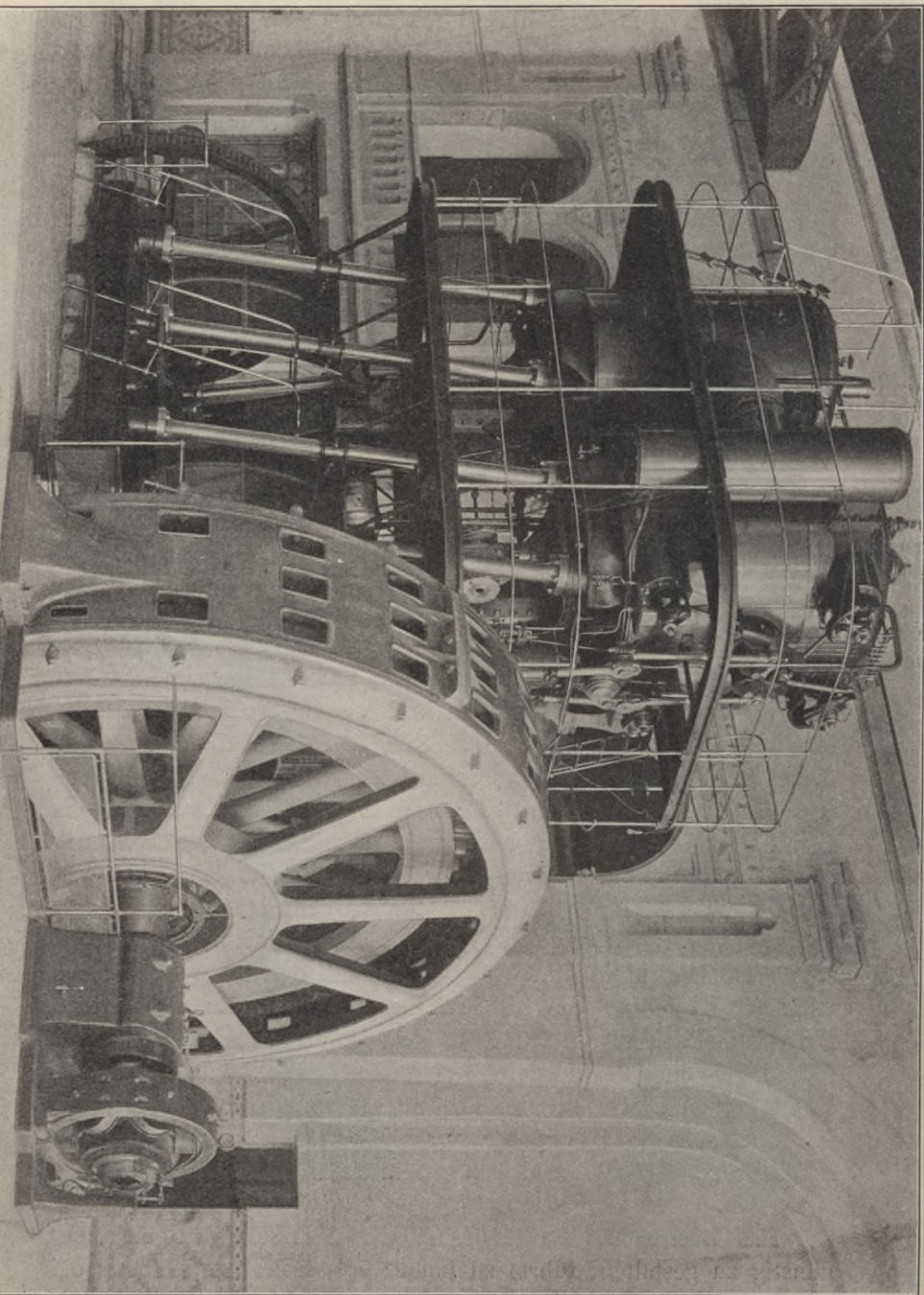
aufgekeilt ist. Die Kraft wird durch zwei Leitungen zur Stadt geführt, von denen eine für den Kraftbedarf, die andere für die Lichtversorgung bestimmt ist. In der Stadt wird die Spannung von 7200 Volt auf 156 Volt heruntertransformirt.

Madrid. Die in Fig. 336 dargestellte Centrale ist ursprünglich von einer englischen Gesellschaft errichtet, jedoch im Jahre 1898 von der Union Electricitäts-Gesellschaft in Berlin gänzlich umgebaut worden. Mit Rücksicht auf die bereits bestehende Anlage und die weite Verzweigung des Netzes konnte nur Wechselstrom in Betracht kommen; man wählte eine modificirte Form des letzteren, das monocyclische System (vgl. S. 147 ff.), bei welchem eine dritte, mit einer Hilfwicklung des Generators verbundene Leitung, der sog. Teazer, das Anschliessen von asynchronen Motoren unter Belastung gestattet.

Die vorerst aufgestellten 4 monocyclischen Generatoren werden von 4 stehenden Compound-Dampfmaschinen mit Condensation direkt angetrieben, sie leisten bei 125 Umdrehungen in der Minute und inductionsfreier Belastung 450 KW, die Spannung schwankt je nach der Belastung zwischen 2040 und 2200 Volt. Die Periodenzahl ist 50. Die 4 Erregermaschinen leisten jede 18 KW. Die Hochspannung wird durch Kabel an die Unterstationen geführt und dort durch 76 Oeltransformatoren auf 2×104 Volt heruntertransformirt. Die Transformatoren sind in 38 Strassenkiosken, ähnlich denen der Fig. 288 u. 289 aufgestellt.

Pariser Ausstellung 1900. Die Fig. 337 stellte eine für die Centrale in Essen a. d. Ruhr bestimmte Kraftereinheit von 1350 KW dar, welche 1900 in Paris von den vereinigten Maschinenfabriken Augsburg und Nürnberg und der Electricitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M. ausgestellt war. Die Dampfmaschine treibt direkt auf der einen Seite einen Gleichstromerzeuger von 350 KW Leistung, auf der andern eine Drehstrommaschine von 1000 KW bei 5000 Volt Spannung. Letztere hat 64 Pole und 94 Umdrehungen in der Minute, woraus sich die Frequenz von 50 Perioden ergibt. Die Figuren 338 und 339 zeigen im Einzelnen die Bauart der Maschine. Wegen weiterer Einzelheiten wird auf die zahlreich erschienenen Ausstellungsberichte verwiesen.

Das Bestreben, die Kraftereinheiten der Centralen möglichst günstig zu gestalten, führte zu immer grösseren Abmessungen der Generatoren, und dies zwang schon aus mechanischen Gründen zu



einem massigen Aufbau; trotzdem zeigten die horizontal ausgebohrten Gestelle beim Aufrichten Verdrückungen, die durch Versteifungen und Verspannungen beseitigt werden mussten (vgl. Fig. 2). Die Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft in Berlin, welche in den letzten Jahren viele Centralen mit Maschinen Modell NDM (Tafel XVII des Verfassers Werk: Die Dynamoelctrischen Maschinen, 6. Aufl.) ausrüstete, das schon eine wesentliche Gewichtersparniss gegenüber den Rheinfeldener Maschinen Modell O Fig. 139 darstellte, ging nach vielen Versuchen dazu über, das gusseiserne Gehäuse als Träger der Construction zu verlassen und als solchen den durch die magnetischen Verhältnisse gegebenen Blechkranz zu benutzen, der ein zwar elastischer, aber ein ausserordentlich zäher Körper ist,

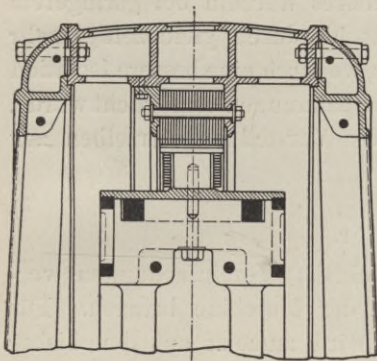


Fig. 338.

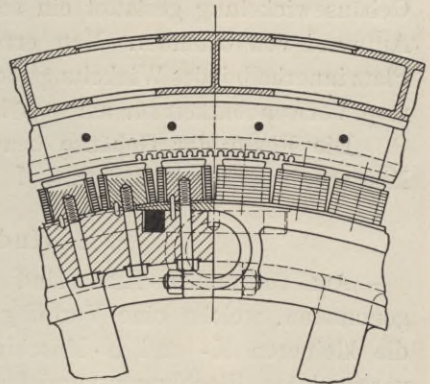


Fig. 339.

und durch ein System von Zugstangen zu einem völlig steifen Körper gemacht wird. Es ist dadurch eine wesentliche Verminderung des theuren Kupfergewichtes erzielt, ohne dass eine entsprechende Steigerung der Eisenmasse nothwendig wird. Denn diese neue Bauart ohne Gehäuse und mit Schlitten im magnetischen Eisen gestattet durch die wesentlich bessere Kühlung eine stärkere Beanspruchung des die Polwechsel erleidenden Eisens, und somit vielfach noch eine Verminderung der Eisenmenge gegen die frühere Bauart. Tafel V und die Fig. 340 stellen eine solche Spannwerkmaschine dar.

Bezüglich der Construction der Maschine wäre im Einzelnen noch Folgendes zu bemerken:

A. Gehäuse.

Wie schon oben bemerkt, kommt das gusseiserne Gehäuse vollständig in Wegfall. Der schmiedeeiserne Blechring, in welchem

die Drehstromwicklung gebettet ist, bleibt in seinen Dimensionen nahezu bestehen wie bisher; für die gleiche Leistung wird der Kranz etwas schmaler und dünner entsprechend der besseren Ausnutzung des Materials. Dieser an sich elastische und nachgiebige Ring wird durch ein bzw. zwei Systeme von Spannstangen verspannt, also steif gemacht. Die Construction wäre zu vergleichen mit modernen Eisenconstructions im Brückenbau, oder andererseits auch mit dem Spannwerk am Fahrrad.

Die Wicklung wird ohne Bandumwicklung ausgeführt. Die Spule der einzelnen Kanäle wird an den Seiten durch Kordel verbunden, so dass auch in dieser Beziehung das Aussehen thunlichst constructiv und elegant gestaltet ist. Eine etwas gröbere Theilung der Gehäusewicklung gestattet ein schnelleres Wickeln bei geringerem Aufwand von Glimmer. Man erreicht hierdurch gleichzeitig mehr Platz innerhalb jedes Wickelungsloches, wodurch eine bessere Isolation resp. Verwendbarkeit für um so höhere Spannungen ermöglicht wurde.

Die Füße der Gehäuse bzw. die Verstellung derselben zur Montage bleiben wie bisher.

B. Inductor.

Am rotirenden Theil sind gleichfalls Vereinfachungen vorgenommen, welche eine Verbilligung der Maschine bringen. Für die kleineren K- und N-Maschinen wird zumeist auf den bisher verwendeten Blechkranz verzichtet und die Polhörner direkt auf das Gusseisenrad geschraubt. Die niedrige Umfangsgeschwindigkeit gestattet diese Construction und stellt sich der Preis insbesondere auch wegen einer weitergehenden besseren Ausnutzung des Inductors als Schwungring billiger.

Die grosse G-Maschine behält den Blechkranz, derselbe wird in einer abgeänderten patentirten Weise derartig ausgeführt, dass der Blechring, in welchem die Polhörner mittels Schwalbenschwanz und Keilen eingefügt sind, um den Gusseisenkörper herumgelegt, aber nicht mehr mit diesem verschraubt, sondern mit Keilen gegen ihn verspannt wird.

Der Blechkranz, die elastische Blechkette wird durch sein Eigengewicht und ferner durch die Gewichte von Polhorn und Spule belastet, d. h. er wird durch dieses Gewicht gedehnt. Die Beanspruchung, welche durch diese Belastung und Dehnung des Materials in dem Kranz auftritt, ist genau zu berechnen, es kommen keine unbestimmbaren Grössen in die Rechnung, wie bei einem

steifen Guss- oder Stahlgussrade, bei welchem zudem auch noch völlig unbestimmbare Gussstressungen hinzukommen. Ausserdem

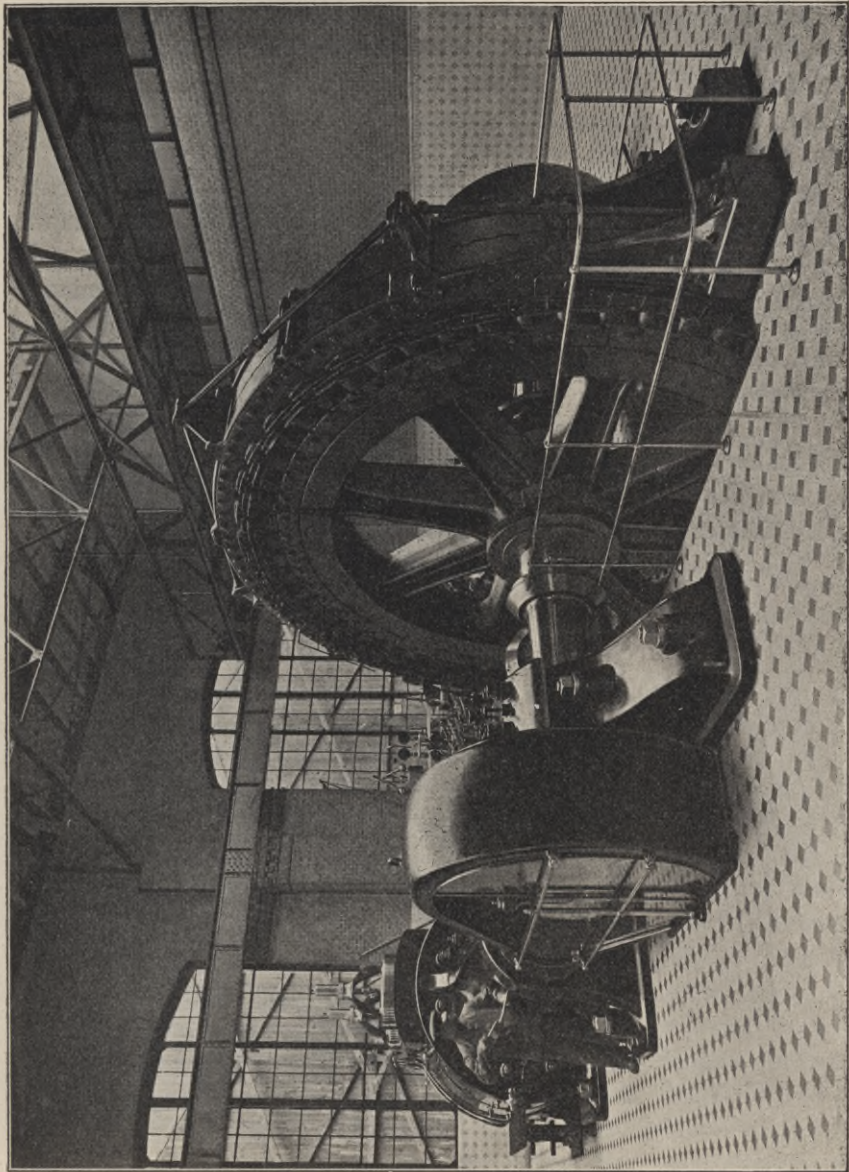


Fig. 340. Spannermaschine der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

ist die zulässige Materialbeanspruchung von Eisenblech ungleich höher, als die des Gusseisens oder Stahlgusses.

Die Erregerspulen sind abnehmbar und werden unten wie oben gegen einen Ring oder Rahmen aus Blech gepresst. Das Aussehen der Spule in dieser Weise ist sehr constructiv und dürfte dem Aussehen der blanken Spule als völlig gleichwerthig gelten. Für eine grosse Zahl von Maschinen sind auch blanke Spulen möglich; blanke Spulen erfordern jedoch für jede Maschine anderen Façon-Kupferdraht, daher längere Liefertermine, oft auch andere Spannungen der Erregung.

Die Polschuhe, hergestellt aus massivem Flacheisen von sehr grossem Querschnitt werden an die lamellirten Polhörner angeschraubt. Die Dämpferwirkung dieser Polschuhe ist zwar nur gering, in vielen Fällen, insbesondere bei höheren Gleichförmigkeitsgraden dürfte sie aber genügen. Eine Garantie für sicheren Parallelbetrieb, ohne besondere Dämpferwicklung zu geben, ist jedoch unmöglich.

Sollten in einem oder anderen Falle Zweifel bestehen, ob Dämpferwicklung erforderlich ist, so ist es möglich, dieselbe noch nachträglich einzusetzen, d. h. es können die Polschuhe gegen solche mit Dämpferwicklung ausgewechselt werden.

Kapitel XVIII.

Mehrphasige elektrische Bahnen.

Der grösste Fortschritt, der in der Anwendung mehrphasiger Maschinen seit der Veröffentlichung der ersten Auflage dieses Werkes 1895 gemacht wurde, liegt in der Einführung mehrphasigen Betriebes bei elektrischen Bahnen. In diesem Zweige der Technik ist Brown Bahnbrecher gewesen, welcher das erste derartige Unternehmen, die elektrische Bahn in Lugano, ausführte. Bei diesem System werden zwei Phasen durch eine oberirdische Doppelleitung zugeführt, während die Schienen als dritte Leitung dienen. Jeder Wagen trägt doppelpolige Stromabnehmer. Ein Bild des Wagenuntergestells ist in Fig. 341 dargestellt. Dieser Anlage folgten vier Bergbahnen in der Schweiz von einer Übergangstype, während das sechste Unternehmen eine Vollbahn von normaler Spurweite ist, auf der gewöhnliche Betriebsmittel verkehren, nämlich die 40 km lange Linie Burgdorf—Thun im Kanton Bern. Die ganze Länge der mit Mehrphasenmotoren betriebenen Bahnen betrug 1898 etwa 110 km, von denen einige doppelgleisig sind, so dass die Gesamtgleislänge über 160 km beträgt. Mit Ausnahme der leichten Bahn in Evian-les-Bains sind die elektrischen Einrichtungen aller dieser Linien von Brown, Boveri & Co. ausgeführt. Sonstige mehrphasige Eisenbahnen wurden weder in Europa noch in Amerika gebaut, obwohl mehrphasige Methoden der Kraftübertragung von Kraftcentralen aus an Umformer, welche Bahnmotoren mit Gleichstrom speisen, sehr zahlreich vorhanden sind. In Deutschland sind drei solcher Linien vorhanden, eine im Elbthal 40 km lang, eine andere im Riesengebirge 37 km lang. Es sind beides Schmalspurbahnen mit 1 m Spur und mit Steigungen bis zu 7 und 10 %. Beide Bahnen sind von Kummer & Co. geliefert. Diese Firma baut auch eine elektrische Vollbahn von Murnah nach Oberammergau

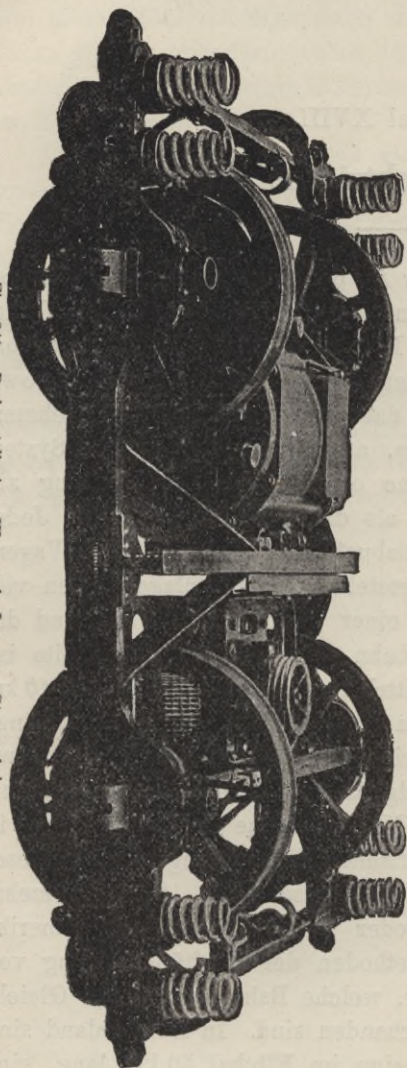
in Bayern. Eine andere Linie in Varese im nördlichen Italien ist von der französischen Thomson-Houston-Gesellschaft ausgeführt. Die nebenstehende Tabelle enthält Angaben über einige dieser Unternehmungen. Die Vollbahn von Burgdorf nach Thun,

die im Juli 1899 eröffnet wurde, hat normales rollendes Material. Die Linie nach Evian-les-Bains ist eine ganz kleine Anlage; nur ein einziger Wagen fährt stetig zwischen den Endpunkten hin und zurück. Von der Jungfraubahn ist erst ein Theil fertiggestellt, nämlich von der kleinen Scheideck auf den Eiger-gletscher. Taf. XIV zeigt die Anordnung der beiden Motoren und die Construction der auf dieser Linie fahrenden Lokomotiven. Eine genaue Zeichnung des Motors ist in den „Dynamoelektrischen Maschinen“, 6. Aufl., enthalten.

Die Jungfraubahn erhält ihren Strom aus einem im Thal der Lütschine erbauten Kraftwerk. Die Generatoren sind von der Oerlikon-Gesellschaft geliefert. Es sind Inductormaschinen, welche ein ausgezeichnetes Beispiel einer für Hochspannungsgeneratoren geeigneten Wicklung darstellen. Sie erfordern 500 P und leisten 7000 Volt bei 380 Umdrehungen in der Minute und 38 Perioden in der Secunde.

Die Engelberg-Linie wird von Motorwagen befahren, welche durch Adhäsion sich über den grössten Theil der Linie fortbewegen, aber über eine sehr starke Steigung, wo Zahnschienen liegen, durch besondere elektrische Lokomotiven geschoben werden.

Fig. 311. Drehgestell eines Wagens in Lugano. Strassenbahn.



Angaben	Trambahnen		Bergbahnen				Vollbahn
	Lugano		Gornergrat	Evian - les - Bains	Jungfrau	Engelberg	
Länge der Linie in km	3		8,8	0,35	3	29	40
Spurweite in m	1		1	1,1	?	1	1,435
Spannung der Generatoren	5500		5400	5200	7000	—	16000
Spannung der Motoren	400		540	200	520	750	750
Frequenz	40		40	50	38	40	40
Maximalgeschwindigkeit in km	15		7	10	6	5 auf der Steigung 20 in der Ebene	36
Zahl der Plätze	24 jeder Wagen		110 der Zug	14 jeder Wagen	40 jeder Wagen	40 jeder Wagen	Normale Eisenbahnwagen
Steigungen in Procenten	6		20 (Zahnstange)	10,2	25 (Zahnstange)	25 (Zahnstange); 5	2,5
Entfernung der Kraftstation in km	12		0,2	13	7	an der Linie	9 km von Thun
Gewicht der Lokomotive in Tonnen	4,6		10,5	3,8	13	10	28
Stärke der Motoren in P.	20		2 × 90	15	2 × 150	2 × 75	2 × 150
Tag der Eröffnung des Betriebes	Juni 1896		August 1898	Juni 1898	September 1898	October 1898	Juli 1899

Alle diese Linien, die in der Tabelle aufgeführt sind, arbeiten nach dem Drehstromsystem und sind reine Dreiphaseneisenbahnen. Der Grund, weshalb man Drehstrom lieber als Zweiphasenstrom wählt, besteht darin, dass der erstere eine grössere Oekonomie bei der Uebertragung und im Betriebe gibt und ferner, weil der Drehstrommotor leichter anläuft. In fast allen den oben erwähnten Fällen liegt die Kraftstation in einiger Entfernung von der Linie; die Kraft, durch Wasser oder auf andere billige Weise erzeugt, wird mit hoher Spannung nach verschiedenen Stellen der Linie übertragen, dort auf 500 Volt heruntertransformirt und den Leitungen und Schienen zugeführt. Die Wagenmotoren erhalten ihren Strom aus den Zuleitungen mit Hilfe zweier gewöhnlicher Stromabnehmer, der Räder und des Wagengestelles. Die Schienen sind in gewöhnlicher Weise verbunden und zum Theil durch Kupferleiter unterstützt. Das rollende Material besteht entweder aus einer Lokomotive mit einem oder mehreren Motoren, oder aus Motorwagen mit einem oder mehreren Motoren auf jedem Wagen, die durch eine der unten beschriebenen Methoden zum Anlaufen und zur Geschwindigkeitsregelung geeignet gemacht werden.

Fig. 342 zeigt einen zum Betriebe einer Schmalspurbahn dienenden Drehstrommotor von Siemens & Halske. Hier ist die sonst übliche Anordnung, den Hochspannungsstrom in den Ständer einzuführen, verlassen, und umgekehrt die Hochspannung in den Läufer eingeführt. Es ist dies aus Gründen der Betriebssicherheit geschehen, damit bei eventl. Durchschlagen der Läufer rasch ausgewechselt werden kann. Aus dem gleichen Grunde ist die Wicklung des Läufers als Schablonenwicklung ausgeführt, um einzelne Spulen rasch ersetzen zu können.

Anlauf-Drehmoment. — Ein für Lokomotiven berechneter Drehstrommotor weicht ziemlich bedeutend von einem gewöhnlichen Eisenbahnmotor ab, soweit sein Anlauf-Drehmoment in Frage kommt. Der mit Reihenwicklung versehene Eisenbahnmotor hat natürlich seine grösste Zugkraft beim Anlaufen, die indessen durch die Sättigung der Felder und die Stärke des zugeführten Stromes begrenzt wird; d. h. wenn nicht die Gefahr des Durchbrennens der Wicklungen vorhanden wäre, könnte ein derartiger Motor eine unbegrenzte Zugkraft ausüben, wenn man ihn einfach in die Linie einschaltet und auf diese Weise den Wagen unter Belastung sofort angehen lässt. Wesentlich anders liegt die Sache beim Dreiphasenmotor. Die Zugkraft eines Mehrphasenmotors beim Anlaufen ist

bedeutend weniger gross als die Maximalzugkraft, und überhaupt ist ein solcher Motor nicht im Stande anzulaufen, ohne dass ein bestimmtes Maass von Widerstand in seinen Anker eingeschaltet wird. Er ist in seinem Verhalten einem Nebenschlussmotor sehr ähnlich, ist aber diesem für Bahnzwecke aus folgendem Grunde weit überlegen: Die Zugkraft eines jeden Motors hängt von zwei Factoren ab, nämlich von der Feldstärke und vom Ankerstrom. Nun ist aber ein Nebenschlussmotor stets so gebaut, dass das Magnetfeld ziemlich gesättigt ist und der Magnetismus jenseits oder an der Biegungsstelle der Magnetisirungskurve liegt; die Zugkraft eines solchen Motors kann daher durch eine Vermehrung des Feld-

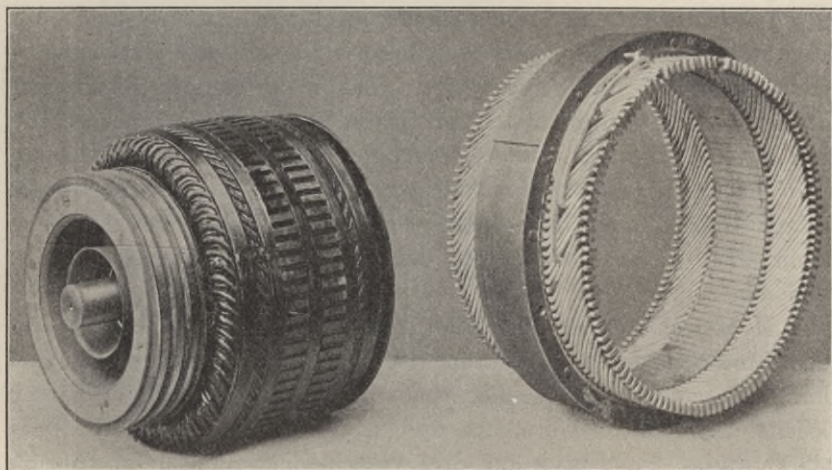


Fig. 342. Drehstrommotor für Schmalspurbahnen von Siemens & Halske.

stromes nicht wesentlich vergrössert werden, sie muss also nothwendiger Weise nur von dem Ankerstrom abhängen, welcher seinerseits ebenfalls nicht beliebig verstärkt werden kann. Dagegen ist das Ständerisen mehrphasiger Motoren (wegen der Eisenverluste und der magnetischen Streuung) stets bedeutend unter dem Sättigungsgrad. Die Kraftliniendichte ist für Perioden von ungefähr 40—50 nur etwa 7000 Linien auf das qcm. Demnach kann die Zugkraft eines Drehstrommotors, dessen Läuferstrom durch den vortheilhaftesten Werth des Läuferwiderstandes begrenzt ist, ganz bedeutend vermehrt werden, indem man einfach das Ständerfeld verstärkt. Wir sahen nun (Seite 243), dass das Ständerfeld von der Spannung an den Ständerklemmen abhängt; indem wir also

die Ständerspannung beim Anlaufen vergrössern, sind wir im Stande, die Zugkraft eines Drehstrommotors weit mehr als die eines Nebenschlussmotors zu steigern, so sehr, dass sie der Zugkraft eines Reihenmotors beim Angehen nahe kommt. Diese Vergrösserung der Ständerspannung beim Anlaufen kann leicht und ökonomisch durch eine der folgenden Methoden bewirkt werden.

I. Durch Verändern der dem Motor zugeführten wirklichen Spannung. Hierbei wird ein dreiphasiger Transformator auf dem Wagen mitgeführt, welcher wie eine Zusatzmaschine (Booster) wirkt, und dessen secundäre Wickelung mit dem Ständer in Reihe geschaltet ist. Beim Anlaufen oder bei starken Steigungen kann man durch eine einzige Bewegung eines doppelpoligen Schalters die Primärwicklung des Transformators und die Ständerwickelungen, mit welchen die Secundärwicklung in Reihe geschaltet sind, mit den Stromabnehmern verbinden. In Folge dessen erhalten die Ständerwickelungen die Spannung der Stromabnehmer plus der durch die Zusatzmaschine gelieferten Spannung. Einen derartigen Transformator einzubauen, bietet keine besonderen Schwierigkeiten, denn die Stromdichte in seinen Wickelungen kann sehr gross und sein Eisengewicht sehr klein sein, da er nur während kurzer Zeiträume eingeschaltet ist und daher bedeutend überlastet werden kann.

II. Durch Aendern der Anordnung der Ständerwicklung. Die dem Motor zugeführte Spannung ist einfach die Spannung der Zuleitungen, es wird jedoch die Spannung an den Enden besonderer Wickelungselemente vermehrt und dadurch das Ständerfeld verstärkt. Dies kann man auf drei verschiedene Weisen ausführen, erstens, indem man die Verbindungen von Stern- auf Dreieckschaltung umlegt, wodurch die Spannung in jeder Phase im Verhältniss von 1 : 1,73 vermehrt und so die Feldstärke um nahezu 75 % vergrössert wird. Diese Methode ist von Brown¹⁾ als die beste zur zeitweiligen Vermehrung der Zugkraft eines mehrphasigen Motors empfohlen worden. Der zweite Weg besteht darin, beim Anlaufen einzelne Ständerwickelungen parallel zu schalten. Haben wir beispielsweise einen vierpoligen Drehstrommotor in Sternschaltung, jeder Pol besonders gewickelt, und verfolgen wir die Wickelung jeder Phase, so geht der Linienstrom beim Anlaufen von einer Motorklemme ausgehend durch alle Spulen in Reihe nach dem Ende der vierten Spule, die den gemeinsamen Verbindungs-

1) Siehe Journ. of Inst. C. E., Band 26, S. 424—425.

punkt darstellt; ebenso ist es auch bei den andern Phasen. Wenn wir nun die einzelnen Spulen an einem Commutator so anordnen, dass die vier Spulen einer Phase zu je zweien parallel und die beiden so gebildeten Gruppen hinter einander geschaltet werden, so erhalten wir die doppelte Spannung für jeden Pol, und folglich erhalten wir auch die doppelte Zahl der Kraftlinien für jeden Pol. Der Anwendung solcher Reihenparallelschaltung steht entgegen, dass der erforderliche Commutator nothwendigerweise complicirt und schwer in Ordnung zu halten ist. Schliesslich gibt es noch einen dritten Weg, denselben Zweck zu erreichen, der aber nur da anwendbar ist, wo zwei oder mehr Motoren auf demselben Wagen aufgestellt sind, nämlich eine parallele Reihenschaltung der Motoren. Dies entspricht genau der Anordnung bei Gleichstrom. Die beiden Motoren sind in Reihe beim Anlaufen und parallel beim normalen Gang geschaltet, der einzelne Motor strebt daher beim Anlaufen die halbe Geschwindigkeit, und in Parallelschaltung die volle Geschwindigkeit zu erreichen. Aber man sieht leicht ein, dass diese Arbeitsmethode von der mit Gleichstrom beträchtlich abweicht und keineswegs dieselben Vorteile bietet: Sie hat keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Wagen, ihr einziger Zweck ist nur das Vergrössern der Zugkraft beim Angehen. Es würden daher, wenn diese Reihenparallelschaltung für einen mit zwei Drehstrommotoren ausgerüsteten Wagen angenommen würde, diese Motoren einzeln sehr viel grösser sein müssen als gleichwerthige Gleichstrommotoren. Als Regel kann man also sagen, dass einfache Reihenparallelschaltung nicht ökonomisch sein kann, jedoch kann eine weiter unten beschriebene Abänderung ganz dieselben Vortheile wie die Gleichstromanordnung und auch gleich gute Resultate liefern.

Geschwindigkeitsregelung. Während die vorbeschriebenen Anordnungen gute Ergebnisse in Bezug auf das Anlaufen geben, hat keine derselben einen Einfluss auf die Regelung der Fahrgeschwindigkeit. Wie schon vorher auseinandergesetzt, ist der Abfall der Geschwindigkeit jedes Asynchronmotors zwischen den Grenzen Leerlauf und volle Belastung sehr klein, es würden daher die Betriebsmittel stets mit einer bestimmten (praktisch synchronen) Geschwindigkeit laufen, wofern nicht besondere Anordnungen getroffen werden, dies zu verhindern. Abgesehen von der unpraktischen Methode, diesen Zweck durch Verändern der Periodenzahl des Speisestromes zu erreichen, gibt es noch drei Wege, auf

denen das Ziel, in wirtschaftlicher Weise die Geschwindigkeit von Mehrphasenmotoren zu verändern, erreichbar ist. Diese Wege sind folgende:

I. Man schaltet einen inductionsfreien Widerstand in den Läuferkreis. Wie wir schon gesehen haben, hängt der Ständerstrom und die Zugkraft eines Mehrphasenmotors von dem Verhältniss ab, das zwischen dem Widerstand des Läufers und seinem Schlipf obwaltet, und ferner von bestimmten Constanten des Motors. Hieraus folgt, dass wir die Geschwindigkeit eines Mehr-

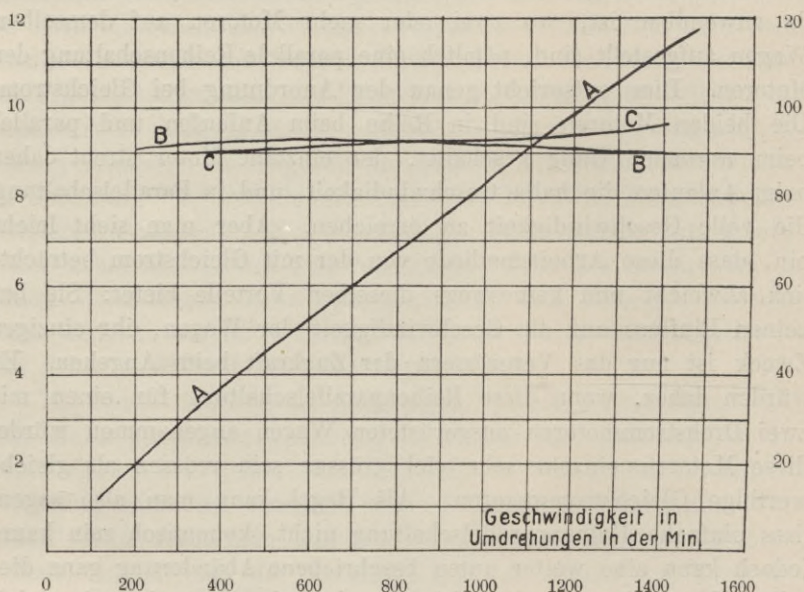


Fig. 343.

phasenmotors bei gleichbleibender Zugkraft (und Ständerstrom) durch einfaches Regeln des Läuferwiderstandes verändern können. Diesen Weg hat Brown bei allen seinen Arbeiten auf diesem Gebiete beschritten, er fand, dass hierbei allen Anforderungen am besten entsprochen wurde. Die Läufer der Wagenmotoren sind mit einer regelmässigen in Stern geschalteten Dreiphasenwicklung versehen, deren Enden an drei Schleifringe geführt werden. Da der Regel nach die Läuferströme von beträchtlicher Stärke sind, so wird der Läuferwiderstand unmittelbar neben dem Motor aufgestellt, um grössere Längen schwerer Kabel zu vermeiden. Der Widerstand ist aus Nickel- oder Rheotanstreifen aufgebaut

(bei ganz grossen Motoren auch aus gusseisernen Bändern), die in drei Reihen mit einander verbunden sind, deren Enden an einer Seite zusammenlaufen, so dass die Streifen in ihrer Gesammtheit in der That einen in Stern geschalteten inductionsfreien Widerstand darstellen. Mit Hülfe eines Schleifkontakts wie in Fig. 198 kann mehr oder weniger Widerstand eingeschaltet oder er kann auch ganz kurzgeschlossen werden. Der Kontakt ist vom Führerstande aus steuerbar. Die Wirkung der Veränderung des Läuferwiderstandes eines Mehrphasenmotors bei constanter Belastung ist in den Curven der Fig. 343 dargestellt, welche Louis Bell bei Versuchen an einem zwölfpferdigen Drehstrommotor erhielt. Die Linie *AA* zeigt die Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Leistung, *BB* diejenigen zwischen Geschwindigkeit und Leistungsfactor, und endlich *CC* die Abhängigkeit zwischen Ständerstrom und Geschwindigkeit. Wie man sieht, sind Ständerstrom und Leistungsfactor, praktisch genommen, als constant anzusehen, also unabhängig von der Geschwindigkeit, ein Ergebniss, welches mit der Theorie übereinstimmt.

Diese Methode der Geschwindigkeitsregelung ist einfach und bequem und bietet noch den Vortheil, dass die 500 voltigen Stromkreise des Ständers niemals unterbrochen werden. Sie hat nur den einzigen Nachtheil, dass sie wenig ökonomisch ist, da der Ständerstrom constant bleibt und im Widerstand reine Energieverluste eintreten. Von diesem Standpunkt aus betrachtet, ist die Methode gleichwerthig mit der Regelung eines Nebenschlussmotors durch Einschalten eines Widerstandes in den Ankerstromkreis.

II. Man ändert die Zahl der Ständerpole. Die Geschwindigkeit eines Mehrphasenmotors wird bekanntlich durch die Gleichung ausgedrückt:

$$\frac{\text{Periodenzahl}}{\text{Ständerpolpaare}} \times 60 = \text{Zahl der Umdrehungen/Minute.}$$

Die Aenderung der Polzahl gewährt daher ebenfalls ein Mittel, die Geschwindigkeit zu regeln. Wird mit Hülfe einer geeigneten Einrichtung die Zahl der Pole verdoppelt, so wird die Geschwindigkeit auf die Hälfte des früheren Werthes sinken. Es ist indessen einleuchtend, dass eine solche Anordnung wenig schmiegsam ist; der Veränderlichkeit der Geschwindigkeit entsprechend kann man bei ihr, und meistens muss man bei ihr eine starke Untertheilung der Ständer vornehmen, die eine verwickelte und kostspielige Regelungsvor-

richtung erforderlich macht. Aus diesen Gründen ist dieser Weg wenig gangbar und bis jetzt auch in der Praxis noch nicht beschritten worden.

III. Die Tandemschaltung. Diese Methode zur Regelung der Geschwindigkeit, die zugleich eine grosse Anzugkraft bietet, wurde unabhängig von einander und gleichzeitig von Görges in Deutschland und Steinmetz in Amerika 1897 angegeben. Sie ist in ihren Wirkungen mit der Reihenparallelschaltung der Gleichstrommotoren gleichwerthig und stellt die am sparsamsten arbeitende Methode der Geschwindigkeitsregelung dar. Der Betrieb gestaltet sich hierbei folgendermaassen: Auf jedem Wagen sind zwei Motoren, die jedoch nicht gleich zu sein brauchen, angebracht, z. B. auf jeder Achse ein Motor. Jeder Läufer ist gewickelt und mit Schleifringen und Bürsten ausgerüstet. Beim Anlaufen wird der Motor Nr. 1 unmittelbar an die Leitungen angelegt, und der Ständer des zweiten Motors mit den Schleifringen des ersten verbunden. Die Läuferströme des Motors Nr. 1 werden demnach, statt nutzlos in einem Läuferwiderstand verbraucht zu werden, zur Speisung des Motors Nr. 2 verwandt, dessen Läufer mit einem Regulirwiderstand verbunden ist. Die Motoren werden nun mit starker Zugkraft anlaufen, aber ihre theoretische Maximalgeschwindigkeit kann nie die Hälfte derjenigen überschreiten, welche ein gleicher, unmittelbar an dieselben Leitungen gelegter Motor erreichen würde. Werden nun höhere Geschwindigkeiten verlangt, so braucht man nur beide Motoren direkt in die Leitung zu schalten, mit oder ohne passende Läuferwiderstände. Soll die Geschwindigkeit verringert werden, wird dagegen mehr Widerstand in den Läufer des Motors Nr. 2 geschaltet. Wir haben damit eine sehr anpassungsfähige Regelungsvorrichtung, welche gleichzeitig noch den Vortheil bietet, dass die Motoren auch bei halber Geschwindigkeit mit nahezu vollem Wirkungsgrad arbeiten. Der letztere ist bei dieser Schaltung ein wenig kleiner als er bei directer Parallelschaltung der Motoren sein würde, weil im ersteren Falle bei der gleichen Zugkraft die Verluste doppelt so gross sind. Immerhin ist diese Art der Regelung vom Standpunkt des guten Wirkungsgrades der Methode der Regelung durch Läuferwiderstände weit überlegen, zudem die Anlaufstromstärke auch geringer. Die praktischen Nachtheile dieser Methode sind folgende: 1. Der Ständer von Motor 2 gibt dem Läufer des Motors 1 eine grosse Selbstinduction, die die Zugkraft des letzteren stark vermindert; 2. der

Läufer des Motors 1 muss statt der gewöhnlichen Wickelung mit sehr geringem Widerstande eine solche erhalten, die einen beträchtlich geringeren Strom mit einer grösseren elektromotorischen Kraft gibt, damit der Betrag des in den Ständern des Motors Nr. 2 eintretenden Stromes nicht übermässig gross wird; ferner muss, wenn beide Motoren zur Vergrösserung der Geschwindigkeit parallel auf das Netz geschaltet werden, das Verhältniss zwischen Ständer- und Läuferwickelung beim Motor 1 gleich 1 sein; 3. wird die zur Ausübung dieser Methode erforderliche Steuerungsvorrichtung etwas verwickelt. Es kann jedoch kein Zweifel darüber bestehen, dass bei grossen Kräften diese Methode die einzige ist, die auch in der Zukunft Verwendung finden wird.

Dieses Tandemsytem ist bei einer Anlage in Varese (Oberitalien) zur Anwendung gelangt. Dreiphasige Generatoren von 250 KW liefern Strom von 6000 Volt und 45 Perioden in der Sekunde an Speiseleitungen, welche mit Hilfe von Transformatoren die Fahrdrähte an verschiedenen Punkten mit Strom von 500 Volt versehen. Die Bahn besteht aus zwei Linien, von denen die eine, etwa 32 km lang mit Steigungen bis zu $4\frac{1}{2}$ v. H., von 26 Tonnen schweren Zügen mit einer stündlichen Geschwindigkeit von 36 km befahren wird. Die andere Linie ist eine 8 km lange Abzweigung, welche im Zickzack bei einer gleichbleibenden Steigung von 6 bis $7\frac{1}{2}$ v. H. einen Berg hinaufführt. Jeder Wagen ist mit zwei Drehstrommotoren von je 70 P ausgerüstet, die nach dem oben beschriebenen Tandemsystem geschaltet sind, indem die Motoren bei voller Fahrgeschwindigkeit mit Läuferwiderständen unmittelbar an die Fahrleitungen angelegt, bei halber oder noch geringerer Geschwindigkeit in Tandem geschaltet werden. Beim Abwärtsfahren laufen die Motoren auf dem starken Gefälle der Zweiglinie mit halber Geschwindigkeit und geben Energie in die Leitung zurück. Die Schienen werden als dritte Leitung benutzt.

Vortheile und Mängel der Mehrphasenströme für den Zugförderungsdienst. Die dem Mehrphasensystem eigenen Vorzüge bestehen darin, dass 1. ganz gleich ob es sich um lange oder kurze Strecken handelt, die Kraftstation ohne Rücksicht auf ihre Entfernung von der Linie dort angelegt werden kann, wo die Bedingungen für die Erzeugung oder die Verwendung der Kraft möglichst günstig liegen; 2. dass die Fahrleitungen leicht und billig durch stationäre Transformatoren von hohem Wirkungsgrade mit Strom versorgt und der Spannungsabfall in den Leitungen ent-

sprechend leicht innerhalb enger Grenzen gehalten werden kann; 3. dass elektrolytische Wirkungen ausgeschlossen und 4. der Motor im Verhältniss zum Gleichstrommotor bei gleichem Gewicht einen ebenso hohen oder noch höheren Wirkungsgrad hat, weniger Raum und viel weniger aufmerksame Wartung erfordert, dass er billiger ist und weniger leicht zu Störungen Veranlassung bietet.

Diesen Vortheilen stehen folgende Nachtheile gegenüber:

1. Es sind mehrere (mindestens zwei) Fahrleitungen erforderlich.
2. Die Regelung der Fahrgeschwindigkeit ist bei gleichem Wirkungsgrad etwas schwieriger.
3. Das Anlaufen ist nicht so leicht.
4. Der Querschnitt der Leitungen ist für die gleiche Spannung etwas grösser als bei einer Gleichstromanlage, wegen der wattlosen Ströme, die die Belastung der Leitungen um etwa 30 v. H. vergrössern.
5. Die Möglichkeit der Störung von Telephonanlagen.
6. Dem Vortheil des Wegfallens des Commutators steht der Nachtheil gegenüber, dass die Kleinheit des Luftzwischenraumes bei den Mehrphasenmotoren ebenfalls eine Störungsquelle ist, wofern es nicht gelingt, Vibrationen so weit auszuschliessen, dass sie sich praktisch nicht mehr bemerkbar machen. Wenn man die Vortheile und Nachtheile gegen einander abwägt, kann man sagen, dass für kurze Stadtlinien, etwa bis zu 8 km Länge, wo zahlreiche Haltestellen vorhanden sind und mit sehr wechselnder Geschwindigkeit gefahren wird, sich Gleichstrom besser eignet. Liegt aber die Centrale von einer solchen Bahn aus irgend welchen Gründen weit entfernt, so ist eine Combination beider Systeme am Platze, nämlich Erzeugung von hochgespanntem Drehstrom und Vertheilen durch rotirende Umformer an die einzelnen Speisepunkte mit 500 bis 600 Volt. Hierbei entstehen zwar Verluste durch die doppelte Umformung und vermehrte Ueberwachungskosten, diese werden jedoch der Regel nach mehr als ausgeglichen durch die Vortheile, welche sich aus der Verwendung von gebräuchlichem Material, billiger Leitungsanordnung und der bestmöglichen Methode der Steuerung ergeben.

Dagegen kann kein Zweifel darüber mehr sein, dass für lange Linien und schwere Betriebsmittel ausschliesslich Mehrphasenstrom in Frage kommt. Die Kosten des Betriebes einer längeren Bahn mittels Umformerstationen würden sehr bedeutend sein, erstens wegen der Ausgaben für Unterhaltung, Reparatur und Grunderwerb, und zweitens wegen der grossen Umsetzungsverluste in den Transformatoren und rotirenden Umformer. Da die Speiseleitungen bei

solchen Linien grösstentheils ausserhalb der Städte liegen oder überhaupt unterirdisch geführt sind, so würde das Vorhandensein von zwei Fahrdrähten nicht wesentlich sein, es könnte, da der Linienstrom nicht direkt an den umlaufenden Theil des Motors herangeführt wird, eine bedeutende Ersparniss dadurch erzielt werden, dass die Spannung der Fahrdrähte auf 750 oder auch 1000 Volt erhöht wird. Denn da der Ständer jedes Mehrphasenmotors beliebig hoch isolirt werden kann, würde nur die Isolation an den Steuerungstheilen etwas mehr Schwierigkeit bieten, hierbei ist aber im Auge zu behalten, dass die höhere Spannung dem menschlichen Leben nicht mehr Gefahr bietet, als es eine Spannung von 500 Volt thut.

Es mögen noch einige Angaben über ausgeführte Bahnen von Interesse sein. Fig. 341 zeigt das mit einem 20pferdigen Motor versehene Drehgestell eines Wagens der Luganobahn. Der Motor ist für zwölf Pole gewickelt, er macht bei voller Geschwindigkeit 400 Umdrehungen in der Minute (entsprechend einer Fahrgeschwindigkeit von 13 km in der Stunde), und arbeitet auf die Treibachse mit einem Vorgelege von 1 : 4. Ohne dieses Letztere wiegt der Motor 690 kg. Die Wickelung ist derartig angeordnet, dass durch eine geeignete Schaltvorrichtung die Polzahl geändert und dadurch ausserhalb der Stadt eine grössere Geschwindigkeit erzielt werden kann.

Die Bergbahnen auf den Gornergrat und die Jungfrau sind Zahnstangenbahnen mit sehr starken Neigungen. So sehr man auch vom ästhetischen Standpunkt aus den Bau solcher Bahnen und den Umstand beklagen mag, dass durch sie die erhabenen Naturwunder, zu denen sie führen, dem breiten Strome der Vergnügungszügler erschlossen und damit gewissermaassen entweiht werden, so ist doch keine Frage, dass sie werthvolle Zeugen der gewaltigen Fortschritte auf dem Gebiete der Ingenieurkunst sind. Der Drehstrom hat sich bei der Lösung dieser Aufgaben als vorzüglich geeignet für den Betrieb gezeigt unter Bedingungen, wo der Gleichstrom wahrscheinlich nicht anwendbar sein würde, ja er hat sie geradezu erst möglich gemacht. Bei der Gornergratbahn ist die Eigenschaft des Inductionsmotors, dass er sich bei Ueberschreitung der dem Synchronismus entsprechenden Geschwindigkeit in einen Generator verwandelt, in vortheilhafter Weise ausgenutzt worden. Bergab lässt man die Wagen um etwa 8 v. H. rascher als bergauf fahren, dadurch fördern die Motoren Energie bis zu 50 und 70 P

in die Leitungen zurück, die den bergauf fahrenden Wagen zu gute kommt.

Wegen des bedeutenden Interesses, das diesen Unternehmungen allseitig entgegengebracht wird, mögen nachstehend einige Angaben folgen, die von der ausführenden Firma Brown, Boveri & Co. herrühren.

Die Gornergratbahn ist nach dem Abtschen Zahnstangensystem gebaut, bei welchem eine doppelte stählerne Zahnstange zwischen den beiden Schienen liegt. Sie verbindet das Dorf Zermatt mit dem Gornergrat, eine Strecke von etwa 10 km. Die Meereshöhen der Endpunkte sind 1603 und 3019 m. Die Steigung ist durchschnittlich 20 v. H., sie ist an einigen Stellen auf 12 v. H. herabgemindert und beträgt an den Stationen und den Kreuzungen 4 v. H. Als Betriebskraft dient eine 2 km von Zermatt und nur 200 m von der Linie entfernte Wasserkraft, welche bei einem Gefälle von 100 m durch Turbinen 1000 P leistet. Bei starkem Verkehr sind drei Züge im Betriebe, jeder aus einem Motorwagen und einem Anhängewagen bestehend, die zusammen 110 Personen aufnehmen können. Gleichzeitig sollen nicht mehr als zwei Züge in der Bergfahrt begriffen sein.

Die Fahrgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 7 km in der Stunde, hierbei erfordert jeder Zug in der Steigung von 20 v. H. eine Leistung von 180 P an der Motorwelle.

Für die Wahl des Drehstromsystems waren folgende Gründe maassgebend:

Die Lage des Kraftwerkes zum Schienenwege und die Länge des letzteren bedingte die Verwendung von Hochspannungs-Speiseleitungen, wenn die Kosten in angemessenen Grenzen bleiben sollten. Unter dieser Voraussetzung wäre bei Gleichstrombetrieb die Anlage von Umformerstationen mit ihren unzertrennlichen Begleitern, hohen Betriebskosten und der Nothwendigkeit sorgfältigster Ueberwachung erforderlich gewesen.

Die Maschinen, sowohl Generatoren als Motoren, können als Drehstrommaschinen mechanisch stark gebaut werden, erforderlich werdende Reparaturen sind leichter vorzunehmen als bei Gleichstrommaschinen.

Ferner macht die selbstregelnde Kraft der Drehstrommotoren diese grade zum Betriebe von Bergbahnen sehr geeignet, da keinerlei elektrische Regelung des Motors beim Uebergang von einer Steigung zu einer andern nöthig ist. Bei einer gleichbleibenden

Geschwindigkeit des Generators ist auch die des Motors und demnach auch des Zuges constant, der Maximalunterschied ist 8 v. H., d. h. 4 v. H. über und 4 v. H. unter der synchronen Geschwindigkeit, wenn die Läufer kurzgeschlossen sind. Beim Abstieg braucht man daher keine Bremsen, die in den Motoren erzeugte Kraft wird vielmehr wieder in die Leitungen zurückgeführt und entlastet die Centrale.

Endlich hat der bemerkenswerthe Erfolg der Luganobahn bereits den Beweis geliefert, dass das Drehstromsystem für diese Zwecke vorzüglich geeignet ist, und dass der den Drehstrommotoren so oft gemachte Vorwurf, dass sie nicht unter Belastung anlaufen, gänzlich grundlos ist.

Im Kraftwerk sind drei Satz Hochspannungsturbinen mit horizontaler Achse aufgestellt, welche bei einer Geschwindigkeit von 400 Umdrehungen in der Minute 215 P leisten. Die Turbinen sind direct gekuppelt mit den Generatoren, die Drehstrom von 5000 Volt und 40 Perioden erzeugen.

Um möglichst die durch die sehr ungleiche Belastung der Generatoren hervorgebrachten Spannungsschwankungen zu vermindern, sind die Maschinen nicht mit direct gekuppelten Erregermaschinen versehen, wie dies meist der Fall ist, sondern sie werden besonders erregt von Gleichstrommaschinen, die von besonderen Turbinen angetrieben werden. Im Kraftwerk kann noch ein vierter Maschinensatz aufgestellt werden, so dass dann die gesammte Leistung 1000 P beträgt.

Die Lokomotiven sind von der Schweizerischen Lokomotivfabrik in Winterthur gebaut worden und wiegen jede 15 Tonnen. Sie sind mit zwei Motoren von je 90 P bei einer Geschwindigkeit von 800 Umdrehungen versehen, die ihre Kraft an die Treibachsen durch ein doppeltes Vorgelege mit einer Uebersetzung von 12 : 1 abgeben. Die vergleichsweise hohe Umdrehungszahl der Motoren wurde von der Fabrik gewählt, obwohl eine niedrigere erreichbar gewesen wäre, und ist nicht durch Rücksicht auf irgend welche elektrische Verhältnisse bestimmt worden.

Die sechspoligen Motoren laufen (mit einem eingeschalteten Widerstand) bei voller Belastung an mit einem Strom, dessen Stärke nicht grösser als bei normaler Geschwindigkeit und voller Belastung. Die Speiseleitungen, aus drei je 4 mm dicken Drähten bestehend, leiten den Strom zu drei Transformatorstationen, welche in ungefähr gleichem Abstände von einander an der Strecke ver-

theilt sind und eine Leistungsfähigkeit von 200 KW haben. Hier wird die Spannung auf 550 Volt transformiert, und mit dieser Spannung den Fahrdrähten zugeführt, von denen zwei als aus hartgezogenen 8 mm starken Kupferdrähten bestehende Oberleitung, die dritte als Schienenleitung ausgebildet sind. Fig. 344 zeigt die Schaltung der Lokomotive und die Anordnung der Stromkreise.

Die Jungfraubahn wird nach ihrer Vollendung etwa 13 km lang sein, und sich von der Kleinen Scheidegg bis zur Spitze des Berges erstrecken. Sie wird fünf Zwischenstationen enthalten und

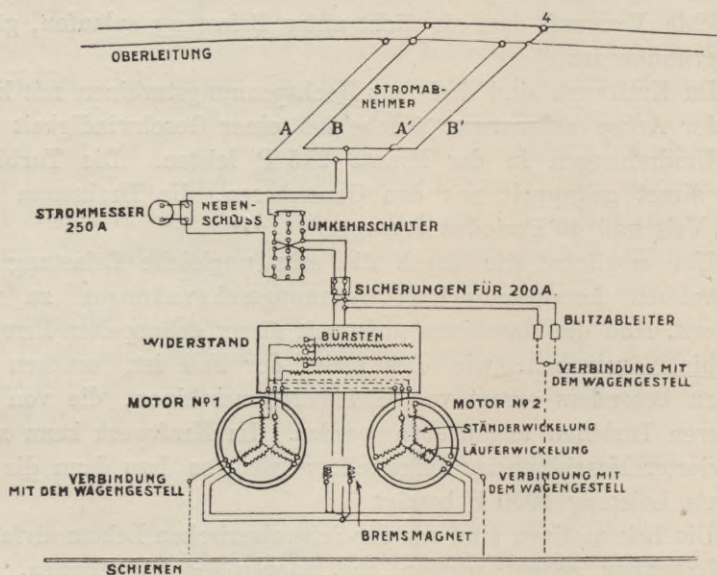


Fig. 344. Stromschema der Lokomotive der Gornegratbahn.

die höchste Spitze des Berges durch einen Aufzug von etwa 80 m Höhe erreichen. Die oberen Strecken der Bahn liegen in einem Tunnel. Die Steigung wechselt zwischen 6 und 25 v. H. Zum Betriebe wird die Wasserkraft der Lütschine ausgenutzt, welche, in Drehstrom von 7000 Volt umgewandelt, durch Oberleitungsdrähte an der Kleinen Scheidegg und dem Eigergletscher gelegenen Transformatorstationen zugeleitet und dort in Strom von 500 Volt umgewandelt wird. Die elektrische Kraft dient zur Beleuchtung, zum Heizen, zum Betriebe der Steinbohrmaschinen nicht minder wie zum Betriebe der Bahn. Das Kraftwerk befindet sich in Lauterbrunnen, die Kraft wird 7 km weit durch drei Drähte von je

7,5 mm Durchmesser fortgeleitet, die von dreifachen Glockenisolatoren von 11 cm Durchmesser und 18 cm Höhe getragen werden. Diese Isolatoren sind durch eiserne Stützen an den 11 m hohen Masten befestigt. Eine zweite Kraftstation ist noch in der Nähe von Grindelwald projectirt. Die Unterstationen sind mit je zwei Transformatoren von je 200 KW ausgerüstet, die die aus 9 mm starken, hart gezogenen Kupferdrähten bestehende secundäre Leitung speisen, die in gleicher Weise wie die Hauptleitung hergestellt ist. In dem Maasse, wie die Strecke ausgebaut wird, werden auf je 1 km weitere Transformatoren aufgestellt werden. Die vier Lokomotiven sind von Brown, Boveri & Co. zusammen mit der Société Suisse des Locomotives gebaut. Jede enthält zwei Induc-

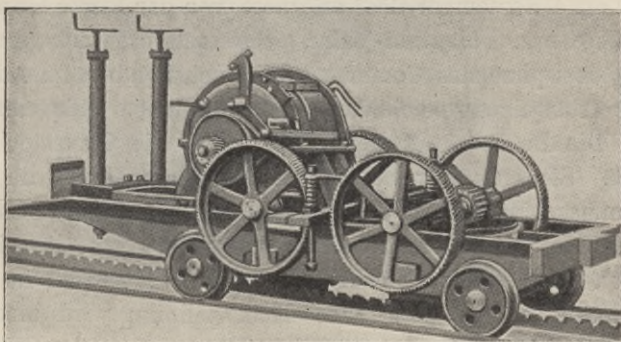


Fig. 345. Drehgestell der Lokomotive der Jungfraubahn.

tionsmotoren von je 125 bis 150 P mit 760 Umdrehungen und 38 Perioden. Das Gewicht eines Motors beträgt 2,6 Tonnen; das der betriebsfähigen Locomotive 13 Tonnen. Die Construction und das Schema der Verbindungen ist aus Tafel XIV zu ersehen. Die Anordnung ist derjenigen der Gernergratlokomotive sehr ähnlich; die Motoren sind sechspolig und wirken mit doppeltem Vorgelege auf die Treibachse (Fig. 345).

Die Bahn Burgdorf-Thun ist eine normalspurige Eisenbahn von 42 km Länge, welche von normalen Dampflokomotiven und sonstigen Betriebsmitteln befahren werden kann, jedoch elektrisch betrieben wird, und zwar mit Drehstrom, der von dem 9 km entfernten Kraftwerke der Kander bei Spiez mit 16000 Volt geliefert wird. Diese Spannung wird in 14 an der Linie liegenden Transformatorstationen auf 750 Volt ermässigt. Die Betriebsmittel sind

zum Theil Motorwagen, die 66 Personen fassen und auf Drehgestellen ruhen, die mit Inductionsmotoren versehen sind. Sie werden elektrisch beleuchtet und geheizt. Zur Beförderung ganzer Züge haben Brown, Boveri & Co., die die ganze elektrische Ausrüstung der Bahn geliefert haben, zwei Lokomotiven gebaut, die mit je zwei Inductionsmotoren von je 150 P ausgerüstet sind. Die Bauart ist bedeutend schwerer als die der Jungfraubahn, sie laufen auf nahezu ebener Bahn mit wesentlich grösserer Geschwindigkeit. Jede Lokomotive wiegt 28 Tonnen, hiervon entfallen 10 Tonnen auf die elektrische Ausrüstung. Die Geschwindigkeit wird durch Widerstand im Läuferstromkreise geregelt.

Das erste Beispiel einer mit Drehstrom betriebenen Vollbahn zur Beförderung ganzer Züge auf grosse Entfernungen in Italien bietet die am 4. September 1902 eröffnete, von der Firma Ganz & Co. eingerichtete sog. Valtellina-Bahn. Sie erstreckt sich von Lecco an der Südostspitze des Comersees bis nach Sondrio im Addathale, mit einer Abzweigung nach dem industriereichen Chiavenna, etwa 200 km. Die Betriebskraft liefert die Adda, die Centrale liegt bei Morbegno. Sie enthält vorläufig 3 Turbineneinheiten, die je eine Drehstrommaschine von 2000 P antreiben. Diese von Schuckert gelieferten Maschinen sind insofern bemerkenswerth, als sie hochgespannten Drehstrom von 20000 Volt und 15 Perioden in der Secunde unmittelbar erzeugen. Diese Hochspannung wird durch Oberleitung neun auf der Strecke vertheilten Unterstationen zugeführt und dort auf 3000 Volt umgeformt. Mit dieser Spannung werden die Zugmotoren direkt betrieben. Es sind für die Stromzuführung zwei blanke Kupferdrähte von 8 mm Durchmesser in einer Höhe von 6 m über den Schienen gespannt, als Rückleitung dient das Gleise. Vorläufig dienen für den Personenverkehr Motorwagen, welche einen Zug von 5 bis 7 Personenwagen im Gesamtgewicht von 150 Tonnen in Steigungen von 10 v. H. mit einer Geschwindigkeit von 65 km in der Stunde befördern können. Der Lastverkehr wird durch Lokomotiven bewältigt. Die Stromabnahme erfolgt durch Rollencylinder in Kugellagern, welche auf Mannesmannröhren montirt sind. Zum Heben und Senken der Stromabnehmer, zum Bewegen der Schalter und zum Bremsen dient comprimirt Luft, die von einem elektrisch angetriebenen Compressor geliefert wird. Jedes Anfahren wird mit der Cascadenschaltung der Motoren eingeleitet, von denen jedes Drehgestell zwei besitzt, einen Niederspannungsmotor für 300 Volt und einen Hochspannungsmotor für 3000 Volt.

Die Hochspannung wird dem Ständer des Primärmotors zugeführt, dessen Läufer an die Ständerklemmen angeschlossen wird, bis die halbe Geschwindigkeit erreicht ist. Weiteres hierüber siehe Elektrotechnische Zeitschrift 1903, Heft 17 u. 18.

In Deutschland ist eine Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen ins Leben getreten, welche auf der Militäreisenbahn Berlin-Zossen eingehende Versuche über die Verwendbarkeit des elektrischen Stromes zum Betriebe von Schnellbahnen angestellt hat. Es wurde hierzu von der Centrale Oberspree Drehstrom von 12000 Volt auf die Strecke geleitet, und mit zwei von den Firmen Siemens und Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft zur Verfügung gestellten Zügen in den Jahren 1901 und 1902 Probefahrten unternommen, bei welchen Geschwindigkeiten bis zu 160 km in der Stunde erreicht wurden. Die elektrischen und mechanischen Einrichtungen arbeiteten hierbei tadellos. Die Ueberschreitung dieser Geschwindigkeit verhinderte nur die zu schwache Gleisanlage. Die Versuche sollen nach Verstärkung des Oberbaus der Bahn weiter fortgesetzt werden. Berichte über diese Versuche sind in der Elektrotechnischen Zeitschrift 1901 S. 671, 745, 776, 841 und ebenda 1902 S. 851 veröffentlicht, ebenso im Elektrotechnischen Anzeiger 1901 S. 2639 und 1902 S. 2251.

Auch in anderen Ländern ist man dem Studium dieser Frage näher getreten. So besteht in Schweden die Absicht, den ausserordentlich grossen Reichthum des Landes an Wasserkraften für den Bahnbetrieb unter Verwendung von Drehstrom nutzbar zu machen.

Kapitel XIX.

Eigenschaften der magnetischen Drehfelder.

Das Wesen des jetzigen mehrphasigen Motors ist die Erzeugung magnetischer Drehfelder, in denen Metallmassen mittels der in ihnen inducirten Ströme in kräftige Umdrehung versetzt werden. Diese Drehfelder werden erzeugt durch den Kunstgriff, zwei oder mehrere schwingende magnetische Felder zu vereinigen, wozu man, wie schon gezeigt, Wechselströme von verschiedener Phase benutzt. Aber die wichtigsten Eigenschaften der Drehfelder können untersucht und gezeigt werden ohne solche Kunstgriffe, mit sehr einfachen Mitteln.

Alles, was erforderlich ist, besteht in einer Vorrichtung, um einen Magnet zu drehen, dessen Feld untersucht wird, während es mit einer bekannten Geschwindigkeit umläuft.

Der Gegenstand scheint etwa um das Jahr 1825 zuerst bekannt geworden zu sein, als die Arago'schen Drehungserscheinungen besprochen wurden; über diese müssen wir zunächst hier kurz berichten.

Arago's Drehversuche.

Wie es so oft in anderen Zweigen der Wissenschaft geschieht, so ist auch die magnetische Drehung von mehreren Personen nahezu gleichzeitig entdeckt worden, für die alle die Priorität in Anspruch genommen wird. Um 1824 hatte Gambey¹⁾, der berühmte Instrumentenmacher von Paris, gelegentlich die Beobachtung gemacht, dass eine Compassnadel, welche abgelenkt wurde und in Schwingungen um ihren Aufhängungspunkt gerieth, eher zur Ruhe kam, wenn der Boden des Compassgehäuses aus Kupfer, als wenn er aus Holz oder einem anderen Material bestand. Barlow und Marsh²⁾ in

1) Jamin, Cours de Physique. B. 3, S. 296. 1869: Verdet, Conférences de Physique. B. 1, S. 415. 1872.

2) Edinburgh Philos. Journal. B. 13, S. 122. 1824.

Woolwich hatten zur gleichen Zeit die Wirkung der Drehung einer eisernen Kugel auf eine benachbarte Magnetnadel beobachtet. Arago¹⁾, der Astronom, der von der Erscheinung durch Gambey gehört haben, nach Anderen²⁾ aber sie 1822 unabhängig entdeckt haben soll, als er mit Humboldt an magnetischen Messungen arbeitete, hat ohne Frage zuerst einen Bericht über die Beobachtung veröffentlicht, indem er am 22. November 1824 darüber der Pariser Akademie der Wissenschaften vortrug.

Er hing eine Compassnadel in Ringen von verschiedenen Materialien auf, stiess die Nadel um 45 Grad zur Seite und zählte die Schwingungen, bis der Winkel auf 10 Grad abgenommen hatte. In einem hölzernen Ring betrug die Zahl 145, in einem dünnen kupfernen Ring 66 und in einem starken kupfernen Ring nur 33.

Die Wirkung der Gegenwart des Kupfers ist eine Dämpfung der Nadelschwingungen. Jede Schwingung erfordert dieselbe Zeit wie die vorhergehende, aber ihre Weite wird vermindert; die Bewegung verschwindet, als wäre eine unsichtbare Reibung im Spiel. Arago bemerkte, dass hieraus auf das Vorhandensein einer Kraft geschlossen werden müsse, die nur so lange bestand, als sich die Magnetnadel und die Kupfermasse gegen einander bewegten. Er gab der Erscheinung den Namen „Drehungsmagnetismus“. Im Jahre 1825 beschrieb er einen anderen Versuch, in dem er nach dem Satze von Wirkung und Gegenwirkung durch die Drehung einer kupfernen Scheibe eine ruhende Nadel in Bewegung setzte. Er hing eine Compassnadel in einem Glasgefässe auf, das am Boden mittels eines Blattes Papier oder einer Glasscheibe geschlossen war, und hielt sie so über eine sich drehende Kupferscheibe (Fig. 346).

Dreht diese sich langsam, so wird die Nadel nur aus dem magnetischen Meridian abgelenkt, wobei sie dem Sinne der Scheibendrehung folgt, als wenn sie unsichtbar von dieser getrieben würde. Bei schnellerer Drehung wächst die Ablenkung; wird die Drehung so rasch, dass die Nadel um mehr als 90 Grad abgelenkt wird, so geräth letztere in Umlauf. Arago fand indessen, dass die Kraft nicht einfach tangential sei. Indem er eine Nadel senkrecht von

1) Annales de Chimie et de Physique. B. 27, S. 363; B. 28, S. 325; B. 32, S. 213.

2) Arago, Oeuvres complètes. B. 4, S. 424.

einem Wagebalken herab über der sich drehenden Scheibe aufhing, fand er, dass die Nadel abgestossen wurde, wenn die Scheibe sich drehte. Auf den Pol, der der Scheibe zunächst hing, wirkten ausserdem radiale Kräfte, die bestrebt waren, ihn radial nach aussen zu treiben, wenn er dem Rande der Scheibe näher war, dagegen radial nach innen, wenn er der Achse näher war.

Poisson, der mit seinen Anschauungen über magnetische Fernwirkung in Coulomb's Fusstapfen trat, versuchte, eine Theorie des Drehungsmagnetismus aufzustellen, indem er annahm,

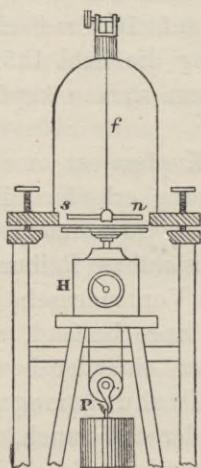


Fig. 346.
Arago's Drehscheibe.

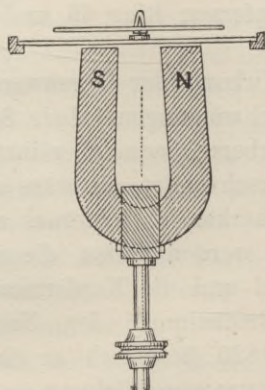


Fig. 347. Versuch von
Babbage und Herschel.

dass alle Körper in der Nähe eines Magnetes zeitweiligen Magnetismus erhalten, dass aber im Kupfer dieser zeitweilige Magnetismus längere Zeit zum Verschwinden gebrauche.

Vergebens behauptete Arago, dass die Theorie den Thatsachen nicht entspreche. Der sogenannte Drehungsmagnetismus drohte zu einer fixen Idee zu werden.

Bei diesem Stande der Dinge wurde die Erscheinung von einigen englischen Forschern untersucht, von Babbage und Herschel, von Christie, später von Sturgeon und von Faraday. Babbage und Herschel massen den Betrag der hemmenden Kraft, welche von verschiedenen Stoffen auf die Nadel ausgeübt wurde und fanden, dass Silber und Kupfer (welche die beiden besten Leiter der Elektrizität sind) die kräftigsten sind, nach diesen Gold und Zink, während Blei, Quecksilber und Wismuth ihnen

an Wirkung weit nachstehen. 1825 machten sie ihre erfolgreiche Umkehrung von Arago's Versuch bekannt. Sie hatten einen Magnet unter einer drehbaren Kupferscheibe in Umlauf versetzt (Fig. 347), und dadurch bewirkt, dass die letztere sich rasch drehte.

Sie machten auch die bemerkenswerthe Beobachtung, dass radiale Schlitzte in der Kupferscheibe (Fig. 348) das Bestreben unter dem Einfluss des bewegten Magnetes sich zu drehen, verminderten.

Rechnete man die drehende Kraft der ungeschlitzten Scheibe zu 100, so brachte sie ein radialer Schlitz herab auf 88, der zweite auf 77, vier auf 48 und acht auf 24. Ampère zeigte 1826, dass

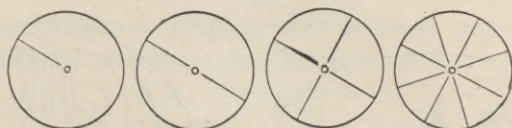


Fig. 348. Babbage und Herschel's geschlitzte Scheiben.

eine umlaufende Kupferscheibe auch ein Drehmoment auf einen benachbarten Kupferdraht, durch den ein Strom fließt, ausübte. Seebeck in Deutschland, Prévost und Colladon in der Schweiz, Nobili und Racelli in Italien bestätigten die Beobachtungen der englischen Forscher und fügten neue hinzu. Sturgeon zeigte, dass die dämpfende Wirkung eines Magnetpoles auf eine bewegte Kupferscheibe in Gegenwart eines zweiten, ungleichnamigen Poles, der neben den ersten gebracht wurde, sich verminderte. Fünf Jahre später kehrte er zu dem Gegenstande zurück und zog den Schluss, dass die Wirkung in einer elektrischen Störung bestehe, „eine Art von Umkehrung dessen, was im Elektromagnetismus stattfindet“. In jener Zeit, 1831, brachte Faraday's glänzende Untersuchung über die elektromagnetische Induction die vollständige Erklärung jener Versuche.

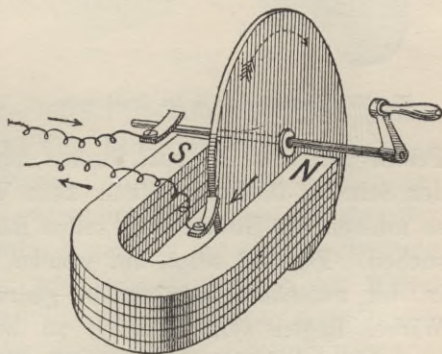


Fig. 349. Faraday's Scheibenmaschine.

Faraday zeigte, dass eine relative Bewegung von Magnet und Kupferscheibe gegen einander immer Ströme in dem Metall der Scheibe erzeugte, welche ihrerseits auf den Magnetpol zurückwirkten mit einer Kraft, welche bestrebt war, die relative Bewegung

zu vermindern, d. h. den feststehenden Theil (Magnet oder Scheibe) in der Richtung des bewegten Theiles zu ziehen, und immer sich der Bewegung des bewegten Theiles zu widersetzen. Die Ströme laufen wirbelnd um die bewegte Scheibe, wenn sie nicht durch Schleifcontacte abgenommen werden. Dies führte indes Faraday aus, indem er seine Kupferscheibe zwischen die Pole eines kräftigen Magnetes schob (Fig. 349) und drehte, während gegen den Rand und die Achse Stromschlussfedern angedrückt wurden, um die Ströme abzunehmen. Die elektromotorische Kraft, welche rechtwinklig zur Bewegung und zu den Kraftlinien des magnetischen

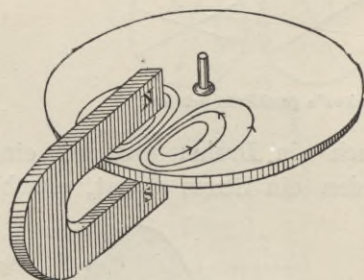


Fig. 350. Wirbelströme in der Drehscheibe.

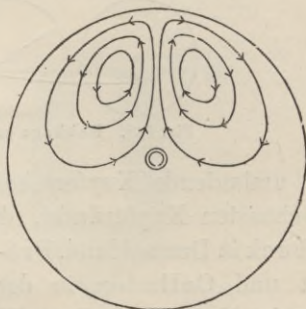


Fig. 351. Wege der Wirbelströme.

Feldes gerichtet ist, ruft Ströme hervor, welche längs des Radius der Scheibe fließen. Wenn kein Weg nach aussen angelegt ist, so müssen die Ströme sich selbst Rückwege im Metall der Scheibe suchen. Fig. 350 zeigt, auf welche Weise ein Paar solcher Wirbel in der zwischen Magnetpolen gedrehten Scheibe verläuft. Diese Wirbel liegen symmetrisch¹⁾ zu beiden Seiten des Radius von höchster elektromotorischer Kraft (Fig. 351).

Die Richtung der Wirbelströme ist immer derart, dass sie der relativen Bewegung entgegenwirken. Der Wirbelstrom in dem Theil, der sich von den Polen entfernt, sucht die Pole voranzuziehen oder diesen Theil der Scheibe zurückzudrängen. Der Wirbelstrom in dem Theil, der sich den Polen nähert, sucht diese Pole abzustossen und stösst sich selbst von ihnen ab. Es ist klar, dass

1) Ausser, wenn die Drehgeschwindigkeit sehr gross ist; in diesem Falle verursacht die Selbstinduction der Wirbelwege eine Verzögerung, wobei der Radius des stärksten Stromes gegen denjenigen der höchsten elektromotorischen Kraft in der Richtung der Drehung verschoben wird.

Schlitze, die in die Scheibe geschnitten werden, die Wirbelströme im ungehinderten Fließen beeinträchtigen und hierdurch den Widerstand ihrer möglichen Wege im Metall erhöhen, ohne dass die elektromotorische Kraft geändert wird.

In Sturgeon's Untersuchungen¹⁾ werden eine Anzahl Versuche beschrieben, welche dazu angestellt wurden, die Richtungen der Wirbelströme in Scheiben zu bestimmen. Aehnliche, aber vollständigere Forschungen wurden von Matteucci unternommen. Die Induction in gedrehten Kugeln wurde mathematisch untersucht von Jochmann und später von dem uns zu früh entrissenen Hertz.

Faraday zeigte mehrere interessante Versuche über Wirbelströme. Unter Anderem hing er mittels eines gedrehten Fadens einen Kupferwürfel zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisen-

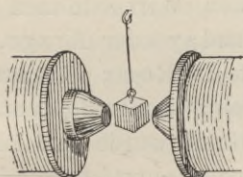


Fig. 352. Faraday's Kupferwürfel.

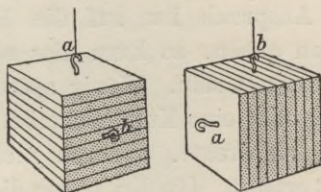


Fig. 353. Matteucci's Kupferwürfel.

magnetes auf (Fig 352). Ehe der Strom geschlossen wurde, drillte der Würfel durch sein Gewicht den Faden auf und gelangte in rasche Drehung. Sobald der Magnet durch Schliessen des Stromes erregt wurde, blieb der Würfel augenblicklich stehen; als aber der Strom wieder unterbrochen wurde, begann er sofort seine Drehung wieder. Matteucci veränderte den Versuch noch in der Weise, dass er einen Würfel aus quadratischen Stückchen Kupferblech zusammensetzte, die von einander durch Papier getrennt waren.

Dieser Blätterwürfel (Fig. 353) wurde im magnetischen Felde mittels eines Hähchens *a* aufgehängt, so dass seine Blätter den magnetischen Kraftlinien parallel standen; nunmehr konnte er in seiner Drehung nicht mehr durch den plötzlichen Stromschluss des Elektromagnetes aufgehalten werden.

Wurde er aber an dem Hähchen *b* aufgehängt, so dass die Trennungsf lächen in der senkrechten Ebene lagen, und nun in Drehung versetzt, so wurde er wieder plötzlich angehalten, wenn

1) Edinburgh, Philosophical Journal, Juli 1825. Philosophical Magazine, April und Mai 1832; vergl. auch Sturgeon's Scientific Researches, S. 211.

der Elektromagnet Strom erhielt. Nur in letzterem Falle konnten Wirbelströme entstehen, da sie Wege in Ebenen erfordern, die zu den magnetischen Linien senkrecht stehen.

Nachdem Faraday die Arago'schen Drehversuche dahin erklärt hatte, dass sie nur von den inducirten Wirbelströmen herühren, schien das besondere Interesse, das sie erzeugten, so lange sie unbekannt waren, ziemlich erstorben zu sein. Indessen wurde die Theilnahme einige Jahre später wieder lebendig, als Foucault zeigte, dass die Wirbelströme die Metallscheibe zu erwärmen vermochten, wenn die Drehung im magnetischen Felde gegen den Widerstand der ausgeübten Kräfte fortgesetzt wurde. Es ist nicht klar, woher es kommt, dass nach dieser Beobachtung die von Faraday als Erklärung der Arago'schen Erscheinung entdeckten Wirbelströme Foucault'sche Ströme getauft wurden. Wenn irgend Jemand Anspruch hat auf die Ehre, den Wirbelströmen seinen Namen zu geben, so kann dies nur Faraday oder Arago, nicht aber Foucault sein. Wenig später zeigte Le Roux den paradoxen Versuch, dass eine Kupferscheibe, die sich zwischen concentrischen Magnetpolen drehte, dadurch nicht erwärmt wurde und keinerlei Zugkraft erfährt. Die Erklärung dieser Erscheinung ist die folgende: Wenn der einen Fläche der Scheibe ein ringförmiger Nordpol und der anderen Fläche ein ringförmiger Südpol gegenübersteht, so wird zwar ein magnetisches Feld erzeugt, das die Scheibe senkrecht durchsetzt, aber es entstehen keine Wirbelströme. Denn da um die ganze Scheibe herum gleiche elektromotorische Kräfte erzeugt werden, die radial nach aussen oder nach innen gerichtet sind, so gibt es für die Ströme keinen Rückweg längs irgend eines Radius der Scheibe. Der Umfang erhält nur ein von dem des Mittelpunktes ein wenig verschiedenes Potential; aber es fließen keine Ströme, weil die elektromotorischen Kräfte längs irgend eines geschlossenen Weges in der Scheibe im Gleichgewicht sind.

1884 veröffentlichte Willoughby Smith¹⁾ eine Untersuchung über gedrehte Metallscheiben, in der er angab, dass in eisernen Scheiben höhere elektromotorische Kräfte erzeugt werden, als in Kupferscheiben von gleicher Grösse. Guthrie und Boys hingen 1879²⁾ eine Kupferplatte mittels eines Torsionsfadens über einem

1) Vorlesung an der Royal Institution: Volta- and Magneto-Electric Induction. Juni 1884.

2) Proc. Physical Soc. B. 3, Th. 3, S. 127 und Th. 4, S. 55.

in Drehung begriffenen Magnet auf und fanden, dass die Torsion der Geschwindigkeit der Drehung direct proportional war. Sie zeigten, dass mit einem solchen Instrument die Geschwindigkeit einer Maschine sehr genau gemessen werden konnte. Sie stellten auch Versuche an über den Einfluss des Abstandes zwischen der Kupferplatte und dem Magnet und über den Einfluss des Durchmessers und der Dicke der Kupferscheibe.

Es wurden verschiedene Metalle untersucht und gefunden, dass die Drehkraft je nach der Leitfähigkeit des Metalles sich änderte, soweit die letztere nach der Herstellung der Platten beurtheilt werden konnte. Guthrie und Boys wandten dann die Methode an, um die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten zu bestimmen.

1880 beobachteten De Fonvielle und Lontin, dass eine leicht drehbar aufgestellte Kupferscheibe in fortwährender Drehung erhalten werden konnte — wenn sie einmal angestossen war —, indem man sie in Gegenwart eines Magnetes in eine Kupferdrahtspule brachte, die auf einen rechteckigen Rahmen gewickelt war (wie die Spule eines älteren Galvanometers), und die aus einem gewöhnlichen Ruhmkorff'schen Apparat mit Wechselstrom gespeist wurde. Sie nannten ihren Apparat ein elektromagnetisches Gyroskop.

Aber es scheint nicht, als wenn vor dem Jahre 1879 irgend Jemand auf den Gedanken gekommen wäre, dass die Arago'schen Drehungserscheinungen für den Bau eines Motors verwendet werden könnten.

Versuche im magnetischen Drehfeld.

Mit dem einfachen, in Fig. 347 dargestellten Apparate können mehrere interessante und leichte Versuche angestellt werden.

Eine drehbare Compassnadel, die über den Magnet gestellt wird, dreht sich synchron mit letzterem.

Wenn mehrere kleine Compassnadeln nahe bei einander über den sich drehenden Magnet gestellt werden, so drehen sie sich alle in Uebereinstimmung. Eine drehbar aufgestellte Scheibe aus dünnem Eisenblech (Schwarzblech oder verzinntes Eisenblech) kommt gleichfalls in synchronen Umlauf.

Ein eiserner Nagel oder eine stählerne Nadel, die auf eine Glastafel über den Magnet gelegt wird, beginnt umzulaufen, sobald der Magnet gedreht wird, und erlangt eine grosse Geschwindigkeit, wobei sie immer mit dem Magnet synchron bleibt. Dasselbe ge-

schiebt mit einem kleinen eisernen Schlüssel. Aber wenn der Magnet zuerst in rasche Drehung versetzt und dann der eiserne Nagel oder Schlüssel auf das Glas niedergelegt wird, so kommt er nicht in Tact, ja nicht einmal in Drehung. Wenn Eisenfeilspähne aus einer Pfefferbüchse auf die Glastafel gestreut werden (eine Tafel aus Spiegelglas ist am besten), während die Pole sich langsam drehen, so wird eine höchst merkwürdige und schöne Wirkung hervorgebracht. Da die magnetischen Felder, die von den Polen aus fortschreiten, senkrechte Componenten haben, so stellt sich jedes Stückchen Eisenfeile auf, wie die Pole unter ihm hindurch gehen, und schlägt bei jeder Drehung des Magnetes einen Purzelbaum. Bei jedem Purzelbaum verschieben sich die Feilspähne ein wenig in einer Richtung, die derjenigen der Drehung entgegengesetzt ist; wenn die Geschwindigkeit vergrößert wird, so erhält man den Anblick von Theilchen, die in einem Haufen herumtanzen und bald bestrebt sind, sich im Mittelpunkte anzusammeln, bald am Rande der Glasscheibe aus dem Felde zu springen. Eiserne Kugeln oder Knöpfe drehen sich synchron mit dem Magnet. Eine der gebräuchlichsten Methoden zur Prüfung von Eisenblechen, die zu Transformator-kernen verwendet werden sollen, besteht darin, dass man das Eisenblech in ein magnetisches Drehfeld bringt und den ausgeübten Zug misst.¹⁾ Kugeln oder eiförmige Stücke Kupfer oder Messing drehen sich indess nur ganz langsam und halten mit dem sich drehenden Magnet nicht Schritt, wie es Körper aus magnetischem Stoffe thun. Scheiben aus Kupfer, Messing, Zink oder, am besten von Allem Aluminium, die über dem Magnet drehbar aufgestellt werden, erlangen gleichfalls eine langsame, nicht synchrone Bewegung, indem sie durch die in ihnen erzeugten Wirbelströme getrieben werden.

Wenn die drehbaren Scheiben, Compassnadeln u. s. w., nicht central, sondern seitwärts über dem bewegten Magnet stehen, ganz ausserhalb des von den Polen beschriebenen Kreises, so drehen sich die Scheiben entgegengesetzt wie der Magnet.

Wenn die Scheibe central über dem Magnet etwa 9 bis 12 cm über den Polen steht und allmählich aus der centralen Lage seitwärts geführt wird, so kann man in einer gewissen Entfernung einen Punkt finden, wo die Scheibe kein Bestreben zeigt, sich in

1) Ewing, A Magnetic Tester for Measuring Hysteresis in Sheet Iron. Inst. Elect. Eng. B. 24, S. 398. Beathie und Clinker, Electrician, 2. 10. 1896.

einer von beiden Richtungen zu drehen. Innerhalb der von solchen neutralen Punkten begrenzten Zone herrscht das Bestreben, sich in gleichem Sinne wie der Magnet zu drehen, ausserhalb derselben Zone, sich entgegengesetzt zu drehen. Der neutrale Gürtel erweitert sich, wenn die senkrechte Entfernung wächst.

Wenn eine drehbare Scheibe an einen neutralen Punkt gebracht wird, so kann man sie in Drehung versetzen, wenn man in den Zwischenraum Eisenstücke oder auch Bänder oder Schleifen aus Kupfer in solche Lagen bringt, dass sie entweder die Feldrichtung ändern oder durch Wirbelströme ein neues Drehfeld erzeugen.

Wenn ein leitender Käfig aus Kupferblech, wie ihn Fig. 354 zeigt, über den drehbaren Magnet geschoben, und eine leicht drehbare Aluminiumscheibe über sein oberes Ende bei *a* gesetzt wird, so kann diese Scheibe in Drehung gerathen, wiewohl die Entfernung zwischen Magnet und Scheibe bei Weitem zu gross ist, um ohne dieses Hilfsmittel noch eine Drehung hervorzubringen. Die Wirkung wird noch stärker, wenn man eine Eisenmasse bei *b* einlegt, um die Inductionswirkung des Magnetes zu erhöhen.

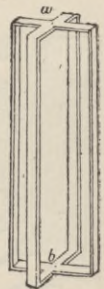


Fig. 354.

Ein anderer lehrreicher Versuch, den der Verfasser im Februar 1894 der Royal Institution vorführte, besteht darin, ein Stück

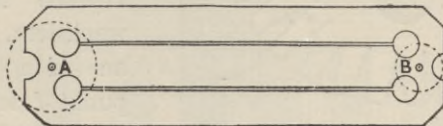


Fig. 355.

Kupferblech nach Fig. 355 auszuschneiden, so dass es fast seiner ganzen Länge nach zwei Schlitze hat; es mag 1—2 m lang und 8—10 cm breit sein. Legt man das Band wagerecht, den Punkt *A* über den Drehungsmittelpunkt des Magnetes, und ein grösseres Stück Eisen darüber, um die Inductionswirkung zu verstärken, so entstehen in dem Band Wirbelströme (in der That dreiphasige Wirbelströme), welche eine kleine Metallscheibe, die auf einer Nadel am fernen Ende *B* aufgestellt ist, zu drehen vermögen. Die bei diesem Versuche benutzte Scheibe war eine Kupferscheibe mit verstärktem Rande, auf der eine eingesetzte Eisenscheibe lag, das Ganze mit einem Steinhütchen in der Mitte, um die Reibung zu vermindern. Viel stärkere Wirkungen können erzielt werden, wenn

man den mechanisch gedrehten Stahlmagnet durch eine Einrichtung ersetzt, welche durch Vereinigung richtiger mehrphasiger Ströme, wie weiter unten beschrieben wird, ein Drehfeld erzeugt.

Für Diejenigen, die keine wahren mehrphasigen Ströme zur Verfügung haben, die aber Batterien für 5—10 Ampere Stromleistung bei einer Spannung von 10—20 Volt oder mehr besitzen, mag es erwünscht sein, wenn hier eine Methode beschrieben wird, nach der man wahre mehrphasige Ströme mittels eines von der Hand gedrehten Stromwechslers nachahmen kann.

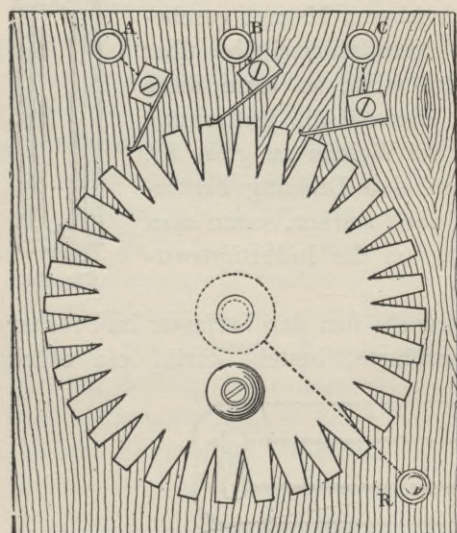


Fig. 356. Stromwechsler mit Handbetrieb zur Nachahmung dreiphasiger Ströme.

Fig. 356 zeigt eine sehr einfache Form eines solchen Stromwechslers, durch den ein Drehfeld erzeugt werden kann, wenn die Klemmen *A*, *B* und *C* mit den Punkten *m*, *o* und *n* eines nach Fig. 54, S. 54, gewickelten Ringes verbunden werden, und der eine Pol der Batterie an die Rückleitungsklemme *R* des Stromwechslers, der andere Pol an den Vereinigungspunkt *J* der Spulen gelegt wird. Dreht man die Kurbel rasch, so erhalten die drei Stromschlussfedern in

regelmässigen Zwischenräumen Ströme, von denen man sagen kann, sie hätten 120 Grad Phasenunterschied, obgleich natürlich keine Stromumkehr stattfindet. Man sieht, dass die Zwischenräume mit einem Winkel von 60 Grad übereinandergreifen, d. h. der Zahn in *B* wird $\frac{1}{6}$ -Periode eher geschlossen als der Strom in *A* geöffnet wird; während $\frac{1}{6}$ -Periode ist der Strom bei *B* allein geschlossen, worauf für die nächste $\frac{1}{6}$ -Periode *B* und *C* gleichzeitig Strom erhalten u. s. w. Die stromschliessende Fläche der Zähne ist die Hälfte des ganzen Umfanges, die schleifenden Enden der Stromschlussfedern bedecken ein Drittel des Raumes von Strom und Lücke. Dieser Stromwechsler kann aus einem Stück Messing-

blech geschnitten werden und lässt sich leicht ausbessern, wenn er, was rasch geschieht, durch die Funken beschädigt wird.

Umständlicher herzustellen ist ein Stromwender (Fig. 357/58), der die Ströme in den drei Leitungen in der richtigen Reihenfolge umkehrt; er erfordert keinen vierten Draht als Rückleitung. Auf

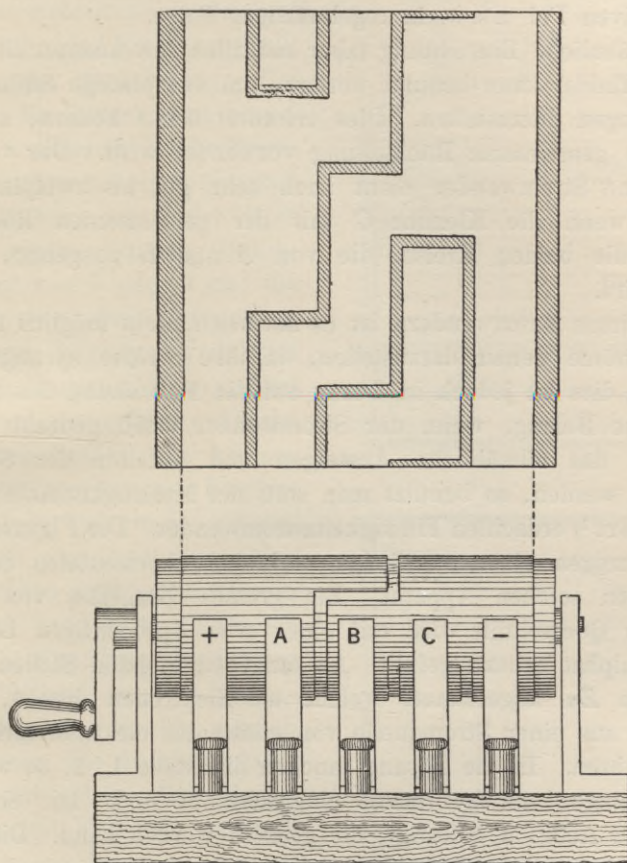


Fig. 357/58. Stromwender mit Handbetrieb zur Nachahmung dreiphasiger Ströme.

eine hölzerne Walze von etwa 5 cm Durchmesser und 7—8 cm Länge werden zwei passend geschnittene Contactstücke von einander isolirt aufgeschraubt.

Gegen diese Walze drücken Stromschlussfedern; drei davon sind die Endklemmen der drei Leitungen; zwei werden mit den Polen der Batterie verbunden. Eine Abwicklung des Stromwenders, welche zeigt, wie die Contactstücke geschnitten sein müssen,

ist, genau in halber natürlicher Grösse, im oberen Theile der Figur zu sehen.

Folgt man aufmerksam der Reihe der Vorgänge während einer Umdrehung, so sieht man, dass der Strom in einer Leitung nach der anderen umgekehrt wird; fliesst der Strom vom positiven Pol in die Leitung *A*, so bildet Band *C* gleichzeitig die Rückleitung zum negativen Pol u. s. w. in regelmässiger Folge.

Eine ähnliche Einrichtung (aber natürlich mit anderer Bemessung der Theile) kann benutzt werden, um zweiphasige Ströme in vier Leitungen darzustellen. Dies erfordert sechs Federn, ausser wenn eine gemeinsame Rückleitung verwendet wird. Der vorher beschriebene Stromwender dient auch sehr gut als zweiphasiger Apparat, wenn die Klemme *C* mit der gemeinsamen Rückleitung für die beiden Kreise, die von *A* und *B* ausgehen, verbunden wird.

Mit diesen Stromwendern ist es natürlich nicht möglich mehrphasige Ströme genau darzustellen, da ihre Ströme sprungweise umkehren, dies ist jedoch in Bezug auf die Entstehung des Drehfeldes ohne Belang, wenn der Stromwender rasch gedreht wird. Soll auch das allmähliche Ansteigen und Abfallen der Ströme dargestellt werden, so benutzt man statt der Messingkontakte einen von Carhart¹⁾ erdachten Flüssigkeitsstromwender. Die Figuren 359 und 360 zeigen einen vertikalen und einen horizontalen Schnitt durch einen solchen Apparat. Ein grosses Glasgefäss von quadratischem Querschnitt wird mit einer etwa 3procentigen Lösung von Zinksulphat nahezu gefüllt. An entgegengesetzten Stellen sind Zinkplatten *Zn* angeordnet, welche als Elektroden dienen, und den Strom aus einer Stromquelle von constanter elektromotorischer Kraft zuführen. In die Lösung tauchen Zinkstäbe 1, 2, 3, welche in eine Scheibe aus Isolirmasse eingeschraubt sind. Die Scheibe ist an einer Achse *A* befestigt, die gedreht werden kann. Die drei Zinkstäbe sind durch die hohle Achse mit den Schleifringen 1, 2, 3 elektrisch leitend verbunden. Es ist noch ein vierter Ring *A* vorgesehen, an den noch ein weiterer Zinkstab angeschlossen werden kann, wenn die Vorrichtung als Zweiphasenstromwender benutzt werden soll. Die Bürsten übertragen den von den Schleifringen abgenommenen Wechselstrom an die Aussenleitungen.

1) Carhart, Amer. Electrician, B. 9, S. 121. Vergl. auch Hopkinson und Wilson, Phil. Trans., 1895, Th. 1, S. 98.

Mit dieser Vorrichtung kann man z. B. durch Eisenfeilspähne die Drehung eines Magnetfeldes darstellen. Carhart¹⁾ hat eine ganze Reihe von Experimenten veröffentlicht, die mit dem Apparat gezeigt werden können.

Um mit diesem Dreiphasenstromwender einfache Drehfeldversuche zu zeigen, braucht man nur einen Ringmagnet mit geeigneter Bewicklung. Der Kern des Ringes wird hergestellt aus Eisendraht oder Eisenblechringen mit einem äusseren Durchmesser von 8 oder 10 cm und einem inneren Durchmesser von 5 oder 7 cm; die Tiefe mag etwa 1 bis 2 cm betragen. Nachdem er mit Band oder gefirnissetem Papier isolirt ist, wird er sorgfältig mit sechs gleichen Spulen aus 1,6 mm starkem umsponnenen Kupferdraht (oder der grösseren Biegsamkeit wegen mit einer Litze von sieben Drähten zu 0,6 mm Stärke) bewickelt. Jede der sechs Spulen nimmt einen Raum von 60 Grad ein; die gegenüberliegenden Spulen werden paarweise mit drei Stromkreisen verbunden, ihre Enden können mit Klemmen versehen werden, so dass man sie nach Belieben in Stern- oder in Netzschaltung verbinden kann.

Jede Spule soll wenigstens 100 Windungen enthalten. Verwendet man dünneren Draht (und dies hat einige Vortheile), so muss eine im Verhältniss grössere Zahl Windungen auf jeden Ring ge-

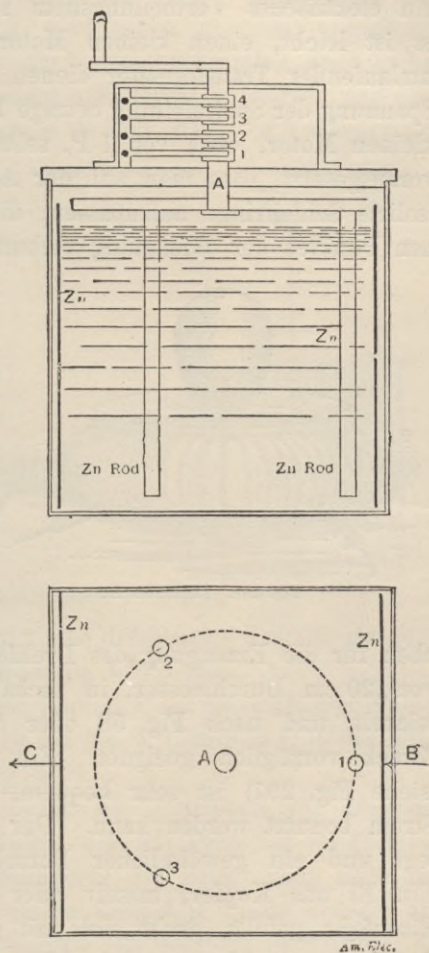


Fig. 359/60.

1) Carhart, Experimental Investigation of the Rotary Field. The Elec. Journal (Chicago) 1. 9. 1895.

bracht werden. Mit einem solchen kleinen Ring kann man ziemlich alle oben beschriebenen Versuche zeigen.

Für Versuche in grösserem Maassstabe kann man sich mehrphasige Ströme leicht verschaffen, wenn man einen Anschluss an ein elektrisches Vertheilungsnetz für Gleichstrom besitzt. Denn es ist leicht, einen kleinen Motor so einzurichten, dass er als umlaufender Transformator dienen kann. Nehmen wir an, die Spannung der Speiseleitung betrage 100 Volt. Dann kann man einen kleinen Motor, etwa von 1 P, selbst von $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{4}$ P benutzen, vorausgesetzt, dass man auf der Achse Platz genug hat, um drei isolirte Schleifringe aufzupassen, die mit drei symmetrisch gelegenen Punkten der Wickelung verbunden werden.

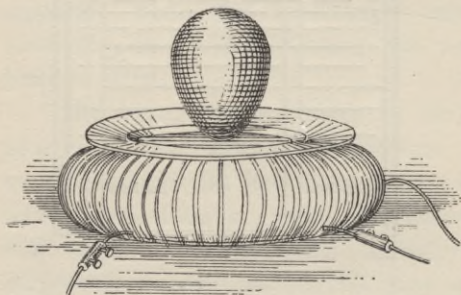


Fig. 361. Tanzendes Ei.

Von diesen drei Schleifringen nehmen drei Bürsten den dreiphasigen Strom ab.

Einer der erstaunlichsten Versuche, der mit solchem Apparat leicht gezeigt werden kann, ist die Drehung eines kupfernen Eies. Für diesen Zweck wird ein etwas grösserer Ringelektromagnet gebraucht, als derjenige, der

oben für die Erzeugung des Drehfeldes benutzt wurde. Ein Ring von 20 cm Durchmesser, in sechs oder zwölf Abtheilungen bewickelt und nach Fig. 58 oder 59 verbunden, ist für diesen Zweck vorzüglich geeignet. Ein Ring mit zwölf Abtheilungen (siehe Fig. 297) ist sehr bequem, da er auch für zweiphasigen Strom benutzt werden kann. Der Ring wird auf den Tisch gelegt und ein gewöhnlicher Porzellanteller wird darauf gestellt. Ein Ei aus Kupfer, massiv oder hohl, oder noch besser mit Eisenfeile gefüllt, dreht sich mit grosser Geschwindigkeit, wenn der Strom geschlossen wird. Mit zunehmender Drehungsgeschwindigkeit richtet es sich auf und dreht sich schliesslich auf seiner Spitze (Fig. 361). Ein Ei aus Aluminium dreht sich noch besser. Eine dicke Scheibe aus Kupfer oder Aluminium, deren Fläche ein wenig ausgebogen und deren Rand abgerundet ist, dreht sich, richtet sich allmählich auf und tanzt schliesslich auf dem Rande wie eine Münze.

Mechanische Vorrichtung zur Erläuterung der mehrphasigen Uebertragung.

Die Aehnlichkeiten zwischen Mehrphasenstrom-Apparaten und Maschinen, in denen zur Vermeidung der todten Punkte zwei oder drei Kurbeln verwendet werden, sind schon mehrmals angedeutet worden. Mechanische Modelle, die einem bestimmten Falle mehrphasiger Ströme entsprechen, lassen sich leicht entwerfen und sind sehr lehrreich. Ein ganz einfaches Modell, das vom Verfasser an-

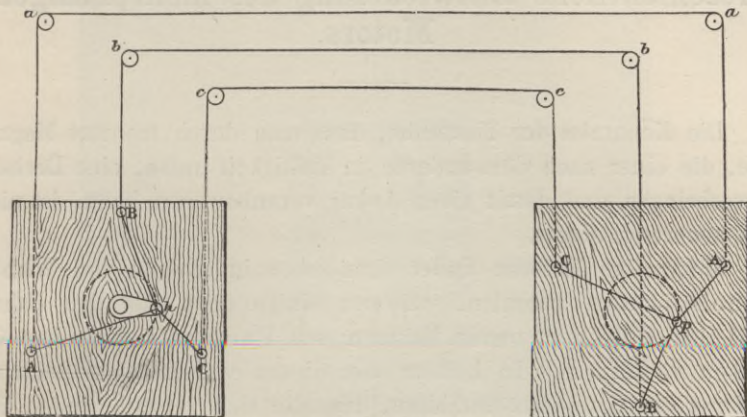


Fig. 362. Dreiphasige mechanische Bewegung.

gegeben wurde, um eine gewöhnliche dreiphasige Kraftübertragung zu erläutern, mag einer Beschreibung werth sein.

Drei Fäden werden an einen Zapfen *P* auf einer kleinen Kurbel geknüpft; die letztere dreht sich um den Mittelpunkt *O* in der Mitte eines feststehenden Brettes (Fig. 362).

Die drei Fäden werden durch die gleichweit von einander entfernten Löcher *A*, *B*, *C* geführt, die mit Porzellan ausgefüttert sind, um die Reibung zu vermindern; sie gehen dann über drei Rollen *a*, *b*, *c*, von wo sie zu einem ähnlichen Brette geführt und in einem Punkte *p* vereinigt werden, an dem ein Schreibstift befestigt ist. Ertheilt man der Kurbel *h* mit der Hand eine kreisförmige Bewegung, so führt auch der Punkt *p* eine kreisförmige Bewegung aus, obgleich er nicht von einer Kurbel geführt wird, und zeichnet (annähernd) einen Kreis auf das Brett.

Kapitel XX.

Geschichtliche Entwicklung des mehrphasigen Motors.

Die Kenntniss der Thatsache, dass man durch mehrere Magnetpole, die einer nach dem anderen in Thätigkeit treten, eine Drehung hervorbringen und damit einen Anker voranbewegen kann, ist nicht erst neueren Datums.

Mehrpole Motoren findet man schon in einigen von Wheatstone's ältesten Patenten, während einige etwa aus den Jahren 1861 bis 1865 stammende Motoren von Pacinotti denselben Gedanken verkörpern. In keinem von diesen war indessen auch nur entfernt der Grundsatz enthalten, dass die sich verschiebenden Pole dadurch wirken sollten, dass sie in dem drehbaren Theil Ströme inducirten.

Der erste Inductionsmotor.

Unter der Menge neuer Erfindungen hat man wenig von den bescheidenen Anfängen des mehrphasigen Motors bemerkt, dessen Geburt in das Jahr 1879 fällt. Fig. 363 zeigt den einfachen Motor, den Walter Baily der Physikalischen Gesellschaft in London am 28. Juni 1879 vorführte, als er einen Vortrag über eine Methode, Arago'sche Drehungen hervorzubringen, hielt.

Bis dahin war die einzige Art, diese Drehungen zu erzeugen, unter einer Kupferscheibe einen Magnet zu drehen. Statt des Stahlmagnetes, der sich unter der Scheibe drehte, benutzte Baily einen feststehenden Elektromagnet; er liess dessen Magnetismus sich allmählich über vier nebeneinanderstehende Pole verschieben, wodurch er in der darüber aufgestellten drehbaren Kupferscheibe Wirbelströme erzeugte; diese ertheilten durch ihre Rückwirkung der Scheibe eine mechanische Bewegung in der Richtung, in der die Pole sich verschoben. Die Scheibe erhielt bei diesem ersten Versuche einen

Durchmesser von 6 cm; die vier Magnetkerne sind etwa 10 cm hoch und besitzen ein gemeinsames Joch; jeder ist mit etwa 150 Windungen eines 2,5 mm starken isolierten Kupferdrahtes bewickelt. Die Spulen werden zu zwei und zwei hintereinander geschaltet, so dass sie zwei unabhängige, kreuzweise ineinander gestellte Hufeisenmagnete bilden.

Die beiden Kreise werden mit einem sinnreichen umlaufenden Unterbrecher verbunden, der einfach aus Federn und Stromschluss-

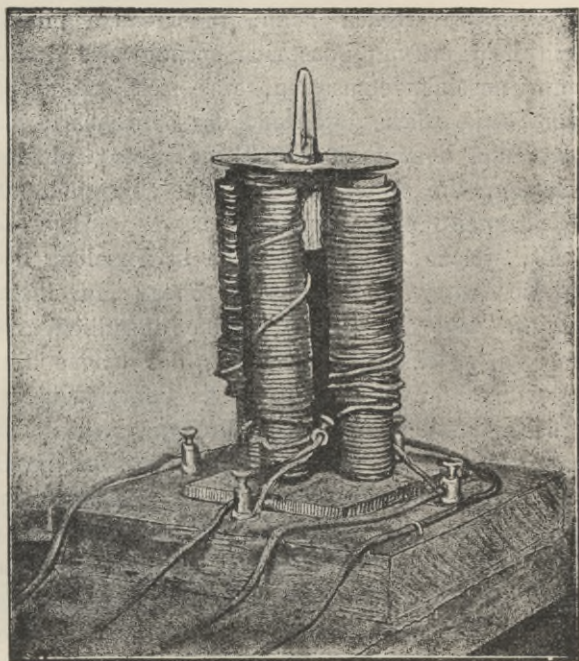


Fig. 363. Walter Baily's mehrphasiger Motor (1879).

stücken auf einem Stücke Holz zusammengesetzt ist und mittels eines Handgriffes aus Draht gedreht wird.

Bei der Drehung werden die Ströme von zwei Batterien abwechselnd unter Umkehrung der Richtung in die beiden Stromkreise geleitet, wobei sie die Polarität der vier Pole in nachfolgender Weise ändern:

S	O	N	N	O	N	S	N	S	O
↘		↓		↙		←		↗	
O	S	S	S	S	O	S	N	O	N

u. s. w. Baily hatte sehr klare Ansichten darüber, wie weit dies wirklich ein magnetisches Drehfeld darstellte. Er sagt darüber

wörtlich: „Die Drehung der Scheibe wird verursacht durch diejenige des magnetischen Feldes, in dem sie aufgestellt ist, und wir dürfen erwarten, dass, wenn eine ähnliche Bewegung des Feldes auf eine andere Weise erzeugt wird, sich eine ähnliche Bewegung der Scheibe ergeben wird.

„Möglicherweise ist die Drehung des Magnetes die einzige ausführbare Art, eine gleichmässige Drehung des Feldes zu erzeugen; aber es wird in dieser Abhandlung gezeigt werden, dass die Scheibe in Drehung versetzt werden kann, indem man mittels Elektromagnetes ein Feld erzeugt, das sich sprungweise dreht.“ Baily beginnt dann, auseinanderzusetzen, was sich ereignet, wenn ein Pol in seiner Stärke wächst, während der benachbarte gleichnamige Pol abnimmt, und kommt zu dem Schluss, dass ein voller Kreis von Magnetpolen, die unter der Scheibe aufgestellt und in der Reihenfolge paarweise entgegengesetzt erregt werden, der Scheibe Stösse ertheilt, welche alle die Scheibe in derselben Richtung zur Drehung um die Achse antreiben; er fährt fort: „In einem extremen Falle, wenn die Zahl der Elektromagnete unendlich gross ist, erhalten wir eine gleichmässige Drehung des magnetischen Feldes, ebenso wie wir es durch Drehung eines Dauermagnetes erzielen.“ Er kommt dann auf den durch sein Modell verwirklichten Fall der zwei Polpaare aa' und bb' zurück und zeigt, dass die Drehung in der einen Richtung stattfindet, wenn das Paar bb' vor dem Paare aa' umgekehrt wird; wenn aber das Paar bb' nach dem Paar aa' umgekehrt wird, so erfolgt die Drehung in der entgegengesetzten Richtung.

Nunmehr wird gezeigt, wie die Umkehrung der Drehungsrichtung ausgeführt werden kann, entweder durch Umkehrung der Drehungsrichtung des Stromwechslers oder durch Vertauschung der Pole der einen von beiden Batterien. Das Diagramm, welches der Abhandlung beigegeben ist, setzt voraus, dass die Kerne aus zertheiltem Eisen bestehen; die des ausgeführten Modelles sind aber massiv. In einem Schlussparagraphen bemerkt Baily, dass die Wirkung auf die Scheibe bedeutend vergrössert werden kann, indem man vier andere Elektromagnete über die Scheibe setzt, je einen gegenüber einem der unteren Magnete und mit diesem so verbunden, dass sie einander ungleichnamige Pole zukehren.

Das Modell läuft sehr gut, wenn vier Trockenelemente zur Erregung der Elektromagnete benutzt werden.

Als vor nunmehr 15 Jahren der Vortrag gehalten und das Modell gezeigt wurde, fragte der verstorbene Professor Guthrie im

Scherz, wie viel Kraft der Motor wohl äussern möchte; Baily erwiderte darauf bescheiden, dass er für den Augenblick den Motor nur als ein wissenschaftliches Spielzeug ansehen könne.

Untersuchungen von Marcel Deprez.

1880 hielt Marcel Deprez vor der Société Française de Physique einen Vortrag über eine elektrische Methode, den Synchronismus von Drehungen zu erhalten, wobei künstlich erzeugte zweiphasige Ströme von einem umlaufenden Stromwender auf einen synchronen Motor mit zwei I-Ankern auf gemeinsamer Achse übertragen wurden; die beiden Anker lagen jeder zwischen den Polen eines Hufeisenmagnetes und der eine war gegen den anderen um 90 Grad verdreht, so dass kein todter Punkt entstehen konnte. Fig. 364 zeigt, wie die Ströme von der Batterie zu den beiden Ankern geführt wurden.

Dieser Apparat gleicht dem Baily'schen nur insofern, als er eines zweiphasigen Stromes zum Betriebe bedurfte. Beide arbeiten mit den künstlichen zweiphasigen Strömen, wie man sie mit Hilfe von Stromwendern

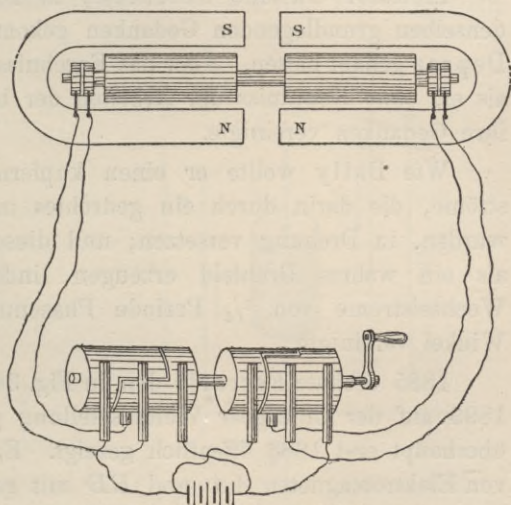


Fig. 364. Marcel Deprez' Drehapparat.

aus Batterien entnehmen kann, oder mit zweiphasigen Strömen, die durch Induction in periodischer Art erzeugt werden.

Sie unterscheiden sich aber grundsätzlich in der Art ihrer Wirksamkeit.

Der Deprez'sche Motor ist lediglich die Vereinigung von zwei gewöhnlichen Motoren unter rechtem Winkel, so dass kein todter Punkt entsteht. Nirgend ist in ihm der Gedanke des magnetischen Drehfeldes verkörpert. Dagegen ist bei Baily's Motor wesentlich, dass das magnetische Feld in regelmässiger Folge um einen Mittelpunkt voran gedreht wird und durch Induction in einer drehbaren Metallmasse Ströme hervorbringt, ohne dazu Schleif-contacte oder Stromwender nöthig zu haben.

Drei Jahre später veröffentlichte Deprez den bedeutsamen Satz, den wir auf Seite 67 besprochen haben, und der die Erzeugung eines wahren magnetischen Drehfeldes durch Zusammenwirken zweier Wechselströme, die eine Viertelperiode Phasenunterschied haben, betrifft.

Der Deprez'sche Satz trug keine Früchte; er blieb eine geometrische Abstraction.

Untersuchungen des Professors G. Ferraris.

Im Jahre 1887 waren mehrere Forscher unabhängig von einander an der Arbeit.

Professor Galileo Ferraris¹⁾ in Turin war schon 1885 zu denselben grundlegenden Gedanken gekommen, wie sie Baily und Deprez gehabt hatten. Aber das Ergebniss war fruchtbarer, insofern als er, ohne Kenntniss der Arbeiten der beiden genannten Forscher, ihre Gedanken vereinigte.

Wie Baily wollte er einen kupfernen Leiter durch Wirbelströme, die darin durch ein gedrehtes magnetisches Feld inducirt wurden, in Drehung versetzen; und dieses gedrehte Feld wollte er als ein wahres Drehfeld erzeugen, indem er die Felder zweier Wechselströme von $\frac{1}{4}$ Periode Phasenunterschied unter rechtem Winkel vereinigte.

1885 erbaute Ferraris den in Fig. 365 dargestellten Motor, der 1893 auf der Chicagoer Weltausstellung gezeigt wurde. Er wurde überhaupt erst 1888 öffentlich gezeigt. Er bestand aus zwei Paaren von Elektromagneten AA' und BB' mit gemeinsamem Joch, welches dadurch hergestellt wurde, dass man Eisendraht über die äusseren Enden der Magnete wickelte. Zwei in der Phase gegen einander verschobene Wechselströme wurden in diese beiden Stromkreise geleitet, und es wurde beobachtet, dass der innere drehbare Theil in Bewegung kam.

Ferraris' erste Veröffentlichung fiel in den März 1888 und führt den Titel: Elektrodynamische Drehungen, welche mittels Wechselströmen erzeugt werden. Nachdem er die geometrische Theorie des magnetischen Drehfeldes auseinandergesetzt hat, findet er, dass ein einfacher Weg, die gewünschten verschobenen Ströme zu erhalten, darin besteht, den Stromkreis eines Wechselstromes in

1) Ferraris, Rotazioni elettrodinamiche. Turin. Acad. Maerz 1888.

zwei Zweige zu spalten; in den einen wird ein Widerstand ohne Selbstinduction, in den anderen eine Spule mit geringem Widerstand und grosser Selbstinduction eingeschaltet.

Die beiden Wickelungen des Motors werden in diese beiden Zweige eingefügt. Der Phasenunterschied, der auf diese Weise hervorgebracht wird, beträgt nahezu 90 Grad. Ferraris spricht die Meinung aus, dass man auf diesem Wege alle Wirkungen erzielen kann, die die Drehung eines Magnetes hervorbringt. Er beschreibt dann die nachfolgenden Versuche, die im Herbst 1885 angestellt wurden.

Zwei flache Spulen, eine aus dickem, die andere aus dünnerem Draht, welche in Fig. 366 schematisch durch *AA* und *BB* dargestellt

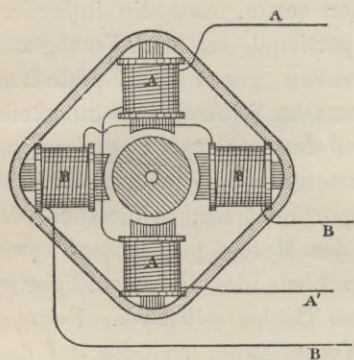


Fig. 365. Ferraris' Motor (1885).

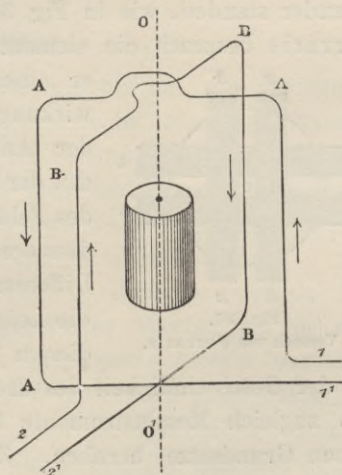


Fig. 366. Versuch von Ferraris.

werden, stehen rechtwinklig zu einander. In die erstere wird der Strom aus der primären, in die andere der Strom aus der secundären Spule eines Gaulard'schen Transformators geleitet; zu der letzteren wurde noch ein grösserer oder kleinerer inductionsfreier Widerstand geschaltet. Im centralen Zwischenraume wurde ein kleiner, hohler, geschlossener Kupfercylinder aufgehängt. Wurde der Strom nur durch eine der Spulen geschickt, so blieb der Cylinder stehen; schloss man auch den zweiten Stromkreis, so begann er sofort, sich zudrehen.

Der Sinn der Drehung konnte umgekehrt werden, indem einfach mittels Stromwechslers die Verbindungen an der secundären Spule vertauscht wurden. Dasselbe Ergebniss wurde erzielt, wenn

der Kupfercylinder durch einen Eisencylinder ersetzt wurde. Ein zertheilter eiserner Cylinder, der aus isolirten Scheiben zusammengesetzt war, drehte sich gleichfalls.

Dann folgten Ueberlegungen über die Construction von Wechselstrommotoren nach diesem Grundsatz, aber mit gewissen Abweichungen; denn, wie Professor Ferraris bemerkte, war es klar, dass ein Motor, der so gebaut war, keinerlei gewerbliche Bedeutung für die Umwandlung der Kräfte besass. Er entwarf also ein grösseres Modell, welches als drehbaren Theil einen Kupfercylinder von 5 kg Gewicht, 18 cm Länge und 8,9 cm Durchmesser besass, der auf einer wagerechten Achse von 1 cm Stärke befestigt war. Er wurde umgeben von zwei Spulenpaaren *AA* und *BB*, die rechtwinklig zu einander standen, wie in Fig. 367, er besass aber nur geringe Kraft. Ferraris besprach die elementare Theorie dieses Apparates, wobei

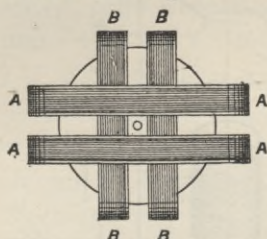


Fig. 367.

Versuch von Ferraris.

er auseinander setzte, dass die Inductionswirkung proportional sei der Verzögerung der Ankerdrehung gegen die Felddrehung, d. i. der Differenz der Winkelgeschwindigkeiten des Feldes und des drehbaren Cylinders, und dass der in letzterem inducirte Strom derselben Differenz proportional sei; schliesslich, dass die Leistung des Motors proportional sowohl diesem Unterschiede der Geschwindigkeiten,

als der Geschwindigkeit des drehbaren Theiles selbst sei. Ferraris gab zugleich Messinstrumente für Wechselstrom an, die auf demselben Grundsatz beruhen. Zum Schluss gelang es ihm, eine Drehung in einer Quecksilbermasse hervorzubringen, die in einem Gefässe in das Drehfeld gebracht wurde. Ferraris' Vortrag, am 18. März gehalten, wurde sofort gedruckt und Abzüge am 10. April der Königlichen Akademie der Wissenschaften in Turin übersandt. Am selben Tage wurden noch 150 Exemplare für Zeitschriften und einzelne Fachleute der Post übergeben. Am 20. April veröffentlichte die Zeitschrift *L'Elettricità* in Mailand einen Auszug, andere Zeitschriften in Deutschland und England kurz darauf ebenfalls. Bald nachher suchte die Westinghouse Co. telegraphisch durch den Ingenieur Pantaleoni die Erlaubniss nach, auf die Ferraris'sche Entdeckung in den Vereinigten Staaten ein Patent zu nehmen. Pantaleoni sprach mit Ferraris im Mai oder Juni in Turin und war sehr erstaunt von ihm zu hören, dass er seine Erfindung zum Besten der Allgemeinheit veröffentlicht habe. Schliesslich gab Fer-

raris die erbetene Erlaubniss, weil Pantaleoni darauf hinwies, dass seine Erfindung in den Händen der kapitalkräftigen Westinghouse Co. am ehesten weiter ausgebaut werden und reiche Früchte für die Elektrotechnik tragen würde. Ferraris erhielt hierfür die Summe von 1000 Dollars. Einige Monate später las Ferraris zu seinem grossen Kummer in einer amerikanischen Zeitschrift, der *Electrical World* (B. 12, S. 222), die Beschreibung eines von der Westinghouse Co. gebauten Motors, von dem gesagt war, dass er nach dem Princip von Tesla entworfen sei. Von diesen Motoren wird noch später die Rede sein. 1894 veröffentlichte Ferraris einen weiteren Beitrag zur Theorie dieser Motoren, welche im VIII. Kapitel mitgetheilt ist.

Borel's Motor.

1887 gab Borel einen Wechselstrommotor an, der für einen Verbrauchsmesser bestimmt war; der letztere ist unter dem Namen Borel-Paccaud'scher Verbrauchsmesser bekannt geworden. Es war thatsächlich ein Zweiphasenmotor, in dem die Phasenverschiebung zwischen zwei Theilen eines Wechselstromes durch Benutzung zweier Stromzweige von verschiedener Zeitconstante erzeugt wurde.

Auf die beiden Seiten eines eisernen Rahmens wurden die Spulen *AA* gewickelt, um ein magnetisches Wechselfeld in der Richtung von rechts nach links zu erzeugen. Aussen um den Rahmen waren zwei andere Spulen *BB* gewunden (eine davon ist in Fig. 368 nur punktirt angegeben, um das Innere des Motors besser zu zeigen), und diese suchten ein zweites Wechselfeld rechtwinklig zum ersten hervorzubringen. In der Mitte des Ganzen war ein eisernes Rad drehbar gelagert, welches durch das Drehfeld in Bewegung gesetzt wurde.

Aeltere Motoren der Helios-Gesellschaft in Köln.

Die Helios-Gesellschaft construirte 1887 nach einem Patent von Coerper¹⁾ mehrere kleine Motoren, von denen einige für einphasigen Strom bestimmt waren, sowohl synchron wie asynchron, während ein anderer der dreiphasige, in Fig. 369 dargestellte Motor war. Dieser besass drei Schleifringe am drehbaren Theil, um einen

1) Deutsche Reichs-Patente Nr. 43538 (1887) und Nr. 70084 (1891); —
Englisches Patent Nr. 9013 von 1887; — vergl. Elektrotechnische Zeitschrift
1893, Seite 82.

dreiphasigen Strom aufzunehmen. Da der Motor drei Leitungen gebraucht, und damals alle Bestrebungen, mit zwei Leitungen einen befriedigenden Betrieb zu erzielen, vergeblich waren, so liess die Helios-Gesellschaft das Patent im Jahre 1890 fallen. Ein späteres

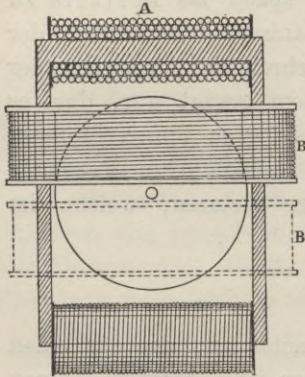


Fig. 368. Borel's Motor.

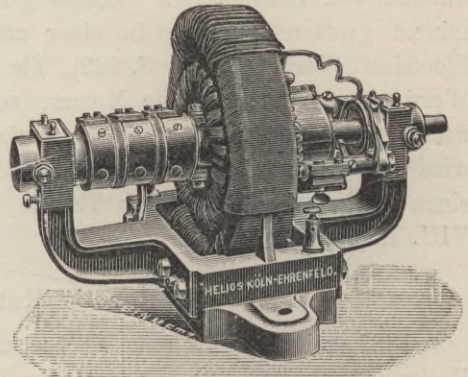


Fig. 369. Coerper's Motor.

Patent von 1891 beschrieb einen einphasigen Motor mit einer Hilfswicklung, welche nur auf das Eisen des drehbaren Theiles wirkt und nur während des Anlassens eingeschaltet wird.

Bradley's Motoren.

Unter den ersten amerikanischen Pionieren auf dem Gebiete des mehrphasigen Betriebes befand sich Charles S. Bradley, dessen

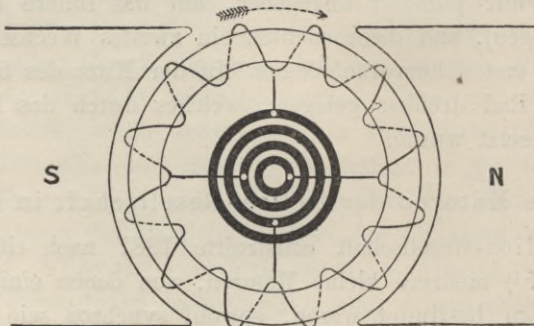


Fig. 370. Ankerschaltung in Bradley's Motor.

Theilnahme an der Arbeit schon aus dem ersten Theil des Jahres 1887 datirt. Sein amerikanisches Patent, welches am 8. März 1887 eingereicht wurde (Nr. 390439), beschreibt einen Stromerzeuger mit Gramme'schem Ring, mit Verbindungsstücken (Fig. 370), die

vier symmetrisch gelegene Punkte der Wickelung mit vier Schleifringen verbinden. Er erhielt so zwei Wechselströme von 90 Grad Phasenunterschied. Die Absicht bei dieser Anordnung war anerkanntermaassen, die Leistung der Maschine zu erhöhen; dies wurde auch erreicht, da ja die Leistung einer mehrphasigen Maschine beträchtlich höher ist, als die einer anderen von gleichem Gewicht. Es wurde auch nachgewiesen, dass die Maschine als Motor benutzt werden konnte, obgleich über die Eigenschaften des Drehfeldes Nichts gesagt wurde. Der neunte Patentanspruch lautet: „Ein drehbarer elektrischer Motor, der aus einem Feldmagnet und einem Anker nebst Paaren von Stromzuführungsvorrichtungen — wie z. B. Schleifringe und Bürsten —, welche paarweise unabhängig von einander mit abwechselnd¹⁾ gelegenen Punkten der Ankerwicklung verbunden und so angeordnet sind, dass sie mit zwei unabhängigen äusseren Stromkreisen verbunden werden können.“ Hier war also im Jahre 1887 ein mehrphasiger Motor unzweideutig beschrieben. Im October 1888 (Patent Nr. 404465) kam ein asynchroner Motor, der durch gerichtete, in einer äusseren Eisenmasse erzeugte Wirbelströme getrieben wurde. Der drehbare Anker erhielt Zweiphasenstrom durch vier Schleifringe. Der Grundsatz der magnetischen Drehung wird vollständig dargelegt.

Ein am 20. August 1889 veröffentlichtes Patent Bradley's (Nr. 409450) beschreibt einen ähnlichen Anker, dessen Bewickelung an drei gleichweit von einander entfernten Punkten mit drei Schleifringen verbunden war, so dass ein dreiphasiges System gebildet wurde. Diese Maschine konnte ebenso gut als Stromerzeuger wie als Motor dienen.

In einem anderen Patente vom gleichen Datum gibt Bradley eine Methode an, um durch Benutzung seiner Maschinen einen einphasigen Strom unter Phasenverschiebung zu theilen.

Untersuchungen von Nikola Tesla.

Die in den Jahren 1887 bis 1891 ausgeführten Arbeiten Nikola Tesla's würden allein hinreichen, wenn auch sonst Niemand auf diesem Gebiete thätig gewesen wäre, den Drehfeldmotor auf eine gesunde Grundlage zu stellen. Er war 1886 zu der festen Ueberzeugung gekommen, dass eine Methode gefunden werden könne, um einen Anker mittels der in ihm selbst inducirten Ströme zu

1) d. i. diametral. Die Uebersetzer.

treiben, statt hierzu mit Hilfe von metallischen Contacten, Commutatoren und Bürsten von aussen Ströme in den Anker zu leiten (wie es bei den gewöhnlichen Elektromotoren geschieht). Im October 1887 war Tesla's Arbeit genügend vorangeschritten, um ihn zur Anmeldung mehrerer amerikanischer Patente zu ermuthigen, welche zahlreiche Punkte von mehr oder weniger grundlegender Bedeutung betrafen. Andere Patentanmeldungen folgten im November und December desselben Jahres, aber keines davon wurde vom Patentamt vor Mai 1888 ausgegeben; zu diesem Zeitpunkte aber wurde eine ganze Schaar davon gewährt.

Das erste dieser Patente setzt im Allgemeinen Tesla's Gedankengang auseinander. Er sagt: „Obgleich ich verschiedene Mittel

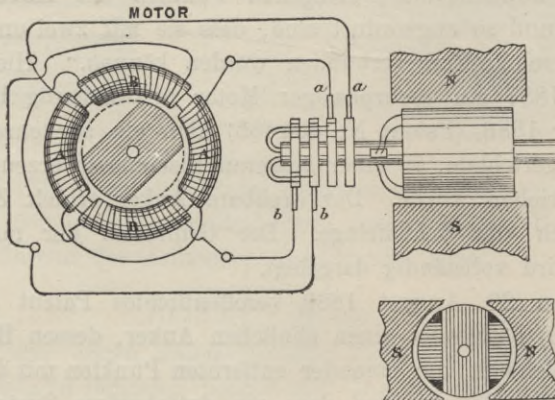


Fig. 371/72. Tesla's zweiphasiges System.

für den Zweck beschrieben habe, so enthalten doch alle dieselben Hauptgesichtspunkte der Construction und Wirkungsweise, die man wie folgt beschreiben kann:

„Ein Motor wird verwendet mit zwei oder mehr unabhängigen Stromkreisen, durch welche Wechselströme in geeigneten Zwischenräumen in der beschriebenen Weise gesandt werden, um ein allmähliches Voranschieben des Magnetismus oder der Kraftlinien in Uebereinstimmung mit der wohlbekanntten Theorie hervorzubringen und damit den Motor zu betreiben. Es ist klar, dass ein allmähliches Voranschieben der Kraftlinien benutzt werden kann, um eine Bewegung oder Drehung eines von beiden Theilen des Motors, des Ankers oder des Feldmagnetes, zu erzeugen, und dass kein Commutator erforderlich ist, wenn die Ströme, die in den verschiedenen Kreisen fließen, von selbst die geeignete Richtung be-

sitzen; man kann vielmehr all die gebräuchlichen, der Umschaltung dienenden Maschinentheile bei diesem System entbehren, wenn man die Stromkreise des Motors unmittelbar mit denen eines geeigneten Wechselstromerzeugers verbindet.“ Darauf beschreibt er mit Hilfe einer schematischen Darstellung (Fig. 371/72, die der Fig. 9 der Patentbeschreibung entnommen sind), wie ein Stromerzeuger mit zwei getrennten Spulen gewickelt wird, deren freie Enden zu isolirten Contactringen auf der Achse geführt sind. Von vier Bürsten, die an den Ringen anliegen, führen vier Drähte zum Motor. Dies ist nun ein einfacher zweiphasiger Stromerzeuger, der zwei in Quadratur stehende Ströme inducirt. Der Motor stellt sich dar als ein Ring, der aus Blechstücken aufgebaut und mit vier Spulen bewickelt ist, von denen zwei mit einem Paar, die anderen beiden mit dem zweiten Paar Leitungen verbunden wird. Sie suchen paarweise zusammenzuwirken, um an diametral gegenüberliegenden Stellen des Ringes magnetische Pole zu erzeugen.

Innerhalb des Ringes ist als Anker eine eiserne Scheibe *D* drehbar aufgestellt, am besten eine Scheibe, die an zwei Seiten abgeschnitten ist, so dass sie einen länglichen Körper bildet. Sie dreht sich so, dass sie von einer Seite des Ringes zur andern eine möglichst grosse Kraftlinienzahl führt. Es zeigte sich, dass diese Form für die Drehung nicht wesentlich ist, da eine kreisförmige eiserne Scheibe sich auch drehte. Diese Erscheinung schrieb Tesla einer gewissen magnetischen Trägheit oder einem Widerstand gegen das Verschieben der magnetischen Linien zu. Diese Ansicht schien bestätigt zu werden durch die Beobachtung, dass eine Kreisscheibe aus Stahl kräftiger gedreht wurde, als eine aus weichem Eisen. Durch eine Reihe von acht schematischen Figuren erklärte Tesla die aufeinanderfolgenden Phasen, welche die Spulen des Stromerzeugers während einer ganzen Drehung durchlaufen, und die entsprechenden, hierdurch hervorgebrachten magnetischen Aenderungen im Motorring. Die resultirende Richtung des magnetischen Feldes dreht sich allmählich herum und zieht dabei die Eisenscheibe mit sich (Fig. 373—376).

Diese Verbindung besteht also aus einem zweiphasigen synchronen Motor mit einem Anker, der nicht mit inducirten Strömen, sondern durch magnetische Rückwirkungen arbeitet, und einem geeigneten Zweiphasen-Stromerzeuger, der den Strom liefert.

Zur selben Zeit wurden noch andere Formen beschrieben. Ein Motor hat einen Trommelanker, auf den zwei Spulen rechtwinklig

zu einander gewickelt sind; diesen werden die Ströme mittels vier Schleifringen zugeführt. Dieser Anker dreht sich zwischen den beiden Theilen eines Eisen- oder Stahlkörpers, der zur Verhütung der Wirbelströme (!) zertheilt sein sollte. Er war nicht bewickelt und wurde demnach nur durch die Polarität des Ankers magnetisirt. Darauf folgte ein dreiphasiger Stromerzeuger und Motor nach ähnlichen Gesichtspunkten, wie der oben beschriebene zweiphasige Stromerzeuger und Motor. Der Stromerzeuger besass drei umlaufende Spulen und sechs Schleifringe.

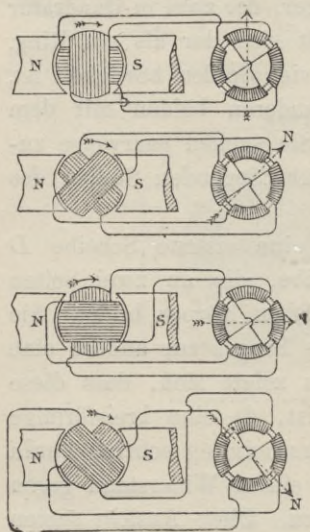


Fig. 373—376.

Tesla's zweiphasiges System.

Er war durch sechs Leitungsdrähte mit dem Ring des Motors verbunden, dessen sechs Spulen auf sechs nach innen vorspringende Polansätze aufgewickelt waren, so dass ein zweipoliges Feld mit drei Phasen entstand. Der Läufer war wie im vorhergehenden Falle eine Scheibe oder ein Cylinder aus Eisen, der an zwei Seiten abgeschnitten war, so dass er einen länglichen Körper bildete.

Die nächste Form, die beschrieben wurde, diente einer zweiphasigen Verbindung, ein Stromerzeuger mit einem drehbaren Magnet und zwei Paaren feststehender Ankerspulen, während der Motor wie zuvor eine zugeschnittene Scheibe als Anker besass, welche von zwei im rechten Winkel zu einander stehenden Spulen umgeben wurde. Eine Motorform wurde abgebildet, welche Vorrichtungen besass, um die Zweiphasenströme sowohl den drehbaren als den feststehenden, auf einem äusseren Ring angebrachten Spulen zuzuführen. In dem Falle, wo ein äusserer Eisenrahmen oder ein feststehender Magnet angewandt wurde, ergab es sich als vortheilhaft, diesem eine bestimmte Polarität zu ertheilen, indem man ihn mittels Gleichstromes erregte. Diese Motoren waren natürlich synchron. Transformatoren für Ströme, wie sie in diesen Systemen benutzt wurden, stellte man dadurch her, dass man einen Satz primärer und einen Satz secundärer Drähte auf denselben Ring von zertheiltem Eisen wickelte, in welchem die magnetischen Pole sich fortwährend verschoben. Im November kam der erste Versuch eines wirklichen Inductionsmotors. Bis dahin

hatte Tesla die Drehung hervorgebracht und unterhalten durch „unmittelbare Anziehung“ der magnetischen Elemente des Motors. „Ich habe entdeckt“, sagte er, „dass man vortheilhafte Ergebnisse in diesem System erzielt, wenn man die Verschiebung der Pole zunächst dazu benutzt, in einem geschlossenen Leiter, der im Bereich des Motorfeldes steht, Ströme zu erzeugen, so dass die Drehung durch die Rückwirkung dieser Ströme auf das Feld erzeugt wird.“

Er brachte innerhalb des Ringes, der das magnetische Drehfeld hervorbringen sollte, einen Cylinder oder eine Scheibe aus weichem Eisen an, welche zwei im rechten Winkel zu einander stehende Spulen aus isolirtem Draht trug; die beiden Enden jeder Spule waren mit einander verbunden, so dass jede einen besonderen, in sich geschlossenen Stromkreis bildete; dieser Anker wurde auf einer Achse in Lagern drehbar befestigt. In einer anderen Form wurde der Anker aus einem Eisenkern gebildet, der zur Vermeidung der Wirbelströme aus Scheiben zusammengesetzt und in äussere Spulen oder Leiter eingeschlossen war; die Spulen waren auf den Cylinder der Länge nach aufgebracht und in einen oder mehrere Kreise um den Kern herum angeordnet. Wenn Kupferplatten als Leiter angewandt wurden, so mussten sie der Länge nach geschlitzt werden. Für diese Construction, bei der geschlossene, der Induction unterworfenen Stromkreise auf dem drehbaren Theile eines Motors verwandt wurden, dessen Wickelung für eine fortwährende Verschiebung der magnetischen Polarität bestimmt war, wurde die Priorität der Erfindung in Anspruch genommen.

Der noch weiter gehende Anspruch auf die Erfindung einer neuen Methode zur elektrischen Kraftübertragung muss in Tesla's eigenen Worten wiedergegeben werden:

„Ich bin mir bewusst, dass es nicht neu ist, die Drehung eines Motors durch unterbrochenes Verschieben der Pole eines seiner Bestandtheile hervorzubringen. Dies ist bisher ausgeführt worden, indem man durch unabhängige Erregerspulen auf dem einen Bestandtheile den Strom einer Batterie oder einer anderen Gleichstromquelle unter Umkehrung des Stromes mittels geeigneter mechanischer Vorrichtungen schickt, so dass er durch die beiden Spulen abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen fliesst.

„In solchen Fällen bleibt die Spannung der Erregerströme gleich, während sich ihre Richtung allein ändert. Nach meiner Erfindung verwende ich wirkliche Wechselströme; und meine Erfindung besteht in der Art und Weise, solche Ströme zu benutzen.

„Der Unterschied zwischen beiden Arten des Betriebes und die Vortheile des meinigen sind einleuchtend. Indem ich einen Wechselstrom, dessen Schwingungen ein Steigen und Fallen des Potentials in sich schliessen, erzeuge, rufe ich im Motor genau dieselben Bedingungen wie im Stromerzeuger hervor, und durch solche Ströme und die daraus sich ergebende Erzeugung resultirender Pole erhalte ich Pole, die nicht sprungweise, sondern allmählich sich verschieben. Hierzu kommt, dass die praktische Schwierigkeit, einen Strom von irgend erheblicher Stärke zu unterbrechen oder umzukehren, so gross ist, dass keine der jetzt bekannten Vorrichtungen dazu verwandt werden kann, wirthschaftlich oder praktisch eine Uebertragung von Arbeit auszuführen, wenn dies in der beschriebenen Weise durch Umkehrung eines Gleichstromes geschehen soll. Insofern als es sich um die Wirkung auf ein Element des Motors handelt, benutzt meine Erfindung einen Wechselstrom im Gegensatz zu einem gewendeten Gleichstrom, worunter ein Gleichstrom zu verstehen ist, der durch irgend eine Form eines Stromwenders, -wechslers oder -unterbrechers von einer Spule zur nächsten verschoben wird. Mit Rücksicht auf denjenigen Theil der Erfindung, der in gleichzeitiger Wirkung auf beide Elemente des Motors besteht, betrachte ich die Verwendung sowohl von Wechsel- wie von gewendetem Gleichstrom als innerhalb des Bereiches meiner Erfindung liegend, obwohl ich nicht glaube, dass die Benutzung des gewendeten Gleichstromes irgend wie von praktischer Bedeutung ist.

Was ich als meine Erfindung beanspruche, ist:

„Die hier beschriebene Methode der elektrischen Kraftübertragung, welche darin besteht, eine allmähliche Verschiebung der Polaritäten des einen oder beider Elemente (des Ankers oder des Feldmagnetes oder der Feldmagnete) eines Motors durch Erregung von Wechselströmen in unabhängigen Stromkreisen, welche die Magnetisierungs- spulen eines oder beider Elemente enthalten, wie im Vorigen auseinandergesetzt wurde.“

Die von Tesla im Herbst 1887 dem amerikanischen Patentamt vorgelegte Beschreibung ist sehr umfangreich; sie handelt von synchronen und nichtsynchrone Motorformen, von mehrphasigen Stromerzeugern und Methoden der Kraftübertragung, sowie von mehrphasigen Transformatoren, und beschreibt viele auf verschiedene Weise combinirte Maschinenformen. Sie schliesst nicht nur das oben beschriebene zweiphasige System der Kraftübertragung mit vier Drähten ein, sondern auch ein Dreiphasensystem mit sechs Leitungen. Das Princip,

das Feld im Motor allmählich fortschreiten oder sich drehen zu lassen, zieht sich als rother Faden durch alle diese Patente, vom ersten bis zum letzten. Auf die Bedeutung des Schlipfes wies das am 30. November 1887 vorgelegte Patent Nr. 382279 hin, in dessen Beschreibung auch schon gesagt wurde, dass zur Umkehrung der Drehrichtung des Motors nur das Umkehren eines der vom Generator kommenden Stromkreise erforderlich sei.

Im April 1888 findet Tesla, dass er in einem Zweiphasensystem eine gemeinsame Rückleitung benutzen kann, so dass er statt der vier nur noch drei Drähte braucht. Er zeigt auch, wie man einen zweiphasigen Strom von einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine abnehmen kann, indem man letztere mit vier Schleifringen versieht, die mit vier symmetrischen Punkten des Commutators verbunden sind.

Für Stromerzeuger, die (wie die bekannte Thomson-Houston'sche Bogenlichtmaschine) drei von einem gemeinsamen Punkte ausgehende Spulen besitzen, während die freien Enden der Spulen zu den Theilen eines Commutators geführt sind, zeigt Tesla, dass man von ihnen drei Wechselströme erhalten kann, wenn man die freien Enden der Spulen zu drei Schleifringen mit Bürsten führt. Diese drei Wechselströme werden in ihren Phasen

symmetrisch sein. In diesem Falle soll der Motor oder Transformator gleichfalls mit drei symmetrisch gestellten Erregerspulen versehen sein.

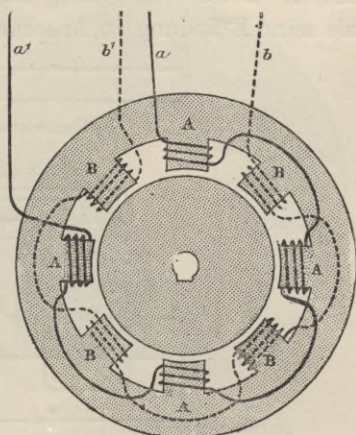


Fig. 377.

Mehrpolige Anordnung Tesla's.

Schon von einer frühen Periode seiner Untersuchungen an scheint Tesla die Bedeutung der vielpoligen Anordnung für die Ermässigung der Geschwindigkeit erkannt zu haben. Im Mai 1888 hatte er schon vielpolige synchrone Motoren, und später vervollkommnete er diese Anordnung noch weiter. Fig. 377 gibt die Zeichnung eines achtpoligen Feldes, von dem vier Pole in dem Kreise A (abwechselnd N- und S-Pole), und vier dazwischen im Kreise B liegen. In solchem Falle besteht die Verschiebung des Feldes nicht in einer gleichmässigen Drehung. Das Feld eines Poles bei A läuft nicht um bis zum nächsten Pole bei B; was wirklich sich zuträgt,

ist, dass der Magnetismus des Poles *A* verschwindet, während neuer Magnetismus in dem Nachbarpole *B* erscheint.

Im April 1889 beschrieb Tesla Methoden, um zweiphasige Motoren mittels eines gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstromes zu speisen, indem er zum Anlassen der synchronen Motoren eine Vorrichtung benutzte, um den Wechselstrom unter Phasenverschiebung zu theilen. Er schaltete die beiden Spulenreihen nebeneinander und brachte in den einen Zweig einen inductionsfreien Widerstand, in den anderen eine Spule mit grosser Selbstinduction, eine Drosselspule. Fig. 378. Wenn der Motor im Gange ist, werden die beiden letzteren ausgeschaltet; aber der Motor bleibt im Gange, nun als synchroner Motor. Diese Vorrichtung nahm Tesla nicht in ihrer Allgemeinheit als seine Erfindung in Anspruch, und that klug daran, weil sie schon

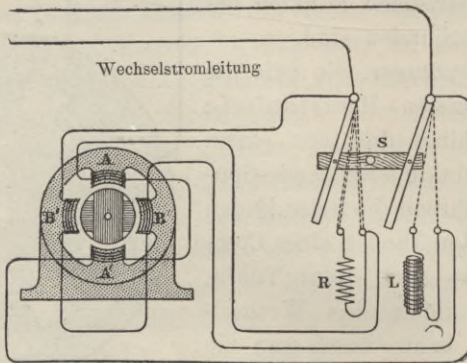


Fig. 378. Anordnung zur Theilung eines Wechselstromes unter Phasenverschiebung.

von Ferraris (Seite 477) benutzt worden ist; aber er beanspruchte sie für sich als Mittel zum Anlassen eines synchronen Motors. Seine Worte sind: „Ich glaube der Erste zu sein, der elektromagnetische Motoren mit Wechselströmen betreibt..., indem ihre Pole oder Punkte grösserer magnetischer Anziehung allmählich durch Verwendung der Wechselströme vorangeschoben oder gedreht werden, bis sie eine vorgeschriebene Geschwindigkeit erreicht haben, und darauf durch dieselben Ströme, welche nun lediglich einen Wechsel der Pole hervorzubringen haben; oder, in anderen Worten, durch einen Wechsel in der Anordnung oder dem Charakter der Verbindungen im Stromkreis, wodurch ein Motor, der nach dem einen Grundgedanken betrieben wird, sich in einen solchen verwandelt, der nach dem anderen Grundgedanken betrieben wird, um den beschriebenen Zweck zu erreichen.“ Es scheint sich hier nur um synchrone Motoren zu handeln.

Hierauf folgten andere Patente für verschiedene Arten solcher Motoren, die mit gewöhnlichen, unter Phasenverschiebung verzweigten Wechselströmen betrieben werden.

Darunter befand sich auch der in Fig. 379 abgebildete, in dem zwei Spulensätze nebeneinander an die Hauptzuführungen einer gewöhnlichen Wechselstromanlage angeschlossen werden sollten. Die Spulen der einen Reihe bestanden aus dickem Draht auf langen Eisenkernen, und haben grosse Selbstinduction und geringen Widerstand; die anderen wurden auf ganz kurze Polansätze mit Draht von viel grösserem Widerstand gewickelt. Das Ergebniss ist, dass die Ströme, die durch die ersteren fliessen, gegen die durch die letzteren gehenden verzögert werden; auf diese Weise wird eine allmähliche Verschiebung der Pole erzeugt.

Viele andere Formen wurden zwischen 1889 und 1891 entworfen; die Reihe schloss mit einem sechspoligen Motor, in dem die erforderliche Phasenverschiebung in der einen Spulenreihe durch einen Condensator hervorgebracht wurde, der von Strömen in einer secundären Wickelung gespeist wurde. Diese wichtige Reihe

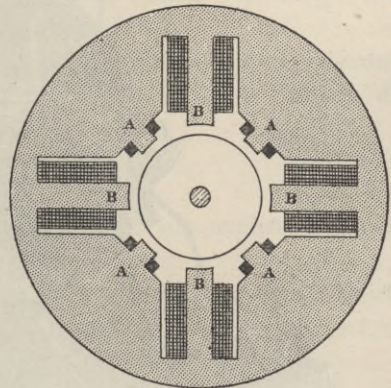


Fig. 379. Drehfeldmotor für gewöhnlichen Wechselstrom.

von Patenten ging in den Besitz der Westinghouse-Gesellschaft über. Ausführlicheres findet man über Tesla's Arbeiten in seinem Vortrage vom Mai 1888 vor dem American Institute of Electrical Engineers, und in dem Buche von T. C. Martin über Tesla's Erfindungen.

Haselwander's Motoren.

Im Sommer 1887 erbaute Haselwander, ein Ingenieur in Offenburg (Baden), eine Dreiphasenmaschine von etwa 10 P (Fig. 380), welche einen feststehenden Ringanker von 40 cm Durchmesser und mit 12 Spulen, und einen im Innern des Ringes sich drehenden vierpoligen Feldmagnet besass. Sie war mit einem Commutator ausgerüstet, um ihr eigenes Feld erregen zu können. 1891 war sie auf der Frankfurter Ausstellung zu sehen. Haselwander's Gedanke war der folgende: Jede gewöhnliche Dynamomaschine oder

Motor für Gleichstrom erzeugt in Wirklichkeit in den aufeinanderfolgenden Gruppen seiner Spulen wechselnde elektromotorische Kräfte mit verschiedenen Phasen, und der Commutator dient dazu, diese mehrphasigen Ströme in eine Folge übereinandergreifender Ströme gleicher Richtung zu verwandeln.

Bei der Kraftübertragung mittels Gleichstromes werden zwei solche Gleichstrommaschinen durch zwei Leitungen miteinander verbunden. Der pulsirende Gleichstrom, den die Primärmaschine (der

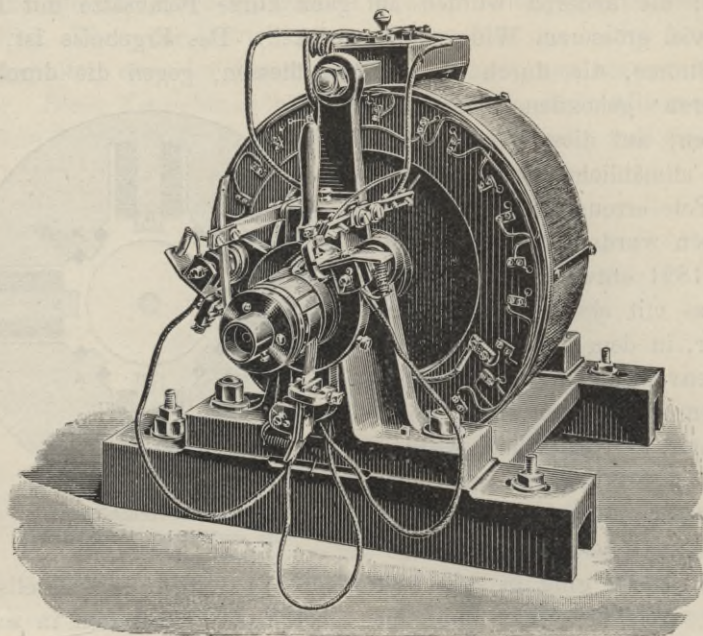


Fig. 380. Haselwander's Motor (1887).

Stromerzeuger) aussendet, wird durch den Commutator der Secundärmaschine (des Motors) in seine Componenten zerlegt und kehrt zu der Form einer Reihe von mehrphasigen Wechselströmen zurück. So kam dem Erfinder der Gedanke, die beiden ähnlichen aber entgegengesetzten Vorgänge, zuerst des Vereinigens und Gleichrichtens, dann des Richtungswechsels und des Trennens der mehrphasigen Ströme, die in den verschiedenen Abtheilungen des Ankers erzeugt worden waren, wegzulassen. Er kam also zu der mehrphasigen Kraftübertragung und konnte den Commutator nebst Bürsten entbehren, ausser insofern diese als Nebenapparate nöthig waren, um einen kleinen Theil des Stromes zur Erregung der Feldmagnete

abzuzweigen. Die Gruppierung der Spulen war die Sternschaltung, aber die Spulen waren mit Endklemmen versehen, welche erlaubten, die einzelnen Spulen jeder Reihe hinter oder neben einander zu schalten. Jede der 12 Spulen hatte 52 Windungen von 1,52 mm starkem Drahte. Ein Strom von 24 Ampere bei 100 Volt konnte in jeder Phase abgenommen werden, die Umlaufzahl betrug 900. Diese Maschine ist in einem Vortrage von J. Epstein im Elektrotechnischen Anzeiger 1891 beschrieben worden.¹⁾

Wilson's Motor.

In einer Patentbeschreibung (Nr. 18525 von 1888) beschreibt Wilson einen Zweiphasenmotor, der einen Anker von Ring- oder Trommelform hat, mit einem Commutator.

Zweiphasenströme werden sowohl den Feldmagneten wie dem Anker zugeführt, während die Richtung der Drehung durch die Stellung der Bürsten bestimmt wird.

Wenström's Motor.

Der verstorbene Wenström nahm 1890 ein englisches Patent (Nr. 5423 von 1890) auf ein Dreiphasensystem.

Er beschreibt und zeigt in einer bemerkenswerth klaren Zeichnung die Wickelung eines dreiphasigen Stromerzeugers. Er schlug vor, die drei Spulen in Sternschaltung zu verbinden.

Ein Dreiphasen-Transformator und ein Dreiphasen-Motor sind gleichfalls in der Patentschrift beschrieben.

M. v. Dolivo-Dobrowolsky's Untersuchungen.

Dobrowolsky, einer der ersten Elektriker der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin, hat zuerst den Ausdruck „Drehstrom“ (ursprünglich für ein dreiphasiges System) gebraucht, um ein mehrphasiges System von Strömen zu bezeichnen.

Das erste der englischen Patente Dobrowolsky's (Nr. 10933 von 1889) bezieht sich auf den Anker eines mehrphasigen Motors und erwähnt besonders die Erzeugung der Drehfelder nach der Methode von Ferraris, wonach eine Wirkung auf leitende Körper durch die in ihnen selbst inducirten Ströme erzeugt wird. Der Vorschlag war, als drehbaren Anker einen Eisenkörper zu ver-

1) Siehe auch den offiziellen Bericht der Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt (Main) 1891 (veröffentlicht 1893), Seite 251. Ebenso Elektrotechnische Zeitschrift. 1881. Seite 540 und 609.

wenden, in welchen Leiter oder Adern aus Kupfer, Barren oder Drahtseile, eingesetzt waren, und zwar in einer solchen Anordnung, dass sie senkrecht standen sowohl zur Drehungsrichtung als zu den Kraftlinien des Feldes; diese Leiter wurden an ihren Enden kurz geschlossen.

Die Zeichnungen stellen einfache Formen von Kurzschlussankern (einschliesslich einer „Trillerkäfig“-Form) mit Eisenkörpern dar.

Die nächsten zwei Patente (Nr. 19554 und 19555 von 1889) betreffen eine Form des mehrphasigen Stromerzeugers und einen dreiphasigen Transformator. Der letztere hatte einen Kern aus drei Zweigen; der magnetische Kreis bildete eine Sternanordnung.

Im August 1890 erscheint das Patent Nr. 13260 vom selben Jahr, worin die Anordnung beschrieben wird, im gemeinsamen Knotenpunkte eines dreiphasigen (oder n -phasigen) Systems eine gemeinsame Rückleitung anzulegen, um die drei oder mehr Stromkreise von einander unabhängig zu machen, und worin ferner Regulirapparate angegeben werden, um die Spannungen in jedem der drei Stromkreise zu beherrschen. Zwei dreiphasige Auto-Transformatoren werden beschrieben, von denen der eine für Uebertragung auf grosse Entfernung bestimmt ist; zugleich wird auch die Zusammenschaltung von drei getrennten Transformatoren angegeben.

Patent Nr. 20425 von 1890 beschreibt einen zertheilten Anker, der mit isolirten Spulen bewickelt ist; und nachdem auseinander-gesetzt worden ist, wie beim Anlassen die Rückwirkung der Ankerströme mit dem Feld, das die primären Ströme erzeugen, zusammentrifft und die Zugkraft vermindert, wird die Methode, in den Ankerkreis regulirbare Widerstände einzuschalten, vorgeschlagen. Die Zeichnungen geben Flüssigkeitswiderstände an.

In dem Patente Nr. 3191 von 1891 zeigt Dobrowolsky mehrphasige Transformatoren zur Verwandlung von Strömen mit einer beliebigen Zahl verschiedener Phasen in ein Dreiphasensystem, zugleich auch Methoden, um dreiphasige Ströme in mehr als dreiphasige zu verwandeln. In Nr. 13503 vom selben Jahre beschreibt er seine Methode, durch Vereinigung der Stern- und der Netzschaltung Ströme von zwischenliegender Phase zu erzeugen. Er zeigt z. B., wie in einem dreiphasigen System sechs Stromphasen aus den drei Leitungen abgenommen werden können mittels sechs Spulen, von denen drei einzeln in die drei Leitungen eingeschaltet, drei als Nebenschliessungen zu je zweien der drei Leitungen gelegt sind. Alle sechs Spulen liegen in geeigneten Aussparungen des Feldmagnetes (vergl. Fig. 61).

Durch die Einführungen solcher Zwischenphasen wollte Dobrowsky die Zugkraft (die in Abwesenheit der Ankerrückwirkung in jeder Periode zwischen bestimmten grössten und kleinsten Werthen schwingen würde) gleichmässiger machen. In einer grossen Zahl Abbildungen werden die verschiedenen Arten der Zusammenstellung von Stromkreisen und Phasen erläutert.

Mehrphasiger Betrieb auf der Frankfurter Ausstellung 1891.

Der Bericht über die Entwicklung der mehrphasigen Ströme würde ohne Erwähnung der Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt (Main) im Sommer 1891 unvollständig sein. Diese Ausstellung ist für alle Zeiten mit der ersten Ausführung einer Kraftübertragung auf weite Entfernung verknüpft, bei welcher 100 P über 175 km weit fortgeleitet wurden.

Ogleich dem Namen nach eine internationale Ausstellung, wurde sie doch wesentlich nur von deutschen Firmen besickt.

Der Gegenstand des grössten Interesses waren die Mehrphasenapparate, die von vielen Firmen ausgestellt wurden. Der amtliche Bericht¹⁾ gibt viele Abbildungen davon und zugleich die Messungen, die während mehrerer Monate durch die Untersuchungscommission ausgeführt wurden. Die nachfolgenden Angaben über die Ausstellungsgegenstände dieser Art sind ein Auszug aus dem genannten Bericht.

W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt vertheilten aus ihrer Stromerzeugungsanlage in der Maschinenhalle einen dreiphasigen Strom von 75 Volt, welcher verschiedene dreiphasige Motoren — worunter die historische Maschine Haselwander's (Fig. 380, Seite 490), ein zehnpferdiger synchroner Motor der gewöhnlichen vierpoligen Lahmeyer'schen Art, aber mit drei Schleifringen anstatt des üblichen Commutators versehen, und eine Anzahl kleiner Motoren — trieb.

Schuckert & Co. führten zwei grosse Zweiphasen-Stromerzeuger mit dem bekannten Flachringanker vor, auch diese mit Schleifringen versehen. Eine der beiden Maschinen stand in der Maschinenhalle und lieferte Strom für die Pumpstation am Main; die andere stand etwa 2 km von der Ausstellung entfernt, beim Palmengarten, und lieferte Strom für die Halle für Leitungsmaterial in der Ausstellung. Da die Ringbewicklung dieser Anker in Netzschaltung

1) Allgemeiner Bericht über die Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt (Main). 1891. 2 Bde. Frankfurt (Main). 1893.

verbunden war, so musste man zwei unabhängige Stromkreise mit im ganzen vier Leitungsdrähten verwenden; doch war es durch Einfügung von Transformatoren (vergl. Fig. 295) möglich, zur Uebertragung in die Ferne ein Dreileitersystem zu benutzen. Aehnliche Maschinen, mit Feldmagneten, die durch Gleichstrom erregt wurden, dienten als Motoren. Sie liefen synchron und leisteten mehr, als wenn man sie als synchrone Motoren ohne besondere Erregung betrieben hätte. Die 25pferdige Maschine, die in der Ausstellung als Motor benutzt wurde, besass in der That einen Hilfscommutator, der sie in den Stand setzte, ihre eigenen Feldmagnete zu erregen. Der 50pferdige Motor auf der Pumpstation wurde besonders erregt.

Die verwendeten Transformatoren waren gleichfalls von der Flachring-Gattung; die Spulen wurden in Nuthen gewickelt, die in einen aus Eisenband spiralig gewickelten Kern geschnitten waren.

Siemens & Halske stellten einige kleine Dreiphasenmotoren aus, wovon eine Gattung einen Kurzschlussanker besass; der Anker einer anderen zeigte einen Commutator, dem der dreiphasige Strom durch drei in gleichen Abständen angelegte Bürsten zugeführt wurde, nachdem er die drei Kreise der Feldebwicklung durchlaufen hatte.

Sie stellten auch zwei Dreiphasen-Stromerzeuger aus; der eine glich ihrem gewöhnlichen Wechselstromerzeuger und hatte als Anker einen Satz von 24 Spulen (in drei Reihen zu acht Spulen), der zwischen zwei Kränzen von 16 abwechselnden Polen sich drehte; der andere hatte das Aussehen ihrer gewöhnlichen Gleichstrommaschinen mit einem Trommelanker, dessen Bewickelung an drei symmetrisch vertheilten Punkten mit drei Schleifringen verbunden wurde.

Die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in Berlin hatte im Verein mit der Maschinenfabrik Oerlikon den staunenswerthen Nachweis von der Möglichkeit einer Kraftübertragung auf grosse Entfernung unternommen; es wurde dazu von Lauffen nach Frankfurt hohe Spannung verwendet, wie weiter unten ausführlich beschrieben wird. Dies war eine dreiphasige (sogenannte Drehstrom-) Uebertragung. Der 100pferdige Motor in der Ausstellung, welcher von dem 175 km entfernten Lauffen Strom empfing, wurde benutzt, um Wasser für einen künstlichen Wasserfall zu pumpen; er ist in Fig. 388, Seite 502 abgebildet. Ein kleinerer dreiphasiger Motor von etwa 3 P, welcher benutzt wurde, um eine kleine Gleichstrommaschine mit Glühlampenbelastung zu treiben, besass eine Construction, welche die Umkehrung derjenigen bildet, die man jetzt

gewöhnlich in den Inductionsmotoren verwendet. Die Ströme wurden durch drei Schleifringe einem drehbaren Anker zugeführt, während ein feststehender äusserer Theil aus eisernen Ringkernen mit

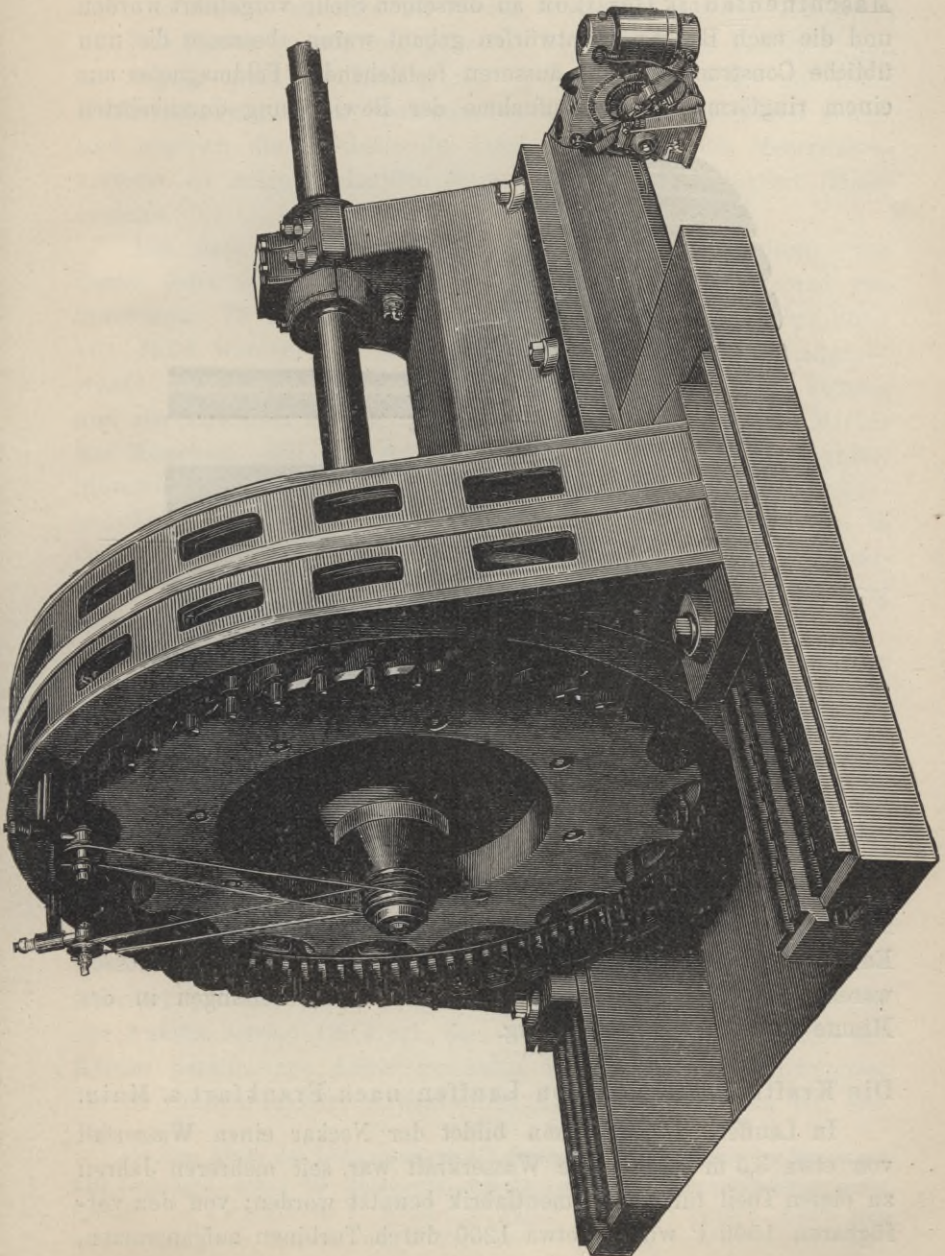


Fig. 381. Laufener Drehstrommaschine von Brown.

geschlossenen Spulen den inducirten Feldmagnet bildete. Ein noch kleinerer Motor mit Inductionsanker ohne Contacte diente zum Betrieb eines kleinen Windrades. Andere Motoren, die von der Maschinenfabrik Oerlikon an derselben Stelle vorgeführt wurden und die nach Brown's Entwürfen gebaut waren, besaßen die nun übliche Construction eines äusseren feststehenden Feldmagnetes aus einem ringförmigen, zur Aufnahme der Bewickelung durchbohrten

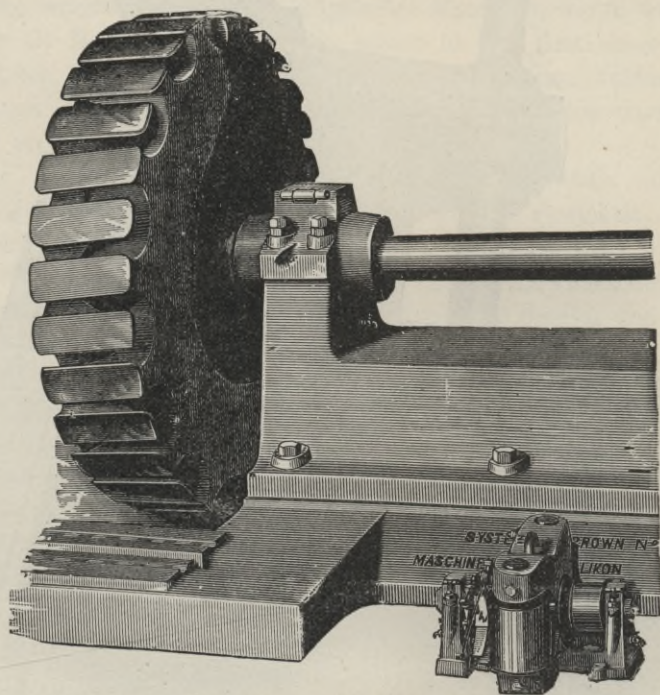


Fig. 382. Feldmagnet der Maschine Fig. 381.

Kerne; der Anker bestand gleichfalls aus einem durchbohrten Kern mit einem einfachen Stromkreis aus Kupferbarren, die an beiden Enden durch zwei Ringe nach Art eines Trillerkäfigs kurzgeschlossen waren. Einer davon, der 20 P bei 1200 Umdrehungen in der Minute leistete, wog nur 420 kg.

Die Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt a. Main.

In Lauffen bei Heilbronn bildet der Neckar einen Wasserfall von etwa 3,5 m Höhe. Die Wasserkraft war seit mehreren Jahren zu einem Theil für eine Cementfabrik benutzt worden; von den verfügbaren 1500 P wurden etwa 1200 durch Turbinen aufgenommen,

aber es blieb noch genug, um 2—300 P mehr zu liefern, und es wurde beschlossen, diese für die Beleuchtung der 10 km weit entfernten Stadt Heilbronn auszunutzen. Während dieser Plan noch erwogen wurde, entstand im Herbst 1890 der Wunsch, die durch die Frankfurter Ausstellung gebotene Gelegenheit zu benutzen, um zu zeigen, was zur Lösung der Aufgabe, eine Kraft auf weite Entfernung mit hoher Spannung zu übertragen, geschehen könne, und zugleich die Vortheile des Drehstromes oder des Mehrphasensystems zu zeigen. Lauffen liegt 175 km von Frankfurt (Main) entfernt.

Um dem Plane gemäss 100 P auf drei Kupferleitern, von denen jeder nur 4 mm stark war, mit einem Wirkungsgrad von mindestens 75 Procent fortzuführen, musste man eine Spannung von nicht weniger als 8000 Volt verwenden. Diese Kraftprobe wurde nichtsdestoweniger ausgeführt. Der Ingenieur der Leitung und der Lauffener Stromerzeugungsanlage war Oskar von Miller aus München. Mit ihm waren zu gemeinsamer Arbeit zwei grosse industrielle Firmen verbunden, die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in Berlin und die Maschinenfabrik Oerlikon in Oerlikon bei Zürich. Sie genossen die Mitwirkung des Kaiserlichen Reichspostamtes bei der schwierigen Arbeit der Errichtung der Leitung.¹⁾

Der Kupferdraht wurde von der Firma F. A. Hesse Söhne in Heddernheim geliehen. Die zwei Stromerzeuger, welche von C. E. L. Brown entworfen und von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut worden waren, wurden von Turbinen angetrieben; sie wurden nach Beendigung des Versuchs ihrer eigentlichen Bestimmung zurückgegeben, und sind heute noch im Betrieb. Sie haben innere umlaufende Feldmagnete, der äussere Anker enthält die im Zickzack verbundenen Leiter in den Löchern der Kerne eingebettet. Fig. 381 und 382 stellen die Maschine dar. Jeder der drei Ströme ist 1400 Ampere stark, die Spannung beträgt 50 Volt, die Maschine erfordert bei 150 Umdrehungen 300 P. Der äussere Durchmesser des Ankers beträgt 189,4 cm, der innere 176,4 cm. Die Stärke des Kernes parallel zur Achse gemessen ist 38 cm, der Durchmesser der 96 runden Löcher, welche einen Abstand von 60 mm von ein-

1) Eine Karte des Leitungsweges mit genauen Beschreibungen der Maschinen und Leitungen, sowie der Messungen, welche von der Prüfungscommission unter Leitung von Professor H. F. Weber in Zürich ausgeführt wurden, findet sich in dem Amtlichen Berichte, der in Frankfurt (Main) 1893 veröffentlicht wurde.

ander haben, ist 33 mm. Jedes Loch ist mit einer Asbeströhre ausgekleidet, die den massiven Kupferleiter von 29 mm Durchmesser umgibt. Die aus ausgestanzten Segmenten zusammengesetzten Kern-

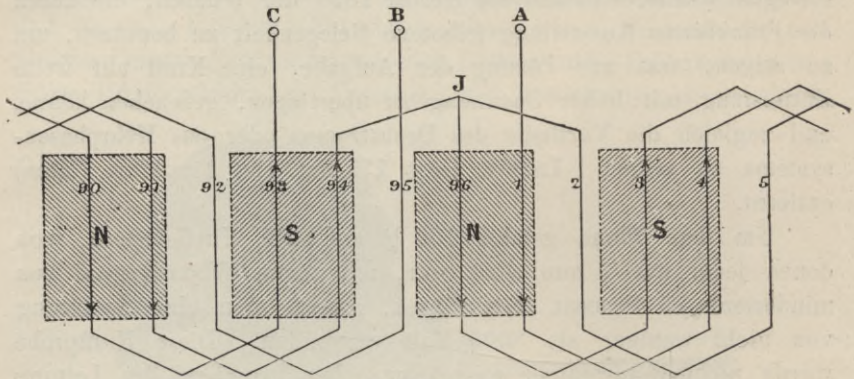


Fig. 383. Abgewickeltes Schema der Feldwicklung.

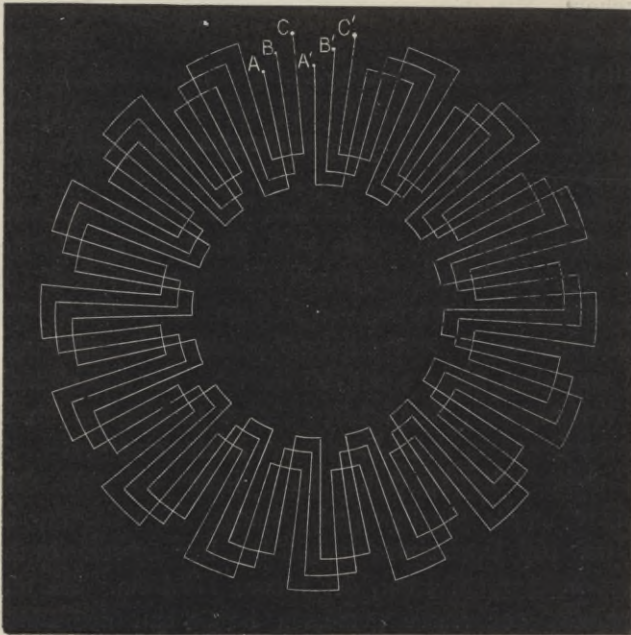


Fig. 384. Schema der Feldwicklung.

ringe werden von einem starken gusseisernen Rahmen zusammengehalten. Die Wicklung, wenn man hier von einer solchen noch reden kann, besteht aus drei von einander unabhängigen Strom-

kreisen, aus je 32 Leitern, die nach dem folgenden Schema verbunden sind:

Kreis A:	Leiter 1, 4, 7, 10	91, 94.
„ B:	„ 95, 92, 89, 86	5, 2.
„ C:	„ 93, 90, 87, 84	3, 96.

Die Enden von 94, 2 und 96 sind an den gemeinsamen Punkt *J* geführt, während 1, 95 und 93 mit den drei Aussenleitern verbunden sind. Das Ganze stellt eine Sternschaltung dar. Die Verbindungen der Stromläufe sind in Fig. 383, das allgemeine Schema der Wickelung in Fig. 384 dargestellt.

Der Luftzwischenraum zwischen dem Anker und den Polflächen des Feldmagnets beträgt 6 mm. Der einfache aber sehr kräftig gebaute

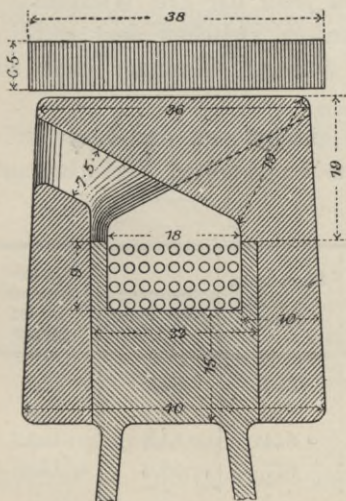


Fig. 385. Schnitt durch den Feldmagnet.

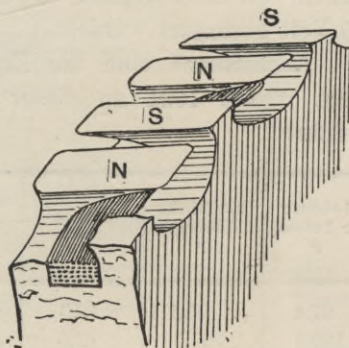


Fig. 386. Ansicht des Feldmagnets.

Feldmagnet hat 32 Pole, die erregende Wickelung ist in einem Kanal an der Aussenseite einer Art Riemenscheibe aus Gusseisen untergebracht, an welche beiderseits eine stählerne Scheibe mit 16 Polhörnern angeschraubt ist. Jede Poloberfläche hat 36×16 cm Querschnitt. Der Kanal ist 18 cm breit und 9 cm tief, er enthält 496 Windungen Kupferdraht von 5 mm Durchmesser. Fig. 385 gibt einen Querschnitt des Kanals, Fig. 386 zeigt, wie die Polhörner nach innen vorstehen und die *N*-Pole zwischen den *S*-Polen die Wickelung übergreifen. Bei dieser Anordnung werden die Kosten der baulichen Ausführung und der Erregung auf das geringste Maass beschränkt. Thatsächlich erfordert die Erregung bei offenem

Stromkreise nur 100 Watt, d. i. $\frac{1}{12}$ v. H. der Leistung. Diese Erregung wird von einer kleinen getrennt angetriebenen Maschine geliefert. Der Strom wird dem rotirenden Theil an Stelle von Bürsten und Schleifringen durch Metallschnüre zugeführt, die über isolirte Scheiben laufen. Bei normaler Spannung und voller Geschwindigkeit beträgt der Verlust durch Reibung und Hysteresis 3600 Watt, d. i. weniger als 1,7 v. H. der maximalen Leistung. Der Verlust durch den Widerstand der Ankerwicklung ist bei voller Belastung 3500 Watt, so dass der Gesamtverlust etwa 4 v. H. und der Wirkungsgrad über 95 v. H. beträgt. Wärmeverluste sind vernachlässigbar gering, da Wirbelströme gänzlich fehlen. Das Gewicht ist $4\frac{1}{2}$ Tonnen. Bei 16 Polpaaren und 150 Umdrehungen in der Minute ist die Periodenzahl 40. Die in jeder der drei Wickelungen erzeugte elektromotorische Kraft, gemessen zwischen dem gemeinsamen Verbindungspunkt *J* und der äusseren Klemme, kann auf 55 Volt gesteigert werden.

Nachstehend sind die Ergebnisse einiger von der Jury unter Prof. Weber 1891 an dieser Maschine angestellten Versuche aufgeführt:

Leistung der Turbine P	Elektrische Leistung P	Verlust P	Wirkungsgrad v. H.	Stromstärke in jeder Phase	Spannung jeder Phase	Umdrehungszahl in der Minute
87,4	75,1	12,3	88	336	54,7	150
120,1	107,5	12,6	90	470	56,1	150
154,7	142,2	12,5	92	644	54,2	149,7
167,2	154,4	12,8	92,6	677	55,9	149,5

Die Versuche wurden nicht bis zur vollen Belastung durchgeführt, für diese ergibt sich unter der Annahme, dass die Leistungen proportional den Angaben der vorstehenden Tabelle wachsen, ein Wirkungsgrad von 95,4 bei 300 P.

Die besondere Form des Feldmagnets mit nur einer erregenden Spule und übergreifenden Polen scheint von Brown, Gibbs und Fesquet¹⁾ gleichzeitig und unabhängig von einander erdnennt zu sein. Sie ist bis in die neueste Zeit von der Oerlikon-Gesellschaft, Alioth und mehreren englischen Firmen, darunter Johnson und Phillips, benutzt worden, ist jedoch nicht in allen Fällen günstig, denn Ankergegenwirkungen, die von Verzögerungsströmen bei induc-

1) Siehe Beschreibung Englisches Patent 1889, Nr. 238.

tiver Belastung herrühren, können in Folge der Polform leicht das Feld verzerren und beträchtliche magnetische Streuung von Pol zu Pol herbeiführen, und daher einen bedeutenden Spannungsabfall verursachen, wenn nicht die Erregung entsprechend verstärkt wird. Thatsächlich ist in allen Fällen, wo ein derartiger Spannungsabfall vermieden werden soll, diese Form verlassen worden. Formen, bei denen jeder Pol oder jeder zweite Pol besonders gewickelt ist, sind den inductiven Wirkungen der genannten Art weniger unterworfen. In neueren Ausführungen werden die Magnetisirungsspulen so dicht an die Polenden als irgend möglich angeordnet.

Kehren wir nach dieser Abschweifung wieder auf die Lauffener Maschine zurück. Jede vermochte drei Ströme von 1400 Ampere bei etwa 50 Volt zu liefern; die Wechselgeschwindigkeit betrug 40 Perioden in der Secunde. An jedem Ende der Leitung wurden Dreiphasen-

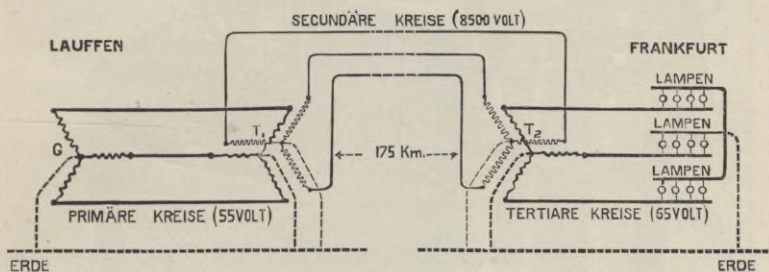


Fig. 387. Stromschema der Lauffen - Frankfurter Kraftübertragung.

Transformatoren benutzt: in Lauffen, um die Spannung auf 8500 Volt zu erhöhen, in Frankfurt, um sie wieder auf 65 Volt zu erniedrigen.

Diese Transformatoren (einige waren in Berlin, die anderen in Oerlikon gebaut) wurden zur besseren Isolirung in Oel eingesetzt. Ihre äussere Gestalt gleicht derjenigen des in Fig. 288/289, Seite 353 dargestellten Transformators. Sowohl die Niederspannungs-, wie die Hochspannungswickelungen waren in Sternschaltung verbunden und die gemeinsamen Knotenpunkte in jedem Falle an Erde gelegt.

Fig. 387 gibt eine schematische Darstellung, die keiner weiteren Erklärung bedarf. Die Leitungen wurden auf etwa 3000 Pfosten von etwa 8 m Höhe geführt, jeder Pfosten trug drei Porzellanisolatoren mit Riefen zur Aufnahme von Oel im Innern. Die Linie ging durch vier verschiedene Länder, Württemberg, Baden, Hessen und Preussen, wobei sie hauptsächlich der Neckar- und der Odenwaldbahn folgte; der lange Krähhertunnel der letzteren

Bahn wurde vermieden, indem die Linie über den Berg ging. Das ganze Gewicht des zu den Leitungen verwendeten Kupfers betrug etwa 60 t.

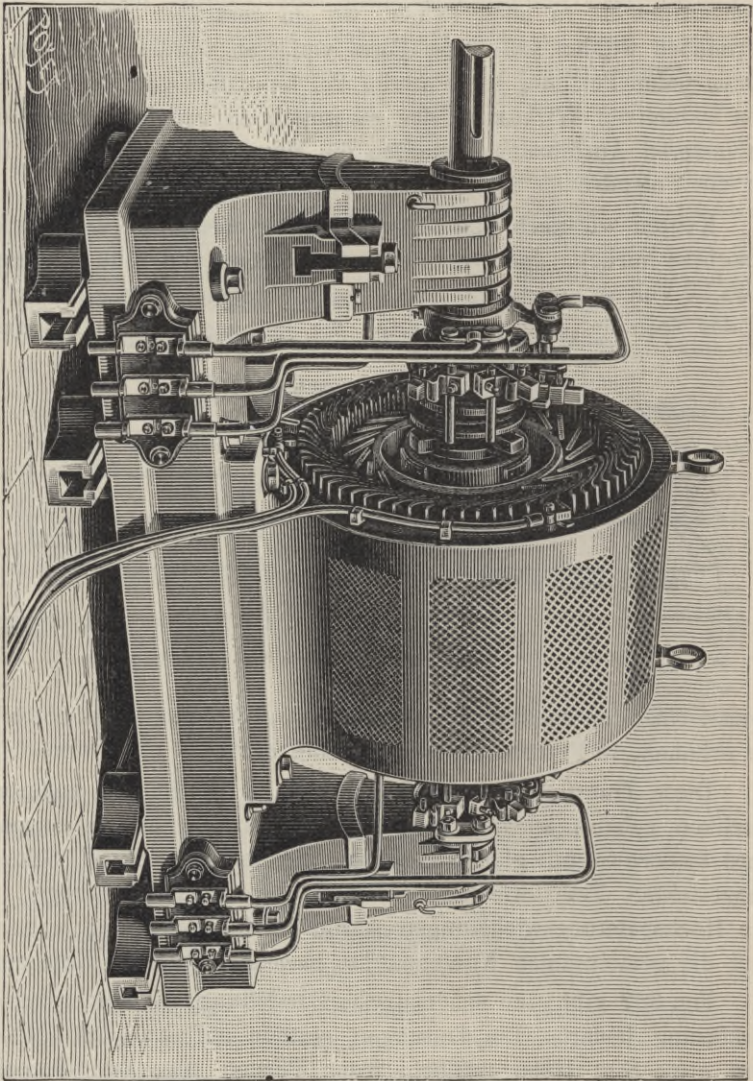


Fig. 388. Dobrowolsky's 100perfliger Dreiphasenmotor.

Die Linie wurde unter der Leitung des Kaiserlichen Telegrapheninspectors Ebert erbaut, der in seiner Arbeit durch die Württembergische Post- und Telegraphenverwaltung unterstützt

wurde. Am 24. August 1891 wurde die Linie von dem Beamten an die Maschinenfabrik Oerlikon und die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft übergeben, und am folgenden Tage wurden Lampen in der Frankfurter Ausstellung mittels der in Lauffen gewonnenen Kraft gespeist. In der Ausstellung stand ein 100-pferdiger Dreiphasenmotor (Fig. 388), der von Dobrowolsky entworfen und von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft ausgeführt war, und andere kleinere Motoren, welche schon oben erwähnt worden sind.

Dieser Motor trieb eine Centrifugalpumpe, welche etwa 60 P verbrauchte, um Wasser für einen künstlichen Wasserfall von etwa 10 m Höhe zu heben. Ausser diesen Motoren wurden etwa 1000 Glühlampen durch den übertragenen Strom gespeist.

Anfangs hegte man grosse Zweifel an dem zu erwartenden Ergebniss der Uebertragung, da die Bedingungen der Benutzung so ausserordentlich hoher Spannungen und einer so langen Linie, und ganz besonders die mehrphasigen Ströme noch neu und wenig bekannt waren. Es wurde von mehreren Seiten angenommen, dass der Wirkungsgrad durch den Einfluss der Capacität der Leitung, die sich wie ein Condensator verhielt, bedeutend herabgesetzt werden würde, oder dass die Verluste über die 10000 Isolatoren, an denen die Drähte befestigt waren, zu bedeutend sein würden. Sogar solche, die dem Unternehmen sehr nahe standen, sprachen im Vertrauen ihre Befürchtungen aus, dass der Wirkungsgrad weniger als 50 Procent betragen werde, und zu einer gewissen Zeit glaubte man, dass es der Untersuchungscommission nicht gestattet werden würde, eine vollständige Messung auszuführen. Indessen lehrte die Erfahrung, dass diese Befürchtungen unnöthig waren.

Die ausführlichen Messungen, die von der Commission in den Herbstmonaten angestellt wurden, in den meisten Fällen bei einer Spannung von 8000 Volt, zeigten, dass die in Frankfurt verfügbare elektrische Leistung im Mittel etwa 74 Procent der von den Turbinen in Lauffen an den Stromerzeuger gelieferten betrug. Die verschiedenen Quellen der Verluste wurden untersucht und sorgfältig gemessen, und die Ergebnisse dieser Ermittlungen in Professor Weber's Bericht aufgenommen. Dieser schliesst mit folgenden zusammenfassenden Sätzen:

„1. In der Lauffen-Frankfurter Anlage zur Uebertragung elektrischer Energie über eine Entfernung von 170 km mittels eines Systems von Wechselströmen mit der Spannung von 8500 Volt bis

7500 Volt und einer durch Oel und Porzellan isolirten nackten Kupferleitung wurden bei der kleinsten Leistung 68,5 Procent, bei der grössten Leistung bis zu 75,2 Procent der von der Lauffener Turbine an die Dynamo abgegebenen Energie in den tertiären Leitungen in Frankfurt nutzbar gemacht.

2. Bei dieser Uebertragung trat in der Fernleitung als einziger, durch die Messungen fixirbarer Effektverlust der durch den Widerstand der Leitung bedingte Joule'sche Effekt auf.

3. Theoretische Untersuchungen ergaben, dass der Einfluss der Capacität langer, in Luft geführter nackter Leitungen zur Fortleitung von Wechselströmen für Energieübertragung auf den Wirkungsgrad der Uebertragung bei der Verwendung von Periodenzahlen 30 bis 40 bis 50 so gering ist, dass derselbe bei der Berechnung elektrischer Energieübertragungen als ganz untergeordnete Grösse behandelt werden darf.

4. Als Ausdruck unserer Erfahrungen während der zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Lauffen-Frankfurter Energieübertragung vorgenommenen Messungen fügen wir noch als viertes Resultat bei: Der elektrische Betrieb mit Wechselströmen von 7500 Volt bis 8500 Volt Spannung in mittels Oel, Porzellan und Luft isolirten Leitungen von mehr als hundert Kilometer Länge verläuft ebenso gleichmässig, sicher und störungsfrei, wie der Betrieb mit Wechselströmen von einigen hundert Volt Spannung in Leitungsbahnen von der Länge einiger Meter.“

In einigen weiteren Untersuchungen, welche etwas später von Kittler und Lindley¹⁾ ausgeführt wurden, verwendete man besonders hohe Spannungen, welche in einigen Fällen bis über 28000 Volt stiegen; diese wurden erreicht durch Hintereinanderschalten zweier Transformatoren an jedem Ende der Leitung; das Ergebniss war im Ganzen das Folgende: „Die mit einer Hochspannung von 25000 Volt (14—15000 Volt Spannungsdifferenz eines Leiters gegen Erde) und bei einer Periodenzahl von 24 in der Secunde betriebene Energieübertragung Lauffen-Frankfurt hat bei einer Nutzleistung von circa 180 P einen Wirkungsgrad von ungefähr 75 Procent ergeben.“

Die Lauffen-Frankfurter Uebertragung war mehr als bloss ein Versuch. Sie war ein werthvoller und erfolgreicher Nachweis nicht nur des Nutzens der Verwendung hoher Spannungen bei der Ueber-

1) Amtlicher Bericht der Frankfurter Ausstellung. II. S. 451.

tragung von Kräften, sondern auch der Vortheile der mehrphasigen Ströme. In dieser Hinsicht bezeichnet sie eine Epoche in der industriellen Verwendung der Elektrizität. Sie erregte ausserordentliches Interesse auf dem ganzen europäischen Continent und besonders in Deutschland. Einen Beweis davon gibt der Umstand, dass schon bald nach dem ersten Auftauchen des Planes der Deutsche Kaiser selbst zu den Kosten des Unternehmens 10 000 Mark beisteuerte.

Anhang I.

Die symbolische Methode der Wechselstromberechnungen.

In den Kapiteln I, VII, VIII und XIII haben wir gesehen, dass für viele praktische Zwecke Berechnungen von Wechselstromaufgaben mit Hilfe des Uhrdiagramms ausgeführt werden können. Aber es lässt sich keine grosse Genauigkeit erreichen, wenn von den Linien dieser Diagramme Grössen abgegriffen und im elektrischen Maasse ausgedrückt werden sollen, und oft kommt es vor, dass in Folge der Gestalt und Lage des Uhrdiagramms der kleinste Irrthum in der Zeichnung einen grossen Fehler im Ergebniss hervorruft. Andererseits ist die analytische Behandlung, in der die verschiedenen Grössen als Sinusfunctionen der Zeit auftreten, sehr mühsam. Wir haben auf Seite 57 gesehen, dass die einfache Addition zweier Ströme, die sich in Amplitude und Phase unterscheiden, einen sehr unübersichtlichen Ausdruck liefert. Wo diese Rechnung mehrmals nach einander auszuführen ist, mag der Anfänger verzweifeln, wenn er erst die Hälfte des Weges hinter sich hat, und die Zuverlässigkeit des endlich erhaltenen Resultates mag ihm fraglich erscheinen.

Nun ist der Grund, weshalb die analytische Behandlung zu langen Ausdrücken führt, während dasselbe Ergebniss im Uhrdiagramm durch wenige Linien ausgedrückt wird, sehr einfach. Die analytischen Formeln geben die Grössen als Functionen der Zeit; wir erhalten den Werth der Grösse für jeden Augenblick, während das Uhrdiagramm Scheitelwerthe und Phasenunterschiede liefert, und wir in Gedanken das Diagramm drehen und seine Linien auf eine feste Achse projiciren müssen, um die Augenblickswerthe zu erhalten. In der Praxis brauchen wir selten die Augenblickswerthe. Wir brauchen die Scheitel- und die virtuellen oder Effectivwerthe und die Phasenbeziehungen. Daher entwerfen wir das

Uhrdiagramm und sind zufrieden, zu wissen, dass wir es drehen können, wenn wir wollen.

Daraus erhellt, dass die Rechenarbeit erheblich vereinfacht werden kann, wenn wir nicht bestrebt sind, die Ausdrücke für die Grössen als Zeitfunctionen festzuhalten, sondern uns darauf beschränken, Scheitel- oder Effectivwerthe mit ihren Phasenbeziehungen in die Rechnung einzuführen. Wir brauchen dann nur Anordnung und Grösse des Uhrdiagramms in Zeichen auszudrücken, statt durch Sinus- und Cosinus-Functionen darzustellen, was bei seiner Drehung geschieht.

C. P. Steinmetz fand, ausgehend von der Algebra der complexen Grössen, eine Methode, die er in seinem Buch über Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen ausgearbeitet hat. W. G. Rhodes¹⁾ hat eine sehr einfache Auseinandersetzung der Methode gegeben.

Wir möchten hier nur eine Skizze der Methode mittheilen, wobei indess der Gegenstand in einer Weise behandelt werden soll, die für den Anfänger leichter verständlich ist, insofern als die Grösse $\sqrt{-1}$ vermieden wird.

Die symbolische Methode, wie sie Steinmetz benutzt hat und wie sie nun in weitem Umfange in Wechselstromberechnungen angewandt wird, verwendet die Bezeichnung und Sprache der complexen Grössen, weil bekannt ist, dass complexe Grössen durch graphische Diagramme dargestellt, und weil umgekehrt graphische Diagramme durch Formeln mit complexen Grössen beschrieben werden können. Aber im Kopfe eines Studirenden kann leicht einige Verwirrung entstehen, wenn nicht genau gesagt wird, dass nur die Bezeichnungsweise der complexen Grössen für den vorliegenden Fall bequem ist, und dass die imaginäre Grösse $\sqrt{-1}$ oder j nicht in dieser ursprünglichen Bedeutung, sondern nur als Rechnungssymbol auftritt. Wenn dies völlig verstanden wird, mag man den Operator $\sqrt{-1}$ mit grössestem Interesse betrachten, seine Fähigkeit bewundern, einen Vector um einen rechten Winkel zu drehen, und seine Anwendung auf das graphische Diagramm studiren, wie es Steinmetz sehr eingehend gethan hat.

Um die Sache klar zu stellen, wollen wir nicht von vornherein das Zeichen j benutzen, um die Drehung um einen rechten Winkel

1) W. G. Rhodes, The Application of Vector Algebra to alternating Currents. Electr. Review vom 7., 14. und 21. Januar 1898.

auszudrücken, sondern wir wollen ein Zeichen verwenden, welches weniger einer reellen Grösse gleicht, und welches weniger den Anschein erweckt, als sollte eine Multiplication ausgeführt werden, wenn es in der Stellung eines Faktors neben reellen Grössen auftritt. Wenn der Leser sich mit dem Sinne dieses Zeichens vertraut gemacht hat, bietet es keine Schwierigkeit, zu j oder einem anderen Zeichen überzugehen, um die gleichen Ausdrücke zu erhalten, die man in anderen Lehrbüchern findet.

Um das Verständniss möglichst zu erleichtern, bedenken wir, dass die Ausdrücke nicht mehr thun, als die Länge und Lage der Linien in einem Uhrdiagramm anzuzeigen. Habe ich eine wagrechte Linie von der Länge c , die vom Ausgangspunkt in positiver Richtung gezogen wird, so kann ich diese Linie vollständig beschreiben durch das Zeichen \underline{c} , indem ich unter die Grösse c , welche die Länge ausdrückt, eine wagrechte Linie ziehe, um anzuzeigen, dass die Grösse c wagrecht ist. Wenn die wagrechte Linie in negativer Richtung vom Anfangspunkt gezogen wäre, so würde das Zeichen einfach $-\underline{c}$ sein. Aehnlich kann ich dem Leser angeben, dass ich eine senkrechte Linie aufwärts vom Anfangspunkt und von der Länge c' gezogen habe, indem ich schreibe $|c'$. Eine negative senkrechte Linie würde sein $-|c'$. Wenn ich eine beliebige Linie im Uhrdiagramm habe, so kann ich ihre wagrechte und senkrechte Componente durch Projection erhalten, und wenn diese c und c' sind, so gebe ich dem Leser alles, was er braucht, um die Linie auf ein Stück Papier zu zeichnen, wenn ich schreibe: $\underline{c} + |c'$; vgl. Fig. 389.

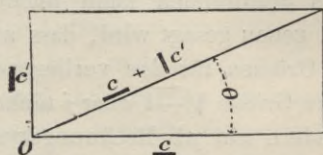


Fig. 389.

Es ist klar, dass die Länge der Linie $= \sqrt{c^2 + c'^2}$ ist, und der Winkel ϑ , den sie mit \underline{c} einschliesst, ist der Winkel, dessen Tangente $= c'/c$ ist.

Nun kommt es bei Uhrdiagrammen häufig vor, dass wir eine Linie rechtwinklig zu einer anderen ziehen wollen, und wir brauchen deshalb ein Zeichen, welches die Drehung einer Linie um einen rechten Winkel angibt; ein passendes Zeichen hierfür ist eine dünne senkrechte Linie \perp . Wird dies Zeichen vor den Ausdruck gesetzt,

der eine Linie darstellt, so bedeutet dies, dass die Linie in der Richtung gegen den Uhrzeiger um einen rechten Winkel gedreht worden ist; der Mittelpunkt der Drehbewegung ist der Anfangspunkt.

Also ist durch Definition

$$\begin{aligned} & \underline{|c} = |c, \\ & \underline{|c} = -c, \\ & -\underline{|c} = -|c, \\ & \text{und } -\underline{|c} = c, \end{aligned}$$

wie wir aus Fig. 390 erkennen.

Wenn wir nun die Linie $(a + |b)$ haben, so wird eine Senkrechte dazu (wie in Fig. 391) nach unserer Uebereinkunft auszudrücken sein durch $\underline{|(a + |b)}$ und dies ist gleich $\underline{|a} + |b$, weil nothwendiger-

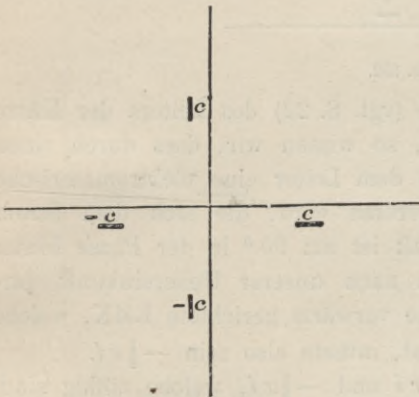


Fig. 390.

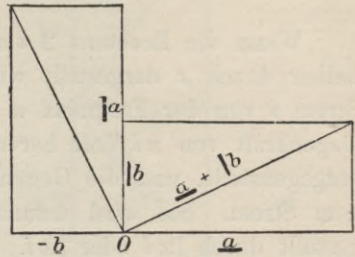


Fig. 391.

weise die Componenten um denselben Winkel gedreht werden, wie die ganze Linie. Nun ist aber

$$\underline{|a} + |b = |a + \underline{-b}.$$

Unsere Uebereinkunft gibt uns also $\underline{|a}$ und $\underline{-b}$ als Componenten des Lothes auf die Linie $\underline{|a} + |b$. Ein so einfacher Fall lässt sich leicht durch die Construction darstellen, wie in Fig. 391. Wir sehen also, dass das Zeichen für alle Linien unter beliebigem Winkel zu gebrauchen ist.

Wenn eine wagrechte Linie mit einer Zahl multiplicirt werden soll, setzen wir einfach diese Zahl vor den Ausdruck für die Linie. So ist $3a$ eine wagrechte Linie, welche dreimal so lang als a ist, und $r|b$ ist eine senkrechte Linie, welche r mal so lang als $|b$ ist.

Wenn eine Linie mit einer Zahl zu multipliciren und gleichzeitig gegen den Uhrzeiger um einen rechten Winkel zu drehen ist, so schreiben wir einfach die Zahl und das $|$ vor den Ausdruck für die Linie.

So ist zu schreiben für \underline{a} multiplicirt mit x und um einen rechten Winkel zurückgedreht $|x\underline{a}$ oder $|xa$, was das gleiche ist wie $x|a$.

Wenn wir einen Leiter haben, der einen Wechselstrom von i Ampere führt, und wir stellen diesen Strom dar durch eine wagrechte Linie i , so ist die EMK, welche aufgewandt werden muss, um diesen Strom durch den Widerstand r des Leiters zu treiben $= ri$ Volt, und seine Phase und Grösse wird vollkommen dargestellt durch die wagrechte Linie ri , welche länger oder kürzer als i ist, je nach dem Werthe von \underline{r} . In Fig. 392 ist r kleiner als 1 angenommen.

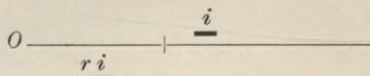


Fig. 392.

Wenn die Reactanz $2\pi nL$ (vgl. S. 22) des Leiters der Kürze halber durch x dargestellt wird, so wissen wir, dass durch einen Strom i von der Frequenz n in dem Leiter eine elektromotorische Gegenkraft von xi Volt hervorgerufen wird, die sich dem Strom entgegenstellt, und die Gegenkraft ist um 90° in der Phase hinter dem Strom. Sie wird demnach nach unserer Uebereinkunft dargestellt durch $|xi$ oder $|xi$. Die vorwärts gerichtete EMK, welche die Gegenkraft zu überwinden hat, müsste also sein $-|xi$.

Addiren wir die EMKkräfte ri und $-|xi$, welche nöthig sind, um Widerstand und Reactanz zu überwinden, so erhalten wir die Linie $ri - |xi = E$, die gesammte EMK. Hier benutzen wir einen grossen Blockbuchstaben E , um den ganzen Vector zu bezeichnen zum Unterschied gegen seine Componenten e und $|e'$.

Die Länge dieser Linie ist $i \cdot \sqrt{r^2 + x^2}$ und dies gibt die Zahl der Volt in E , so dass

$$\frac{E}{\sqrt{r^2 + x^2}} = J.$$

Der Winkel zwischen E und J ist derjenige Winkel, dessen Tangente gleich $-x/r$ ist.

Nun machen wir einen sehr wichtigen Schritt, in dessen Verständniss der Leser völlig eindringen muss. Wir haben den Ausdruck

$$E = (ri - |xi) = (ri - |xi),$$

wobei die Zeichen die auf Seite 508 angegebene Bedeutung haben.

Nehmen wir nun an, dass wir, wie bei der algebraischen Rechnung, i vor die Klammer setzen und definiren, dass $(r - |x) i$ dasselbe bedeutet, wie $(r i - |x i)$. Dann erhalten wir einen Operator $(r - |x)$, welcher die Wirkung hat, i mit $\sqrt{r^2 + x^2}$ zu multipliciren und zugleich um einen Winkel zu drehen, dessen Tangente $= -x/r$ ist.

Durch einen Versuch an einem Diagramm erkennt man leicht, dass bei der Verwendung dieses Operators die gewöhnliche Bezeichnungsweise der algebraischen Multiplication durchaus gültig bleibt. Wenn wir also damit auf den Vector $\underline{a} + \underline{b}$ operiren, so erhalten wir

$$(r - |x)(\underline{a} + \underline{b}) = (r - |x)\underline{a} + (r - |x)\underline{b}.$$

Jede der Componenten des Vectors wird mit $\sqrt{r^2 + x^2}$ multiplicirt und vorwärts um den Winkel ϑ gedreht; es muss also dieselbe Operation.

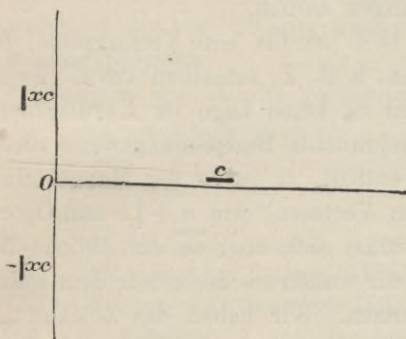


Fig. 393.

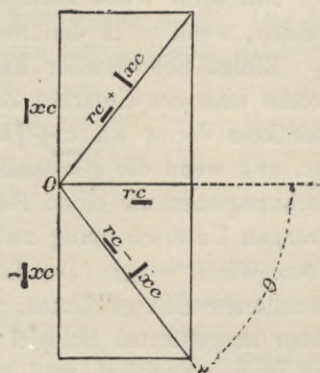


Fig. 394.

mit dem ganzen Vector ausgeführt worden sein. Indem wir nun die Rechnung weiter führen, erhalten wir

$$(r - |x)(\underline{a} + \underline{b}) = r a + x b + |r b - x a),$$

weil $\underline{b} = -b$ (vgl. S. 509). Das Weitere ergibt sich aus S. 515.

Wenn $\underline{i} \cdot (r - |x) = E$, so kann man auch schreiben

$$i = \frac{E}{(r - |x)}.$$

Hier muss mit E die umgekehrte Operation vorgenommen werden, d. h. E ist zu dividiren mit $\sqrt{r^2 + x^2}$ und rückwärts um den Winkel ϑ zu drehen. Nun zeigt ein Diagramm, dass der Operator $(r + |x)$ die Wirkung hat, einen Vector rückwärts um den Winkel ϑ zu drehen, er multiplicirt aber zugleich mit $\sqrt{r^2 + x^2}$. Wenn wir also mit $(r + |x)$ operiren und zweimal mit $\sqrt{r^2 + x^2}$ dividiren, so

erhalten wir dasselbe, als wenn wir die umgekehrte Operation $\frac{|}{(r-|x)}$ vornehmen.

So erhalten wir

$$\frac{E}{(r-|x)} = \frac{E(r+|x)}{r^2+x^2}.$$

Dasselbe Ergebniss kann natürlich erhalten werden durch eine Rechnung, die eine Operation der complexen Algebra nachahmt, indem wir für das Zeichen $|$ das neue Zeichen $\sqrt{-1}$ setzen. Dann ergibt sich

$$\frac{E}{(r-|x)} = \frac{E(r+|x)}{(r-|x)(r+|x)} = \frac{E(r+|x)}{r^2+x^2}.$$

Auf diese Weise können wir stets den Operator im Nenner vermeiden, wenn er in den Rechnungen auftritt.

Einige Schriftsteller halten $(r+|x)$ für eine Vectorgrösse, für welche man ein einfaches Zeichen, z. B. Z , schreiben kann. Es ist aber kein Vector wie $\underline{a} + \mathbf{|}b$, weil es keine Lage im Uhrdiagramm hat, und wenn die gewöhnlich gebrauchte Bezeichnungsweise dieser Rechnungsmethode einen Fehler enthält, so ist es der Mangel einer strengen Unterscheidung zwischen Vektoren, wie $\underline{a} + \mathbf{|}b$ und Operatoren, wie $(r+|x)$. Der Leser muss sich aber an die übliche Bezeichnungsweise gewöhnen, und wir wollen sie deshalb in dem weiter unten ausgeführten Beispiel benutzen. Wir haben das Zeichen $\underline{\quad}$, wie in \underline{a} , eingeführt, weil kein Grund vorliegt, die wagrechte Linie als Zeichen zu verschmähen, wenn man die senkrechte als solches benutzt, und das Zeichen hält dem Leser die Natur der Grösse vor. Aber in der Praxis hat man ein unterscheidendes Zeichen für wagrechte und senkrechte Linien nicht nöthig; es genügt, eine davon zu bezeichnen. In der Praxis setzt man den senkrechten Componenten den Buchstaben j bei, und derselbe Buchstabe j wird gebraucht, um die Operation zu bezeichnen, dass ein Vector gegen den Uhrzeiger um einen rechten Winkel gedreht wird. Dieses Zeichen lässt sich leichter schreiben, und ein wenig Uebung setzt uns in den Stand, es ohne Schwierigkeit zu gebrauchen, nachdem seine Bedeutung richtig verstanden worden ist.

Statt des bisherigen Ausdrucks $\underline{a} + \mathbf{|}b$ schreiben wir jetzt $a + jb$, und der Operator $(r+|x)$ wird geschrieben $r + jx$.

Als Beispiel wollen wir in Zeichen ausdrücken das Uhrdiagramm eines Inductionsmotors, wie es auf Seite 206 gegeben wird. Der

Leser mag diese Berechnung vergleichen mit der allgemeinen Theorie¹⁾ des Inductionsmotors von Steinmetz, wie sie auf Seite 207 seines Buches (s. oben) gegeben wird. Um diese Vergleichung zu erleichtern, wollen wir das Diagramm auf die Seite legen; vgl. Fig. 395 auf Seite 514.

Maassstäbe und Drehungen sind dieselben wie im Kapitel VII. Der magnetisirende und der Kernverlust-Strom sind annähernd proportional zu der elektromotorischen Gegenkraft e , und es ist bequem, sie als Producte von e und gewissen Coëfficienten auszudrücken. Wenn der magnetisirende Strom bei 1 Volt Klemmenspannung an den Ständerleitern = m ist, so bedeutet $e \cdot m$ den magnetisirenden Strom bei der Klemmenspannung e . Der ganze Leerlaufstrom ist dann $e(\underline{h} + \mathbf{m})$ oder $e(h + jm)$. Steinmetz benutzt das Zeichen Y für die Grösse $(h + jm)$, welche er Admittanz nennt. Die Admittanz ist der vom Ständer aufgenommene Leerlaufstrom bei 1 Volt Klemmenspannung.

Nehmen wir an, die gegebenen Grössen seien:

em = magnetisirender Strom	85 A (S. 219)
m =	31 A
eh = Kernverlust-Strom	7,8 A
h =	2,4 A
r_1 = Widerstand des Ständers	$1,7 \cdot 10^{-4}$ Ohm (Seite 214)
r_2 = Widerstand des Läufers	$1,9 \cdot 10^{-4}$ Ohm
L_1 = Streuungs-Selbstinductionscoëfficient des Ständers	$2,82 \cdot 10^{-6}$ (Seite 217)
L_2 = Streuungs-Selbstinductionscoëfficient des Läufers	$2,74 \cdot 10^{-6}$
s = Schlupf	0,0201 (Seite 220)
n = Frequenz	40 Perioden/Secunde
E_1 = äussere Spannung an einem Ständerleiter	2,95 V (Seite 217).

Ausserdem benutzen wir folgende Zeichen:

E = Gegenkraft infolge der Drehung des Feldes.
J_1 = Ständerstrom für 1 cm Umfang (Seite 203).
J_2 = Läuferstrom für 1 cm Umfang.
x_1 = Reactanz in einem Leiter des Ständers = $2\pi n L_1 = 7,1 \cdot 10^{-4}$.
x_2 = Reactanz in einem Leiter des Läufers = $2\pi n L_2 = 6,2 \cdot 10^{-4}$.

Kleine Buchstaben mit und ohne Accent werden benutzt, um die wagrechte und senkrechte Componente einer Grösse zu bezeichnen, z. B.

$$J_1 = i_1 + j i_1'$$

1) Vgl. auch Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Bd. 14, S. 185; Bd. 15, S. 35; Bd. 16, S. 289.

dem man den kleinen Werth $(r_1 - jx_1)(r_2 - jsx_2)(h + jm)$ vernachlässigt. Dann ist der Ausdruck für den Ständerstrom

$$J_1 = \frac{s + (r_2 - jsx_2)(h + jm)}{(r_2 - jsx_2) + s(r_1 - jx_1)} E_1.$$

Um die Operatoren zu beseitigen, trennen wir die wagrechten und senkrechten Componenten von einander:

$$J_1 = \frac{(s + r_2 h + sx_2 m) + j(r_2 m - sx_2 h)}{r_2 + sr_1 - j(sx_2 + sx_1)} E_1.$$

Dann multipliciren wir Zähler und Nenner mit $r_2 + sr_1 + j(sx_2 + sx_1)$, wie auf Seite 512 erklärt, und erhalten

$$\frac{A + jB}{(r_2 + sr_1)^2 + s^2(x_2 + x_1)^2} E_1;$$

worin

$$A = sr_2 + s^2 r_1 + r_2^2 h + sr_2(r_1 h - x_1 m) + s^2 x_2(x_1 h + x_2 h + r_1 m)$$

und

$$B = s^2(x_1 + x_2) + r_2^2 m + sr_2(x_1 h + r_1 m) + s^2 x_2(x_1 m + x_2 m - r_1 h).$$

Der Winkel, um den der Strom J_1 hinter der EMK E_1 zurückbleibt, ergibt sich aus $\varphi = B/A$.

Der leichteste Weg, den Werth des Stromes J_1 zu finden, ist zuerst nach Formel (3) e aus E_1 zu berechnen (Seite 514). Dann setzt man die Werthe von $m_1 h_1 r_1 r_2 x_1$ und x_2 von Seite 513 ein, und wir sehen sofort, dass die Werthe von jsx_2 und jsx_1 vernachlässigt werden können, wodurch sich der Ausdruck vereinfacht zu

$$E_1 = e + e \cdot (0,042) + je(0,083),$$

d. h.

$$E_1 = e \cdot \sqrt{1,042^2 + 0,083^2} = 1,045e.$$

Oder $e = 0,955 E_1$, ein Ergebniss, das sich auch aus der graphischen Construction auf Seite 218 ergeben hat.

Setzen wir diesen Werth von $e = 2,82$ in die Formel (2) auf Seite 514 und vernachlässigen jsx_2 , so erhalten wir $J_1 = 315A$, genau wie bei der graphischen Construction.

Auf Seite 511 haben wir die Wirkung des Operators $(r - |x)$ auf den Vector $(\underline{a} + |b)$ betrachtet, und das Ergebniss wurde durch algebraische Multiplication erhalten. Wir müssen nun annehmen, dass eine Leistung ausgedrückt werden kann als ein ähnliches Product des Stromes $(\underline{i} + |i')$ und der EMK $(\underline{e} + |e')$. Wenn wir nun dieses Product in der Form $ie - i'e' + j(i'e + ie')$ schrieben, so würde dieser Ausdruck nur eine bestimmte Linie in unserem Uhrdiagramm darstellen, welche mit derselben Geschwindigkeit wie die

andern Linien umläuft; wir wissen aber, dass die Leistung eine doppelt so hohe Frequenz wie Strom und Spannung hat. Die Linie für die Leistung P müsste daher in ein anderes Uhrdiagramm eingezeichnet werden, welches mit der doppelten Geschwindigkeit umläuft. Wie Steinmetz gezeigt hat¹⁾, dreht der Operator j^2 einen Vector um 180° in dem einen Diagramm und den Vector von doppelter Frequenz um 360° in seinem eigenen Diagramm. Wenn wir also bei der Bildung des obigen Productes sagen, dass das Zeichen $|| = -$ oder $= +1$ anstatt $= -1$, und dass $|- = |$, während $-| = -|$, so erhalten wir die wahren Componenten von P in dem Diagramm von doppelter Frequenz. Also

$$P = \underline{ie + i'e'} + |(ie' - i'e).$$

Nun ist die wahre Leistung in jedem Augenblick die Projection des Vectors P auf die Wagrechte, und dies ist dem Zahlenwerth nach $= ie + i'e'$, ein Ergebniss, das mit unserer Erfahrung übereinstimmt. Den anderen Ausdruck $(ie' - i'e)$ nennt Steinmetz die „wattlose Leistung“.

1) Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Bd. 16, Seite 290; Juni 1899.

Anhang II.

Deutsche und englische Patente auf dem Wechselstromgebiet.

[Die letzte Spalte enthält die Nummer, unter welcher das Patent in den Fortschritten der Elektrotechnik (Vierteljährliche Berichte über die neueren Erscheinungen auf dem Gesamtgebiet der angewandten Elektrizitätslehre) zu finden ist.]

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
	1576	Gramme	Elektromagnetische Maschine mit vervielfältigter Wirkung.	
	2245	Siemens & Halske	Dynamoelektrische Maschine zur Erzeugung von intermittirenden, gleichgerichteten oder Wechselströmen in einem oder mehreren Stromkreisen.	
935/78 3134/78		Gramme C. H. Siemens	Wechselstrommaschine. Dynamoelektrische Maschine.	
	3383	Siemens & Halske	Maschine zur Erzeugung von intermittirenden gleichgerichteten oder intermittirenden Wechselströmen in einem oder mehreren Stromkreisen durch Bewegung von Drahtspulen in magnetischen Feldern.	
	3847	Société L'Alliance	Neuerungen an magneto-elektrischen Maschinen.	
	7701	S. Schuckert	Dynamoelektrische Maschine.	
	15205	Zipernowski	Neuerung an dynamoelektrischen Maschinen.	
200/81	19227	Cabanellas	Elektrisches automatisches System der Umwandlung, Uebertragung und Anwendung von Energie.	
	25202	Zipernowski	Selbsterregende Wechselstrommaschine.	
5536/81	26375	Gordon	Wechselstrommaschine.	
	34649	Zipernowski	Neuerung in den Mitteln zur Regulierung von elektrischen Wechselströmen.	240/87
	39680	Siemens & Halske	Verfahren, Wechselstrommaschinen elektrisch zu verbinden.	

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
	40414	Zipernowski	Neuerungen an Inductionsapparaten, um elektrische Ströme zu transformiren.	2255/87 3473/87
11391/86 9013/87		Wynne Coerper	Wechselstromkraftübertragung. Wechselstrommaschine mit untertheiltem Eisen.	3443/87 62/88
	43487	S. Schuckert	Neuerungen an Coulombzählern.	
	43538	Helios	Kraftübertragung durch Wechselströme vermittels besonderer Schaltung an Gleichstrommaschinen.	
	46243	Mordey	Aufbau einer Wechselstrommaschine.	65/89
1888				
1383	46616	Borel	Neuerungen an Elektromotoren.	1192/89
	47415	Borel u. Paccaud	Neuerung an elektrischen Apparaten.	
6481	47885	Tesla	Verbindung der Drahtspulen bei Elektrizitätserzeugern mit denen von Motoren.	1179/88 80/89
	6502			
	47012	Tesla	Schaltung eines Transformators und des zugehörigen Elektrizitätserzeugers.	
	49855	Helios	Neuerung in der Construction von Elektrizitätserzeugern.	
	50446	Mordey	Dynamoelektrische Maschine.	63/90
	50908	Zipernowski, Déri & Bláthy	Einrichtungen an synchronen Wechselstrommotoren.	
16852		Goolden, Atkinson & Gold	Wechselstromumformer (Transformator).	155/90
18525		Wilson	Zweiphasenmotor.	
	51596	Zipernowski	Apparat zur Umwandlung elektrischer Wechselströme in continuirliche Gleichströme und umgekehrt.	2899/90 3834/89
	53332	Leblanc	Kraftmaschine mit Wechselstrom.	
	53416	Zipernowski	Vertheilungsanordnung für elektrische Wechselströme.	4449/90
	53892	E. Thomson	Einrichtung zum Anlassen von Wechselstrommaschinen (Repulsionsmotor).	
1889				
5621	54197	E. Thomson	Regelungseinrichtung für Transformatoren.	
6065	59373	E. Thomson	Wechselstrommaschine.	4425/91 2792/90
6527		Tesla	Anlassvorrichtung für einphasige Wechselstrommotoren.	2447/89
10933	51083	Dobrowolsky (A. E. G.)	Anker für Wechselstrommotoren.	
16709	54797	Tesla	Verfahren, Wechselströme in gleichgerichtete umzuwandeln.	
	54967	Krebs	Verfahren zur Regelung der Zugkraft und Geschwindigkeit von Wechselstromkraftmaschinen.	83/91

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1889				
	55978	Haselwander	Fernleitungssystem für Wechselströme.	1621/91
	56741	Nipkow	Rotirendes magnetisches Feld.	1515/91
	56757	A. E. G.	Herstellung der Feldmagnetwicklung von Wechselstromkraftmaschinen.	1554/91
	56770	Schlatter	Elektrische Kraftmaschine.	
	57396	Nipkow	Schaltung für Wechselstromkraftmaschinen behufs Erzeugung der zur Erregung der Feldmagnete benutzten Wechselströme mit verschobenen Phasen.	3048/91
16697	59321	Bláthy (Helios)	Wechselstromkraftmaschine.	4441/91
19420	66802	Tesla	Wechselstromtreibmaschine mit auf eine in sich geschlossene Ankerwicklung wirkenden Haupt- und Hilfsfeldmagneten.	1399/90 70/93
19426	58774	Tesla	Feldmagnetanordnung für Wechselstromkraftmaschinen.	3050/91
19555	56359	Dobrowolsky (A. E. G.)	Stromumwandler für Wechselströme mit verschobenen Phasen.	1634/91
	59188	A. E. G.	Einschaltung von Sammlern in den Ankerstromkreis von Kraftmaschinen behufs Regelung des Stromverbrauches.	4482/91
1890				
	5423	Wenström	Drehstromerzeugung und Vertheilung.	
13260	71137	Dobrowolsky (A. E. G.)	Ausgleichsleitung für Drehstromvertheilungsanlagen.	5618/93 3132/01
14817		Kennedy	Vertheilungssystem mit pulsirenden Strömen	
16889		Kennedy	Wechselstromdoppelmotor.	
20425		Dobrowolsky	Anlassen von Inductionsmotoren mit Hilfe von Widerständen im Ankerstromkreis.	1718/92
	61667	Lahmeyer	Anker für Drehfeldkraftmaschinen.	1696/92
	61951	Rotten (Goerges bezw. Siemens & Halske)	Schaltungsweise für elektrische Drehstromkraftmaschinen (Collectormotor).	1687/92
	62438	Sohlmann	Elektrische Maschine zur Erzeugung von gewöhnlichen oder mehrphasigen Wechselströmen.	
1891				
	63446	Hutin & Leblanc	Mehrphasenwechselstrommaschine mit durch Condensatoren bewirkter Phasenverschiebung.	87/92
	68051	Hutin & Leblanc	Verfahren zur Erzielung gleichbleibender Spannung im secundären Stromkreis von Wechselstromtransformatoren.	1880/93
	68053	Maschinenfabrik Oerlikon	Einrichtung zur Regelung von Drehstromkraftmaschinen durch Schaltung der Ankerwindungen.	

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1891				
	68411	Rotten (Siemens & Halske)	Regelungseinrichtung für Drehstromtreibmaschinen.	3607/93
	70084	Helios	Elektrische Treibmaschine mit geschlossener, an den Polschuhen befestigter Ankerwicklung.	
14189/92	72461	Hutin & Leblanc	Verfahren zur Erzeugung von Wechselströmen.	117/94
	3191	A. E. G.	System der Erzeugung, Regelung und Fernleitung für Wechselströme mit verschiedenen Phasen.	222/95
	7970	Wahlström	Drehfelderzeugung.	
	8151	Siemens & Halske	Drehstromvertheilungssystem, Anschluss der Stromverbraucher zwischen Haupt- und Nulleiter.	1770/92
	9522	Stanley & Kelly	Beseitigung der Selbstinduction von Wechselstrommotoren.	
	10307	Coerper	Wechselstrommaschine mit feststehender Ankerwicklung.	44/92
	10612	Siemens & Halske	Transformator f. Mehrphasenströme.	1783/92
	10613	Siemens & Halske	Dreifädige Glühlampe.	
	11473	Tesla	Einphasenwechselstrommotor.	1688/92
	12046	Sahulka	Wechselstrommotor.	3366/92
	13503	Dobrowolsky	Mehrphasige Wickelungen.	4439/91
	13627	Brain & Arnot	Wechselstrommotor mit Collector.	4437/91
	14388	63658 Gutmann	Elektrische Treibmaschine mit Kurzschlussbürsten.	95/94
	16099	Bradley, Taylor & McDonald	Einphasenwechselstrommotor.	
	18890	67271 Siemens & Halske	Schaltung der Spulen in Drehstromtriebmaschinen.	3367/92 1770/93
	19176	66232 Wahlström	Herstellung magnetischer Drehfelder durch Spulen, deren zwei Stromkreisen angehörende Wickelungen in wechselndem Zahlenverhältniss zu einander stehen.	
	20604	Stanley & Kolly	Kompensirung der Anker selbstinduction von Wechselstrommaschinen.	127/92
1892				
	360	75049 Siemens & Halske	Ausgleicher für Drehstromanordnungen.	310/94
	13543	Siemens & Halske	Erregung von Wechselstromerzeugermaschinen.	3623/94
	13765	76814 Hutin & Leblanc	Verfahren zur Herbeiführung und Aufrechterhaltung des synchronen Ganges von Wechselstrommotoren.	97/94
		73200 Siemens & Halske	Verfahren zur Herabsetzung der Magnetisirungsarbeit von Transformatoren bei schwacher Beanspruchung.	338/94
		74462 Helios	Elektromotor für Wechselströme.	96/94

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1892				
14056		Stanley & Kelly	Motor für Einphasenstrom.	
16919		Swinburne	Wechselstromcollectormotor.	109/94 5485/93
	75741	Maschinenfabrik Oerlikon	Wechselstrommotor.	103/94
20505		Maschinenfabrik Oerlikon	Einphasenwechselstrommotor mit Anlasswicklung.	103/94 5488/93
21811		Brown	Construction mehrphasiger Wechsel- strommotoren.	89/94 5487/93
23290	74684	Maschinenfabrik Oerlikon (Arnold)	Wechselstromtreibmaschine mit Kurzschlussvorrichtung.	85/94 257/94
	82101	Maschinenfabrik Oerlikon	Anordnung der Feldmagnetwickel- ung bei Wechselstromkraftma- schinen (Anlasswicklung).	75/95
23902		Brown	Einphasenwechselstrommotor mit Kurzschlussanker.	89/94
24098		Brown	Anlassvorrichtung für Einphasen- wechselstrommotoren mit Kurz- schlussanker.	90/94
	72125	Kaehlert & Teege	Selbsterregende Drehstromerzeu- germaschine.	46/94
	73050	Siemens & Halske	Verfahren, die Umdrehungszahl von Wechselstromtreibmaschinen mit magnetischem Drehfeld zu ver- ringern (Kaskadenschaltung).	106/94
	74544	Lahmeyer	Schlussanker für Drehstrom- und Wechselstrommotoren.	99/94
1893				
510		Rice	Gleichstromergermaschine für Wechselstromerzeuger.	887/94
1621		Bradley	Vertheilungssystem für Beleuchtung und Kraft.	300/94
5539		Lundell & Johnson	Anlassen synchroner Einphasenmo- toren mit Kurzschlussanker mittels eines verzerrten Magnetfeldes.	
5340		Lundell & Johnson	Repulsionsmotor.	101/94
	75361	A. E. G.	Anlassvorrichtung für Drehstrom- treibmaschinen.	244/94
6050	75365	Helios	Wechselstrommotor mit zwischen Stromwender und Ankerspulen ge- schalteten Selbstinductionsspulen.	87/94 96/94
6241		Duncan	Mehrphasiger Verbrauchsmesser.	2402/94
	78313	El. A. Ges. vorm. Schuckert & Co.	Wechselstromtriebmaschine.	76/95
12458	78833	Hutin & Leblanc	Wechselstrommaschine mit Strom- wender, in deren einzelne Anker- spulen Nutzwiderstände geschaltet sind.	28/95 18/94
	78825	Hutin & Leblanc	Verfahren zur Umwandlung von Wechselströmen beliebiger Span- nung in Gleichströme von eben- falls beliebiger Spannung und umgekehrt.	241/95
			Zusatzpatente 82383 und 84649.	

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1893	79 158	Kolbe	Wechselstromtriebmaschine mit durch magnetische Verzögerung erzeugtem Drehfeld.	31/95
12971	79542	Dahl	Strom- und Phasenumformer.	93/94 180/95
	79608	A. E. G.	Stromumwandler (Kerntransformator) für Wechselströme mit verschobenen Phasen.	250/95
14664		Kingdon	Commutatormotor für Wechselstrom (Funkenverminderung).	165/94
16307		Swinburne	Wechselstrommesser.	2481/94
	80436	Kolbe	Anlassverfahren für Drehfeldtreibmaschinen, deren Betriebsströme durch eine Stromwendevorrichtung von einer Gleichstrommaschine abgenommen werden.	70/95
	81177	Kolbe	Wechselstromtriebmaschine mit besonderem, Verzögerungsspulen tragendem Schlusstecke.	71/95
	82217	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Wechselstromerzeugermaschine, deren Wechselzahl durch die Resonanzverhältnisse des Feldmagnetstromkreises bestimmt wird.	35/95
1894				
2812	87269	Tesla	Vorrichtung zur Erzeugung elektrischer Ströme von gleichbleibender Schwingungszahl.	2639/96 55/94
3986		Ries Electric Co.	Wechselstromcommutatormotor.	46/95
4170		Bradley	Doppelmotor (Anlassen).	54/95
4171		Bradley	Anlassen von Drehfeldmotoren.	54/95
6458		Ferranti	Aufbau und Isolation elektrischer Maschinen.	2/95
7239	82003	Coerper (Helios)	Synchroner Wechselstrommotor mit nacktem, sternförmigem Eisenanker.	58/95 65/95
8638		Blondel u. Sautter, Harlé & Cie.	Wechselstrommaschine.	25/95
	78701	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Schaltapparat zum Vergleich von Spannung und Stromphase parallel zu schaltender Wechselstrommaschinen.	185/95
9605		Mordey	Einphasenwechselstrommotor.	74/95
11059	88806	Rowland	Verfahren, aus einem Mehrphasenstrom einen andern Mehrphasenstrom von beliebiger Perioden- und Phasenzahl zu erzeugen.	234/96 227/95
12875		Kelly	Wechselstromzähler.	2317/95
14246		Scott	Phasen- und Spannungstransformator.	228/95
18273	79588	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Vermöge magnetischer Schirmwirkung belastet anlaufender Einphasenwechselstrommotor.	80/95

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1894				
19364	90556	The Alternate Current Electromotor Syndicate Ltd.	Feldmagnet zur Erzeugung eines gleichmässigen Drehfeldes.	5532/97 225/96
20241		Clark	Repulsionsmotor.	57/95
21045	84855	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Electricité	Aufrechterhaltung des synchronen Ganges von Wechselstrommotoren durch Zuhilfenahme eines asynchronen Motors.	171/96 167/96
21141	82016	Siemens & Halske	Anlassvorrichtung (Gegenschaltung) für Wechselstrominductionsmotoren.	77/95 59/96
24926	99917	Blackburn & Buchanan	Wechselstrommaschine (Inductortyp).	5906/98 26/96
	82525	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Herstellung von untertheilten Kernen für Transformatoren.	263/95
	83855	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Electricité	Verfahren zur Herbeiführung des synchronen Ganges von Wechselstrommotoren.	188/95
	84534	Arnold	Inductionsmotor mit mehrtheiligen Stromwenderbürsten.	50/96
	84714	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Starres Vertheilungssystem für Wechselstrom.	215/96
	87402	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Magnetanordnung für Wechselstromtreibmaschinen.	102/96
1895				
148	90554	Shallenberger (Westingh. El. Co.)	Wechselstromzähler.	7799/97 2564/96
1536		Brown, Boveri & Funk	Anlassen von Wechselstrommaschinen.	205/96
2218	90474	Hummel	Wattstundenzähler für Wechselstrom.	7781/97 2599/96
2914)		Steinmetz	Dreileitersystem (Monocyclisches System).	(235/95
2915)				233/95
2916)				233/95
2917)				233/95
2918		Steinmetz	Mehrphasenwicklung.	106/95
4490		Ferranti	Wechselstrommaschine mit Scheibenanker.	27/96
7504 und 11227	101109	Ferraris & Arno	Speisung von Mehrphasenstromverbrauchern aus einem Einphasenstromnetz.	207/96
	96970	Ferraris & Arno	Verfahren zur Speisung von Mehrphasenstromverbrauchern aus einem Einphasenwechselstromnetz.	2111/98
	84812	Ferraris & Arno	Schaltungsweise zum Anlassen von Motoren eines Wechselstromnetzes mittels einer phasenverschobenen Strom führenden Hilfsleitung.	207/96
7668		Rice E. W.	Vertheilungssystem.	214/95

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1895				
8764		Wright, A.	Wechselstromanlage mit Hoch- und Niederspannungsgeneratoren.	200/96
13164		Maschinenfabrik Oerlikon	Wechselstromerzeuger (Inductor-typ).	34/96
14842		Bradley	Condensator für Mehrphasenstrom.	269/95
15174		Atkinson	Vermeidung von Streuverlusten durch Kupferumkleidungen.	51/96
15470	94992	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Electricité	Erregungsweise von asynchronen Wechselstrommaschinen.	5489/97 41/96
18033		Bradley	Herstellung von Phasenverschiebungen.	5631/97
18870	95933	Langdon - Davies	Feldmagnet mit ungleich grossen Windungen zur Erzeugung eines gleichmässigen Drehfeldes.	64/98 5635/97
19832		New und Mayne	Umformer für Mehrphasenströme.	6560/97
19863		Steinmetz	Zusatztransformator.	163/96 5625/97
19866		Shallenberger	Wechselstromzähler (regelbare Inductionsspule).	2628/96 7834/97
21543	84649	Hutin & Leblanc	Verfahren zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom.	228/96 5642/97
22586	87534	Siemens & Halske	Wicklungsanordnung für den stromempfangenden Theil von asynchronen Einphasenmotoren.	59/96 5505/97
24264	86854	Siemens & Halske	Anlasser für Einphasen- und Mehrphasenmotoren.	157/96 5591/97
	88716	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Verfahren zum Anlassen von Synchronmotoren.	134/96 5589/97
	90559	Kandó	Stromvertheilungssystem für gemeinsame Erzeugung und Vertheilung von Drehstrom und Gleichstrom.	5617/97
	92859	Boucherot	Wechselstrommaschine mit Selbst-erregung.	5474/97
	93660	Blondel	Asynchron anlaufender Wechselstrom - Gleichstrom - Umformer.	5630/97
	92566	Union E. G.	Transformatorkern.	5654/97
	92958	A. E. G.	Mehrphasenmaschine mit ungleicher Ankerspulen- und Polzahl.	5472/97
1896				
543	98897	Hummel	Verfahren zur Herstellung einer Phasenverschiebung von 90° bei auf Ferraris'schem Princip beruhenden Wechselstromzählern.	5558/98 7781/97
868	87042 90425 91849	Raab	Wechselstrommotorzähler.	2602/96 7787/97
2772	91550	Siemens & Halske	Schaltungsweise zur Erleichterung des Parallelschaltens von Wechselstrommaschinen.	5595/97

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1896				
3082	91243	Cushman	Inductionsmotor mit Anlasswiderstand auf dem inducirten Theil.	69/96 5496/97
3094		Berg, E. J.	Regelung der Phasenverschiebung in Wechselstromnetzen mittels eines Synchronmotors.	203/96 5613/97
5491	87745	Siemens & Halske	Verfahren zur Aenderung der Umlaufszahl von asynchronen Wechselstrommotoren.	5505/97
7013		Steinmetz	Motorzähler.	7794/97
7882		Potter	Regelung von Drehstrombahnmotoren.	211/96 6203/97
7883	92672	Steinmetz & Berg (Union E. G.)	Schaltungsweise zum Betrieb von Drehstrommotoren mit Einphasenstrom.	5627/97 6460/97 6186/97
7884				
9531		Steinmetz	Mehrphasenstromerzeuger (Inductortyp).	5486/97
10124		Steinmetz	Nulleiter in Mehrphasensystemen.	216/96 5625/97
12637		W. H. Cooley	Wechselstrommotor für Ein- und Mehrphasenstrom.	5632/97
13264	91220	Union E. G. (Armstrong, Potter & Case)	Inductionsmotor mit vertauschbarem inducirten und inducirenden Theil.	6169/97 6454/97 5509/97
21560				
14462	93364	Scott & Janney	Wechselstromumformer mit ringförmig in sich geschlossenen Leitern.	160/98 214/96 5639/97
15031	93880	Steinmetz (Union E. G.)	Mehrphasenmaschine mit zwei Ankerstromkreisen.	5490/97 54/98 37/96 5625/97
19148	93254	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Manteltransformator für Mehrphasenstrom.	152/98 5650/97
21668	91135	Siemens & Halske	Schwungkraftregler zur selbstthätigen Bedienung der Anlassvorrichtung (Gegenschaltung) nach Pat. 82016.	6748/97 110/98
22333	91571	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Erregungssystem für Wechselstrommaschinen.	5489/97
23512	92488	Hookham	Motorzähler.	7780/97 1709/98
	93069	Hookham	Elektrizitätszähler mit unter dem Einfluss permanenter Magnete in Quecksilber rotirender Ankerscheibe.	7780/97
25729		Batault	Wechselstromzähler.	3581/98
25904		Brit. Thomson Houston Co (A. H. Armstrong)	Phasenregler für Mehrphasenstrommotoren.	2046/98
26303	96096	Aktiebolaget de Lavals Angturbin	Wechselstrommaschine mit ruhenden Wickelungen.	49/98 5478/97

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1896				
26627	105460	Westinghouse El. Co. (Lamme & Mershon)	Verfahren nebst Einrichtung, um das Nachbleiben des Stromes in Wechselstromkreisen zu beein- flussen.	6136/99 2110/98
29499	93166	Heyland	Wechselstrommotor, dessen Feld von grösserer Phasenverschie- bung stärker ist, als das von geringerer Verschiebung.	68/98 5500/97
1897				
7497	94139	General El. Co. (Union E. G.)	Erregungsanordnung für Wechsel- strommaschinen.	5490/97 4031/98
	94674	Union E. G.	Einrichtung zur Herbeiführung des synchronen Laufs parallel zu schaltender Wechselstromma- schinen.	5596/97
	95153	Danielson	Ein- oder mehrphasige Wechsel- strommaschine für gleichbleibende Spannung bei veränderlicher Pha- senverschiebung und Belastung.	51/98
	96119	Nicolaysen	Transformator mit regelbarem Ueber- setzungsverhältniss.	157/98
2558		Siemens & Halske	Drehstromzähler.	3591/98
2559	94564	Siemens & Halske	Verfahren zum Zerlegen eines Wechselstroms in zwei gegen- einander in der Phase um einen bestimmten Winkel verschobene.	5640/97
4212	96636	Raab	Verfahren zur Erzeugung eines gegen die gelieferte Spannung um 90° verschobenen magne- tischen Feldes.	3568/98 7902/99
5569	93663	Société Anonyme pour la Transmis- sion de la Force par l'Électricité	Einrichtung zum Betrieb eines asynchronen Wechselstrommo- tors.	71/98 3938/98 7385/97
2801	109377	A. F. Berry	Transformatoren.	2806/00
9457	111716			5534/00 2131/98 4029/98 2129/99
7772	101599	Langdon-Davies	Wechselstrommotor mit Anlass- spulen.	88/99 3935/98
8041	93912	Siemens & Halske	Verfahren zur Fernübertragung von Bewegungen.	1640/98
8185	89351	E. A. G. vorm. Schuckert	Starres Vertheilungssystem für Wechselstrom. Zusatz zu Pat. S4714.	4007/98
9707 9708 16788	91772	E. A. G. vorm. Schuckert vgl. (Britt. Pat. von Bláthy & Kandó)	Schraubenförmige Anordnung der Anker- und Feldmagnetdrähte von Wechselstrommotoren.	5503/97 3922/98 3923/98 5929/98
11148		Lamme	Inductionsmotor.	3934/98

É. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1897				
	119342	Lamme	Vorrichtung zur Ausgleichung der magnetischen Ströme bei elektrischen Maschinen.	
13970	s. auch vorst.	Rice (Brit. Thomson-Houston Co.)	Ausgleichsverbindungen in Ringankern.	5895/98
13976		Steinmetz	Wechselstromzähler.	3999/99 7613/98
13977		Steinmetz	Drehstromzähler.	1717/98
14253		Raab	Wechselstromzähler (Wirbelstromtyp).	7612/98
14804	97431	Maschinenfabrik Oerlikon	Ankerwicklung für Mehrphasenstromerzeuger.	2025/98
14923		Soames, A.	Einphasenmotor mit Anlaufwicklung von grösserer Polzahl.	3967/98
18095		Steinmetz	Regelung der Geschwindigkeit von Inductionsmotoren (Kaskadenschaltung).	100/98
18122		Gibboney	Wechselstromerzeugermaschine für Telephonzwecke.	7448/98
19445		Grassi & Civita	Transformator zur Erzeugung von Einphasenstrom aus Mehrphasenstrom.	177/99 6026/98
19719		Lamme	Regelung der Geschwindigkeit von Gleichstrommotoren, welche von Mehrphasengleichstromumformern gespeist werden.	195/99 6010/98
	110649	Lamme	Verfahren nebst Einrichtung zur Vertheilung von elektrischer Energie.	2784/00
	97432	Union E. G.	Maschine zur Erzeugung von Wechselströmen beliebiger Frequenz und Phasenzahl.	2006/98
20781		Atkinson	Inductionsgenerator.	174/99
21100		Fairbanks	Wechselstromerzeuger (Inductor-typ).	69/99
	98417	Dahlander & Lindström	Anordnung zur Erzielung von zwei verschiedenen Polzahlen bei asynchronen Wechselstrommotoren.	3928/98
	98506	Dettmar	Verfahren zum Parallel- bzw. Auseinanderschalten von Wechselstrommaschinen.	5973/98
21484	99143	Arno	Verfahren zum Anlassen einphasiger asynchroner Wechselstrommotoren.	5956/98 129/99
22215		Shand (Brit. Thomson-Houston Co.)	Motorzähler für Wechselstrom.	1739/99
22806	103836	Bradley	Kraftübertragungssystem für Mehrphasenstrom.	66/99
22807		Bradley	Regelung von Inductionsmotoren.	66/99

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1897				
22852		Belfield	Herstellung einer Phasenverschiebung von 90°.	1741/99
24382	100291	Tischendörfer	Einrichtung zur Erzeugung eines Mehrphasensystems aus einem Einphasensystem.	182/99 2117/99
	99838	Siemens & Halske	Verfahren zur Herabsetzung der Magnetisirungsarbeit von Transformatoren bei schwacher Beanspruchung. Vgl. Pat. 73200.	6005/98
25744		Brit. Thomson-Houston Co. & Hobart	Anlass- (Kurzschluss-) Wicklung für Inductionsmotoren.	87/99
	101420	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Einrichtung zum Anlassen von synchron laufenden Phasenumformern.	196/99
26729	103004	Churchward	Wechselstrommotor mit zwei Feldwickelungen und einer mit Stromwender und Schleifringen versehenen Ankerwicklung.	2002/99
27494		Steinmetz	Phasenreglung in Wechselstromnetzen.	180/98
27495		Foster (Brit. Th.-H. Co.)	Anlassen von Wechselstromsynchronmotoren.	93/99
28800	97994	Peloux	Motorelektrizitätszähler.	5536/98
29055		Feldmann & Helios Co.	Motorelektrizitätszähler.	3685/99
29585		Rice (Brit. Th.-H. Co.)	Regelung und Compoundirung von Wechselstromerzeugern und Umformern.	2035/99
29586	98302	Moody (Brit. Th.-H. Co.) (Union E. G.)	Kerntransformator für den Uebergang von Zweileiter- auf Dreileiternetze und umgekehrt.	2132/99
30264		Brit. Thomson-Houston Co. & Hobart	Wechselstrommaschine mit Stern-dreieckschaltung.	1985/99
30494		Maschinenfabrik Oerlikon	Kurzschlussanker.	2007/99
30626		Steinmetz & Rice	Inductionsgenerator zur Regelung der Phase in Wechselstromnetzen.	2036/99
30628		E. Thomson & Pratt	Motorelektrizitätszähler.	3690/99
1898				
835	108539	Atkinson	Unter Belastung anlaufender Motor für einphasigen Wechselstrom (Collectormotor).	2610/00 2048/99
2426	98653	Déri (Helios E. A. G.)	Ankerwicklung für durch Veränderung der Polzahl anzulassende Wechselstrommotoren.	3930/98 2006/99
4746	107110	Siemens & Halske	Anordnung zur Messung der Arbeit eines Drehstromsystems.	2196/00 7854/99
4747	98211	Siemens & Halske	Vorrichtung zum Ausgleich der Reibungswiderstände bei Wechselstrommotorzählern.	5537/98 7885/99

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1898				
	102499	Ritter	Verfahren zur Aenderung der Drehrichtung und Polzahl von Wechselstrommotoren.	2050/99
4812	112063	Heyland	Einrichtung zum Verändern der Polzahl von Wechselstrommotoren.	5313/00 2049/99
5049		W. Stanley	Inductionsmotor.*	3939/98 2004/99
5064	127168	Belfield	Wechselstrominductionsmotor mit sich gleichbleibendem Drehfeld.	2010/99
6058	98053	Siemens & Halske	Einrichtungen zur Fernübertragung von Bewegungen. Zus. zu Pat. 93912.	5473/98 7535/98 4125/99
10883	99862			
10269		Steinmetz	Wechselstrommotor für Einphasenstrom.	5926/98 3940/98 4000/99
10270				
10652		Bradley	Dielektricum für Condensatoren.	3680/98 1818/99
10690		Stone & Doane (Brit. Th.-H. Co.)	Anlassvorrichtung für Einphasenmotoren.	5967/98
10705	109725	A. E. Skanes	Wechselstrommotor, insbesondere für elektrische Zähler.	2612/00 4040/99
13273		Steinmetz	Monocyclisches System.	179/99 6181/99 176/99
13274				
13399	102498	Déri (Helios)	Verfahren zur combinirten Erregung von Magnetfeldern durch Gleich- und Wechselstrom und nach demselben eingerichtete Maschinen.	1984/99 48/99 6022/99
13895	99838	Siemens & Halske	Verfahren zur Herabsetzung der Magnetisirungsarbeit von Transformatoren bei schwacher Beanspruchung. Zus. zu Pat. 73200.	6005/98
14294	137558	Lamme	Regelung der Spannung in Gleichstromnetzen, welche von Wechselstromumwandl. gespeist werden.	6178/99
14614		Laarmann & Brokkelt	Motorelektricitätszähler.	7900/99
14732	104473	Déri (Helios E. A. G.)	Verfahren zur Herstellung und Vertheilung combinirter Wechsel- und Gleichströme.	4114/99 184/99
16714		Steinmetz	Erzeugung von Mehrphasenströmen.	4126/99 6182/99
18366	107676	Rowe	Regelungstransformator.	307/00 6348/99
18583	129895	Lamme	Verfahren zur Regelung von Inductionsmotoren.	6079/99
19248	106420	Bradley	Einphasenwechselstrommotor.	4004/99 6075/99
19959	106679	Scott	Vertheilungssystem f. Mehrphasenstrom.	275/00
21045		Berg (Brit. Th.-H. Co.)	Geschwindigkeitsfernzeiger.	2106/00 3957/99

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1898				
21046		Davis (Brit. Th.-H. Co.)	Motorelektrizitätszähler.	2228/00
21165	103627	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Erregung von synchronen und asynchronen als Stromerzeuger oder Stromverbraucher laufenden Wechselstrommaschinen.	3981/99 158/00
24371		Steinmetz	Regelung der Anlasswiderstände von Inductionsmotoren.	262/00
24418	110502	The Langdon-Davies Electric Motor Co. l.	Einphasiger Wechselstrommotor.	2614/00
24533	106420	Bradley	Einrichtung zur Speisung von Drehstrommotoren aus Einphasenstromnetzen.	1066/00 254/00
24949	105271	Siemens & Halske	Regelungstransformator für Mehrphasenstromanlagen.	6204/99
27370		Sautter, Harle & Cie.	Compoundirung von Wechselstromgeneratoren.	2678/00
	104072	Sahulka	Vorrichtung zur Umwandlung von mehrphasigen Wechselströmen in Gleichstrom.	4146/99
	105865	Lamme	Kurzschlussanker mit Stabwicklung für Wechselstrommotoren.	6089/99
	106680	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Wechselstromumformer.	289/00
1899				
287	103967	Siemens & Halske	Kühleinrichtung für Wechselstrommotoren.	4033/99 2613/00
925		Déri	Einphasengleichstromumformer.	4141/99 2796/00
1141	107844	Wagner	Verfahren zur Erzeugung von Phasenverschiebung zwischen zwei oder mehreren Theilströmen eines Wechselstromsystems.	263/00 2789/00
	108776	vorm. Kummer	Transformator für die Speisung einer Dreileiteranlage aus einem Zweileiternetz.	2782/00
5545		Rice & Steinmetz (Brit. Th.-H. Co.)	Einphasenwechselstrommotor (Anlassen).	3998/99
5546				5411/00
5547				4149/99
5548				5540/00
5549				
5550		Steinmetz	Anlassen von Einphasenmotoren.	5414/00 3997/99
7427	104301	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Rotirender Umformer.	5520/00 4144/99
8482	107160	Déri (Helios)	Ankerwicklung für Wechselstrommotoren. Zus. zu 98653.	5402/00 121/00

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1899				
8693	106680	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Wechselstromumformer.	289/00
11272		Lamme	Dämpferwicklung auf den Polschuhen von Synchronmotoren.	5517/00
11843	105986	Union E. G.	Anlassvorrichtung für Inductionsmotoren.	6150/99 7932/00
12565	122369	Karmin (Siemens & Halske)	Ankerwicklung mit Schaltung zur Abnahme von zweierlei Dreiphasenstromspannungen.	4055/01 7816/00
12566	123483	Karmin (Siemens & Halske)	Verbindung einer oder mehrerer Gleichstromwickelungen mit getrennt auf derselben Maschine in Sternschaltung angeordneten aufgeschnittenen Gleichstromwickelungen.	5935/01 7793/00
13733	110260	Société Anonyme pour la Transmission de la Force par l'Électricité	Erregung von synchronen und asynchronen als Stromerzeuger oder Stromverbraucher laufenden Wechselstrommaschinen. Zus. zu Pat. 91571.	82/00 7821/00
15066	119480	Lamme	Verfahren zur Regelung der Spannung im Secundärstromkreise von Transformatoren.	2218/01
15138	114239	Lamme	Stabwicklung für den inducirten Theil von Mehrphasenmaschinen.	7896/00 7819/00
16132	111175	Steinmetz (Brit. Th.-H. Co.) (Union E. G.)	Anordnung zur Herstellung einer Phasenverschiebung von 90° zwischen zwei magnetisirenden Feldern.	7444/00
16879	108176	Siemens & Halske	Verfahren zum Zerlegen eines Wechselstroms in zwei gegeneinander in der Phase um einen bestimmten Winkel verschobene. Zus. zu Pat. 94564.	2191/00 8078/00
16889	126082	Berry	Transformator mit Kabelwicklung.	215/02
20002		Heyland	Wicklung für Einphasenmotoren.	66/01
22534		Steinmetz (Brit. Th.-H. Co.)	Einphasenwechselstromgenerator.	174/01
22809		Bláthy	Magnethern.	72/01
23290	117200	Berg (Brit. Th.-H. Co.) (Union E. G.)	Verfahren zur Regelung der Gleichstromspannung bei rotirenden Wechselstromgleichstromumformern.	192/01 198/01
23291		Steinmetz	Regelung des Spannungsabfalls in Wechselstromnetzen.	175/01
1900				
814	113227	Lamme	Verfahren, Zweiphaseninductionsmotoren anzulassen oder bei geringer Belastung zu betreiben.	7978/00 6064/01
1825	119342 125922	Lamme	Vorrichtung zur Ausgleichung der magnetischen Ströme bei elektrischen Maschinen.	2132/01 2066/01

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1900				
4555		Bedell	System zur gleichzeitigen Vertheilung von Wechsel- und Gleichströmen.	2189/01
4785	109132	Déri (Helios)	Wechselstrommotor.	4042/01 2611/00
5050	113988	Jonas (Helios)	Verfahren zur gleichzeitigen Speisung einer und derselben Wickelung elektrischer Maschinen durch zwei von einander unabhängige Ströme.	7912/00 4199/01
5806		Steinmetz	Regelung von Doppelstrommaschinen.	
6947	122301	Lamme	Dämpferwicklung auf den Polschuhen.	4050/01 4001/01
6948	115452	Lamme	Mehrphaseninductionsmotor mit mehrfachen Primärwickelungen für verschiedene Pol- und Umdrehungszahl.	7854/00 4044/01
7084	126274	Pieper	Wechselstromcollectormotor.	92/02 4091/01
8152	113741	Aktien-Ges. El. Werke vorm. Kummer & Co.	Drehstromtransformator.	8100/00
8475	118285	Steinmetz (Union E. G.)	Anordnung, um den Umlaufsinn eines magnetischen Drehfeldes von der Periodenzahl der äußeren elektromotorischen Kraft abhängig zu machen.	2084/01 4166/01
8476		Brit. Th.-H. Co. & Hobart	Benutzung des Skineffekts zum Anlassen von Inductionsmotoren.	4101/01
9533	114306	Boucherot & Cie.	Verfahren zur Erregung von ein- oder mehrphasigen, synchronen oder asynchronen Wechselstrommaschinen und Motoren.	7815/00 4095/01
9534	108543	Boucherot & Cie.	Anlassverfahren für Mehrphasenstrommotoren.	2692/00 4106/01
9975	111810	Grisson	Gleichrichter.	4198/01 5506/01
11797		E. Thomson	Regelungstransformator.	
13720		Berg (Brit. Th.-H. Co.)	Parallelschalten (Synchronisirung) von Wechselstrommaschinen.	6042/01
13970		Steinmetz	Anlassen von Inductionsmotoren.	5965/01
13971	118720	E. Thomson (Union E. G.)	Regelungseinrichtung für Wechselstromgleichrichter.	235/02 2241/01
13967		Rice (Brit. Th.-H. Co.)	Speisung von Mehrphasengleichstromumformern mit Strömen anderer Phasenzahl und Anschluss des Mittelleiters des Gleichstromdreileitersystems.	224/02
15380		Steinmetz		6138/01
16172		Lunt (Brit. Th.-H. Co.)		6143/01

E. P.	D R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1900				
15379	113266	Steinmetz (Union E. G.)	Einrichtung zur selbstthätigen Regelung von Wechselstromerzeugemaschinen.	6010/01
15918		Lunt (Brit. Th.-H. Co.)	Phasenzahltransformator.	6144/01
16702		Rice (Brit. Th.-H. Co.)	Dämpferwickelung zur Vermeidung des Funkens und Pendelns.	69/02
16706	119190	Buck (Brit. Th.-H. Co.)	Verfahren zur Beseitigung des Pendelns bei synchronen Triebmaschinen und rotirenden Umformern.	145/02 2155/01
18284	134137	Berry	Manteltransformator.	212/02
18613	119114	Lunt (Brit. Th.-H. Co.)	Regelungseinrichtung für Wechselstromgleichrichter mit feststehenden Stromabnehmern.	2242/01 234/02
19494		Reist (Brit. Th.-H. Co.)	Wechselstromsynchronmaschine.	7908/00
20383	118581	Lamme	Einrichtung zum Regeln der Bewegungsgeschwindigkeit von Wechselstrominductionsmotoren.	{ 126/02 2131/01 231/02
20384	131752	Lamme	Verfahren zur selbstthätigen Regelung der Netzspannung eines an einen Wechselstromgleichstromformer angeschlossenen Gleichstromkreises.	4579/02
21702		Emmet (Brit. Th.-H. Co.)	Regelung parallelgeschalteter Wechselstromgeneratoren.	144/02
21815	117986	A. E. G.	Ausbildung von Blechankern und Inductoren elektrischer Maschinen als Spanwerk.	{ 2100/01 3951/01 4422/02
21294		Steinmetz	Anschluss des Mittelleiters von Gleichstromsystemen mit Drehumformern.	8053/00
21450		Woodbridge (Brit. Th.-H. Co.)	Phasentransformator.	8094/00
22824	127792	Arnold, Bragstad & la Cour	Verfahren zur Erzeugung und Umformung von unabhängigen, übereinander gelagerten Wechselströmen verschiedener Periodenzahlen.	202/02
23748	131550	Arnold, Bragstad & la Cour	Inductionsfreie Wickelungen für gleichphasige Ströme eines Mehrphasensystems.	{ 192/02 4570/02 4571/02
23749	128406 131677	Arnold, Bragstad & la Cour	Polycyclisches System.	2248/02 4569/02
23389		Lunt (Brit. Th.-H. Co.)	Regelung von Umformern.	7959/00
21448 16700		Steinmetz	Wechselstrom-Gleichstrom-Umformung und Vertheilung.	197/02 8054/00 5494/00
1901				
7553		S. P. Thompson	Anlassen von Wechselstrommotoren mit Hilfswickelung.	4437/02

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1901	113552	Boucherot	Dynamomaschine oder Motor für Gleichstrom und ein- oder mehrphasigen Wechselstrom.	7789/00
	113992	Zell	Umwandlung von ein- oder mehrphasigem Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt mit Hilfe von Selbstinductionsspulen mit polarisirtem Eisenkern.	179/01
	114068	Pürthner		
	116031	E. A. G. vorm. Schuckert	Regelungsvorrichtung für rotirende Umformer.	193/01
	116988	Feldmann, C. P.	Verfahren zur Regelung von Mehrphasensystemen.	170/01
	117606	Union E. G.	Anordnung zur Vermeidung von Ausgleichströmen zwischen parallel laufenden Wechselstrommaschinen.	114/01
	124737	Bláthy	Einrichtung zur Vermeidung des Pendelns parallel geschalteter Wechselstromerzeuger.	6043/01
	127052	Ges. für elektr. Industrie Karlsruhe	Verfahren zur selbstthätigen Ausgleichung der Belastung parallel geschalteter Wechselstrommaschinen.	147/02
	127271	Heyland	Vorrichtung zur Vermeidung der Funkenbildung am Stromwender elektrischer Maschinen.	65/02
1788	128266 } 130005 } 130573 }	de Lignières	Verfahren, um ein- oder mehrphasige Wechselstrominductionsmotoren unter Belastung anzulassen und ihre Geschwindigkeit während des Ganges zu regeln.	{2171/02 4516/02 2177/02
	122966	Uhde	Einrichtung zum Anlassen und zum Betrieb einphasiger Wechselstrommotoren (Collectormasch.).	4112/01
	129788	Girault	Verfahren zum Anlassen und zum Regeln der Geschwindigkeit ein- oder mehrphasiger Wechselstromdoppelmotoren.	4484/02
	124903	Joung, Ch. J.	Verfahren und Einrichtung zur selbstthätigen Regelung der EMK in einem Dreileitersystem.	6116/01
	131908 } 136844 }	Siemens & Halske	Ausgleicher für verkettete Mehrphasensysteme mit Nulleiter.	4568/02
	129552	Union E. G.		
	130227	Danielson	Kaskadenschaltung für gekuppelte asynchrone Wechselstrommotoren oder Stromerzeuger verschiedener Polzahl oder gleicher Polzahl und ungleicher Geschwindigkeit.	2084/02
	132187	Pieper	Wechselstrommotor mit Reihenwicklung. Zus. zu Pat. 126274.	4486/02

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1901				
	133 025	A. E. G.	Versteifung ruhender Anker und Inductoren elektrischer Maschinen.	7120/02
	134 352	Siemens & Halske	Verfahren zur Regelung von Wechselstromerzeugern mit Reihenschlusserregermaschine.	7138/02
	135 896	Vogel	Asynchronmotor für einphasigen Wechselstrom (Collectormotor).	88/03
	138 065	Union E. G.	Asynchronmotor mit aufgehobener Phasenverzögerung.	85/03
	136 013	Siemens & Halske	Verfahren zum stossfreien Anlassen vollbelasteter asynchroner Drehstrommotoren.	198/03
	136 014	Siemens & Halske	Eisenkörper für Drehstromtransformatoren.	7299/02
	137 859) 137 860)	Helios	Verfahren zum Anlassen von asynchronen Wechselstrommotoren.	177/03
	138 035	E. A. G. vorm. Schuckert	Bremsschaltung für Wechselstrommotoren.	158/03
	138 901	Meyer, H. S.	Anlassvorrichtung auf dem inducirten Theil von Wechselstrominductionsmotoren.	
	140 517	Hobart, H. M.	Elektrische Maschine mit auf dem Anker angeordneten zusätzlichen Kurzschlussstromkreisen.	
	138 854	Maschinenfabrik Oerlikon	Wicklungsanordnung für Inductionsmotoren mit Umschaltung einzelner Spulengruppen für verschiedene Polzahlen.	
	112 094	E. A. G. vorm. Schuckert & Co.	Wicklungsanordnung an asynchronen Wechselstrommotoren zur Erzielung verschiedener Geschwindigkeiten durch Aenderung der Polzahl.	5405/00
	138 253	Brown, Boveri & Co.	Rotirender Feldmagnet für Wechselstromerzeuger.	
	140 925	Schüler, L.	Wechselstrommotor (Repulsionsmotor).	
	129 459) 134 137) 138 190) 140 502)	Berry	Transformatoren.	2269/02
	138 883) 127 585)	Siemens & Halske	Transformator für Ein- und Mehrphasenstrom.	210/02
	140 061	Union E. G.	Transformator f. Zweiphasenströme.	
	143 271	Siemens & Halske	Aufbau von Transformatoren.	
	139 193	E. A. G. vorm. Lahmeyer & Co.	Verfahren zur Umwandlung eines ein- oder mehrphasigen Wechselstroms in einen solchen von doppelter Periodenzahl.	
1902				
25 330	139 126	Peck	Anordnung der Mittelleiter von Gleichstromnetzen.	

E. P.	D. R. P.	Anmelder	Gegenstand des Patentes	F. d. E.
1902				
	140363	E. A. G. vorm. Lahmeyer	Schaltungsweise zum Anschluss eines Gleichstromdreileitersystems an einen von einem Transformator gespeisten sechsphasigen Umformer.	
	141088	Siemens & Halske	Von einem Drehstrom-Gleichstrom-Umformer gespeistes Dreileiternetz.	
	139284	E. A. G. vorm. Schuckert	Verfahren zum Anlassen von Wechselstrom-Gleichstrom-Umformern oder Synchronmotoren.	
	140923 141514	Siemens & Halske	Einrichtung zur Belastung von Drehstrommotoren durch gleichzeitiges Einführen von Gleichstrom.	
	141906	Eichberg	Einrichtung zur Erzeugung von pulsirendem Gleichstrom.	
	141493	A. E. G.	Anordnung zur Verhütung von Pulsationen und plötzlichen Änderungen der Wechselzahl bei Wechselstromerzeugungsanlagen.	
	143069	Heyland	Asynchroner Wechselstrommotor bzw. Erzeuger mit in sich geschlossener Läuferwicklung (Kurzschlusswicklung) u. Stromwendevorrichtung.	
	143120	Osnos	Käfiganker für asynchrone Wechselstrommotoren und Generatoren.	
	144577	Siemens & Halske	Erzeugermaschine für ein- oder mehrphasige Wechselströme geringer Periodenzahl.	
	144054	Maschinenfabrik Oerlikon	Wechselstromerzeuger mit dreitheiligem durch zwei Magnetspulen erregtem umlaufenden inducirenden System.	
	144576	Blondel & Soc. Sautter, Harlé & Cie.	Verfahren zur Compoundirung asynchroner Wechselstromerzeugermaschinen.	



Namen- und Sachregister.

Das Namenregister zum Anhang II findet sich unter Patente.

A.

Admittanzoperator 259, 513.
Aenderung der Geschwindigkeit 305.
— des Feldes 173.
Allgem. Electricitäts-Gesellschaft, Centrale Rheinfelden 423.
— Drehstromerzeuger 110.
— Inductor 132.
— Kraftübertragung 494.
— selbstthätiger Umkehranlasser 194.
— Spannermaschine 433.
— Transformator 355.
— Wasserwiderstand 188.
Alioth & Co. 500.
— Schleifringbefestigung 152.
— Umformer 380, 425.
Amerikanische Maschinen 139.
Amortisseur s. Dämpferwicklung.
Ampère 459.
Amplitude 9.
Analytische Theorie 331.
An der Suhl, Centrale 423.
Angehen der mehrphasigen Motoren 296.
Ankergegenwirkung 33.
— bei Mehrphasen-Stromerzeugern 48.
Ankerrückwirkung 387.
Anlassmethode der Westinghouse-Gesellschaft 284.
Anlassvorrichtung der British Thomson-Houston Co. 340.
— für Einphasenmotoren 342.
Anlasswiderstand 188, 189.
Anlauf-Drehmoment für Lokomotiven 440.
Anlaufvorrichtung für Einphasenmotoren von Kolben 339.
Anzugkraft 223.

Arago, Drehversuche 456.
Arbeitsloser Strom 29.
Arbeitsmesser 393.
Arbeitsströme in Wechselstromankern 375.
Arno, Anlassvorrichtung für Einphasenmotoren 342.
Asynchrone Motoren 155.
— Stromerzeuger 137.
Atkinson 369.
—'s Motoren 350.
— Transformator als Stromerzeuger 369.
Ausführung, mechanische mehrph. Mot. 296.
Ausstellungsmaschine (Paris 1900) von Schuckert & Co. 117.
Ayrton 374.

B.

Babbage, Versuche 458.
Bay Counties Power & Co., Centrale 421.
Baily, Motor 472, 475.
Behn-Eschenburg 305.
Beispiele der graphischen Behandlung 212.
— neuerer mehrphasiger Motoren 261.
Bell, Dr. Louis 301.
Bellegarde, Centrale 103.
Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vorm. L. Schwartzkopff 136.
Berlin-Zossen, Schnellbahnversuche 455.
Betrieb, mehrphasiger 398.
— über Gleichlauf 228.
Blakesley 13.
Bockenheim, Centrale 418.
Booster s. Zusatzmaschine.
Borels Motor 479.
Boys 463.

Bradley 364, 481.
 Breitencoefficient 79, 81, 233.
 Bremgarten, Centrale 103.
 British Thomson Houston Company,
 Anlassvorrichtung 340.
 Brotherhood'sche Maschinen 69.
 Brown, Magnet mit übergreifenden Polen
 500.
 Brown, Boveri & Co., Inductionsmotoren
 269.
 — Mehrphasige Stromerzeuger 103.
 — Methode zum Anlassen einphasiger
 Motoren 337.
 — Motoren 268.
 Budapest, Centrale 419.
 Burgdorf-Thun, elektrische Vollbahn 453.

C.

Capacität, Wirkung der 25.
 Cardew, Spannungsmesser 13.
 Carhart, Flüssigkeitsstromwender 468.
 Cataract Co. 419.
 Centrale Rheinfelden, Allgemeine Elek-
 tricitätsgesellschaft 423.
 — An der Sihl 423.
 — Bay Counties Power & Co. 421.
 — Bellegarde 103.
 — Bockenheim 418.
 — Bremgarten 103.
 — Budapest 419.
 — Chemnitz 417.
 — Colgate 421.
 — Essen 431.
 — Genf 425.
 — Hochfelden 103.
 — Luzern 423.
 — Lyon 424.
 — Madrid 431.
 — Montreal 428.
 — Oberspree 455.
 — Ogden Utah 428.
 — Paderno 423.
 — Rheinfelden 422.
 — Richelieu 428.
 — Saint Ouen 425.
 — Sofia 103, 429.
 — Strassburg 418.
 Centrifugalhegler 189.

Charakteristik des Mehrphasenmotors
 229.
 Chèvres, Kraftwerk 103, 425.
 Coefficient der Läuferstreuung 234.
 — der Ausnutzung 240.
 Colgate, Centrale 421.
 Condensator, elektrolytischer 337.
 — mehrphasiger 75.

D.

Dämpferwicklung (Amortisseur) 425, 436.
 Dämpfung gegen Phasenschwingungen
 427.
 Dämpfungs-Stromkreise 425.
 Danielson 138.
 De Bast, Analytische Theorie 331.
 Deprez, Abhandlung über magnetisches
 Drehfeld 67.
 — Kraftübertragung 415.
 — Motor 475.
 — Untersuchungen 475.
 Diagramm, Heyland's 240, 295.
 — Uhr- 10.
 Dolivo-Dobrowolsky, M. v., Dreiphasen-
 motor 503.
 — Schaltungen 55.
 — Schlussanker 177.
 — Untersuchungen 491.
 Drehfeld 65, 67.
 Drehfelder, magnetische Eigenschaften
 der 456.
 Drehstrom, Benutzung in einphasigen
 Stromkreisen 367.
 — verketteter 385.
 Drehstromerzeuger, Allgemeine Elektri-
 citäts-Gesellschaft 110.
 Drehstromfernleitung in Kanada 421.
 Drehstrommaschine von Kolben & Co.
 128.
 — von Stanley 421.
 Drehstrommaschinen, Siemens & Halske
 113.
 Drehstrommotor der Elektrizitäts-Aktien-
 Gesellschaft vorm. Schuckert & Co. 274.
 — von Siemens & Halske 440.
 Drehstrom-Transformator, Lahmeyer &
 Co. 356.
 Drehungsmagnetismus 457.

Drehungsmagnetismus, Theorie des 458.
 Drehungsmoment von Wechselstromma-
 schinen 31.
 Drehversuche von Arago 456.
 Dreiphasenanker, Parshall 120.
 Dreiphasenstromwender 469.
 Drosselpulen 28.
 — mehrphasige 372.
 Duncan, Mehrphasenmesser 396.
 — Motoren 251, 350.
 — Verbrauchsmesser 396.

E.

Ebert 502.
 Eborall 307.
 Einphasenmotoren 307, 308.
 — Anlassvorrichtung 342.
 — der General Electric Company 339.
 — von Kolben 339.
 — der Langdon-Davies Motor Company
 343.
 — der Oerlikon-Gesellschaft 339.
 Einphasige Inductionsmotoren 309.
 Einschaltung von Widerstand 187.
 Engelberger Linie 438.
 Escher, Wyss & Co., Turbinen 424.
 Evians-les-Bains 437.

F.

Faraday, Entdeckung der Induction 1.
 —'s Scheibenmaschinen 459.
 Farcot 425.
 Ferranti'sche Kabel 28.
 Ferranti & Co., selbstanlaufende Motoren
 309.
 Ferranti-Wright's Motor 7.
 Ferraris 252, 476.
 — Theorie der Einphasenmotoren 311.
 Ferraris & Arno 362.
 Fesquet 500.
 Field 252, 329.
 — Diagramm 322.
 Flachringanker, Schuckert 493.
 Fleming 12, 346.
 Flüssigkeitsstromwender, Carhart 468.
 Formel für den Hysteresisverlust von
 Steinmetz 172.
 Fort Wayne Co. 309.

Foucault 462.
 Fouriers 330.
 Frequenz 7.
 Functionen, Producte periodischer 17.

G.

Ganz & Co., Anlasswiderstand 189.
 Gaulard, Transformator 477.
 Gegenschaltung, Princip der 190.
 Gegenwirkung des Ankers 33.
 General Electric Company 145.
 — Anlaufvorrichtung von einphasigen
 Motoren 339.
 — Centrale Montreal 428.
 — Inductionsmotoren 283. 301.
 — Umformer 388.
 Generatoren der Oerlikon-Gesellschaft
 438.
 Genf, Centrale 425.
 Gewichte von Inductionsmotoren 301.
 Gibbs 500.
 Gleichung, Maxwell'sche 25.
 Glühlampen mit drei Kohlenfäden 60.
 Gordon, Zweiphasenmaschinen 40.
 Görges, Tandemschaltung 446.
 Gonergratbahn 450.
 Gramme, Wechselstromerzeuger 39.
 Guthrie und Boys 463.
 Gyroskop 463.

H.

Haselwander's Motoren 490, 493.
 Hawkins 252.
 Hebezeuge der Union Electricitäts-Ge-
 sellschaft 283.
 Heldt, Verhältniss der Spannungszahlen
 bei Umformern 381.
 Helios-Gesellschaft, Aeltere Motoren 479.
 Helios-Motor 272.
 Hemitropische Wickelungen 84.
 Herschel 458.
 Hertz 461.
 Hesse Söhne 497.
 Heyland 237.
 — Diagramme 240, 295, 311, 319, 320,
 321.
 — Einphasenmotor 341.
 Hilfswickelung 148.

Hochfelden, Centrale 103.
 Hochspannungsanlagen 421.
 Hochspannungsmaschinen von Schuckert 454.
 Hochspannungsmotoren 275.
 Hochspannungssysteme der Leitungen 61.
 Hospitalier, Mehrphasenmaschinen 200.
 Hutin & Leblanc, Dämpfungs-Stromkreise 425.
 — Permutatoren 392.
 — Stromerzeuger 155.

I (J).

Jablochkoff'sche Kerzen 39, 40.
 Impedanz 24.
 Impedanzoperator 259, 514.
 Impedanzspulen 28.
 Inductanz 20.
 Induction, Entdeckung der 1.
 Inductionsmaschinen von Thury 425.
 — von Stanley-Kelly 249.
 Inductionsmotoren der General-Electric-Company 283.
 — der Westinghouse-Gesellschaft 284.
 — von Brown, Boveri & Co. 269.
 Inductormaschinen 122.
 — der Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vorm. L. Schwartzkopff 136.
 — der Oerlikon-Gesellschaft 123.
 Inductor mit versetzten Polen 124.
 — der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft 132.
 Jochmann 461.
 Johnson 500.
 Isolation bei Hochspannungsmaschinen 291.

K.

Kabel, Ferranti'sche 28.
 Kanada, Drehstromfernleitung 421.
 Kapp 119.
 — G., Mehrphasen-Maschinen 200.
 —'scher Coëfficient 79.
 — Umsetzungsverhältniss 383.
 — Wechselströme 13.
 Kernscheiben, Aufbau der 172.
 Kerntransformator, Schuckert & Co. 355.
 Kernverlust-Strom 202, 219, 245.

Kittler und Lindley 504.
 Klemmenspannung an einer Ständerphase 243.
 Kolben & Co., Anlaufvorrichtung von Einphasenmotoren 339.
 — Drehstrommaschine 128.
 — Motoren 270.
 — Ständer und Läuferbleche 158.
 Korda, Désiré 364.
 Kraftliniendichte 172.
 Kraftstation s. Centrale.
 Kraftübertragung, A. E. G. 494.
 — Deprez 415.
 — Lauffen 496.
 — Oerlikon-G. 494.
 Kraftwerk von Chèvres 103.
 Kummer & Co., Schmalspurbahnen 437.
 — Vollbahn Oberammergau 437.
 Kupfergewicht der Leitungen 60.
 Kurzschlussanrichtung von Schuckert & Co. 195.
 — von Siemens & Halske 191.

L.

Lachinen-Fälle, Centrale 428.
 Lager der Mehrphasenmotoren 200.
 Lahmeyer & Co., Drehstrom-Transformator 356.
 — Motor 431.
 Lampen in dreiphasigen Stromkreisen 59.
 — in zweiphasigen Stromkreisen 58.
 Langdon-Davies Motor Company, Einphasenmotor 343.
 Läufer 156.
 — Bauart der 175.
 — eines Drehstrommotors von Siemens & Halske 197.
 — der Oerlikon-G. 198.
 — Wickelung der 180.
 Läufer-Streuzug 230.
 Läuferstromes, Wirkung des 167.
 — bei Vollast 241.
 Lauffener Kraftübertragung 496, 509.
 Leitungen, Hochspannungssysteme 61.
 — Kupfergewicht der 60.
 — mit niederer Spannung 63.
 Leistung, mittlere 28.
 — wattlose 516.

Leistungsfactor 30.
 — der Admittanz 259.
 — der Impedanz 259.
 Literatur über die Theorie der Inductionsmotoren 251.
 — über Mehrphasenmaschinen 200.
 Lontin, Wechselstromerzeuger 39.
 Lüftung 175.
 Luganobahn 449.
 Luzern, Centrale 423.
 Lyon, Centrale 424.

M.

Madrid, Centrale 431.
 Maffiotti und Pescetto 334.
 Magnetinductor 2.
 Magnetisirender Strom 202, 241, 244.
 Mannheim, Umformer 385.
 Maschinenfabriken Augsburg und Nürnberg, Pariser Ausstellung 431.
 Matteucci, Versuche 461.
 Maxwell'sche Gleichung 25.
 Mehrphasenmaschinen, Literatur über 200.
 Mehrphasenstromerzeuger 77.
 — ausgeführte Beispiele 101.
 — der Oerlikon-G. 103.
 — von Brown, Boveri & Co. 103.
 Mehrphasenströme für den Zuförderdienst 447.
 Mehrphasige Condensatoren 75.
 — Drosselspulen 372.
 — elektrische Bahnen 437.
 Messung mehrphasiger Leistung 393.
 Methode der Geschwindigkeitsregelung 443.
 — die symbolische 211, 507.
 — der Phasentransformation von Ferraris & Arno 362.
 — — — von Scott 362.
 — — — von S. P. Thompson 360.
 — zum Anlassen einphasiger Motoren von Brown 357.
 — zur Umformung einphasiger Wechselströme 363.
 — zur Vergrößerung der Ständerspannung 442.
 Miller, Oskar von 497.

Monocyclische Generatoren 431.
 —s System 72, 147.
 Montreal, Centrale 428.
 Motor, normaler 268.
 — zum direkten Antrieb einer Wasserpumpen 263.
 Motoren, Aeltere der Helios-G. 479.
 — Atkinson 350.
 — der E. A. G. vorm. W. Lahmeyer & Co. 279.
 — der Fort Wayne Co. 309.
 — der Maschinenfabrik Oerlikon 261.
 — Einzelheiten einiger ausgeführter 197.
 — für transportable Bohrmaschine 278.
 — mit abgedeckten Polen 248.
 — mit constantem Felde 308.
 — mit Kurzschlussanker von Siemens & Halske 494.
 — mit Wechselfeld 308.
 — von Bailey 472, 475.
 — von Borel 479.
 — von Brown, Boveri & Co. 268.
 — von Deprez 475.
 — von der Union E. G. 283.
 — von E. Thomson 347.
 — von Ferranti-Wright 349.
 — von Haselwander 489, 490, 493.
 — von Helios 272.
 — von Kolben & Co. 270.
 — von Shallenberger 349.
 — von Siemens & Halske 278.
 — von T. Duncan 350.

N.

Netzschaltung 50.
 Niagara Generatoren 140.
 — Umformer 388. 419.

O.

Oerlikon, Centrale in Sofia 429.
 Oerlikon-Gesellschaft, Anlasswiderstand 189.
 — Generatoren 438.
 — Inductormaschine 123.
 — Kraftübertragung 494.
 — Läufer der 198.

Oerlikon-Gesellschaft, Mehrphasenstrom-
erzeuger 103.
— Motoren der 261.
— Umformer 381.
— Versuche 305.
— zum Anlassen der Einphasenmotoren
339.
Ogden Utah, Centrale 428.

P.

Paderno, Centrale 423.
Papierisolation 248.
Pariser Ausstellung 1900 491.
Parshall, Dreiphasenanker 120.
— Umformer 388.
Patente der A. E. G. 519, 520, 521, 522,
524, 533, 535, 536.
— — Aktiebolaget de Lavals Ängturbin
525.
— — Alternate Current Electrom. Synd.
Ltd. 523.
— von Arno 527.
— — Arnold 523.
— — Arnold, Bragstad & la Cour 533.
— — Batault 525.
— — Bedell 532.
— — Belfield 528, 529.
— — Berg 525, 529, 531, 532.
— — Berry 526, 531, 533, 535.
— — Blackburn & Buchanan 523.
— — Bláthy 519, 526, 531, 534.
— — Blondel 522, 524, 536.
— — Borel 518.
— — Boucherot 524, 532, 534.
— — Bradley, 520, 521, 522, 524, 527,
529, 530.
— — Brain & Arnot 520.
— — der Brit. Thomson Houton Co.
525, 528, 532.
— — Brown, Boveri & Co. 521, 523, 535.
— — Buck 533.
— — Cabanellas 517.
— — Churchward 528.
— — Clark 523.
— — Coerper 518, 520, 522.
— — Cooley 525.
— — Cushman 525.
— — Dahl 522.
Patente von Dahlander & Lindström 527.
— — Danielson 526, 534.
— — Daris 530.
— — Déri 518, 528, 529, 530, 532, 533.
— — Dettmar 527.
— — Dobrowolsky 518, 519, 520.
— — Duncan 521.
— — Eichberg 536.
— — Emmet 533.
— — Fairbanks 527.
— — Feldmann 528, 534.
— — Ferranti 522, 523.
— — Ferraris & Arno 523.
— — Foster 528.
— — der General Electric Co. 526.
— — der Ges. f. elektr. Industrie Karls-
ruhe 534.
— — Gibboney 527.
— — Girault 534.
— — Goolden, Atkinson & Gold 518.
— — Gordon 517.
— — Gramme 517.
— — Grassi & Cività 527.
— — Grisson 532.
— — Gutmann 520.
— — Haselwander 519.
— — Helios 518, 520, 521, 532, 535.
— — Heyland 526, 529, 531, 534, 536.
— — Hobart 535.
— — Hookham 525.
— — Hummel 523, 524.
— — Hutin & Leblanc 519, 520, 521,
524.
— — Jung 534.
— — Kählert & Teege 521.
— — Kandó 524.
— — Karmin 531.
— — Kelly 522.
— — Kennedy 519.
— — Kingdon 522.
— — Kolbe 522.
— — Krebs 518.
— — Kummer 530, 532.
— — Laarmann & Brokkelt 529.
— — Lahmeyer 519, 521, 535, 536.
— — Lamme 526, 527, 529, 530, 531,
532, 533.
— — Langdon-Davies 524, 526, 530.

- Patente von Leblanc 518.
 — — de Lignières 534.
 — — Lundell & Johnson 521.
 — — Lunt 532, 533.
 — — Meyer 535.
 — — Moody 528.
 — — Mordey 518, 522.
 — — New & Maine 524.
 — — Nicolaysen 526.
 — — Nipkow 519.
 — — Oerlikon 519, 521, 524, 527, 528,
 535, 536.
 — — Osnos 536.
 — — Peek 535.
 — — Peloux 528.
 — — Pieper 532, 534.
 — — Potter 525.
 — — Pürthner 534.
 — — Raab 524, 526, 527.
 — — Reist 533.
 — — Rice 521, 523, 527, 528, 530,
 532, 533.
 — — der Ries Electric Co. 522.
 — — Ritter 529.
 — — Rotten 519, 520.
 — — Rowe 529.
 — — Rowland 522.
 — — Sahulka 520, 530.
 — — Sautter, Harle & Co. 530, 536.
 — — Schlatter 519.
 — — Schuckert 517, 518, 521—526,
 528, 534—536.
 — — Schüler 535.
 — — Scott 522, 525, 529.
 — — Schallenberger 523, 524.
 — — Shand 527.
 — — Siemens & Halske 517, 519—521,
 523—526, 528—531, 534—536.
 — — Skanes 529.
 — — Soames 527.
 — — Soc. Anonyme 522—526, 530, 531.
 — — Soc. l'Alliance 517.
 — — Sohlmann 519.
 — — Stanley 529.
 — — Stanley & Kelly 520, 521.
 — — Steinmetz 523—524, 527—533.
 — — Stone-Doane 529.
 — — Swinburne 521, 522.
- Patente von Tesla 518—520, 522.
 — — Thompson, S. P. 522, 533.
 — — Thomson, E. 518, 528, 532.
 — — Thomson & Pratt 528.
 — — Tischendörfer 528.
 — — Uhde 534.
 — — der Union E. G. 524—527, 531,
 534, 535.
 — — Vogel 535.
 — — Wagner 530.
 — — Wahlström 520.
 — — Wenström 519.
 — — Westinghouse 526.
 — — Wilson 518.
 — — Woodbridge 533.
 — — Wright 524.
 — — Wynne 518.
 — — Zell 534.
 — — Zipernowski 517, 518.
- Periode 6.
 Permutatoren 391.
 — von Hutin & Leblanc 392.
 — von Zipernowsky & Deri 392.
 Phasenteiler, Drehstrommotoren als 368.
 Phasentransformation 359, 362, 465.
 Phasenunterschied 46.
 Phasenverschiebung in einem Dreileiter-
 system 368.
 Phasenwinkel 10.
 Phillips 500.
 Picou 200.
 Poisson, Theorie des Drehungsmagne-
 tismus 458.
 Polbogen 264.
 Prag, Centrale 419.
- Q.**
- Quadratur zweier Wechselströme 41.
- R.**
- Radiant 8.
 Rathausen, Elektrizitätswerk 101.
 Reactanz 26, 27.
 Rheinfelden, Centrale 422.
 Richelieu, Centrale 428.
 Rodet et Busquet, Mehrphasenmaschinen
 200.
 Rowland's Vorrichtung zur Aenderung
 der Wechselzahl 370.

S.

Schablonenwicklung 440.
 Schaltungen von Dobrowolsky 55.
 Scheibenmaschinen von Faraday 459.
 Scheitelwerth 19.
 Schleifenwicklung 4, 185.
 Schleifringe von Alioth & Co. 152.
 — Befestigung der 152.
 Schlipf 239.
 Schlussanker, Dobrowolsky 179.
 Schmalspurbahnen, Elbthal 437.
 — Riesengebirge 437.
 — von Kummer & Co. 437.
 Schnellbahnen, Versuche 455.
 Schuckert & Co., Ausstellungsmaschinen,
 Paris 1900 117.
 — Flachringanker 493.
 — Hochspannungsmaschinen 454.
 — Kerntransformator 355.
 — Kurzschlusseinrichtung 195.
 — Wechselstromerzeuger 3.
 — Zweiphasige Uebertragung mit drei
 Drähten 359.
 Schweizerische Lokomotivfabrik 451.
 Scott, Methode zur Phasentransformation
 362, 465.
 Selbstinduction, Wirkungen der 19.
 Shallenberger, Mehrphasenmesser 399.
 —'s Motor 349.
 Siemens & Halske, Anlasswiderstand 189.
 — Drehstrommaschinen 113.
 — Läufer eines Drehstrommotors 197.
 — Motoren 278, 480.
 — Motoren mit Kurzschlussanker 494.
 — Stromerzeuger 417.
 — Umformer 384.
 — Wechselstrommotor mit Hilfsphase
 340.
 Smith 462.
 Sofia, Centrale 103, 429.
 Spannungsmesser, Cardew'scher 13.
 — elektrostatischer 15.
 Spannwerkmaschine der A. E. G. 433.
 Ständer 156.
 — Bau des 158.
 — Streuzug 230.
 — strom bei Vollast 241.
 — u. Läuferbleche von Kolben & Co. 158.

Ständer-Wicklungsarten 160.
 Stanley-Kelly, Inductionsmaschinen 429.
 — Dreiphasengeneratoren 421.
 Steinmetz 147, 369, 370.
 — Charakteristik des Mehrphasenmotors
 229.
 — Curven über das Verhalten von Ein-
 phasenmotoren 307.
 — die symbolische Methode 211, 506.
 — Formel für den Hysteresisverlust 172.
 — Tandemschaltung 446.
 Sternschaltung 50.
 Strassburg, Centrale 418.
 Streuung an den Zacken der Zähne 215.
 — magnetische 168.
 Streuungs-Selbstinduct.-Coeff. 513.
 Strom, arbeitsloser 29.
 — magnetisirender 212, 241, 245.
 Stromerzeuger, asynchrone 137.
 — von Hutin & Leblanc 155.
 Ströme, Vereinigung der 55.
 Stromwechsler 466.
 Sturgeon's Untersuchungen 461.
 Symbolische Methode 211, 259, 506.
 Synchroner Motoren 153.
 Systeme mit niederer Spannung 63.

T.

Teazer 149.
 Tandemschaltung 446.
 Tesla 482, 484.
 Theorie, analytische, der mehrphasigen
 Motoren 253.
 — graphische, der mehrphas. Motoren 202.
 — der Inductionsmotoren 251.
 Thomson, E., Motor 347.
 Thomson-Houston-Gesellschaft, Voll-
 bahn in Varese 438.
 Thompson, S. P., Methode zur Phasen-
 transformation 360.
 Thury, Inductionsmaschinen 425.
 Transformator der A. E. G. 355.
 Transformatoren als Stromerzeuger,
 Atkinson 369.
 — einspulige 371.
 — mehrphasige 351.
 — von Gaulard 477.
 — zur Aenderung der Wechselzahl 370.
 Turbinen, Escher, Wyss & Co. 424.

U.

- Ueberlandlinien 428.
- Uhrdiagramme 10.
- Umformer 372.
- am Niagara 388.
- Einanker- 379.
- Gleichstrom-Wechselstrom 376.
- Mannheim 385.
- von Alioth 380, 425.
- von der Oerlikon-Gesellschaft 381.
- von der General Electric Co. 388.
- von Parshall 388.
- von Siemens & Halske 384.
- Umformung einphasiger Wechselströme
in zwei- oder mehrphasige 363.
- Umkehranlasser, selbstthätiger der A. E. G.
194.
- Umsetzungsverhältniss, Kapp 383.
- Union Electricitäts-Gesellschaft 366.
- Centrale, Madrid 431.
- Untersuchungen über Drehfeldmotoren
von Dolivo-Dobrowolsky 491.
- — — von Ferraris 476.
- — — von Kittler & Lindley 504.
- — — von Marcel Deprez 475.
- — — von Tesla 481.

V.

- Valtellina-Bahn 454.
- Vectoreigenschaften der Wechselströme
37.
- Vereinigung der elektromotorischen Kräfte
52.
- Vergrosserung der Ständerspannung 442.
- Versuche im magnetischen Feld 463.
- von Guthrie & Boys 463.
- von Herz 461.
- von Jochmann 461.
- von Matteucci 461.
- von Oerlikon 365.
- von Smith 462.
- von Sturgeon 364.
- von Weber 500.
- an einphasigen Inductionsmotoren 306.

- Vollbahn, Burgdorf-Thun 437.
- Elbthal 437.
- Oberammergau 437.
- Riesengebirge 437.
- Varese der Thomson-Houston Ges. 438.
- Voranbewegung des Feldes 164.

W.

- Walker 346.
- Wasserwiderstand, A. E. G. 188.
- Weber, Bericht 503.
- Wechselfeld 65.
- Wechselgeschwindigkeit 7.
- Wechsellinien 65.
- Wechselströme, Messung der 30.
- Vectoreigenschaften der 37.
- Wechselstrommaschinen, Drehungsmo-
ment von 31.
- von Gramme 39.
- von Lontin 39.
- von Schuckert 3.
- Wellenwicklung 4. 185.
- Westinghouse-Gesellschaft 139.
- Anlassmethode 284.
- Inductionsmotoren 284.
- Wickelungsarten des Ständers 160.
- für Hochspannungsgeneratoren 438.
- Widerstand, magnetischer 215.
- scheinbarer 24.
- Wirkung der Capacität 25.
- der Selbstinductoren 19.
- Wirkungsgrad 298.
- Wynne 40.

Z.

- Zeuner's Diagramm 12.
- Zipernowsky & Déri, Permutatoren 392.
- Züge magnetischer Kraft 230.
- Zugkraft, Ausdrücke für Drehmoment
245.
- beim Angehen 223.
- Zusammensetzung magnetisch. Felder 15.
- Zusatzmaschine 442.
- Zweiphasenstrom-Wickelungen 86. 387.
388.

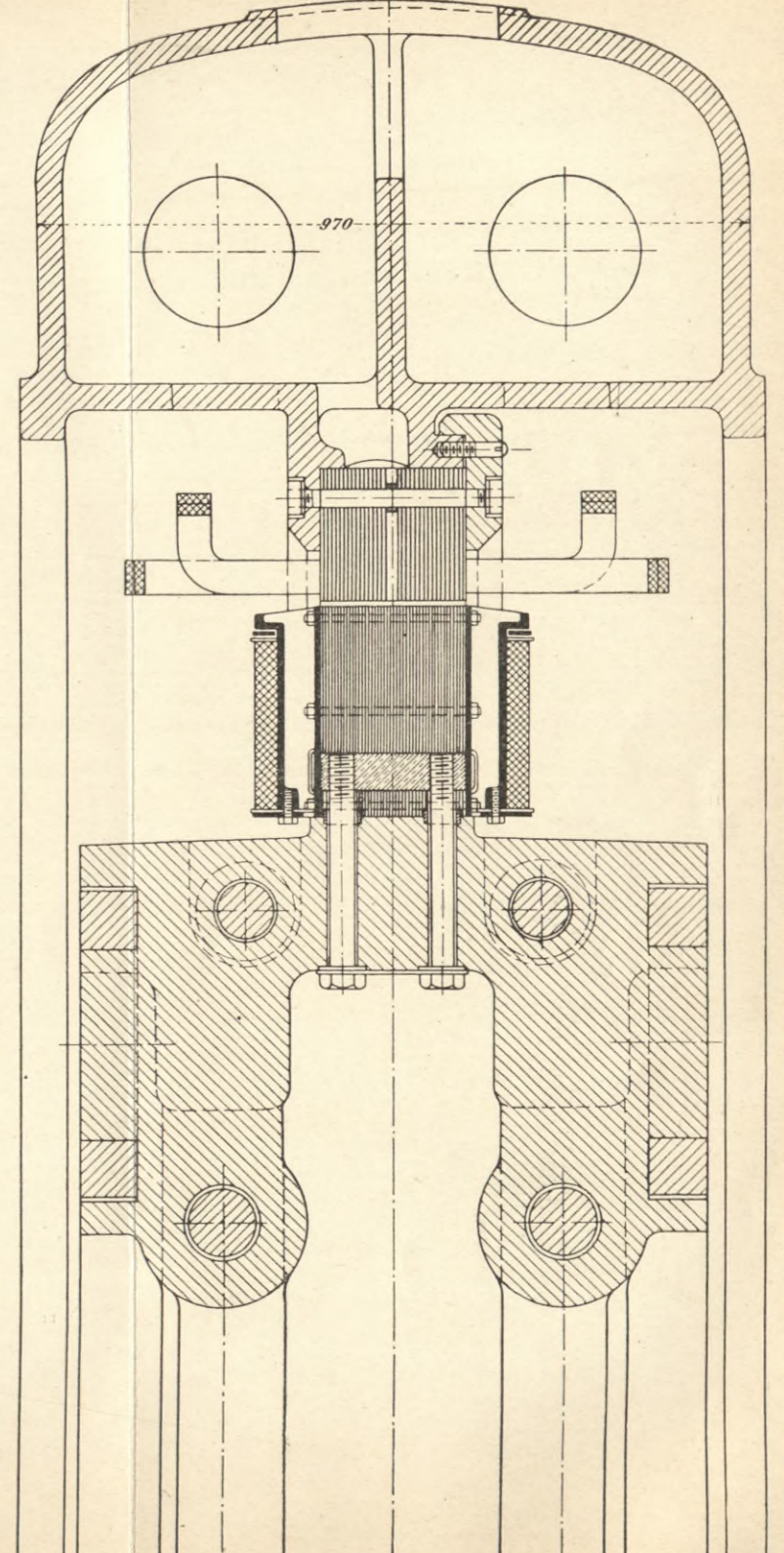
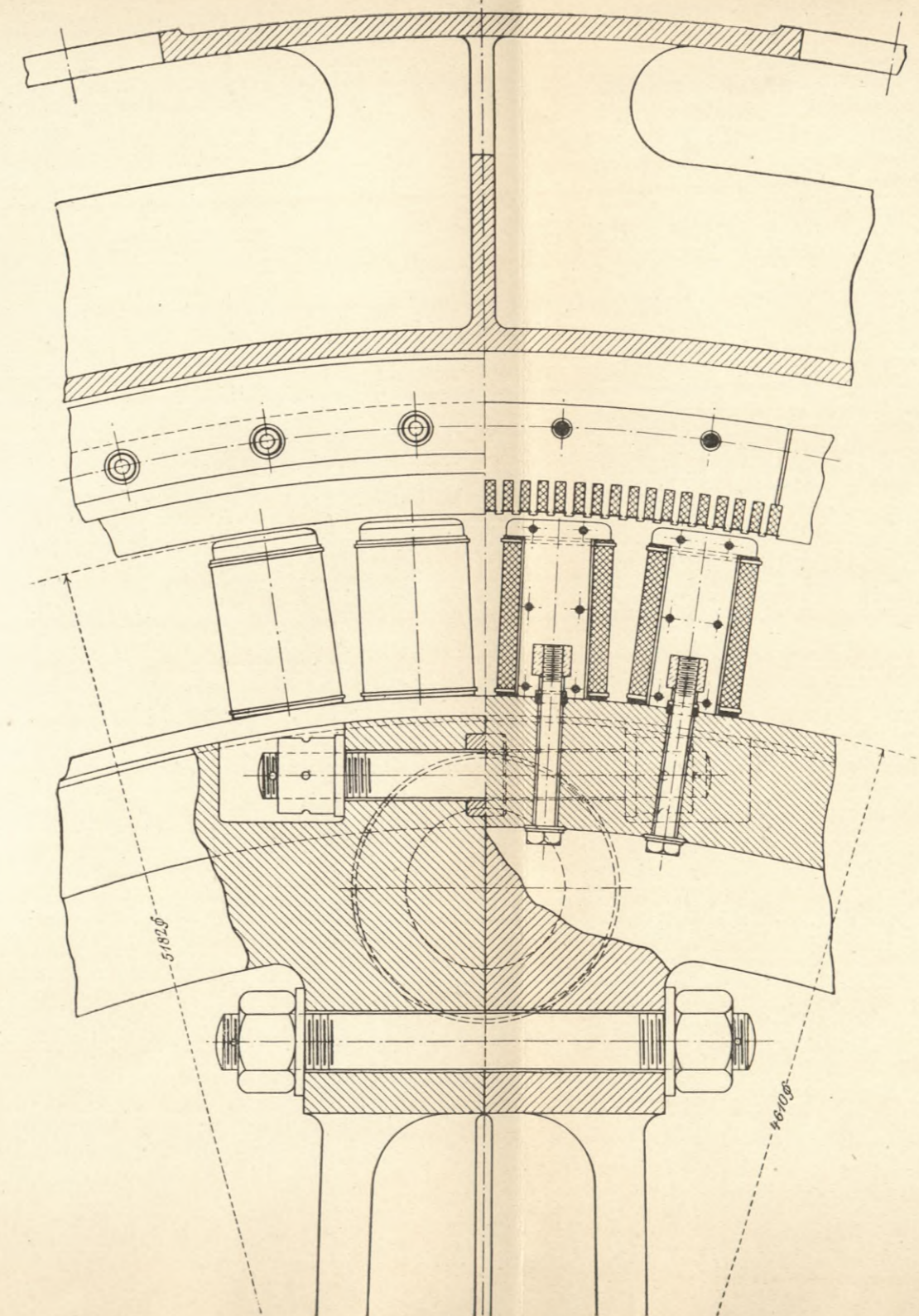
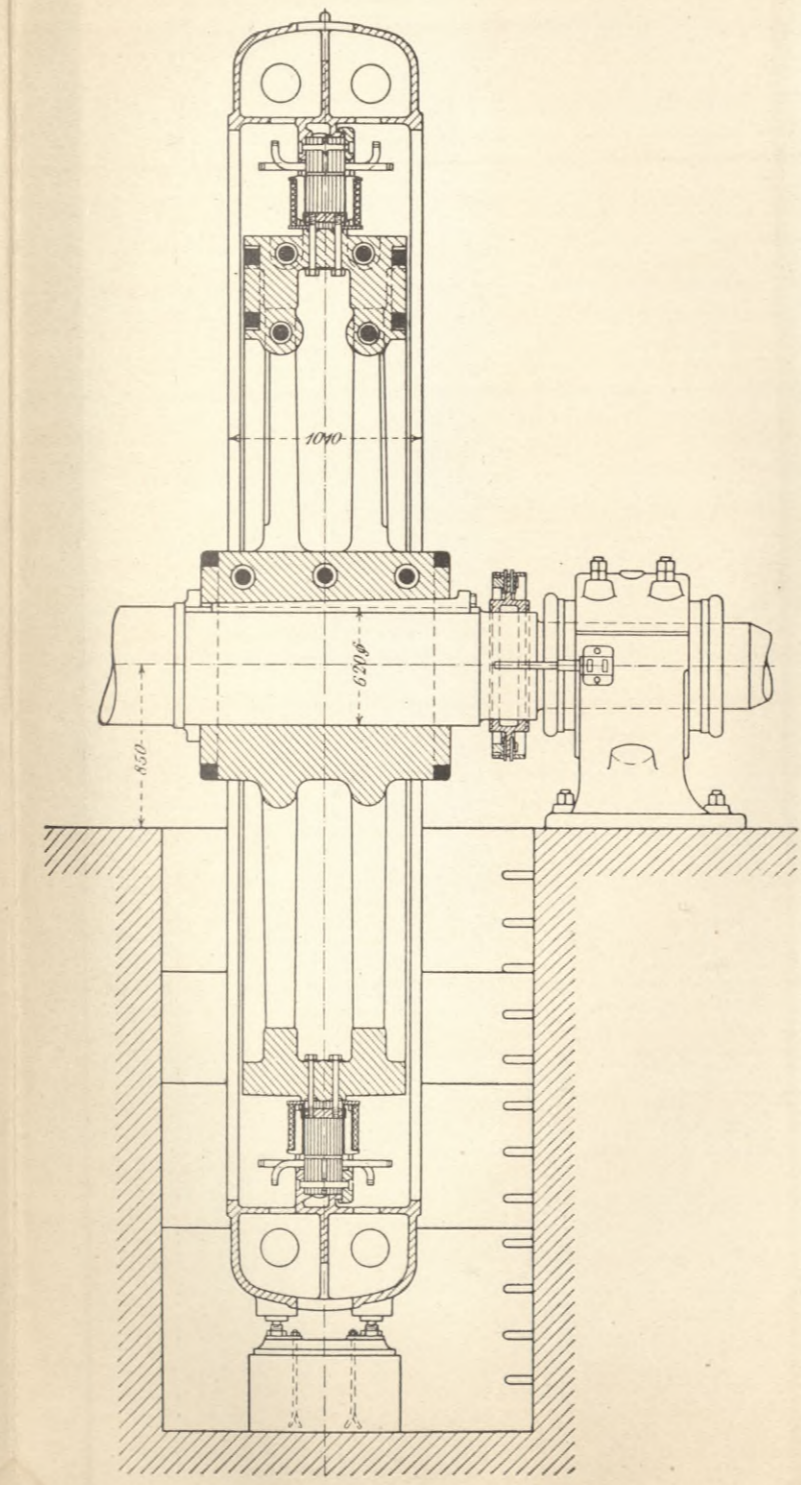
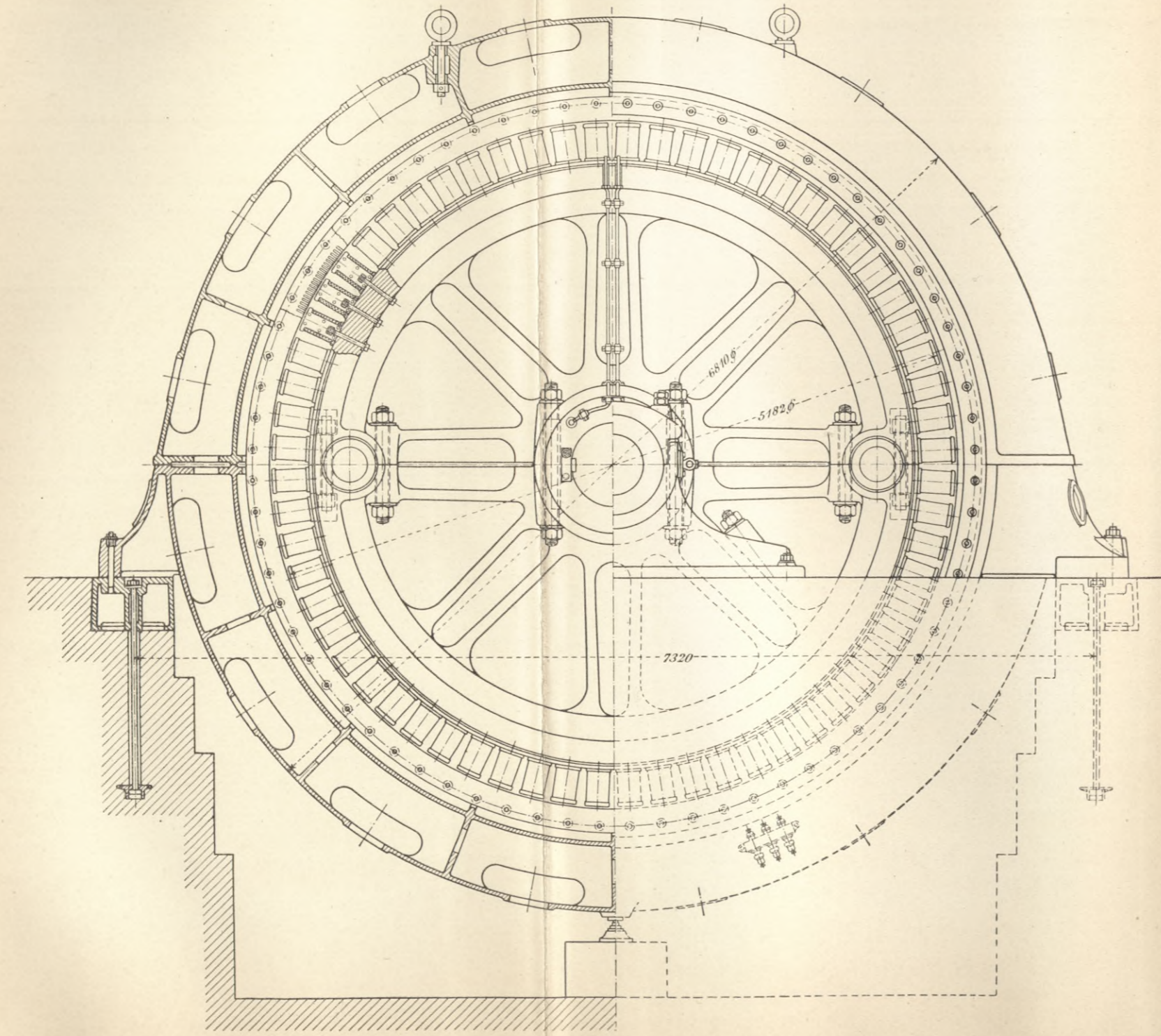
Berichtigungen.

- S. 18 in Fig. 18 lies ω statt Θ .
S. 86 Z. 7 v. u. lies 91 statt 387 und 335.
S. 91 Z. 7 v. u. lies Fig. 130 statt 195.
S. 95 Z. 4 v. o. lies Fig. 212 statt 200.
S. 124 die Figuren 126 und 127 sind unter Belassung der Unterschriften gegeneinander zu vertauschen.
S. 138 Z. 2 v. u. lies asynchroner statt synchroner Drehstrommotor.
S. 161 Z. 8 v. u. lies Fig. 236 statt 241.
S. 221 Z. 7 v. u. lies virtuelle statt virtulle.
S. 237 Anmerkung ist hinter ETZ 1894 einzuschieben S. 561.
S. 302 Ueberschrift lies XIII statt XII.
S. 508 Z. 7 v. u. und S. 511 Z. 3, 4 und 13 v. u. lies Θ statt ϑ (das Θ der Figuren 389 und 394).
S. 510 Z. 10 v. u. lies e statt e.
S. 511 Z. 7 v. u. lies i statt i.
-

DREIPHASEN-STROMERZEUGER FÜR HOHE SPANNUNG DER SIEMENS & HALSKE AKTIEN-GESELLSCHAFT IN BERLIN-CHARLOTTENBURG.

MODELL R 260/20 FÜR 850 KILOWATT BEI 50 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 94 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE

HAUPTZEICHNUNG IN $\frac{1}{10}$, NEBENZEICHNUNG IN $\frac{1}{10}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE

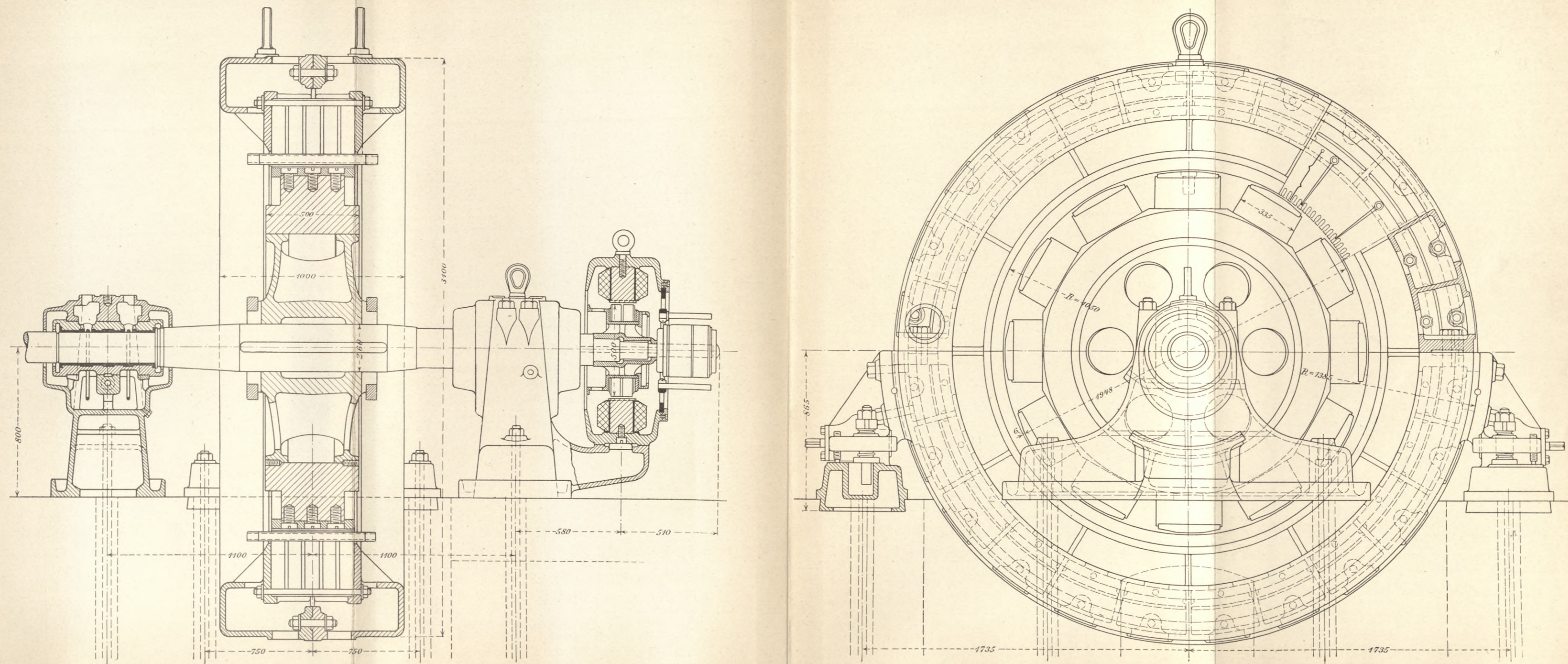




ZWEIPHASIGER WECHSELSTROMERZEUGER VON GANZ & COMP., EISENGIESSEREI- UND MASCHINENFABRIKS-ACT.-GES., BUDAPEST.

MODELL O 1960/12 FÜR $1300 \times \cos \varphi$ KILOWATT BEI 2200 VOLT FÜR JEDE PHASE, 42 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 420 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.

$\frac{1}{20}$ DER NATÜRL. GRÖSSE.



Mehrphasige Ankerwickelungen.

Fig: A.

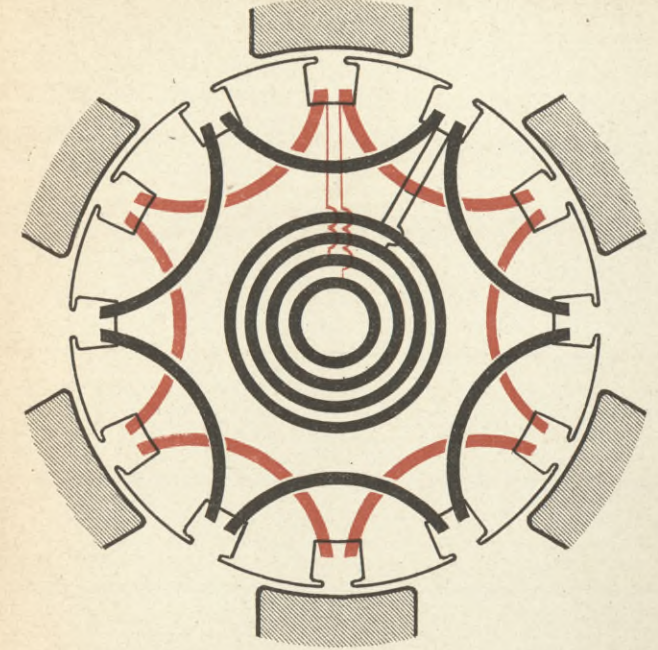


Fig: C.

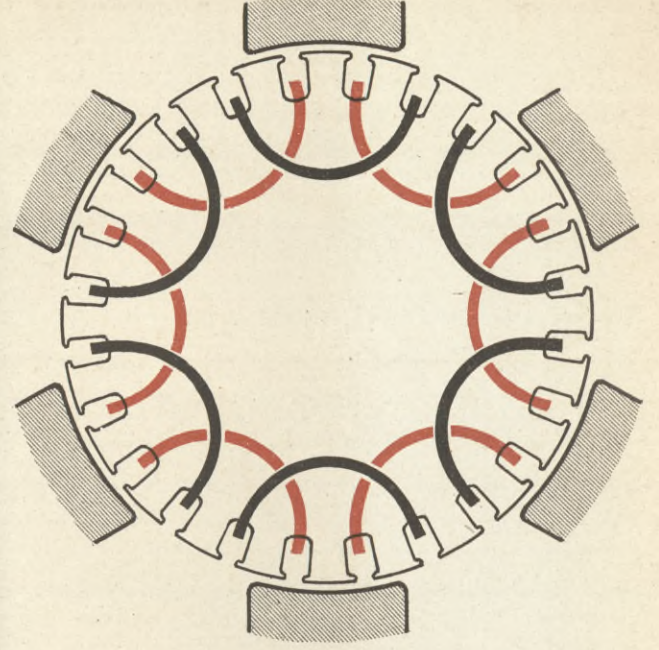


Fig: E.

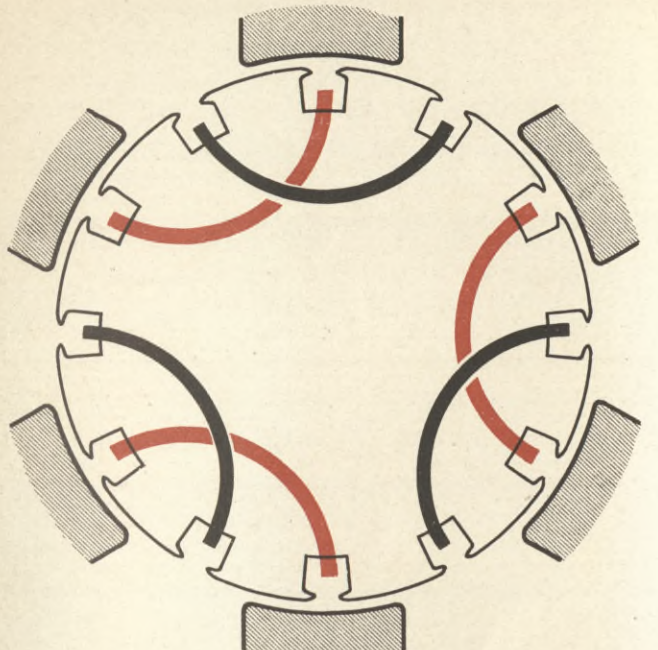


Fig: G.

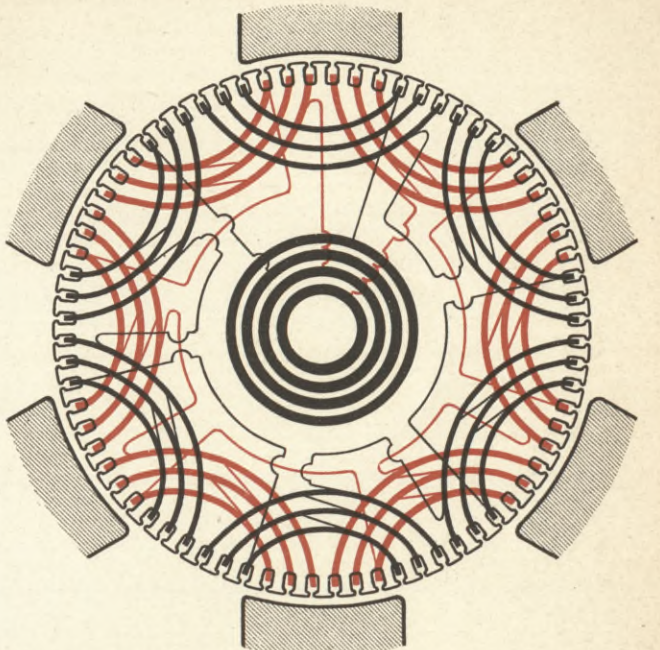


Fig: I.

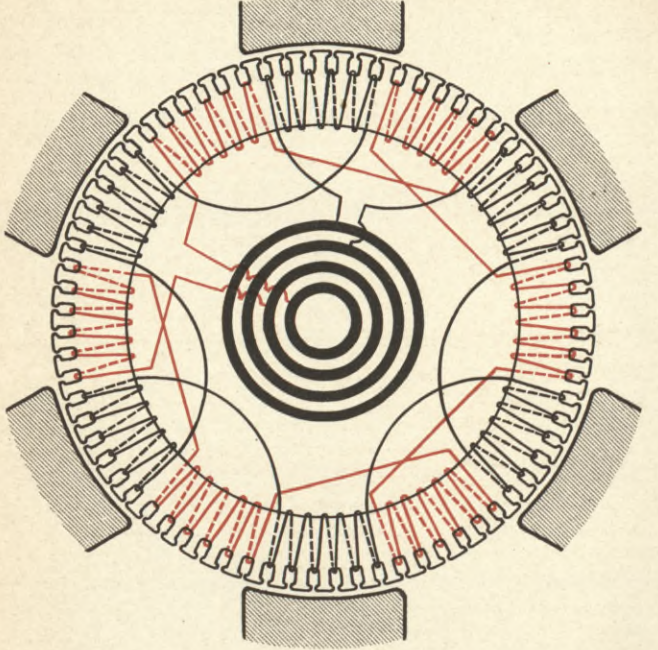


Fig: L.

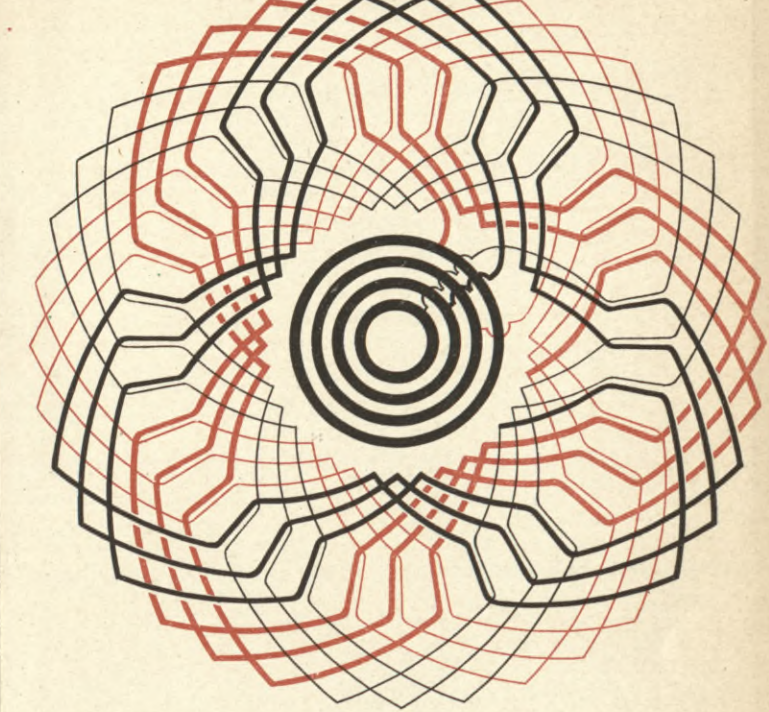


Fig: B.

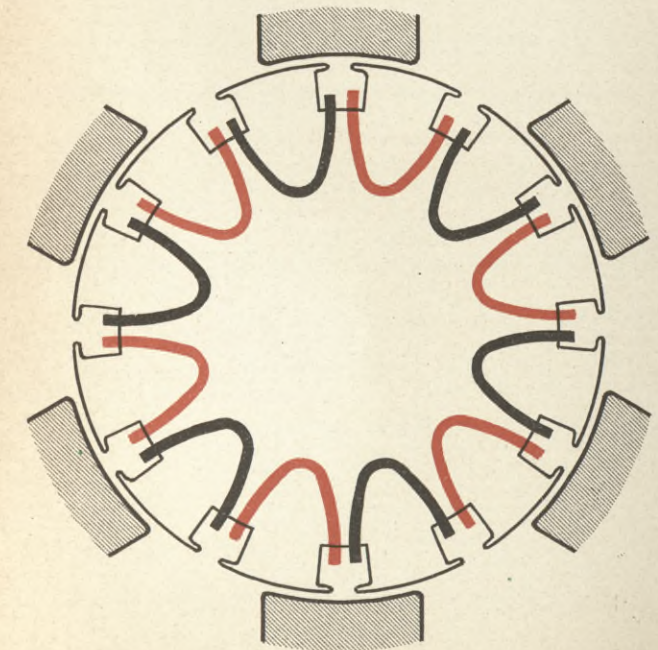


Fig: D.

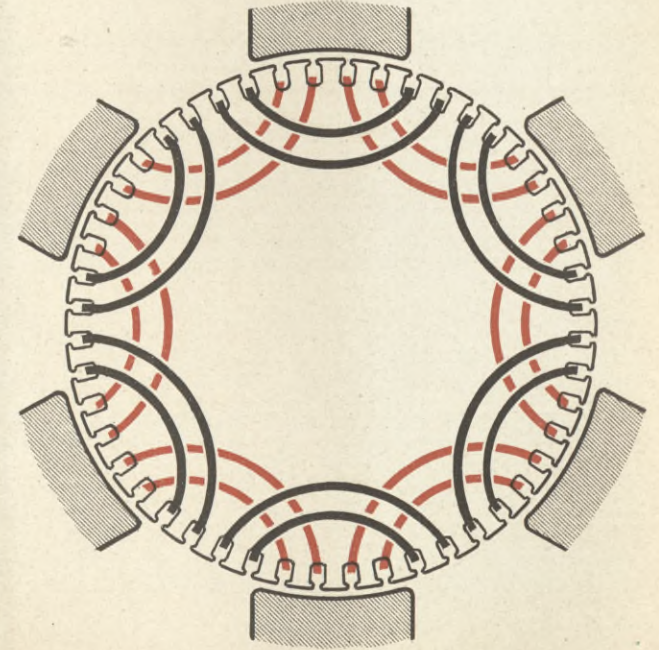


Fig: F.

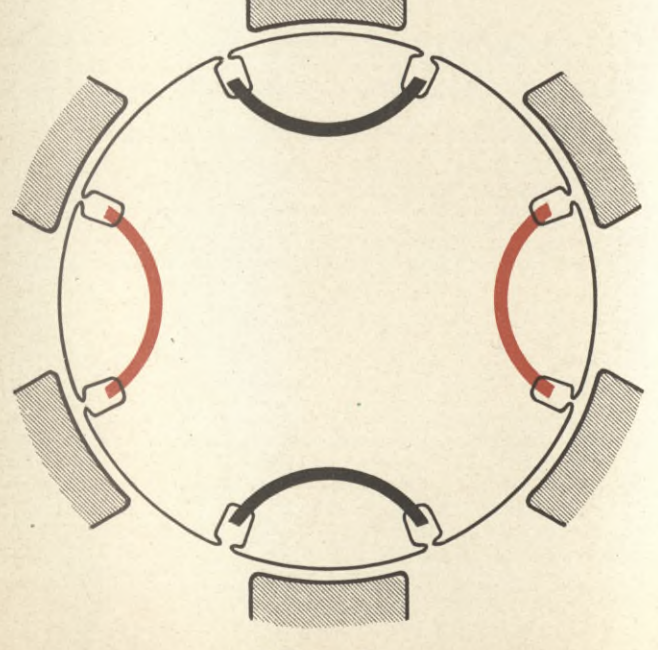


Fig: H.

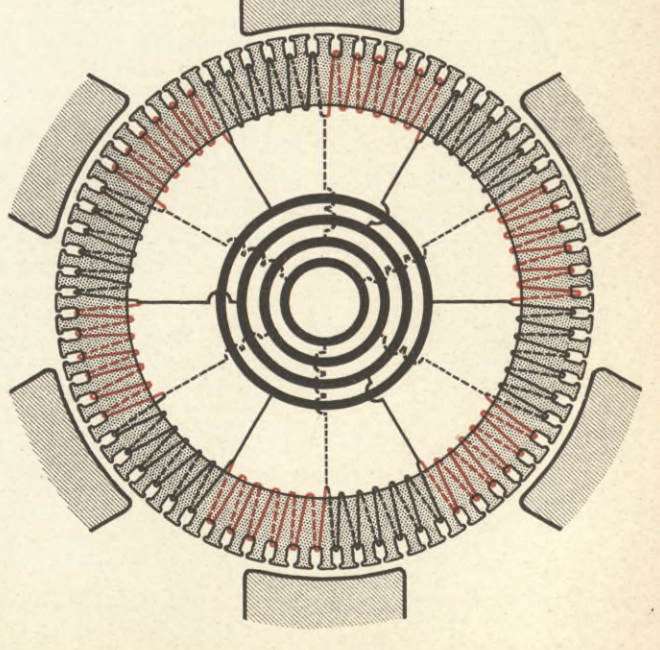
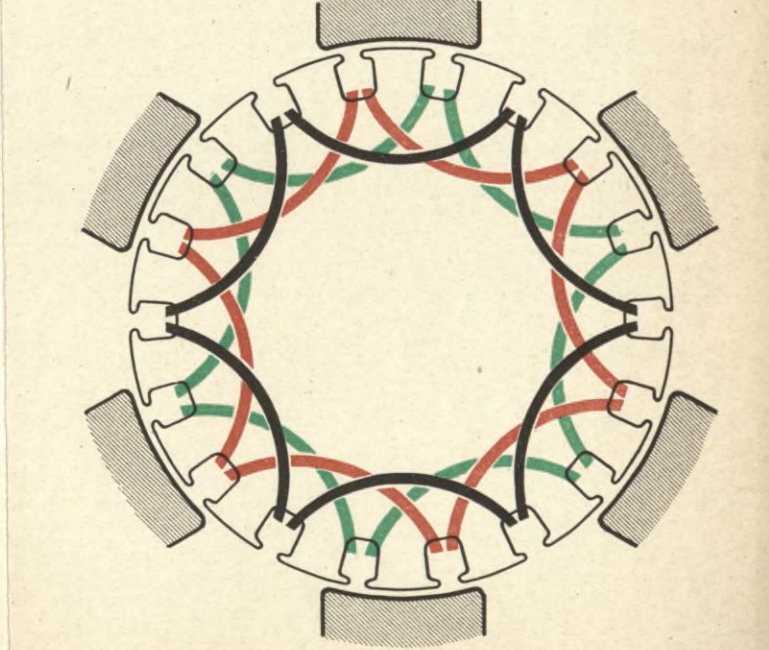


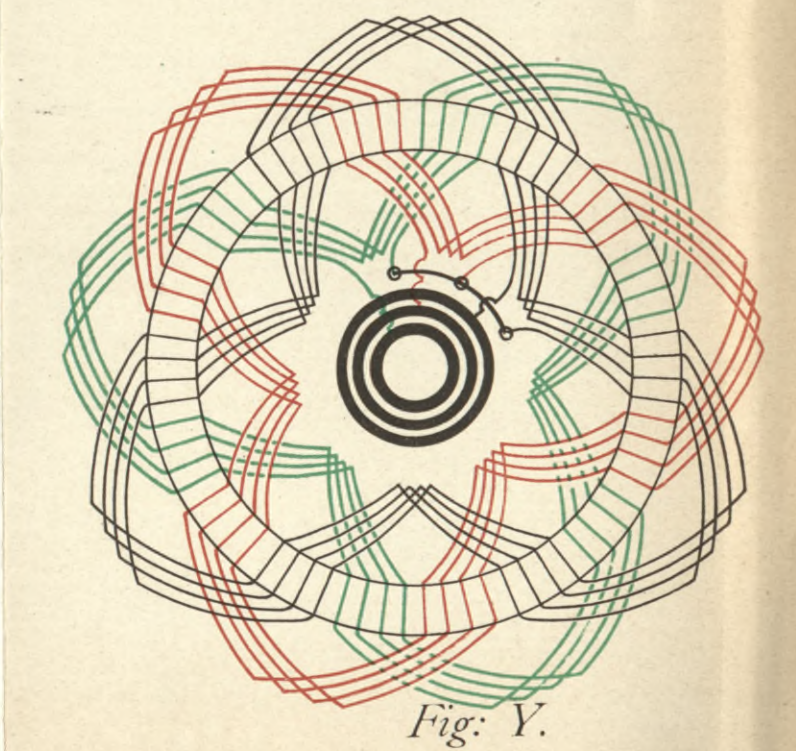
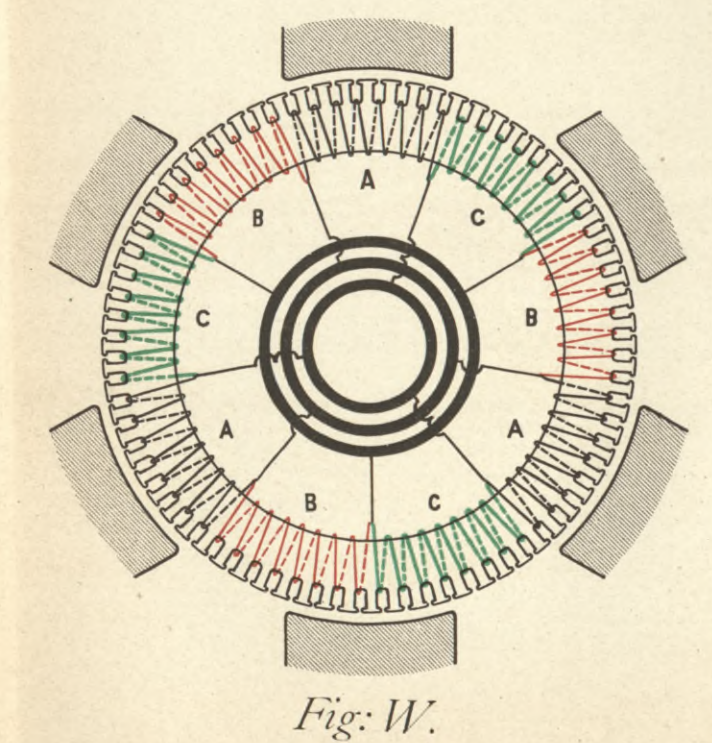
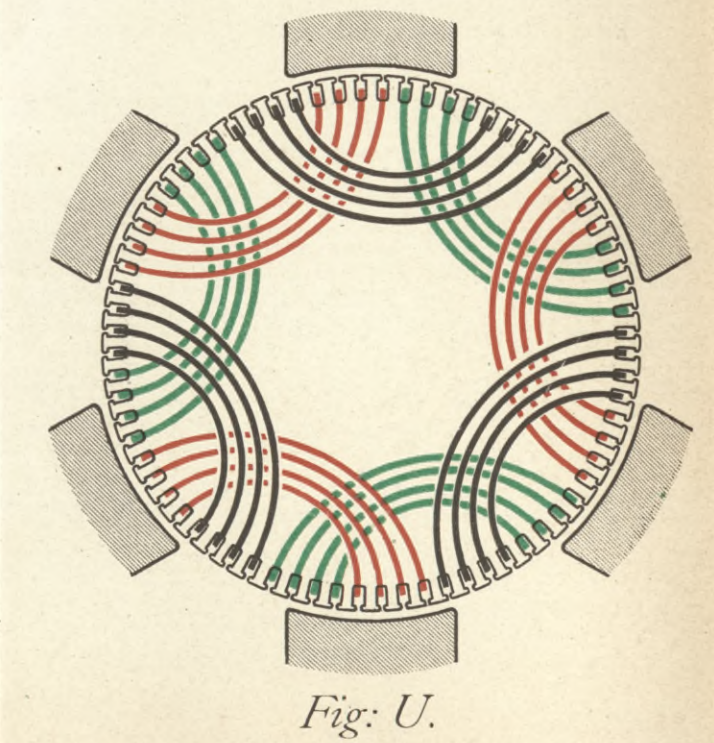
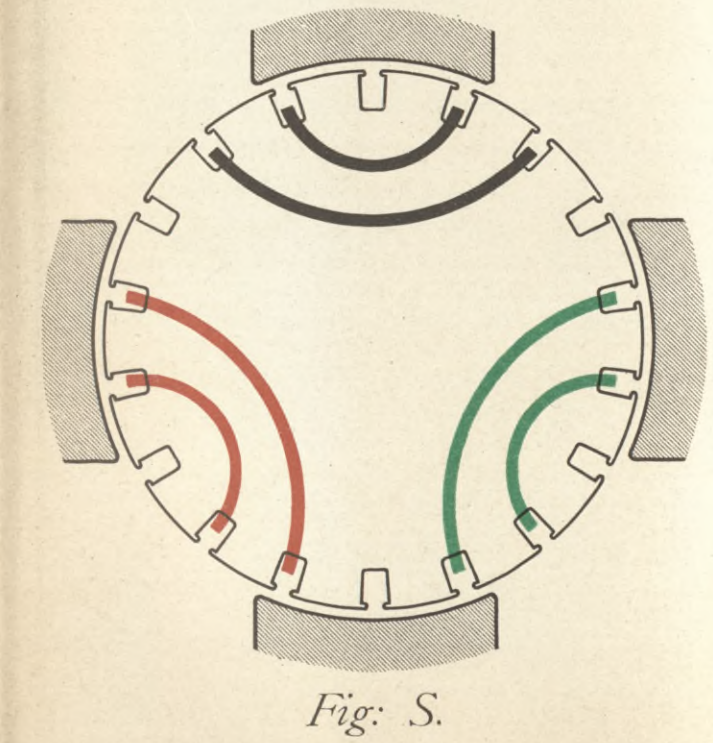
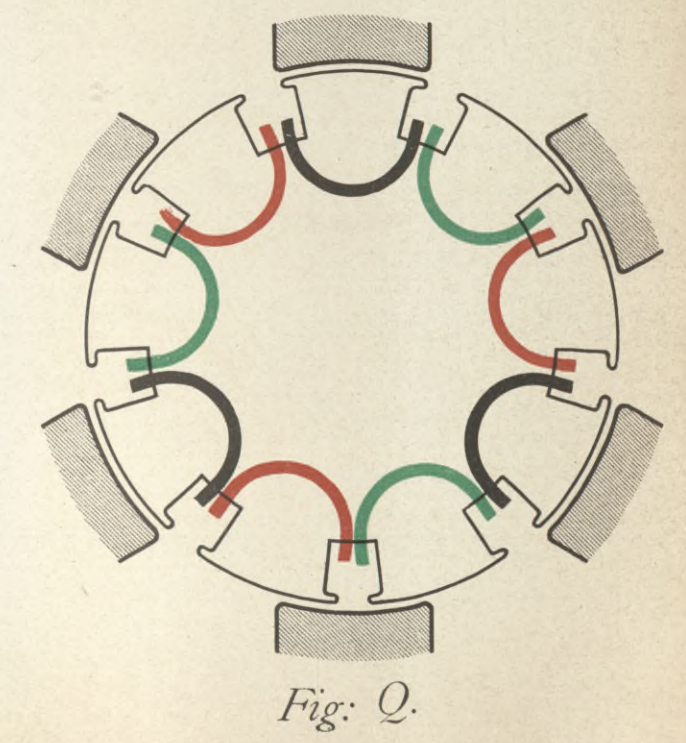
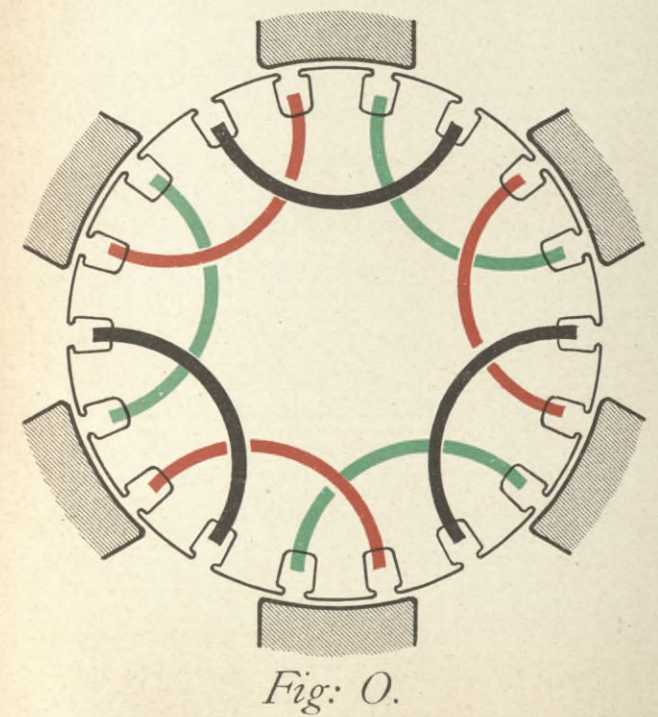
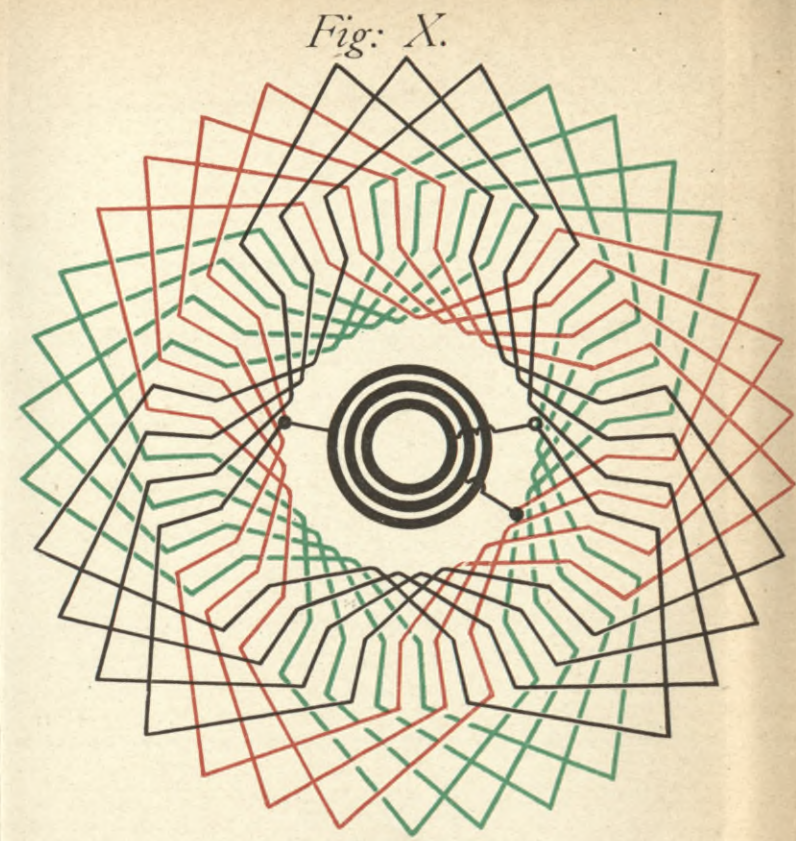
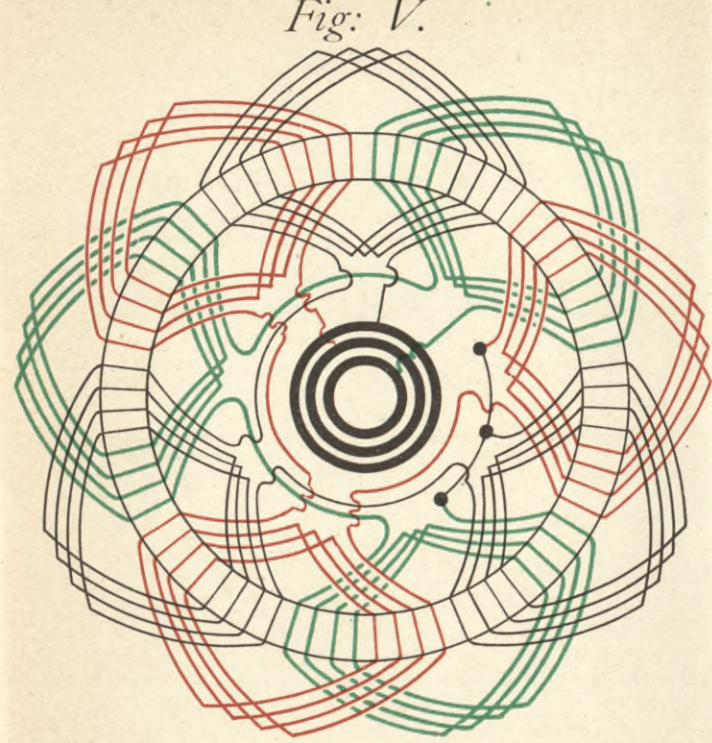
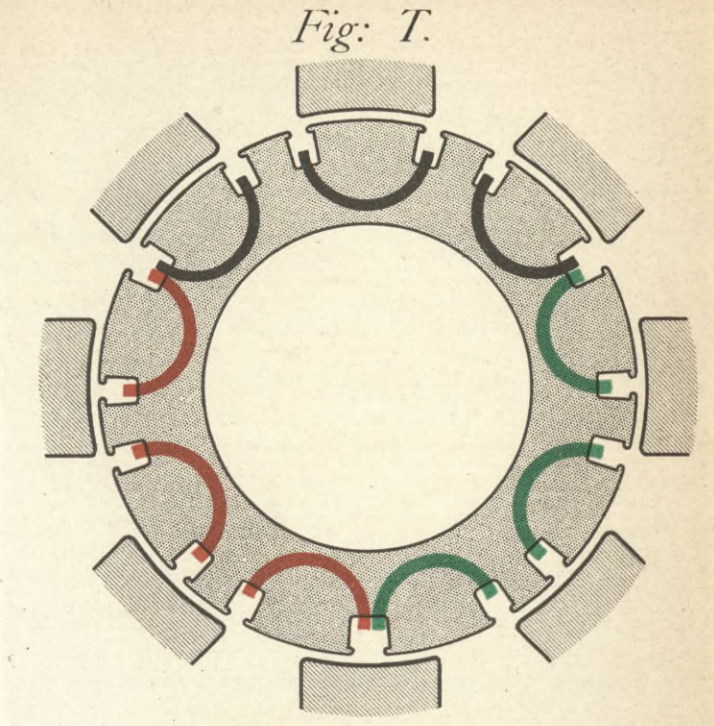
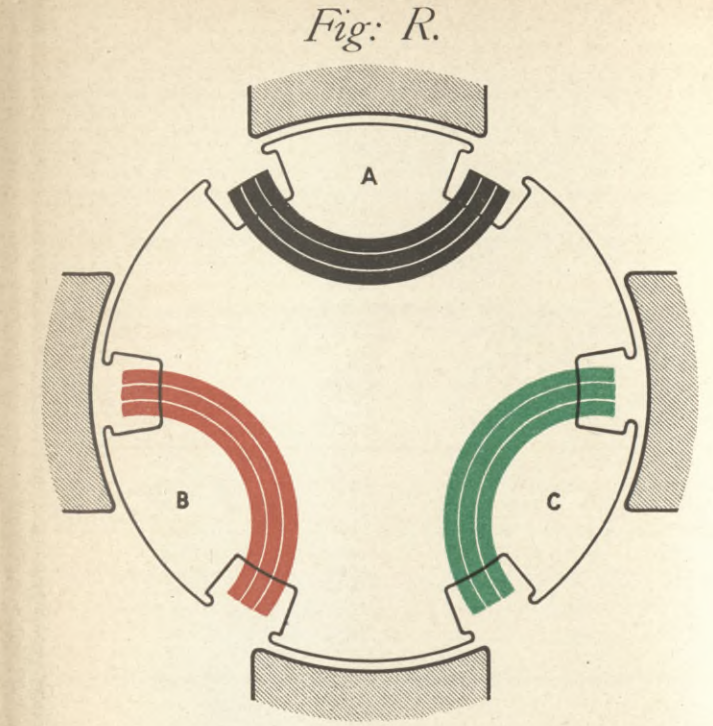
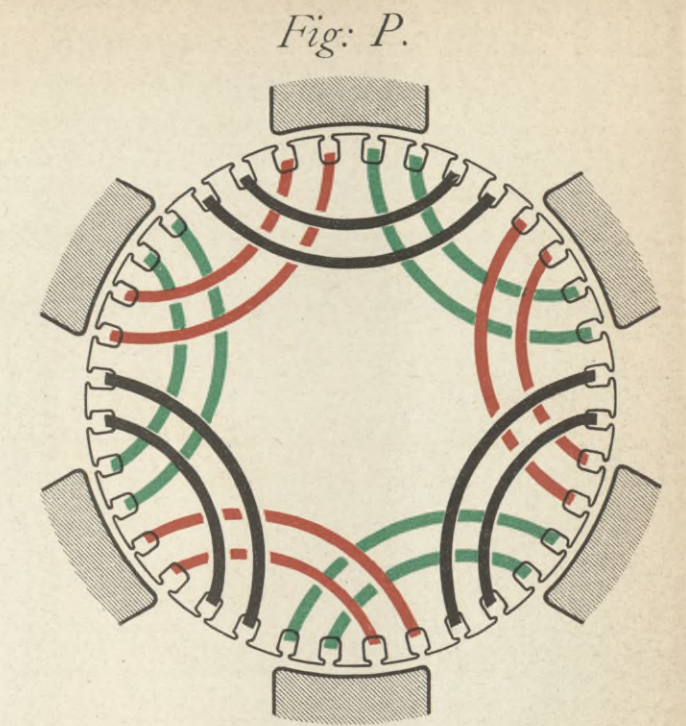
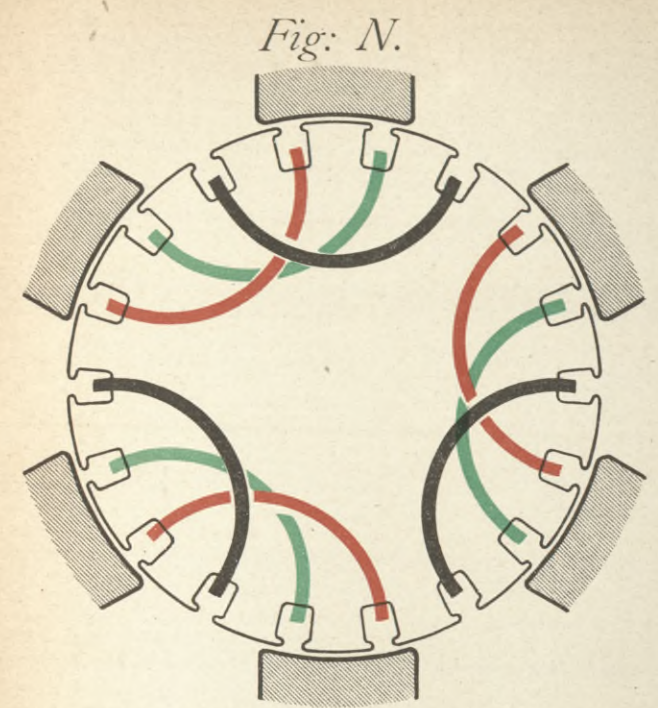
Fig: K.



Fig: M.

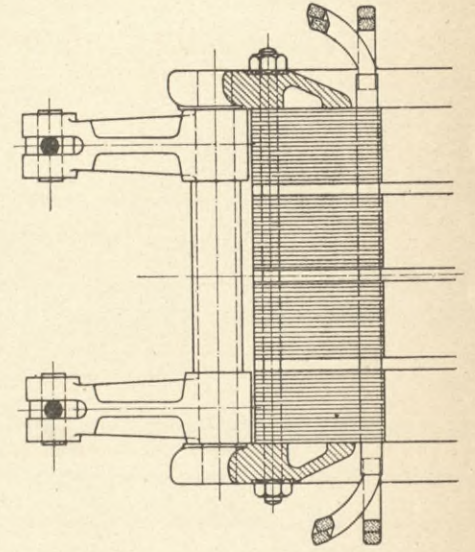
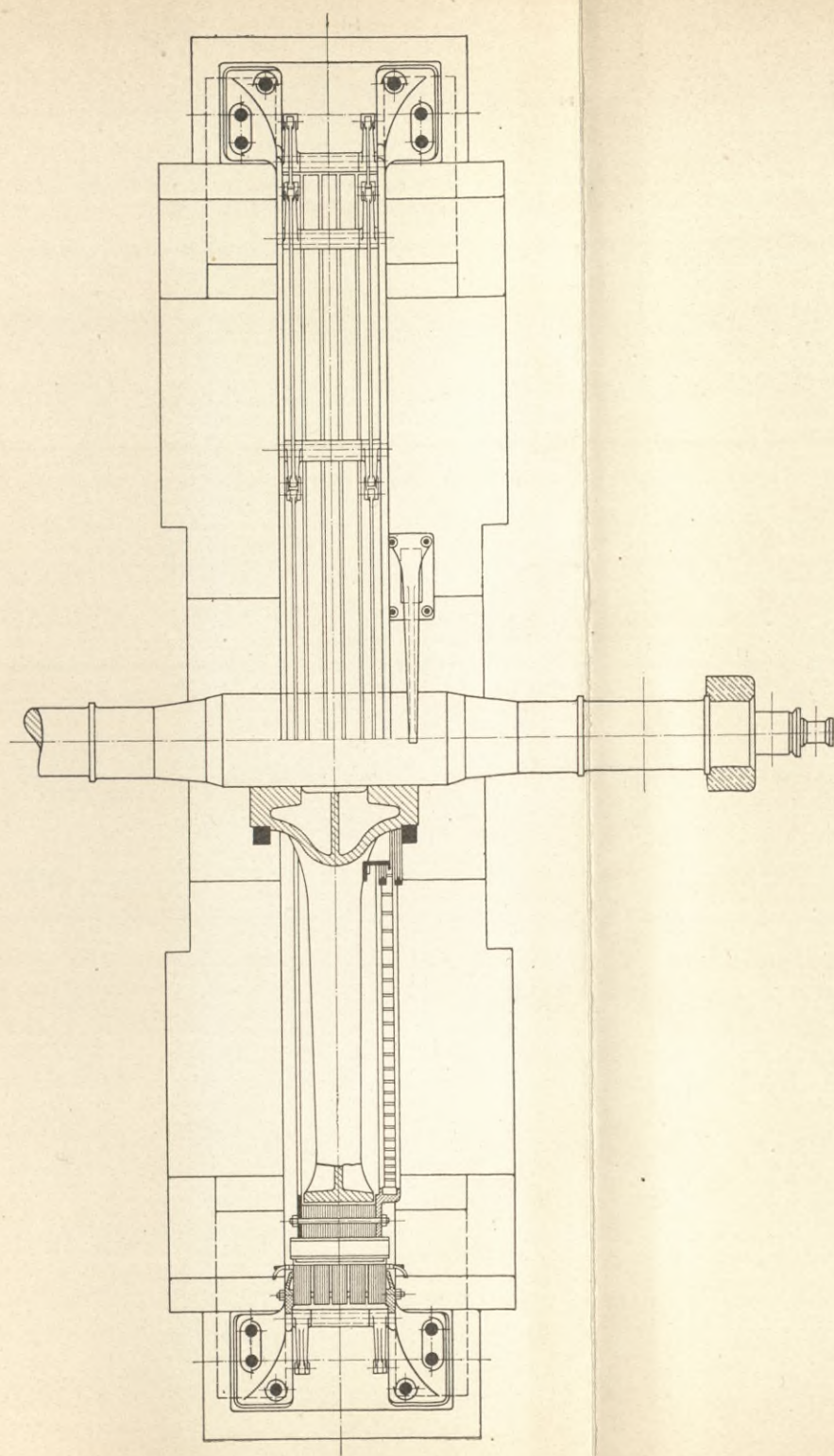
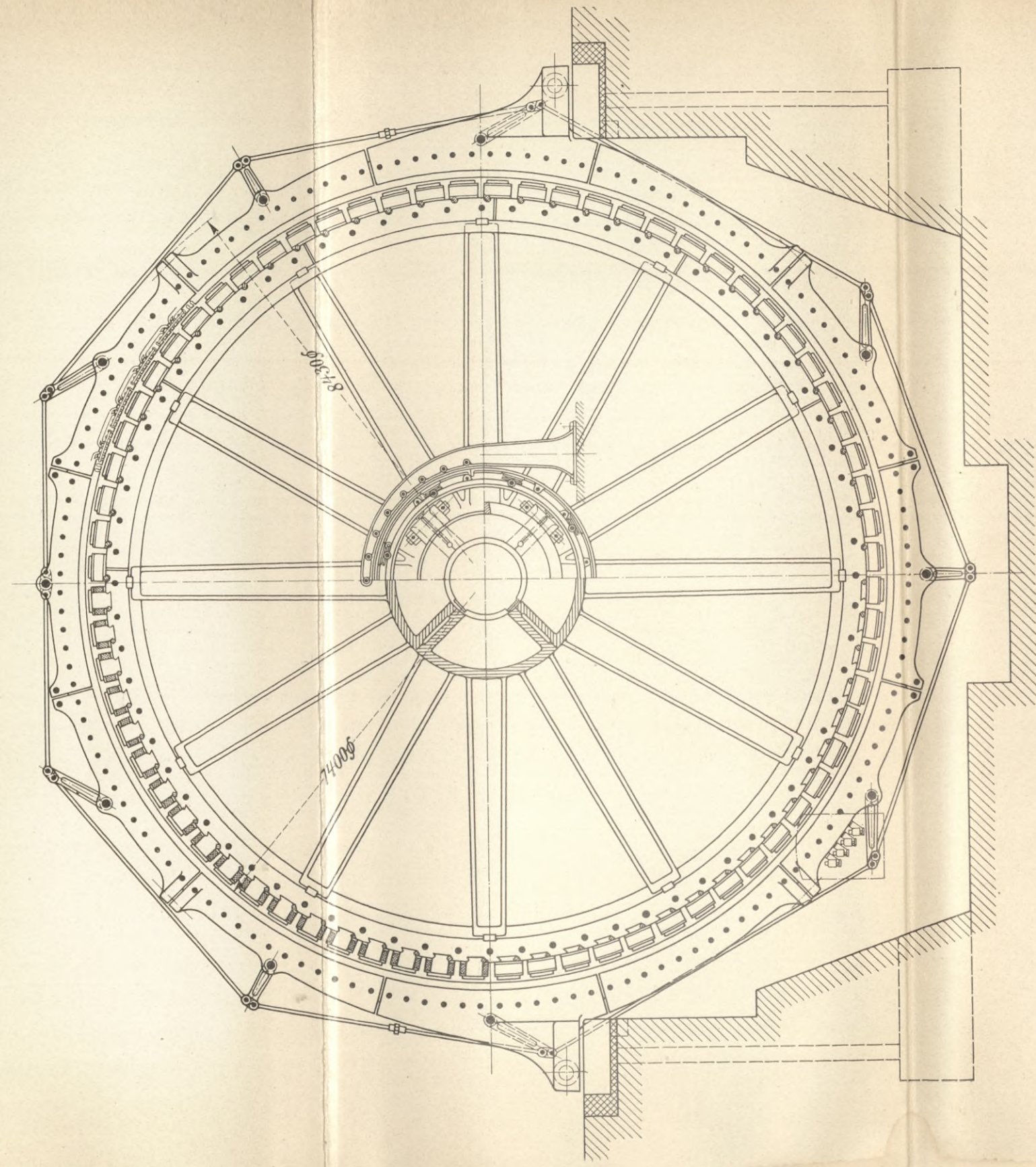


Mehrphasige Ankerwickelungen.



BIBLIOTEKA
KRAKÓW
Politechniczne

DREIPHASEN-STROMERZEUGER DER ALLGEMEINEN ELEKTRICITATS-GESELLSCHAFT IN BERLIN.
MODELL GSD 83650 FÜR 4700 COS φ KILOWATT, 6600 VOLT BEI 50 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 83 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.
HAUPTZEICHNUNG CA. $\frac{1}{50}$, NEBENZEICHNUNG CA. $\frac{1}{15}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.

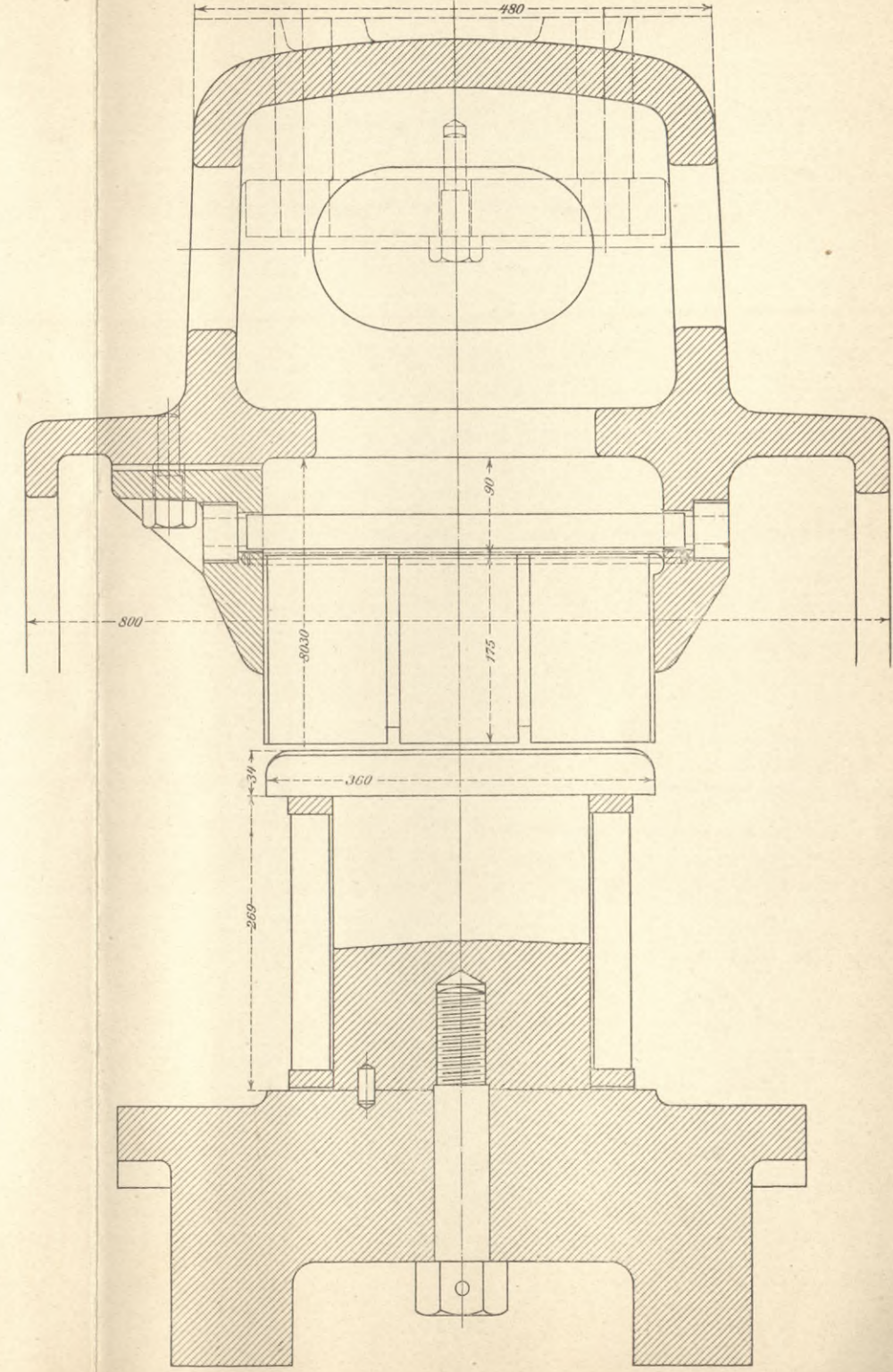
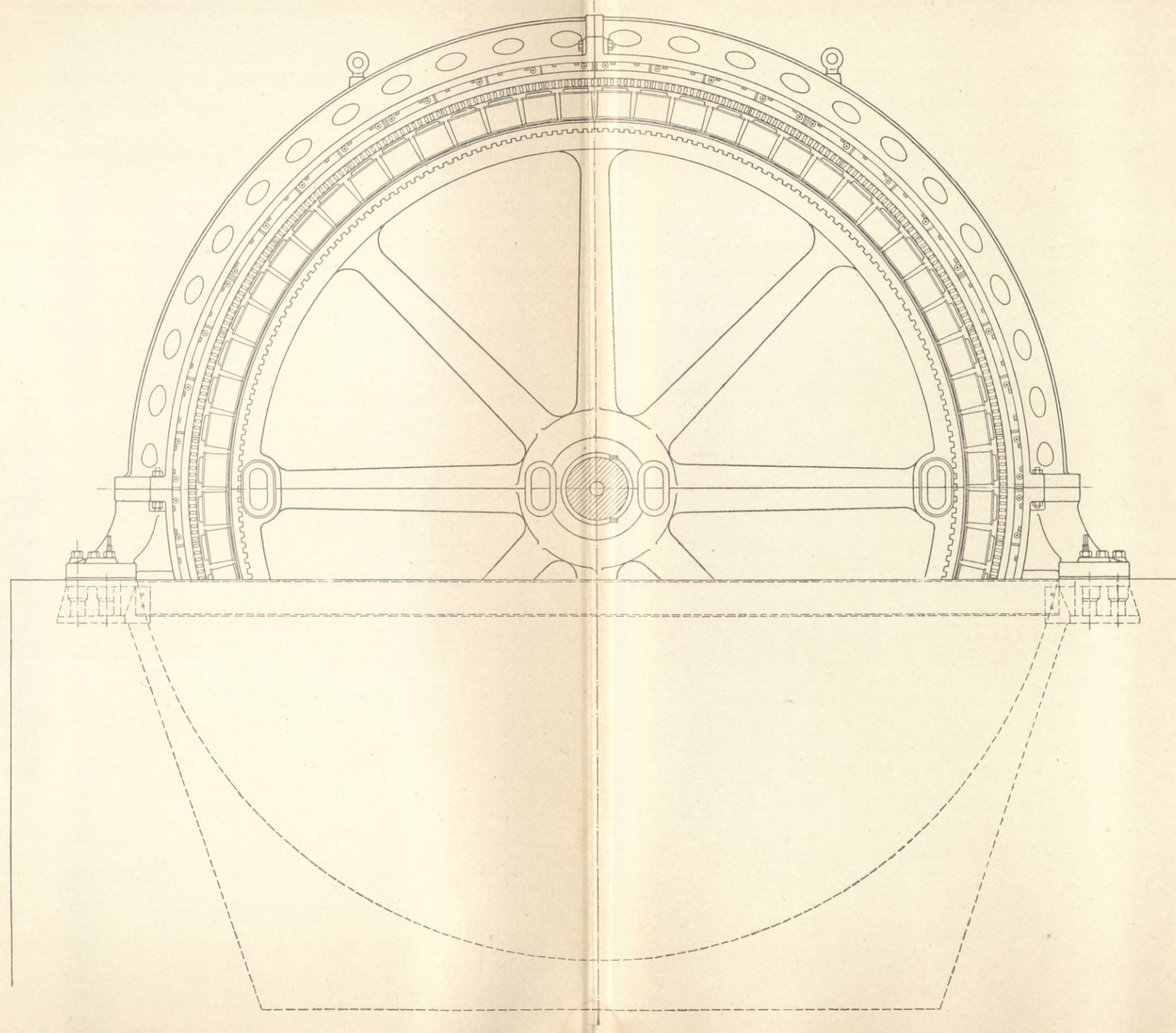
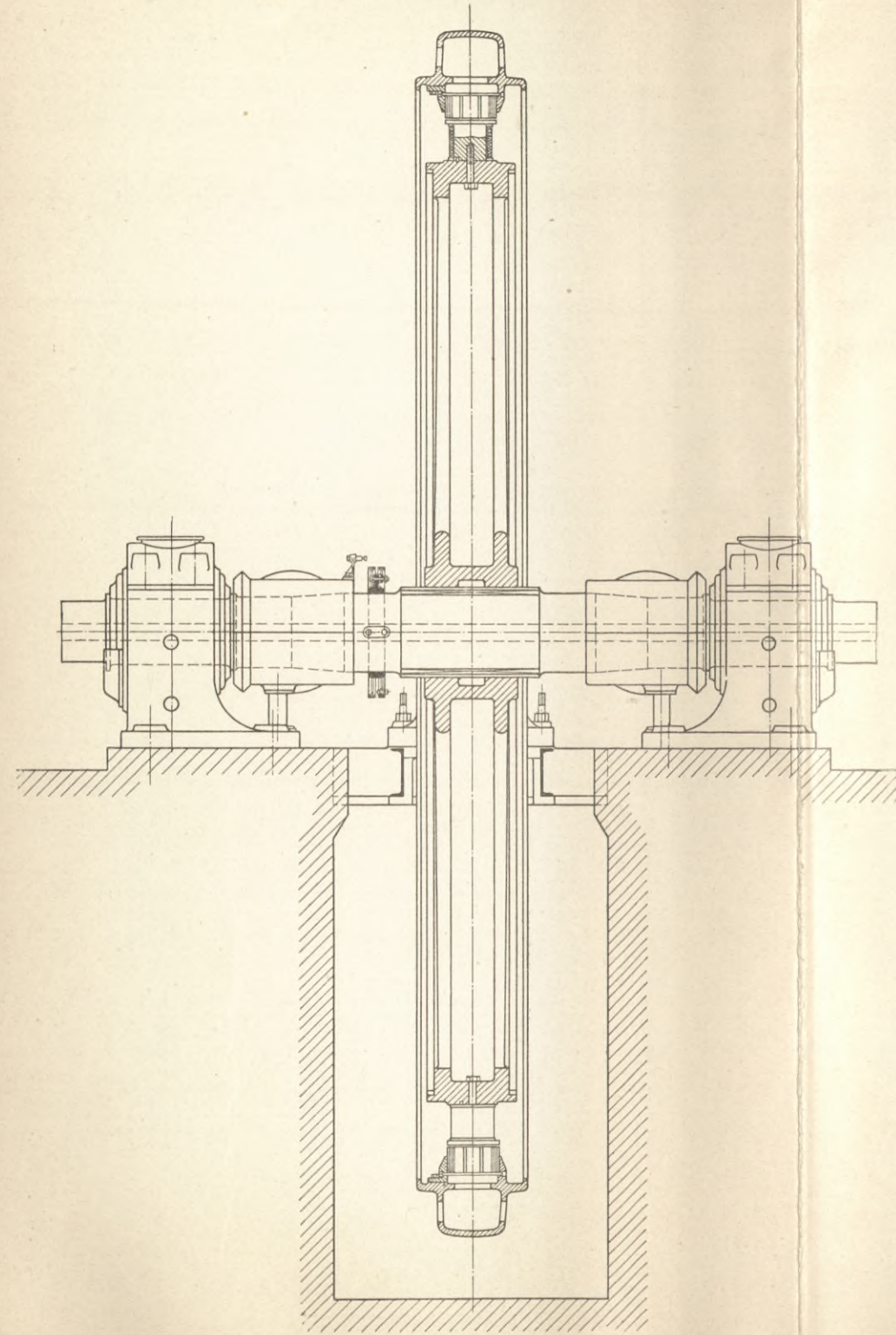




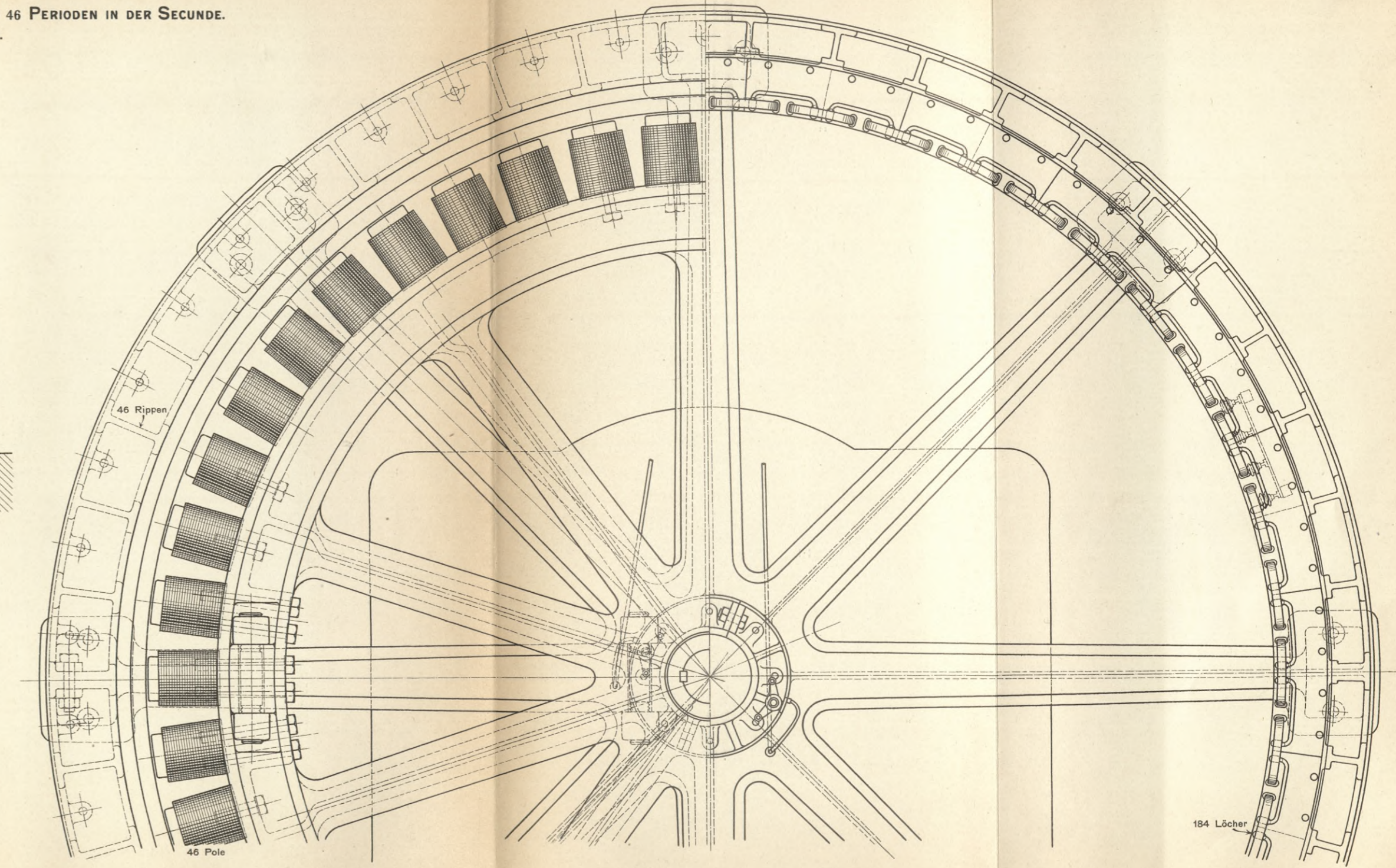
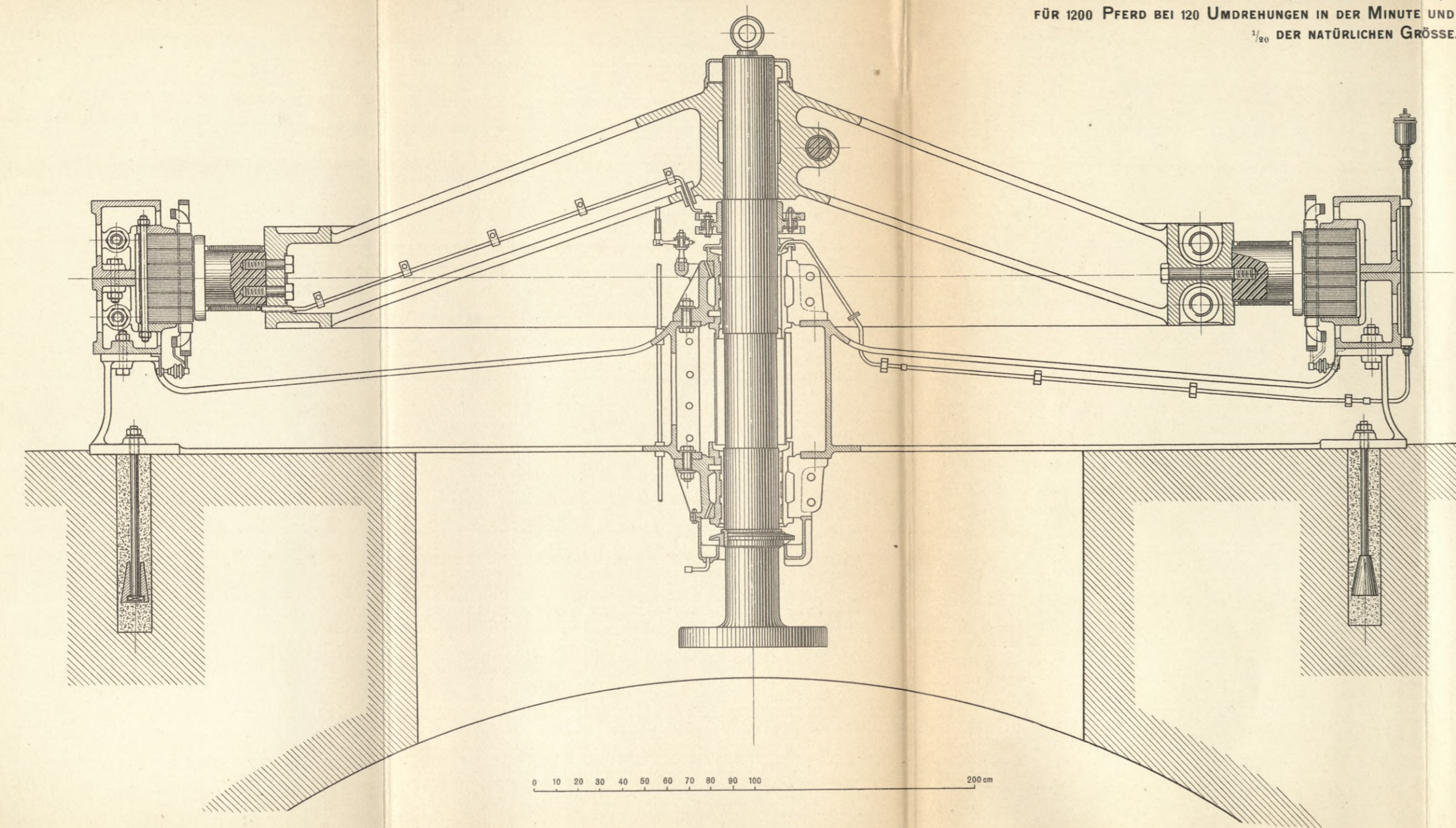
DREIPHASEN-STROMERZEUGER DER ELEKTRIZITÄTS-AKTIENGESELLSCHAFT VORMALS SCHUCKERT & CO. IN NÜRNBERG.

MODELL WJD 2900/94 FÜR 2900 · COS φ KILOWATT, 5500 VOLT BEI 50 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 94 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.

HAUPTZEICHNUNG CA. 1/100, NEBENZEICHNUNG CA. 1/6 DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



ZWEIPHASEN-STROMERZEUGER VON BROWN, BOVERI & CO. IN BADEN (SCHWEIZ),
AUFGESTELLT IN CHÈVRES,
FÜR 1200 PFERD BEI 120 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE UND 46 PERIODEN IN DER SECUNDE.
¹/₂₀ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



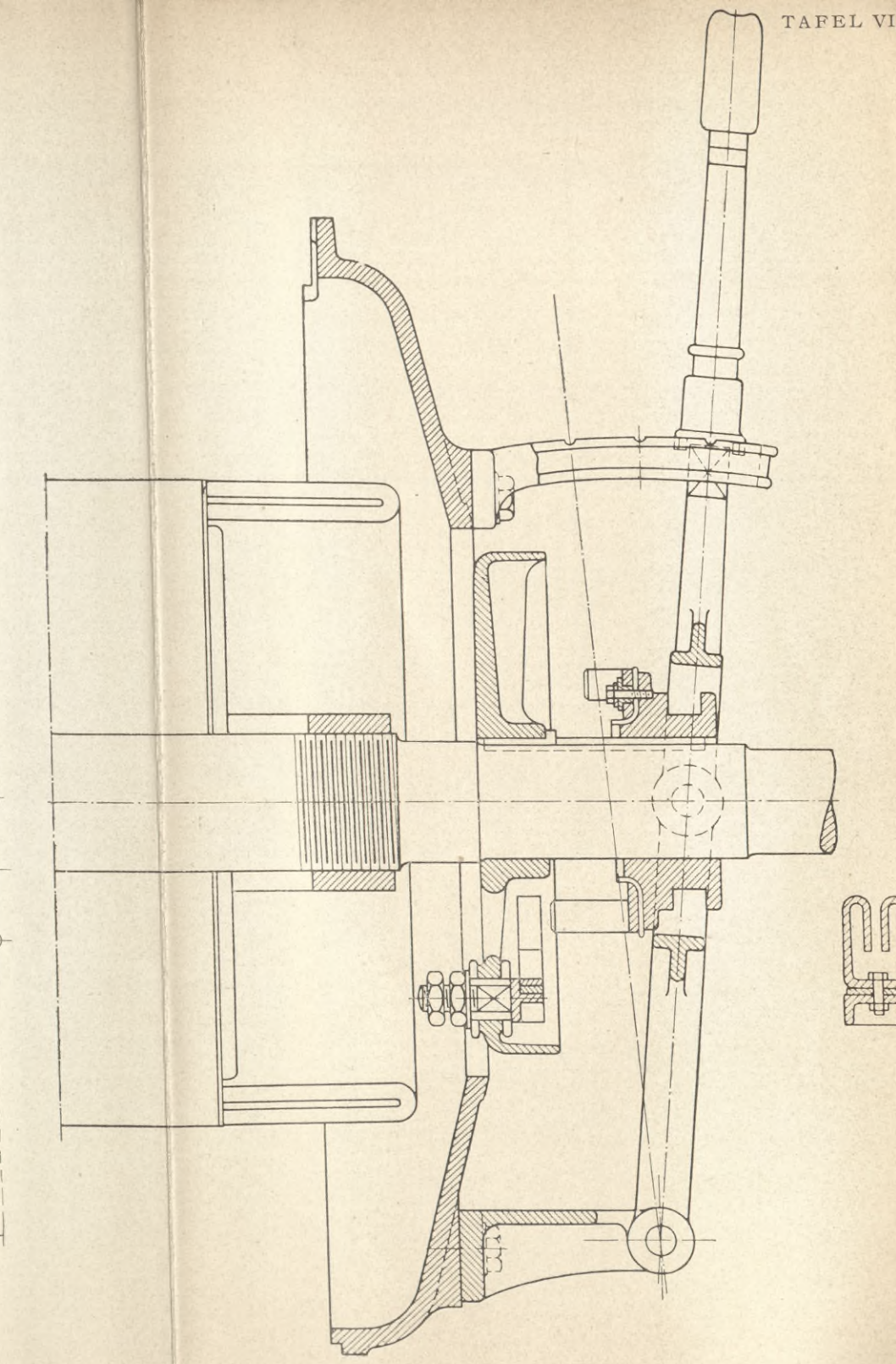
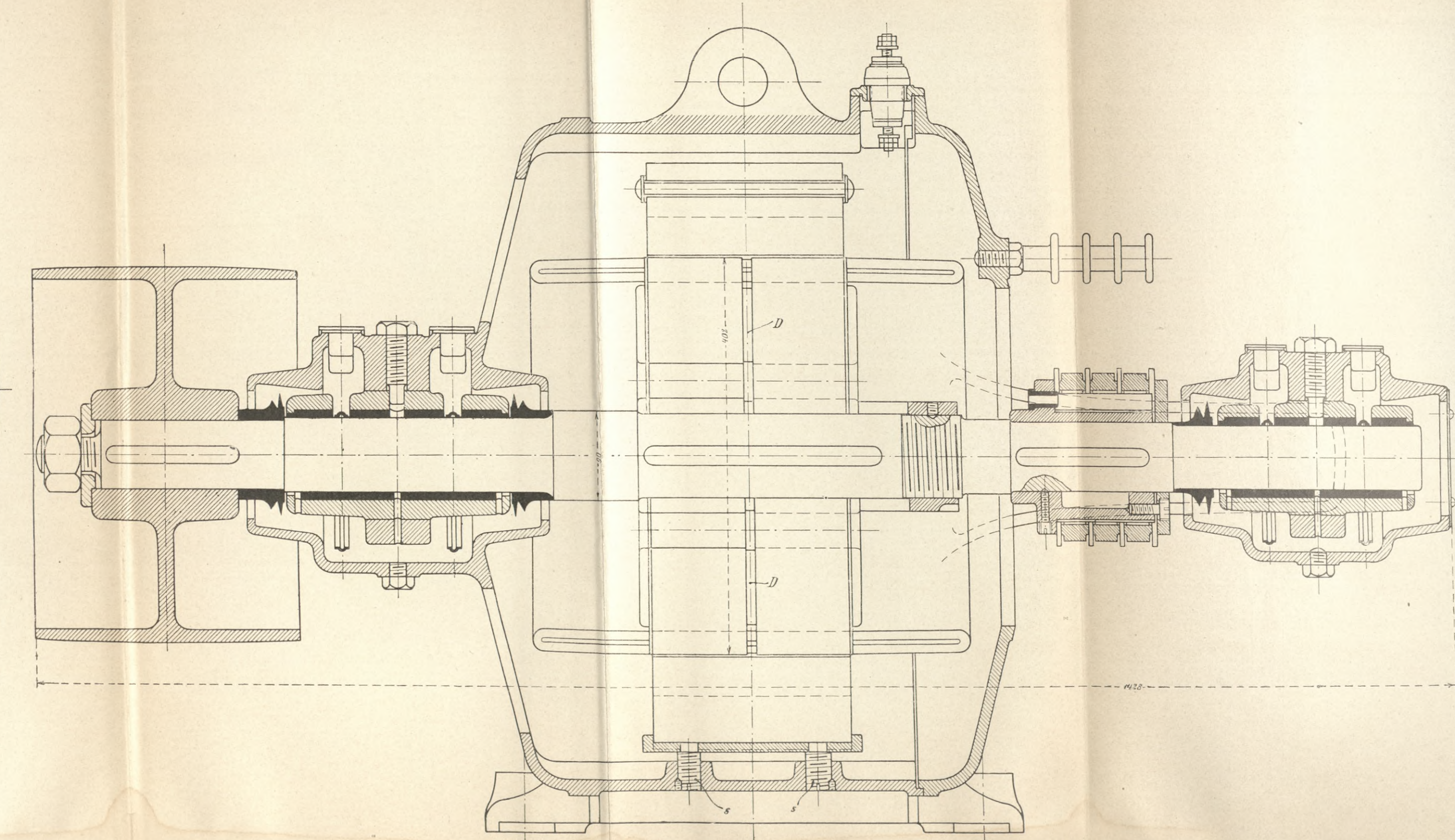
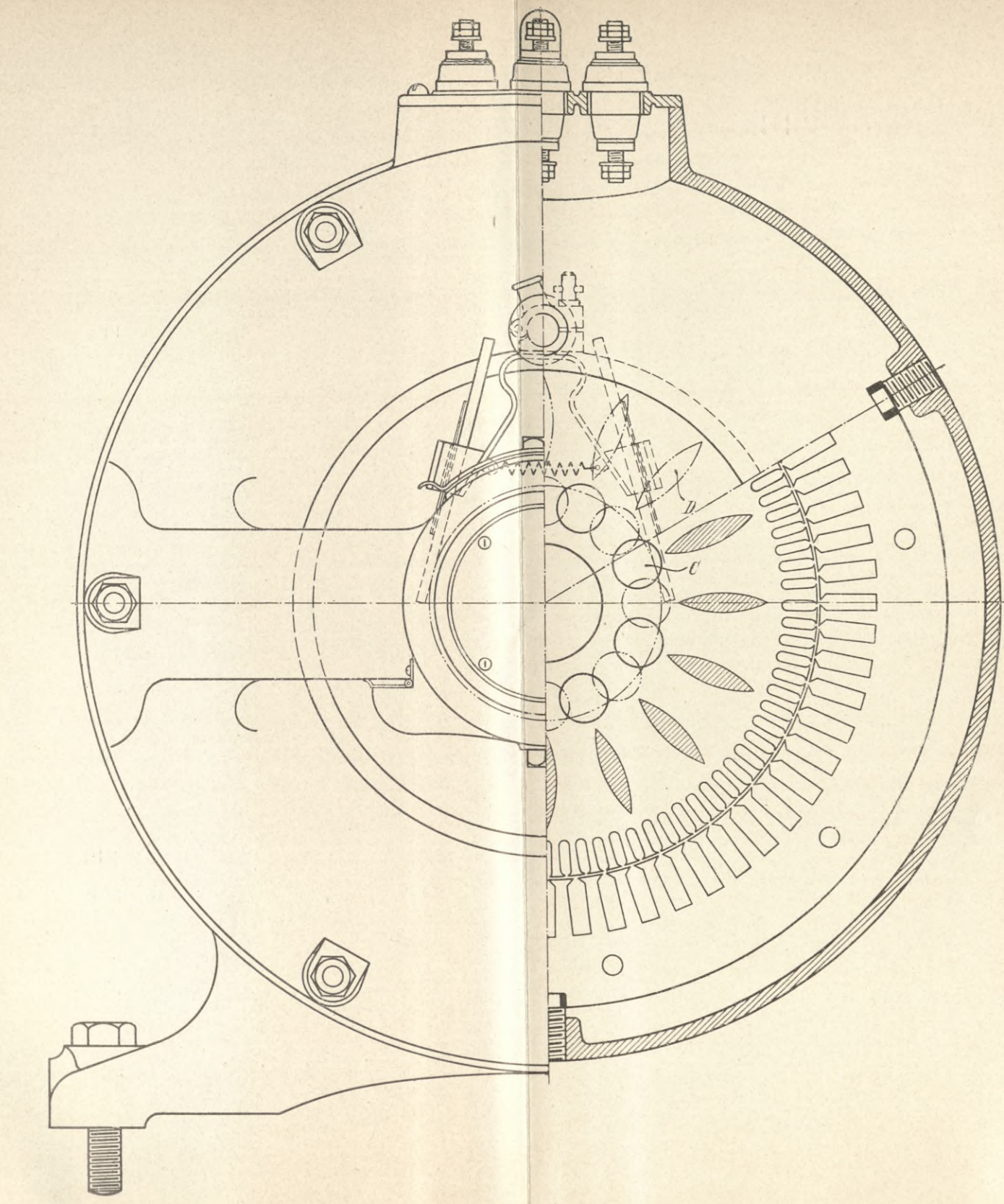


BIBLIOTEKA

KRAKÓW

Politechniczna

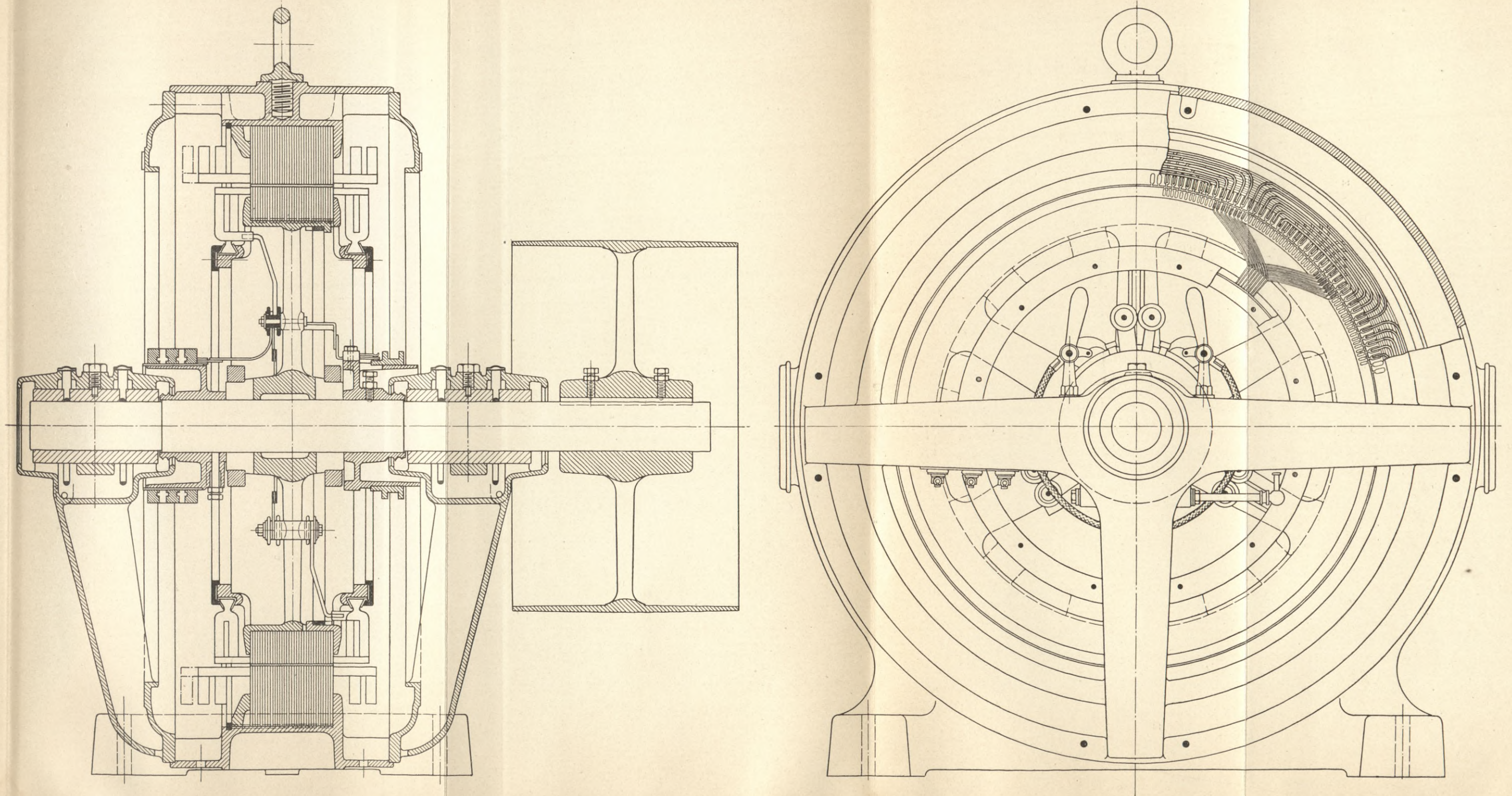
DREIPHASENMOTOR DER SIEMENS & HALSKE AKTIENGESELLSCHAFT IN BERLIN-CHARLOTTENBURG,
MODELL D M 20-1000 FÜR 40 PFERD UND 980 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.
AUSFÜHRUNG MIT SCHLEIFRINGEN UND MIT GEGENSCHALTUNG.
1/4 DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



SH



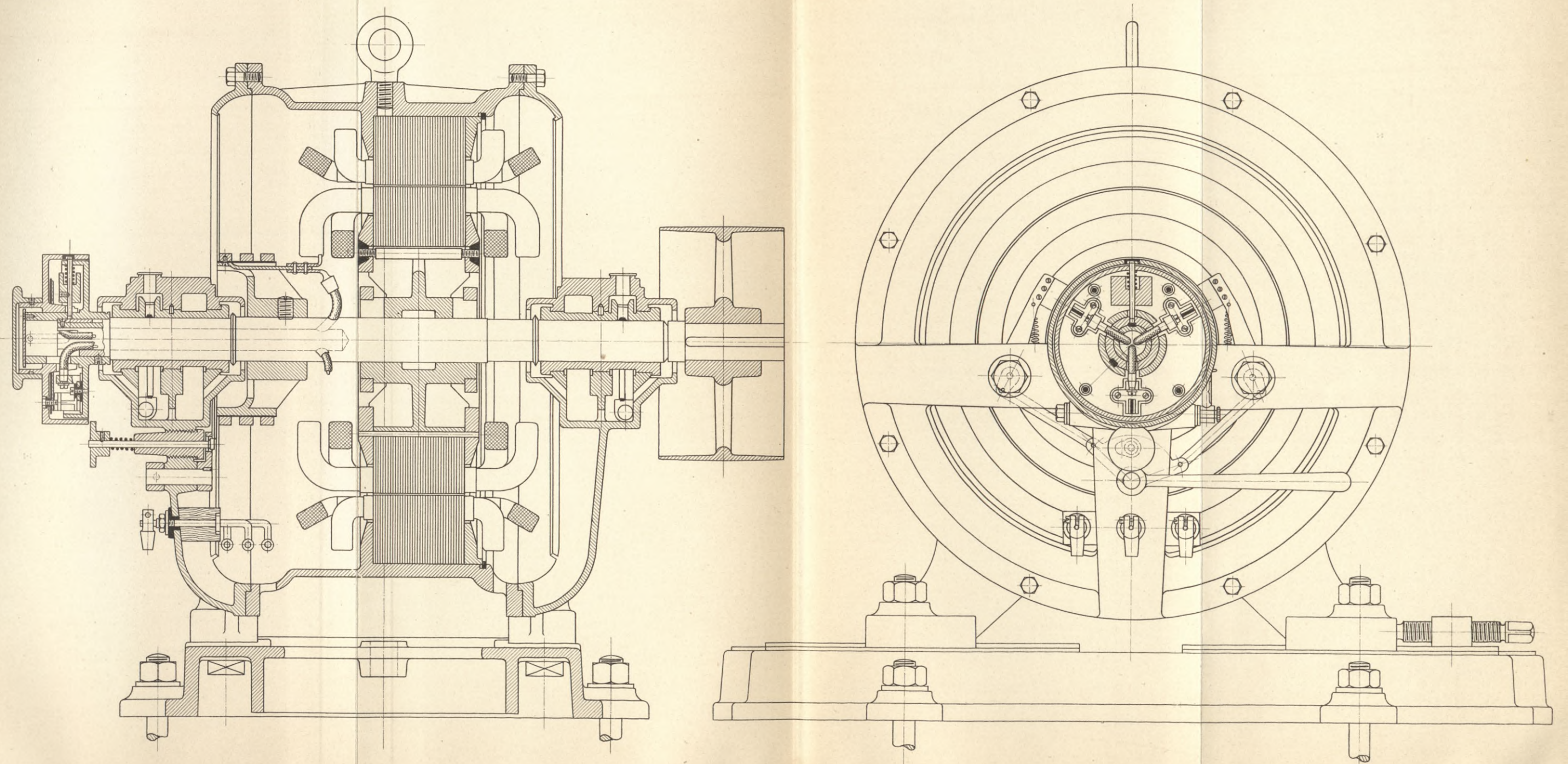
DREIPHASENMOTOR DER ALLGEMEINEN ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT IN BERLIN.
MODELL HD 1000 FÜR 100 PFERD BEI 190 VOLT, 50 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 480 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.
 $\frac{1}{12}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



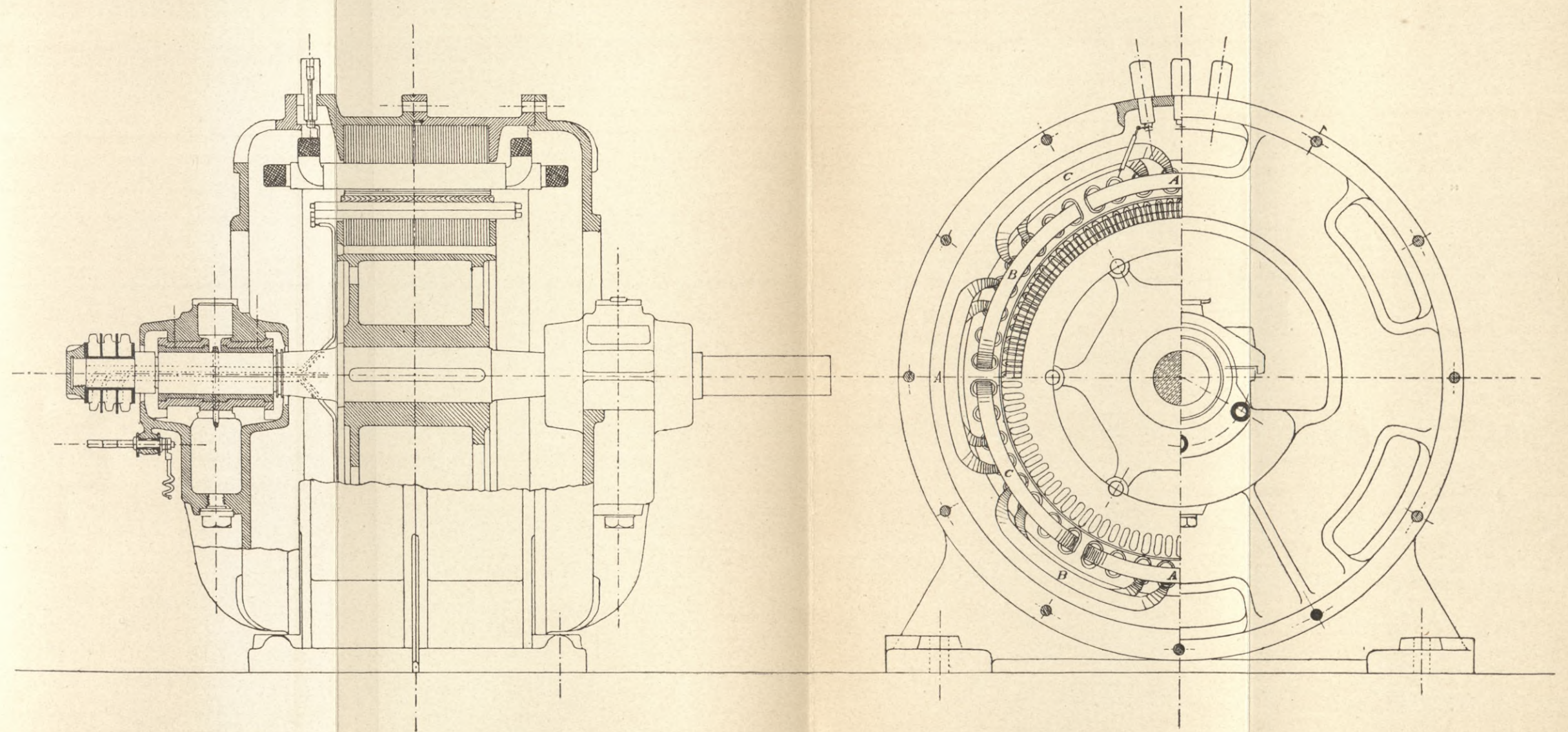
DREIPHASENMOTOR DER ELEKTRIZITÄTS-AKTIENGESELLSCHAFT VORMALS SCHUCKERT & CO. IN NÜRNBERG.

MODELL NA 17 FÜR 17 PFERD BEI 500 VOLT, 50 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 965 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE, $\cos \varphi = 0,9$.

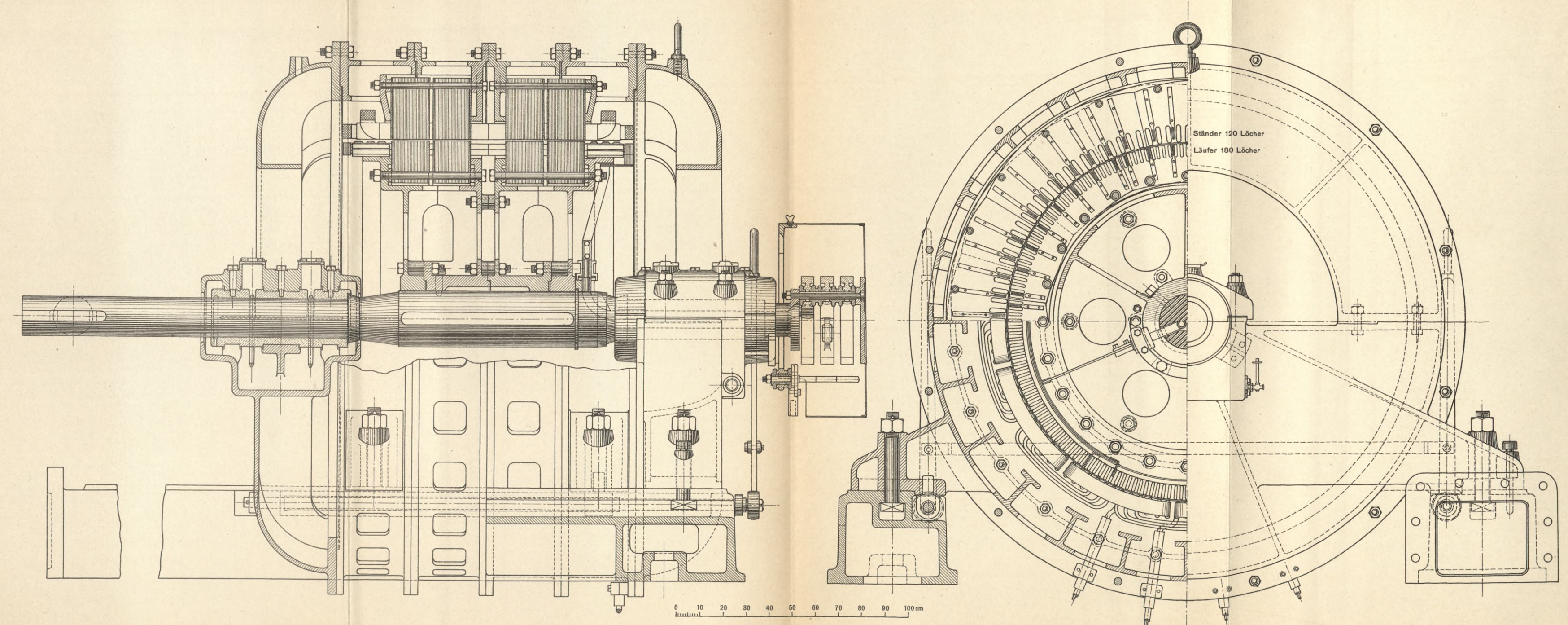
$\frac{1}{6}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



DREIPHASEN-MOTOR VON BROWN, BOVERI & CO. IN BADEN (SCHWEIZ),
FÜR 100 PFERD BEI 5000 V UND 600 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.
 $\frac{1}{10}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.

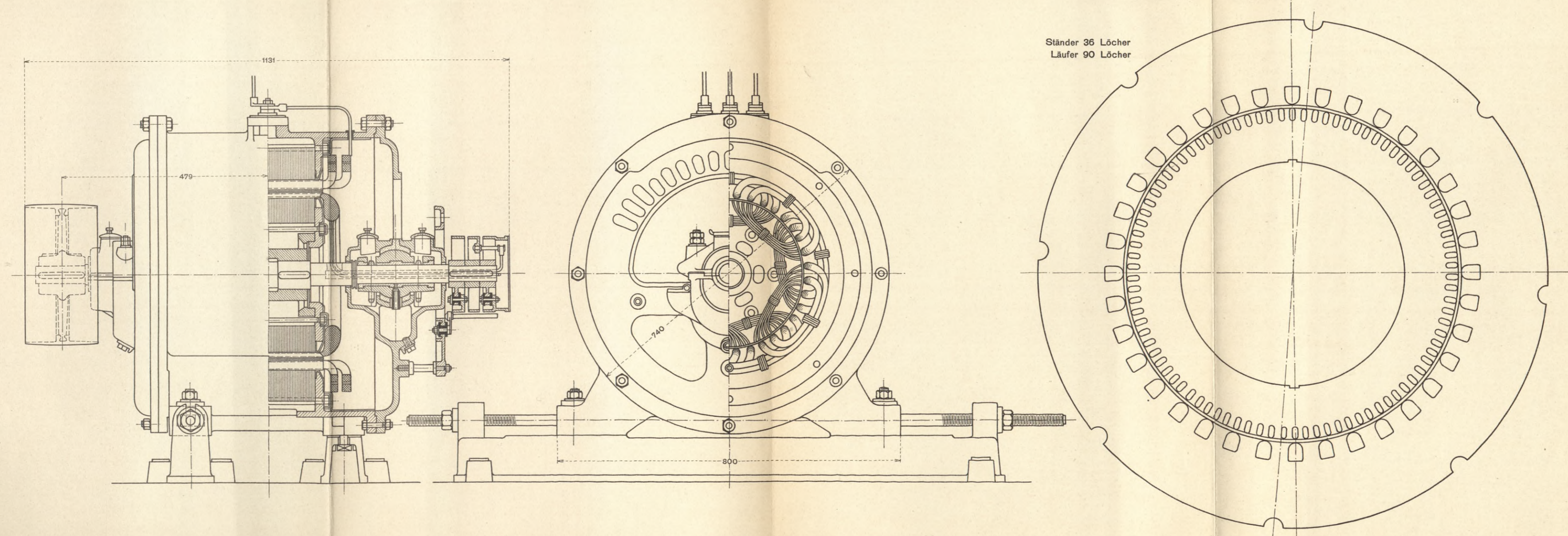


ZWEIPHASEN-MOTOR VON BROWN, BOVERI & Co. IN BADEN (SCHWEIZ),
 AUFGESTELLT IN GENÈVE,
 FÜR 1000 PFERD BEI 2500 VOLT UND 544 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.
 $\frac{1}{15}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.





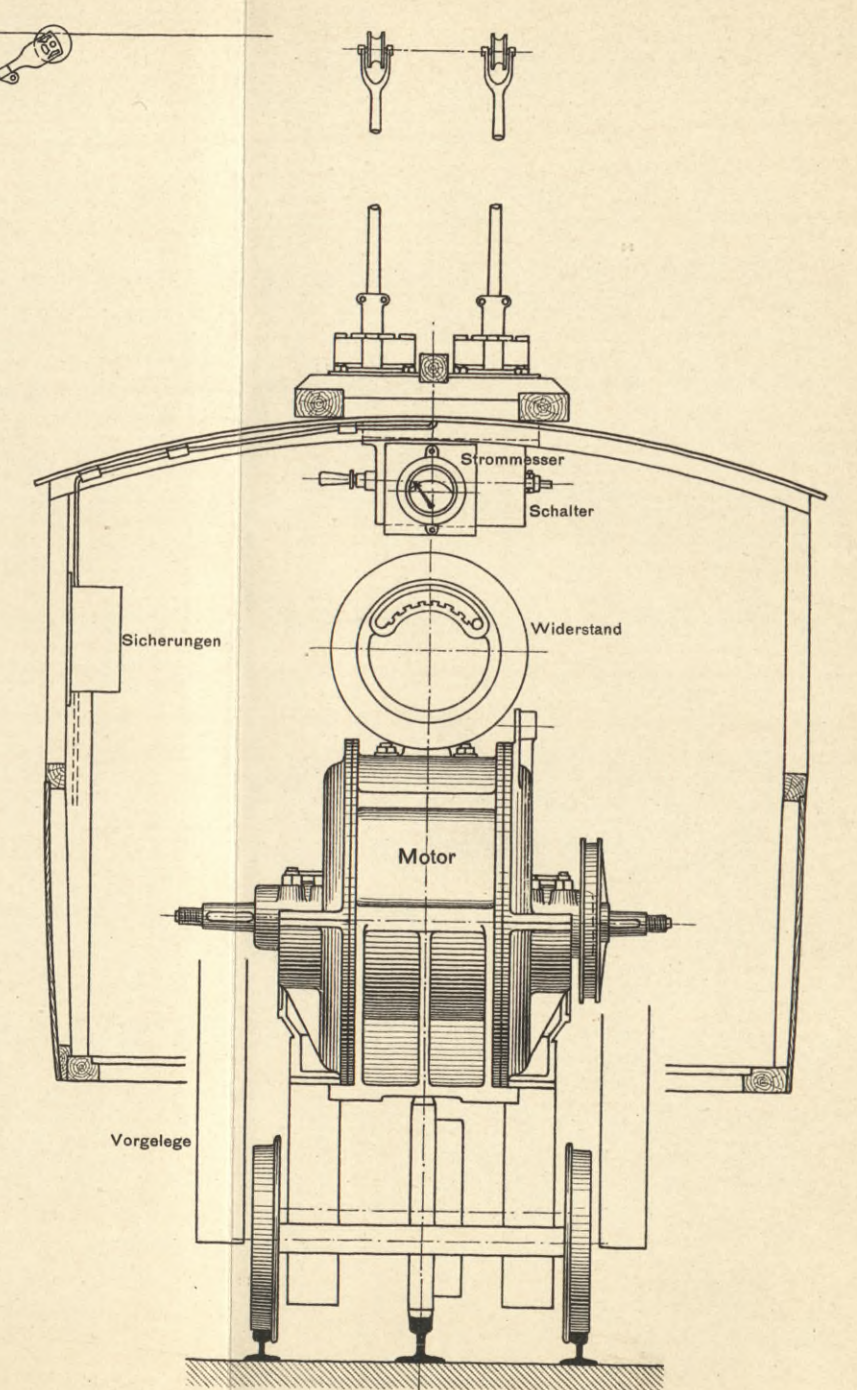
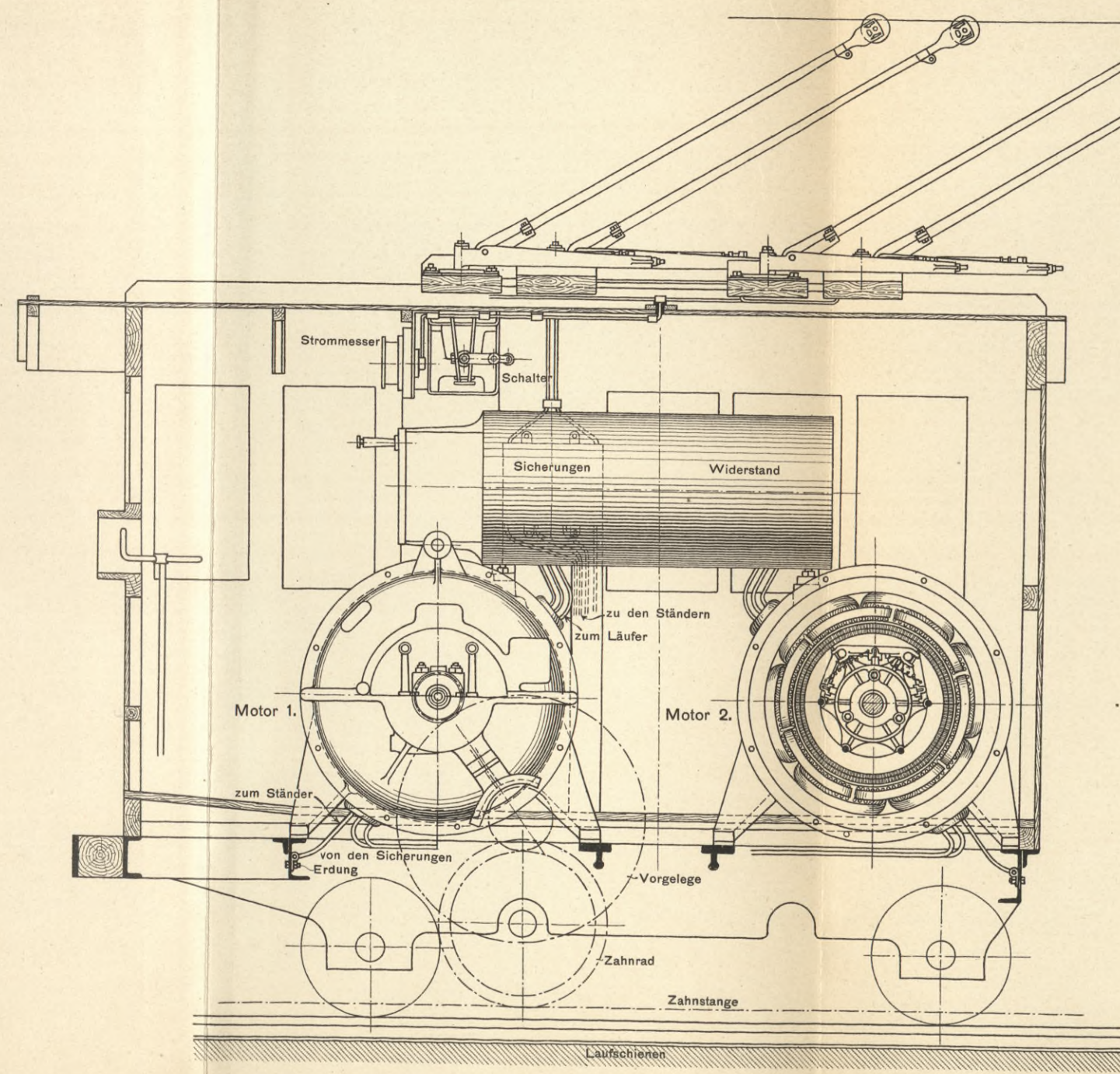
DREIPHASEN-MOTOR VON KOLBEN & CO. IN PRAG,
FÜR 16 PFERD BEI 840 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE UND 42 PERIODEN IN DER SECUNDE,
ODER FÜR 20 PFERD BEI 1000 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE UND 50 PERIODEN IN DER SECUNDE.
HAUPTZEICHNUNG $\frac{1}{5}$, NEBENZEICHNUNG $\frac{1}{5}$ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.





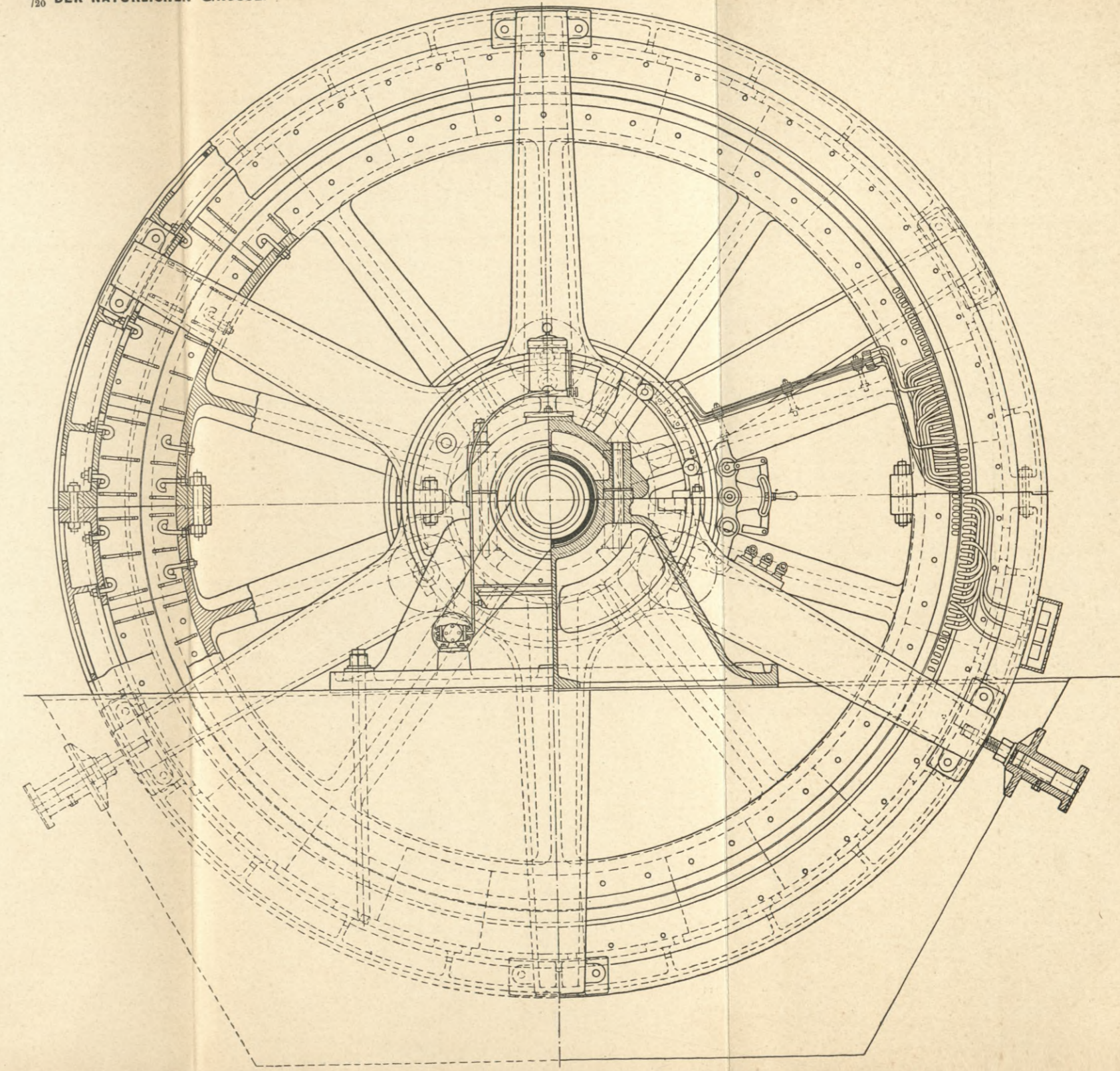
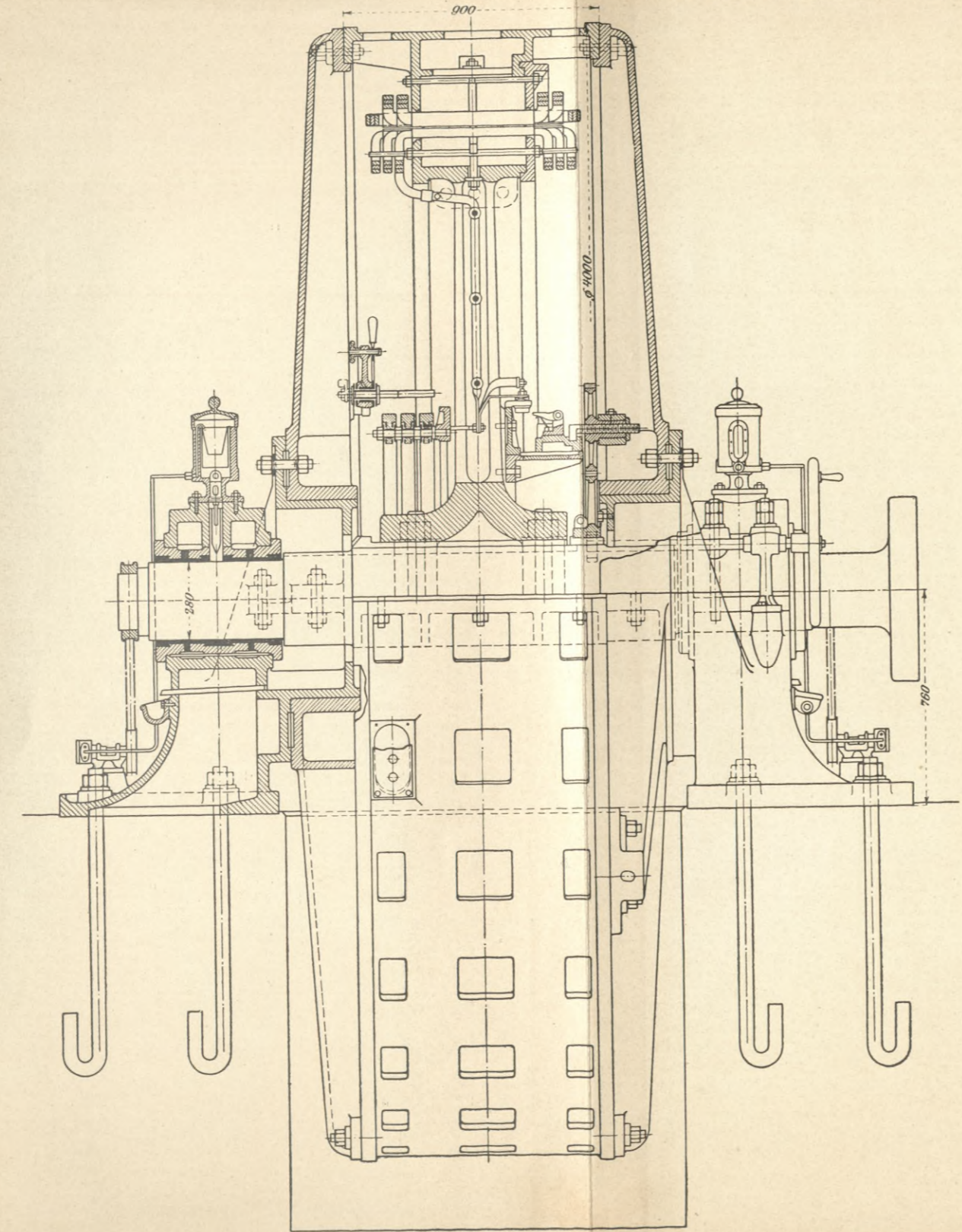
LOCOMOTIVE DER JUNGFRAU-BAHN
VON BROWN, BOVERI & CO. IN BADEN (SCHWEIZ).

¹/₂₅ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



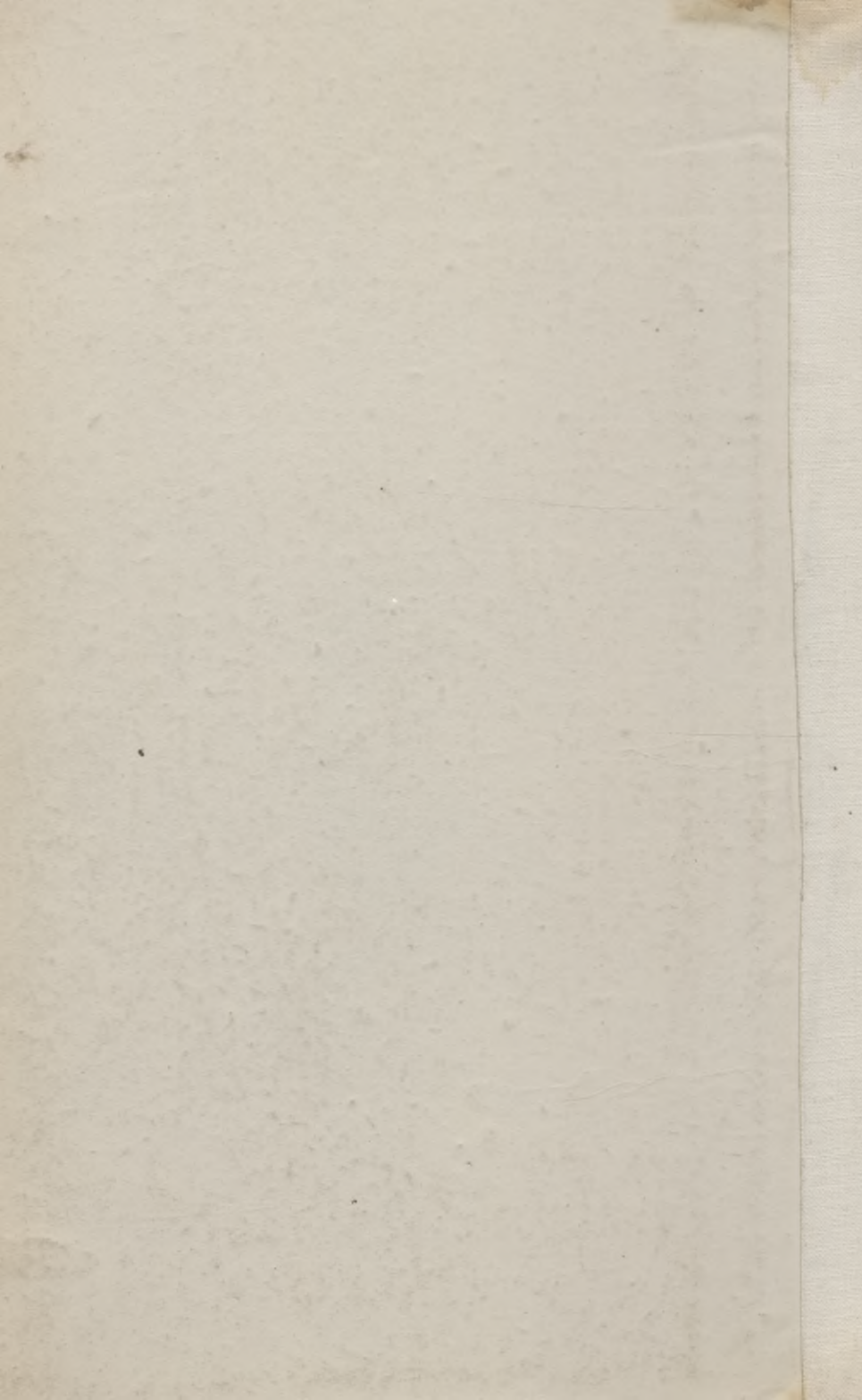


DREIPHASEN-MOTOR DER MASCHINENFABRIK OERLIKON IN OERLIKON BEI ZÜRICH.
FÜR 750 PFERD, 420 KILOWATT BEI 1100 BIS 1900 VOLT, 22,5 PERIODEN IN DER SECUNDE, 75 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.
¹/₂₀ DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.





S.



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRA

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

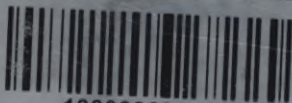
Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-5467

Druk. U. J. Zam. 356. 10.000.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



1000029911