

Hobart-Königslöw,
Gleichstrommaschine



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294749

Der
Entwurf der Gleichstrommaschine.

Von
H. M. Hobart,
M. I. E. E., Mem. A. I. E. E.

Deutsche Bearbeitung
von
A. von Königslöw,
Ingenieur.

Mit 104 Textfiguren und 6 Tafeln.

Mittweida.

Verlag der Polytechnischen Buchhandlung (R. Schulze).
1908.

II 5215



Akt. Nr. 4614/50

W

Vorwort des Übersetzers.

Die vorliegende Übersetzung des Buches: „Continuous-Current Dynamo Design von H. M. Hobart“ verfolgt, wie das Original, den Zweck, den Anfänger über die wichtigsten Fragen bei dem Entwurf der Gleichstrommaschine aufzuklären und ihn auf die eintretenden Schwierigkeiten und ihre Beseitigung hinzuweisen.

Die Berechnung der Gleichstrommaschine ist in einer bereits ausserordentlich ausgedehnten Literatur behandelt. Trotzdem scheint es dem Übersetzer, als ob besonders für den Anfänger eine Anleitung fehlt, welche alle schwierigen und unübersichtlichen Formeln nach Möglichkeit vermeidet und an durchgeführten Beispielen einen einfachen Berechnungsgang klar macht, der zu brauchbaren Resultaten führt.

Vor allem muss der Studierende den Sinn und die Bedeutung der Formeln ohne Schwierigkeit übersehen können, wenn er sie sinngemäss anwenden soll. Auch die genaueste Formel und die beste Konstante führt bei verständnisloser Anwendung oft zu technisch Unbrauchbarem oder Unmöglichem.

Übersetzer hat in seinem Beruf reichlich Gelegenheit zu beobachten, welche Schwierigkeiten für das Verständnis und die Anwendung dem Anfänger die Wicklungsschrittformeln — um nur diesen einen Fall herauszugreifen — bereiten. Die Folge ist, dass der theoretische Teil des betreffenden Werkes als zu „hoch“ nicht beachtet wird, und nur ein der gestellten Aufgabe einigermaßen entsprechendes Beispiel sklavisch nachgeahmt wird.

Diese Lücke soll die Übersetzung einigermaßen ausfüllen.

Formeln wurden nach Möglichkeit vermieden, der Leser soll sich bei jedem Beispiel darüber klar werden, warum er so oder so rechnet.

Soweit es für das allgemeine Verständnis nötig schien, wurde der Text durch Figuren und Konstruktionszeichnungen erläutert. Auf vollständige und reichhaltige Konstruktionszeichnungen wurde verzichtet, da dieselben zur Genüge in der übrigen Literatur enthalten sind.

Um sich weiter zu bilden wird der Anfänger, nachdem er einen allgemeinen Überblick bekommen hat, mit grösserem Nutzen die tiefer in den Stoff eindringenden Fachwerke studieren, als wenn er von vornherein mit Formeln und Konstanten getränkt wird, die ihm in ihrer Unantastbarkeit jedes selbständige Denken unnötig oder gar unmöglich machen.

Der Übersetzer drückt den Firmen, die ihn mit Zeichnungen und Angaben über ausgeführte Maschinen unterstützten, auch an dieser Stelle seinen verbindlichsten Dank aus.

Mittweida, im März 1908.

A. von Königslöw.

Inhalts-Verzeichnis.

Kapitel I.	Seite 1.
Erste Annahmen für den Entwurf, Wicklung.	
Grundformeln, Erfahrungswerte, Ausführung des Ankers, Wicklungen, Wicklungsschritt, Schaltungen.	
Kapitel II.	Seite 19.
Anker.	
Berechnung des Ankers: Widerstand, Stromwärmeverlust, Eisen-Verluste, Erwärmung. Beispiele: 400 KW-, 100 KW-Generator.	
Kapitel III.	Seite 32.
Magnetische Verhältnisse.	
Materialkurven, Gestell, Pol- und Polschuh-Konstruktionen. Berechnung der Ampèrewindungen für Ankereisen, Luft, Zähne, Pole, Joch. Beispiel: 400 KW-Generator.	
Kapitel IV.	Seite 45.
Ankerrückwirkung.	
Entmagnetisierende und quermagnetisierende Ankerampèrewindungen, ihr Einfluss auf die Erregung. Beispiel: 400 KW-Generator.	
Kapitel V.	Seite 57.
Feldspule. Berechnungsbeispiele.	
Raumfaktor. Nebenschlusspule, Hauptstromspule. Beispiele: 400 KW-, 1000 KW-Generator.	
Kapitel VI.	Seite 70.
Kommutator.	
Konstruktion, Stromabnahme, Bürsten. Beispiel: 400 KW-, 100 KW-Generator.	

VI

Kapitel VII. Seite 76.

Wirkungsgrad.

Lager- und Luftreibung. Konstante, veränderliche Verluste.

Kapitel VIII. Seite 79.

Einfluss der Ankerwindungs- und Polzahl auf den Entwurf.

Kommutierung.

Ankerwindungszahl, Polzahl, ihre Bestimmung für die drei Schaltungsarten, Ankerrückwirkung. Stromwendung, Funkenbildung, Reaktanzspannung, Ursachen der Funkenbildung bei kleiner Reaktanzspannung.

Kapitel IX. Seite 99.

Maschinenkonstante.

Entwicklung und Brauchbarkeit der Maschinenkonstante. Bestimmung des besten Entwurfes, Beispiel. Materialkosten, Herstellungskosten, Selbstkosten. Abänderung des Entwurfes für andere Tourenzahl. Kostenkonstante.

Kapitel X. Seite 122.

Abnormale Maschinen.

85 KW-Maschine der Deutschen Elektr.-Gesellschaft zu Aachen, 110 PS-kompensierter Gleichstrommotor der Berliner Maschinenbau-A.-G., vorm. L. Schwartzkopf.

Kapitel XI. Seite 135.

Wendepolmaschinen.

Zweck der Wendepole, Nachteile, Berechnung und Beispiel: 1000 KW-Hochspannungs-Generator.

Kapitel XII. Seite 148.

Aequipotentialverbindungen.

Zweck, Ausführung. Bestimmung der Anzahl der Verbinder und der Anschlusspunkte. Beispiele: 100 KW-, 300 KW-Generator.

Anhang. Seite 152.

Tabelle von sechs ausgeführten Maschinen.

Entwurf der Gleichstrommaschine.

Kapitel I.

Erste Annahmen für den Entwurf, Wicklung.

Die Berechnung der Gleichstrommaschine stützt sich zum Teil auf die elementaren Gesetze der Elektrotechnik, zum Teil auf die Erfahrungen, die man in der Praxis an ausgeführten Maschinen gesammelt hat.

Die in Frage kommenden Gesetze sind:

$J = \frac{E}{W}$ Stromstärke in Ampère gleich Spannung in Volt durch Widerstand in Ohm.

$W = c \cdot \frac{l}{q}$ Widerstand in Ohm gleich spezifischer Widerstand multipliziert mit Länge in m durch Querschnitt in mm^2 .

$H = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{n \cdot i}{l}$ Kraftliniendichte in Luft gleich $\frac{4\pi}{10}$ mal Ampèrewindungen durch Kraftlinienlänge in cm .

$B = \mu \cdot H$ Kraftliniendichte in Eisen gleich Permeabilität mal entsprechende Kraftliniendichte in Luft; meist direkt bestimmt aus der Ampèrewindungszahl mit Hülfe der Magnetisierungskurven (Fig. 29).

$E = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}$ Elektromotorische Kraft gleich Kraftliniendichte mal Leiterlänge in cm mal Leitergeschwindigkeit in cm pro Sekunde multipliziert mit 10^{-8} .

Zu den praktischen Erfahrungen gehören hauptsächlich die Beobachtungen über Erwärmung und Funkenbildung der Maschinen.

Der Berechnungsgang wird nun der sein, dass man die Dimensionen der zu entwerfenden Maschine so wählt, dass sie die geforderte Leistung bei möglichst geringem Materialaufwande abzugeben imstande ist, und dass man an Hand der Erfahrungen an anderen

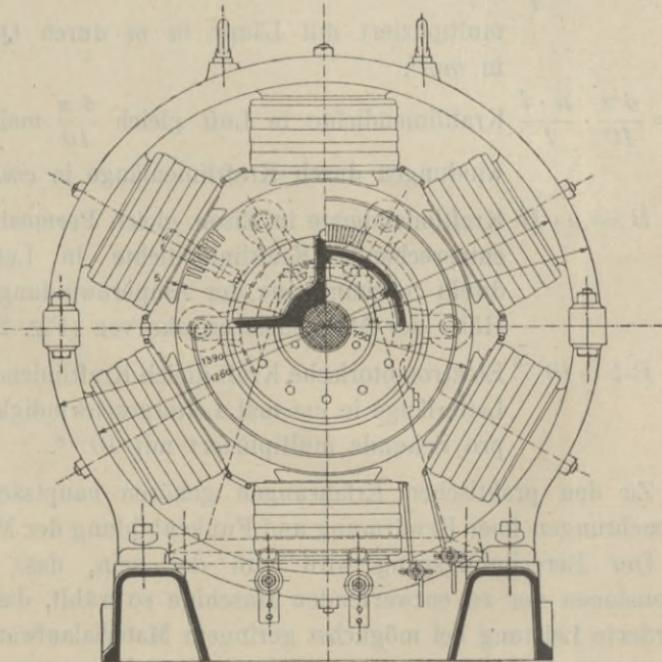
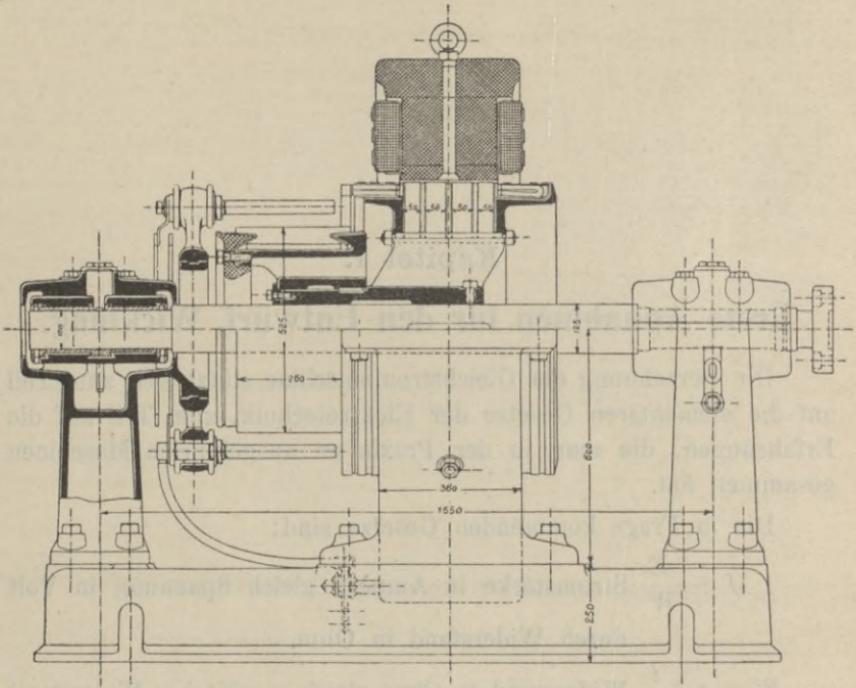


Fig. 1.

ausgeführten Maschinen prüft, ob die Erwärmung der verschiedenen Maschinenteile und die eventuelle Funkenbildung am Kollektor in zulässigen Grenzen bleiben.

Für die Dimensionen lassen sich leicht folgende Beziehungen aufstellen, die wir an dem Generator der Figur 1 für 150 KW bei 200 Volt und 500 Umdrehungen pro Minute ableiten wollen:

Die in der Literatur häufiger*) behandelte Maschine ist sechspolig, die Ankerwicklung besteht aus 6 parallelen Teilen, wie in Figur 2 teilweise dargestellt. Der Übersichtlichkeit wegen sind wenige Windungen angegeben, so dass nur der Wicklungsverlauf klar wird. Man sieht, wie von der linken — Bürste der Strom einen Leiter neben dem ersten Nordpol links durchläuft, dann einen

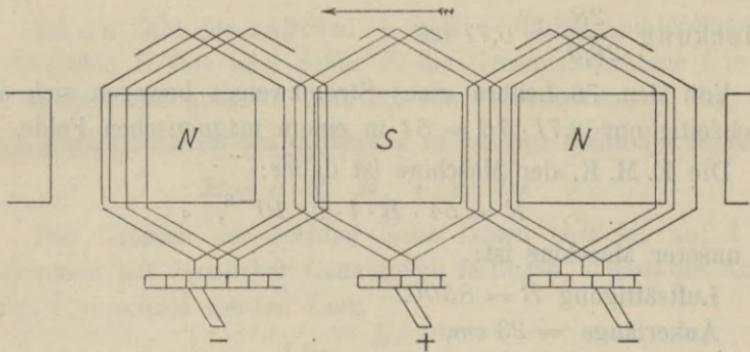


Fig. 2. Schaltung der Ankerleiter des 150 KW-Generators.

Leiter neben dem ersten Südpol, zurück, in dem die ganze Wicklung nach rechts fortschreitet unter dem ersten Nordpol, weiter unter dem ersten Südpol und so fort bis der letzte Leiter rechts neben dem Südpol verlaufend an die + Bürste angeschlossen ist. Dies ist ein Stromkreis. Der zweite Stromkreis verläuft weiter von der + Bürste unter dem ersten Südpol und zweiten Nordpol bis zur zweiten — Bürste. Die Leiter eines Stromkreises befinden sich immer unter dem gleichen Polpaar, die Zahl der parallelen Ankerstromzweige ist gleich der Polzahl, man bezeichnet diese Wicklungsart als reine Parallelwicklung.

Da die Stromkreise parallel geschaltet sind, so ist klar, dass die elektromotorischen Kräfte der einzelnen Stromkreise unter sich

*) Fischer-Hinnen: Die Gleichstrommaschine. E. Arnold: Die Gleichstrommaschine.

gleich, und gleich der E. M. K. der Maschine sind. Ferner, ist die Gesamtzahl der Ankerleiter 456, so ist die Leiterzahl pro Stromzweig $\frac{456}{6} = 76$.

Die Ankerleiter bewegen sich mit der Umfangsgeschwindigkeit des Ankers v cm/sek durch die magnetischen Felder von der Sättigung B , es wird also in jedem Leiter von der Länge l cm (senkrecht zur Bewegungsrichtung gemessen), eine E. M. K. = $B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}$ Volt erzeugt.

Nun überdecken die Pole nicht die ganze Polteilung, sondern der Polbogen ist 28 cm, die Polteilung 39,3 cm, sodass das Verhältnis von dem Polbogen zu der Polteilung, die sogenannte Polbedeckung $\frac{28}{39,3} = 0,71$ ist.

Von den 76 Leitern eines Stromzweiges bewegen sich also gleichzeitig nur $0,71 \cdot 76 = 54$ in einem magnetischen Felde.

Die E. M. K. der Maschine ist daher:

$$E = 54 \cdot B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8},$$

bei unserer Maschine ist:

Luftsättigung $B = 8500$,

Ankerlänge = 23 cm,

Ankerdurchmesser = 75 cm,

Ankerumfangsgeschwindigkeit $75 \cdot \pi \cdot \frac{500}{60} = 1960$ cm/sek,

also

$$E = 54 \cdot 8500 \cdot 23 \cdot 1960 \cdot 10^{-8} \\ = 206 \text{ Volt,}$$

$$\text{Ankerstrom } \frac{150000}{200} = 750 \text{ Ampère,}$$

$$\text{Strom pro Zweig } \frac{750}{6} = 125 \text{ Ampère,}$$

$$\text{Leiterdimensionen } 12 \cdot 2,4 = 28,8 \text{ mm}^2.$$

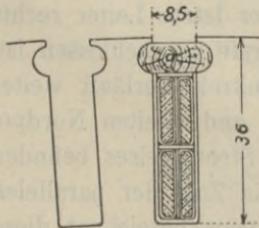


Fig. 3. Nut des 150 KW-Generators.

Die Nutenform zeigt Figur 3, es liegen je zwei Stäbe neben und übereinander, also pro Nut vier Stäbe, daraus Nutenzahl

$\frac{456}{4} = 114$. Die Breite einer Nut ist 0,85 cm, die Breite sämtlicher Nuten $114 \cdot 0,85 = 97$ cm.

Der Ankerumfang aussen ist $75 \cdot \pi = 236 \text{ cm}$, im Grund der Nuten $(75 - 2 \cdot 3,6) \cdot \pi = 213 \text{ cm}$, mithin Gesamtzahnbreite oben $236 - 97 = 139 \text{ cm}$, unten $213 - 97 = 116 \text{ cm}$, Breite eines Zahnes oben $\frac{139}{114} = 1,22 \text{ cm}$, unten $\frac{116}{114} = 1,02 \text{ cm}$. Die Tiefe des Eisens unterhalb der Nuten ist $11,4 \text{ cm}$. Als reine Eisenlänge des Ankers bleibt nach Abzug von 30 mm für die drei Luftspalte und, wenn man die Isolation zwischen den einzelnen Blechen zu 10% der Gesamtbreite schätzt, $0,9 \cdot 20 = 18 \text{ cm}$.

Damit sind alle Dimensionen für die genaue Durchrechnung des Ankers gegeben; in Verbindung mit ihr sei die bereits abgeleitete Beziehung für die E. M. K. der Maschine näher untersucht.

Ist die Zahl der zwischen $+$ und $-$ Bürsten hintereinandergeschalteten Drähte oder Stäbe Z , die Gesamtankerlänge l in cm , die mittlere Sättigung in Luft B_l , die Polbedeckung β , die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers v in cm pro Sekunde, so ist

$$E = \beta \cdot Z \cdot B_l \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}.$$

Die Grössen der rechten Seite lassen sich bis auf l von vornherein mit ziemlicher Genauigkeit festlegen, sodass die Ankerlänge l berechnet werden kann

$$l = \frac{E \cdot 10^8}{\beta \cdot Z \cdot B_l \cdot v}.$$

Das Verhältnis von Polbogen zu Polteilung β beeinflusst die Zahl der gleichzeitig induzierten Leiter, je grösser β ist, um so mehr wird also das Ankerkupfer ausgenutzt, andererseits wird aber der Raum zwischen zwei benachbarten Polkanten um so kleiner, wodurch die Kommutierung verschlechtert wird. Bei normalen Maschinen, mit Ausnahme der zweipoligen, liegt β fast immer in der Nähe von $0,7$, ist die Polzahl der Maschine im Verhältnis zur Maschinenleistung gross, so kann β bis auf $0,6$ hinunter, umgekehrt bei verhältnismässig kleiner Polzahl bis auf $0,75$ hinaufgehen.

Bei zweipoligen Maschinen bedingt eine vernünftige Polform oft einen Wert in der Nähe von $0,5$.

Die Zahl der Ankerleiter zwischen zwei Bürsten ist nach unten hin begrenzt durch die Kommutation, dass nämlich die mittlere Spannung zwischen den Kollektorsegmenten etwa

2— 5 Volt bei 110 Volt Maschinenspannung

4— 6 „ „ 220 „ „

5—10 „ „ 550 „ „

beträgt. Bei Parallelschaltung findet man meist die höheren Werte, bei Serienschaltung die niederen Werte.

Aus der Segmentzahl ergibt sich die Windungs- bzw. Drahtzahl, je nach der Stromstärke pro Zweig, nach folgender Tabelle:

Stromstärke pro Zweig	Windungen pro Segment	Leiter pro Segment
über 60 Amp.	1	2
40—60 „	2	4
20—40 „	3	6
10—20 „	4	8
bei 10 „	5	10

Die Sättigung in Luft liegt bei Maschinen mit Nutenanker zwischen 6000 und 11000, sie ist abhängig von dem Verhältnis der Zahnbreite zur Nutenbreite und von der Sättigung in den Zähnen, welche meist hoch, 18000—22000, bei grossen Maschinen bis zu 25000 gewählt wird. In mittleren Verhältnissen hat der Zahn annähernd die gleiche Breite (in der Mitte gemessen), die wie die Nut, sodass bei einer Zahnsättigung von etwa 20000 eine mittlere Sättigung in Luft ungefähr 8000 ist. Bei grosser Luftsättigung kann die Zahl der Ankerleiter klein sein, dagegen ist viel Feldkupfer erforderlich. Bei kleiner Luftsättigung umgekehrt, viel Ankerkupfer, wenig Feldkupfer. Die Sättigung in Anker-eisen unter den Zähnen ist 8000 bis 12000, selten bis 14000.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers v ist bei sonst gleichen Verhältnissen massgebend für die Ausnutzung des Materials, im allgemeinen ist also die Maschine um so billiger, je grösser die Umfangsgeschwindigkeit ist, bei normaler Ausführung der Maschine kann 20 m/sek als obere Grenze mit Rücksicht auf die Kommutierung angenommen werden.

Für schnellaufende Maschinen ist der günstigste Wert etwa **16—18 m pro sek.**, für Maschinen unter 10 KW ca. 14 m pro sek. Bei langsam laufenden Maschinen ergeben sich mitunter die günstigsten Verhältnisse für noch kleinere Werte, bis etwa 12 m pro sek.

Aus der gewählten Umfangsgeschwindigkeit berechnet sich, wenn die Tourenzahl gegeben ist, der Ankerdurchmesser einfach

aus der Beziehung

$$v = D \pi \cdot \frac{n}{60}, \quad D = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot n}.$$

Ist die Tourenzahl beliebig, so muss die Maschine für verschiedene Annahmen durchgerechnet werden, um die günstigsten Bedingungen zu erhalten.

Es ist noch die Polzahl der Maschine zu erwähnen. Zweipolige Maschinen sind nur für kleinere Leistungen bis etwa 20 KW brauchbar, darüber empfiehlt sich die Verwendung von mehrpoligen und zwar

bis 50 KW	4 Pole,
bis 200 „	6—10 „
über 200 „	mehr als 8 „

Allgemein kann man sagen, höhere Tourenzahl entspricht geringer Polzahl und umgekehrt. Für den einzelnen Fall ist auch hier zu untersuchen, für welche Polzahl die günstigsten Bedingungen auftreten. Als erster Anhalt kann dienen, dass der Polbogen annähernd gleich der Ankerlänge sein soll.

Die Anzahl der parallelen Ankerstromzweige ist bei der reinen Parallelschaltung gleich der Polzahl, bei der reinen Serienschaltung gleich zwei, bei der Serienparallelschaltung unabhängig von der Polzahl.

Während man also bei der Parallelschaltung mit dem Querschnitt des Ankerleiters von der Polzahl abhängig ist, kann man bei der Serienparallelwicklung unabhängig von der sonstigen Maschinenanordnung die Dimensionen des Ankerleiters nach Konstruktionsrücksichten wählen.

Für den Querschnitt der Ankerleiter gilt als zulässige Belastung 3—5 Ampère pro mm^2 , bei grossen, langsam laufenden Maschinen 2—3 Ampère pro mm^2 , je nach den Erwärmungsverhältnissen. Selten ist der Querschnitt mit Rücksicht auf den Ankerwiderstand zu wählen, obwohl eine Kontrolle des letzteren nötig ist.

Die der Berechnung zu Grunde gelegte Maschine hatte, wie zum Teil bereits erwähnt, folgende Verhältnisse:

$$\beta = 0,71,$$

Gesamtstanzahl 456, bei 6 Polen und reiner Parallelwicklung
6 parallele Ankerstromzweige, also

$Z = \frac{456}{6} = 76$ *Stäbe* zwischen zwei Bürsten. Für zwei
Stäbe ein Kollektorsegment, also $\frac{76}{2} = 38$ Segmente,

bei 200 Volt ist die mittlere Spannung zwischen zwei Segmenten

$$\frac{200}{38} = 5,25 \text{ Volt,}$$

die Luftsättigung **8500**,

die Polfläche bei 28 cm Polbogen und 23 cm Ankerlänge
 $28 \cdot 23 = 645 \text{ cm}^2$,

die Kraftlinienzahl pro Pol $= 645 \cdot 8500 = 5,5 \cdot 10^6$,

unter einem Pol liegen $0,7 \cdot \frac{114}{6} = 13,5$ Zähne,

Gesamtzahnquerschnitt in der Mitte $13,5 \cdot 1,12 \cdot 18 = 272 \text{ cm}^2$,

Zahnsättigung $\frac{5,5 \cdot 10^6}{272} = 20200$,

Querschnitt des Ankereisens unter den Nuten $11,4 \cdot 18 = 205 \text{ cm}^2$,

Sättigung im Ankereisen $\frac{5,5 \cdot 10^6}{2 \cdot 205} = 13400$,

die Umfangsgeschwindigkeit ist **19,6 m/sek**,

der Ankerdurchmesser $\frac{19,6 \cdot 60}{\pi \cdot 500} = 75 \text{ cm}$.

Die Belastung der Ankerleiter mit $\frac{125}{28,8} = 4,35 \text{ Amp./mm}^2$

ist bei Maschinen dieser Grösse ziemlich hoch, aber mit Rücksicht auf die grosse Umfangsgeschwindigkeit und gute Ventilation zulässig.

Ist der Anker in dieser Weise entworfen, so ist zu prüfen, ob die Temperatur des Ankers bei vollem Betriebe nicht zu hoch wird, sie hängt ab von den im Anker auftretenden Effektverlusten und der abkühlenden Oberfläche, sie ist ausserdem bedingt durch die Umfangsgeschwindigkeit und die Bauart der Maschine, ob nämlich die Luft freien Zutritt zum Anker hat oder mehr oder weniger behindert ist, und ob durch die Konstruktionsteile die Luft zu lebhafter Zirkulation gezwungen wird oder nicht.

Figur 4, 5 und Tafel III, IV zeigen gut gelüftete Anker verschiedener Konstruktionen.

Der Anker (Fig. 7) ist für kleinere Leistung; die Lüftung ist trotz des vorhandenen Lüftungsschlitzes nicht so gut wie bei den übrigen, da die seitliche Eintrittsöffnung für die Luft ziemlich klein ist.

Im Anschluss an diese Konstruktionen sind die wichtigsten Ausführungsformen der Ankerwicklungen zu erledigen.

Da Ringwicklungen nur noch selten angewandt werden, behandeln wir allein die Trommelwicklungen, und zwar mit Form-

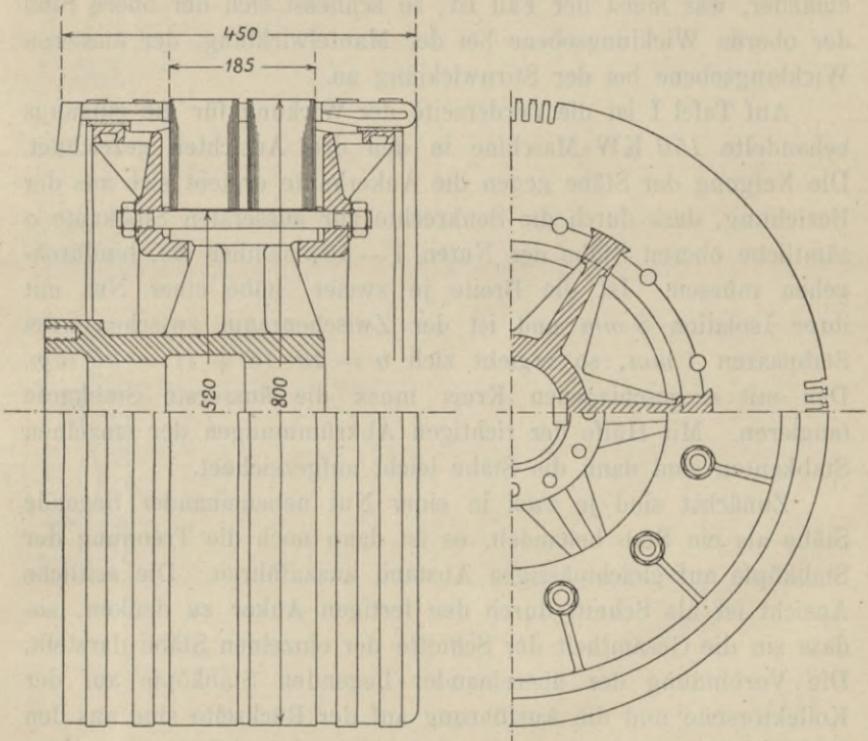


Fig. 4. Anker für 100 KW.

stab- oder Formspulen (Schablonen-) wicklung. Die Wicklungselemente werden ausserhalb des Ankers nach Schablonen hergestellt und fertig in den Anker eingelegt, der dann nur noch zu bandagieren und eventuell zu lackieren ist. Ein Blick auf Figur 2 zeigt, dass die Verbindungsstücke ausserhalb des Ankers sich kreuzen und zwar sowohl auf der Kollektorseite als auch auf der

Rückseite. Wären sie gleichmässig in einer Ebene geführt, so liessen sich offenbar die fertigen Wicklungselemente nicht einlegen. Die Verbindungen sind also in zwei Ebenen zu führen, sodass z. B. die schräg nach rechts verlaufenden oberhalb, die schräg nach links verlaufenden unterhalb je in einer Ebene geführt werden.

Die Ebenen der Wicklungen können parallel zu der Mantelfläche oder parallel zu der Stirnfläche des Ankers liegen. Danach unterscheidet man Mantel- und Stirnwicklung.

Liegen in der Ankernut zwei Stäbe oder Spulenseiten übereinander, was meist der Fall ist, so schliesst sich der obere Stab der oberen Wicklungsebene bei der Mantelwicklung, der äusseren Wicklungsebene bei der Stirnwicklung an.

Auf Tafel I ist die Vorderseite der Wirkung für die eingangs behandelte 150 KW-Maschine in den drei Ansichten gezeichnet. Die Neigung der Stäbe gegen die Ankerkante ergibt sich aus der Beziehung, dass durch die Senkrechte zur äussersten Stabkante a sämtliche oberen Stäbe der Nuten 1—10, nämlich 20, hindurchgehen müssen. Ist die Breite je zweier Stäbe einer Nut mit ihrer Isolation 8 mm und ist der Zwischenraum zwischen zwei Stabpaaren 1 mm, so ergibt sich $a = 10 \cdot (8 + 1) = 90$ mm. Den mit a geschlagenen Kreis muss die äusserste Stabkante tangieren. Mit Hilfe der richtigen Abkrümmungen der einzelnen Stabkanten sind dann die Stäbe leicht aufgezeichnet.

Zunächst sind je zwei in einer Nut nebeneinander liegende Stäbe als ein Stab behandelt, es ist dann noch die Trennung der Stabköpfe auf gleichmässigen Abstand auszuführen. Die seitliche Ansicht ist als Schnitt durch den fertigen Anker zu denken, sodass sie die Gesamtheit der Schnitte der einzelnen Stäbe darstellt. Die Verbindung der übereinander liegenden Stabköpfe auf der Kollektorseite und die Ausführung auf der Rückseite sind aus den Darstellungen zu ersehen. Es sind jedesmal zwei Stäbe aus einem Stück Flachkupfer hergestellt, welches auf der Rückseite des Ankers hochkant umgebogen ist.

Eine Spulen-Mantelwicklung ist auf Tafel II, a, b, c dargestellt.

Die Stirnwicklung wird aus mechanischen Gründen nicht so häufig angewandt wie die Mantelwicklung, obwohl beide Wicklungsarten elektrisch gleichwertig sind. Aus Tafel II, d, e, f ist die Konstruktion ersichtlich, die Verbindungen werden nach Evol-

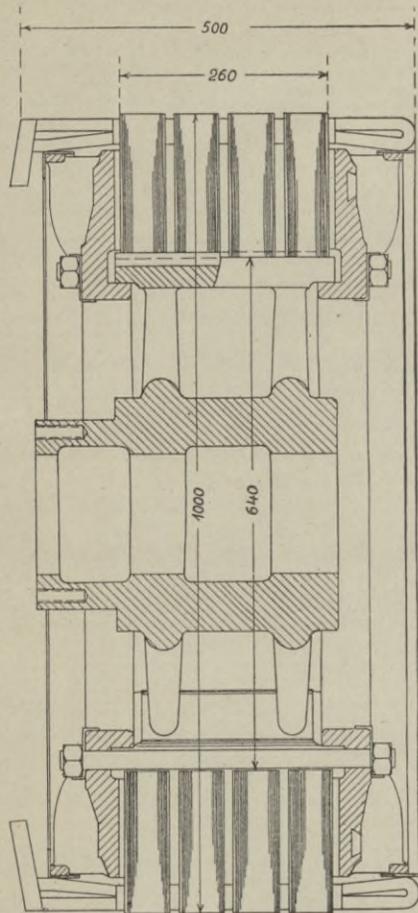


Fig. 5. Anker für 150 KW.

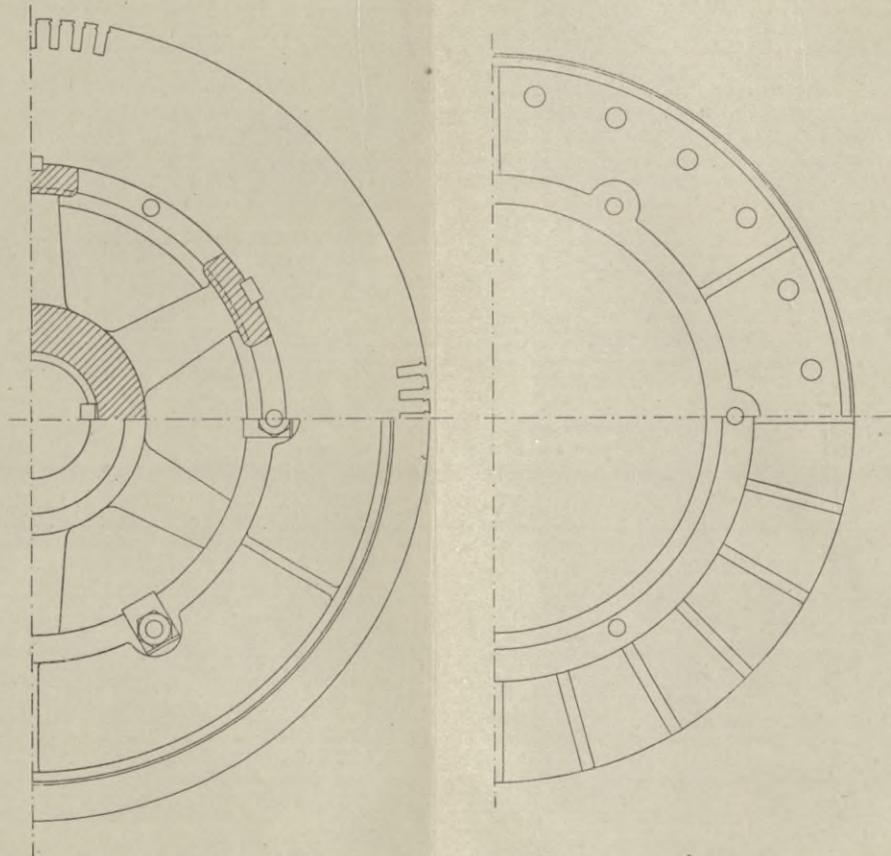


Fig. 6. Endscheibe des Ankers für 150 KW.

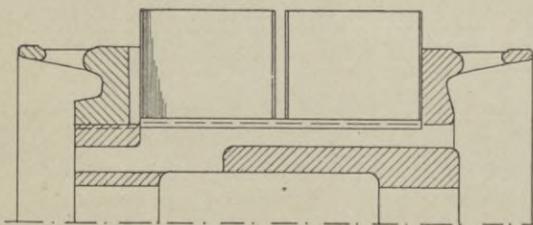


Fig. 7. Anker für 10 KW.

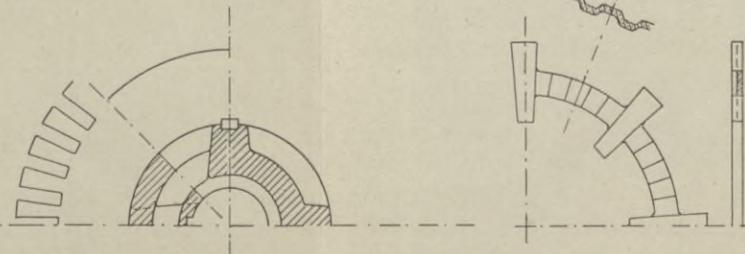


Fig. 8. Einlage für den Lüftungsschlitz.

venten gebogen, und wie bereits erwähnt, in zwei Ebenen parallel zu der Stirnfläche des Ankers geführt. Wo die Enden der Verbindungen zweier zusammengehöriger Spulenseiten oder Stäbe übereinanderliegen, findet ein Abkröpfen aus der äusseren in die innere Ebene, bezw. ein Anschluss durch Verbindungsbleche statt.

Für die Konstruktion der Evolvente gilt folgendes: Ist N die Zahl der Nuten, d die Dicke der Spulenseite oder der zusammengehörigen Stäbe pro Nut, s der Zwischenraum zwischen zwei Spulenseiten, so muss der Umfang des evolventen L -Grundkreises $2r_0 \pi = N(d + s)$ sein. Man konstruiert von diesem Kreis eine beliebige Evolvente, und verschiebt sie bis zu dem Schnittpunkt der Mitte der einen Nut mit einem beliebig zu wählenden Kreis R_0 , eine zweite Evolvente entgegengesetzter Richtung geht durch den Schnittpunkt der Mitte der entsprechenden zweiten Nut mit dem Kreis R_0 . Beide Evolventen gelten als Mittellinien der Stirnverbindungen, welche durch entsprechende Abkrümmungen an die Spulenseiten anzuschliessen sind. Bedingung für die Ausführbarkeit ist, dass der Schnittpunkt der beiden Evolventen ausserhalb oder auf der Peripherie des Kreises r_0 liegt, fällt er in den Kreis hinein, so ist r_0 abzuändern durch Verkleinerung von s oder d . Letzteres ist natürlich nur bei Spulwicklung möglich, indem man die Spule ausserhalb der Nuten schmäler (d') ausführt; dafür muss die Höhe der Nut (h') entsprechend grösser werden.

Die Seitenansicht f ist wieder als Schnitt durch den fertig bewickelten Anker gedacht.

Eine andere Konstruktion der Evolvente kann nach Fig. 9 erfolgen: Von einem beliebigen Grundkreis r' wird die Evolvente verzeichnet; γ ist der halbe Winkel, den zwei Polmitten mit einander einschliessen, z. B. ist bei einer 6poligen

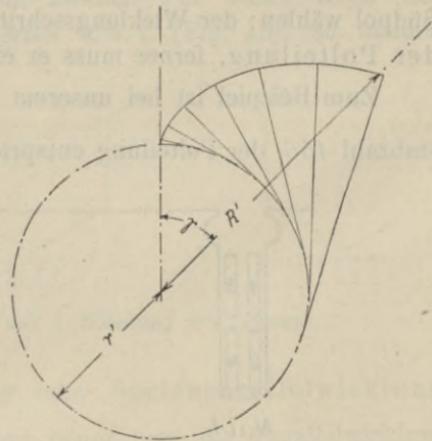


Fig. 9.

Maschine $\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{360}{6}$. Die Evolvente schneidet auf dem Strahl eine Länge R' ab. Liegen ferner die Ankerstäbe auf einem

Kreise R_0 , so ist für diesen Anker der Grundkreis $r_0 = \frac{r'}{R'} \cdot R_0$.

Für die Herstellung der Schablonenwicklung ist Bedingung, dass man stets einen Stab oder eine Spulenseite oben in der Nut verbindet mit einem Stab oder einer Spulenseite unten in der Nut. Nur dann lassen sich die fertigen Wicklungselemente in den Anker einbauen. Die Nummerierung der Leiter in der Nut erfolgt gewöhnlich, wie in Figur 10 angegeben, dass

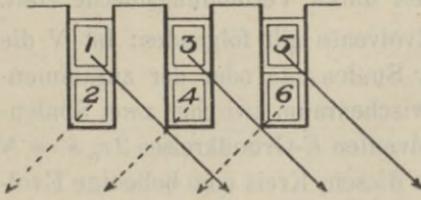


Fig. 10.

die Leiter oben in der Nut die ungerade, die Leiter unten in der Nut die gerade Zahl erhalten. Man verbindet also immer Ungrade mit Grade, oder umgekehrt, daraus folgt, dass zwischen beiden Leitern, die verbunden werden, stets eine ungrade Leiterzahl liegen kann. Man bezeichnet diese Zahl als Wicklungsschritt.

Über die Grösse und Bestimmung des Wicklungsschrittes lässt sich aussagen, dass stets ein Draht, der unter einem Nordpole liegt, verbunden wird mit einem Draht unter einem Südpole, und zwar wird man den nächstfolgenden oder vorhergehenden Südpol wählen; der Wicklungsschritt wird also annähernd gleich der Polteilung, ferner muss er eine ungerade Zahl darstellen.

Zum Beispiel ist bei unserem 150 KW-Generator die Gesamtstabzahl 456, der Polteilung entspricht $\frac{456}{6} = 76$. Nach Figur 11

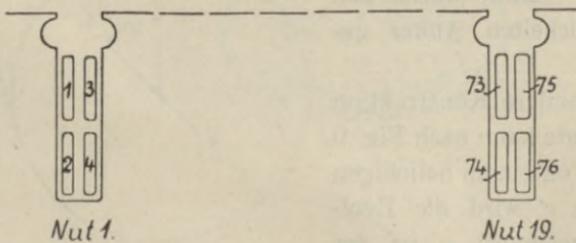


Fig. 11. Wicklungsschritt des 150 KW-Generators.

kann der Wicklungsschritt 77, 75, 73, 71 gewählt werden. Verbindet man Stab oben links (1) mit Stab unten links (74), so ist der Wicklungsschritt auf der Kollektorseite **73**, auf der

Rückseite von (74) nach (3) der Wicklungsschritt auf der Rückseite also 71. Weiter von 3 nach 76, von 76 nach 5 u. s. f.

Bei dieser Wicklung, die wir früher bereits als Parallelwicklung bezeichneten, geht der Draht vom zweiten Pol aus wieder unter den ersten zurück (Fig. 12).

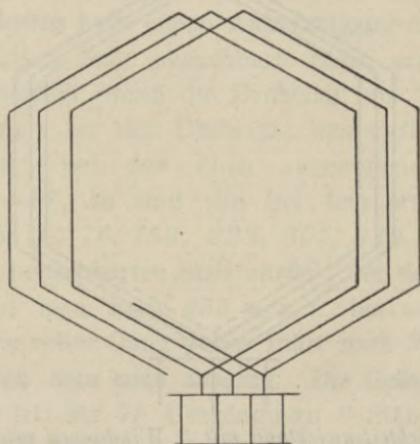


Fig. 12. Schleifenwicklung mit 1 Windung pro Segment.

Geht der Draht von dem zweiten Pol weiter unter den dritten Pol, von dort zum vierten u. s. f. (Fig. 13), so handelt

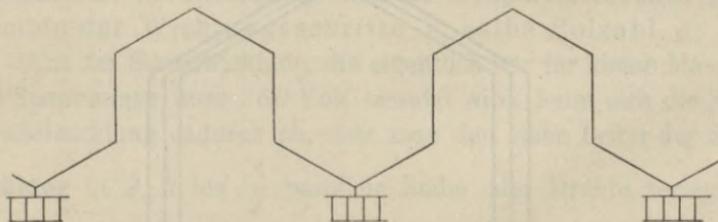


Fig. 13. Wellenwicklung mit 1 Windung pro Segment.

es sich um Serienwicklung oder Serienparallelwicklung.

Der äusseren Form wegen nennt man die Parallelwicklung auch Schleifenwicklung, die Serien- oder Serienparallelwicklung Wellenwicklung. Drei Windungen pro Segment zeigt Figur 14 für Schleifen, Figur 15 für Wellenwicklung.

Für die Wicklungsschritte gilt bei der Wellenwicklung natürlich auch, dass sie annähernd gleich der Polteilung und ungrade

sein müssen, zu beachten ist aber, dass sich die Wicklung nicht zu früh schliesst.

Würde man z. B. wieder den Anker der 150 KW-Maschine mit einer Serienwicklung versehen und wählen $y_1 = 75$, $y_2 = 77$,

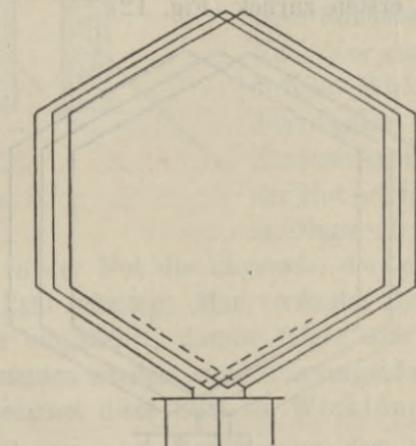


Fig. 14. Schleifenwicklung mit 3 Windungen pro Segment.

so schreitet man bei einem vollen Gang um $75 + 77 = 152$ weiter, nach drei solchen Gängen gelangt man von 1 ausgehend

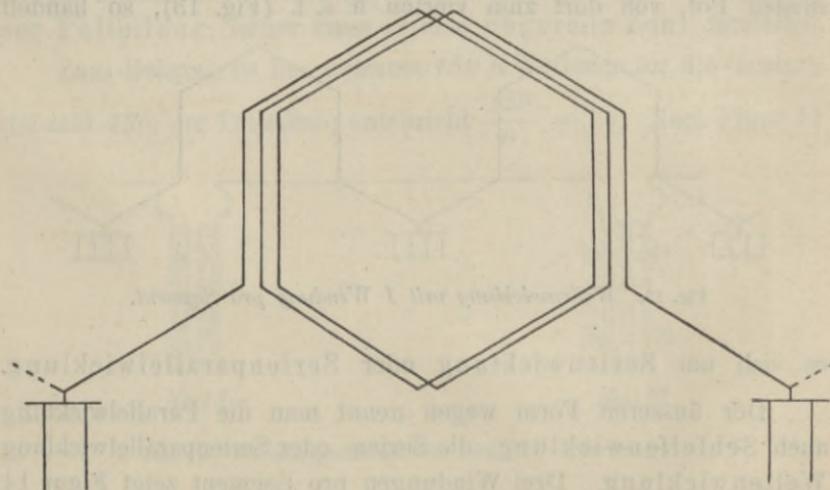


Fig. 15. Wellenwicklung mit 3 Windungen pro Segment.

bei $1 + 3 \cdot 152 = 457$ an, das ist aber wieder Stab 1. Wählt man $y_1 = y_2 = 77$, so kommt man nach drei vollen Gängen nach

$1 + 3 \cdot 154 = 463$, bezw. Stab 7, ist also nach einem Ankerumgang um 6 Stäbe weiter geschritten; der zweite Umgang führt nach 13 u. s. w., der dreizehnte Umgang nach 78, den Stab haben wir aber bereits beim ersten Schritt $1 + 77$ berührt; auch hier ist die Wicklung zu früh in sich geschlossen. Auch bei irgend welchen anderen Wicklungsschritten wird man keinen Erfolg haben. Es muss statt dessen nach einem Ankerumgang der dem Stab 1 zur rechten oder linken Seite benachbarte Stab, erreicht werden, das ist aber nur möglich, wenn die Drahtzahl um 2 vergrössert oder verkleinert wird. Ist die Drahtzahl demnach $456 + 2 = 458$ und bleibt man bei den oben angenommenen Schrittzahlen $y_1 = 75$, $y_2 = 77$, so sind die bei dem ersten Ankerumgang berührten Stäbe **1, 76, 153, 228, 305, 380, 457**, wir bleiben also um einen benachbarten Stab zurück, bei dem zweiten Ankerumgang kommt man nach 455 u. s. f., bis nach 307 bei dem 76. Umgang, ein voller Gang weiter führt nach $307 + 152 = 459$ oder Stab 1, von dem man ausging. Die Gesamtzahl der durchlaufenen Stäbe ist: für 76 Umgänge zu 6 Stäben 456, für einen vollen Gang zwei Stäbe, also $456 + 2 = 458$.

Ähnliches lässt sich für die Stabzahl $456 - 2 = 454$ nachweisen.

Die Ausführbarkeit der einfachen Serienwicklung ist hiernach gebunden an die Bedingung, dass die Gesamtleiterzahl gleich Summe der Wicklungsschritte \times halbe Polzahl ± 2 ist.

Aus der Serienwicklung, die eigentlich nur für kleine Maschinen mit Spannungen über 250 Volt benutzt wird, leitet sich die Serienparallelwicklung dadurch ab, dass man den einen Leiter der Serienwicklung in 2, 3 bis $\frac{A}{2}$ parallele Stäbe oder Drähte zerlegt, um 4, 6 bis A parallele Ankerstromzweige zu erhalten. Der Unterschied beider Wicklungen liegt darin, dass bei der Serienwicklung der halbe Ankerstrom, z. B. 400 Ampère in einen Leiter von etwa 200 mm^2 fliesst, während bei der Serienparallelwicklung beispielsweise mit 10 parallelen Stromzweigen der halbe Ankerstrom sich auf 5 parallele Leiter von je 40 mm^2 verteilt. Die Dimensionen der Stäbe bei 200 mm^2 würden etwa $14 \cdot 14 \text{ mm}$, bei 40 mm^2 etwa $10 \cdot 4$ oder $8 \cdot 5$ sein; es ist ohne weiteres klar, dass in diesem Fall die Serienparallelwicklung, abgesehen von anderen Vorteilen, die günstigere mechanische Ausführung ergibt.

Diesen Vorteil, dass man die Zahl der parallelen Ankerstromzweige entsprechend dem günstigsten Stabquerschnitt wählen kann, hat die Serienparallelwicklung auch vor der reinen Parallelwicklung voraus, ein anderer Vorteil liegt darin, dass die Leiter eines Ankerstromzweiges unter allen Polen der Maschine verlaufen, so dass sich Ungleichmässigkeiten der Felder ausgleichen.

Da die Serienparallelwicklung aus der Serienwicklung durch Unterteilung des einen Stabes in $\frac{A}{2}$ Stäbe entstanden ist, so gelten auch bezüglich der Gesamtdrahtzahl die gleichen Beziehungen, nur dass bei einem vollen Ankerumfang nicht der dem ersten Stab benachbarte zu durchlaufen ist, sondern dass Raum für die übrigen Stromkreise zu lassen ist, also:

Gesamtleiterzahl gleich Summe der Wicklungsschritte \times halbe Polzahl \pm Anzahl der parallelen Stromzweige.

Fassen wir die Bedingungen für Wicklungsschritt und Leiterzahlen zusammen:

Parallelwicklung:

Leiterzahl beliebig aber grade, Wicklungsschritte ungefähr gleich Polteilung, ungrade und von einander verschieden.
Ausführungsform: Schleifenwicklung.

Serienwicklung:

Leiterzahl = $\frac{y_1 + y_2}{2} \times$ Polzahl ± 2 , Wicklungsschritte ungefähr gleich Polteilung, sie müssen ungrade, können aber gleich sein. Ausführungsform: Wellenwicklung.

Serienparallelwicklung:

Leiterzahl = $\frac{y_1 + y_2}{2} \times$ Polzahl \pm Anzahl der Ankerstromzweige, Wicklungsschritt ungefähr gleich Polteilung, beide ungrade event. gleich. Ausführungsform: Wellenwicklung.

Bei der Leiterzahl ist ausserdem noch auf die Nutenzahl zu achten, da die Leiterzahl gleich Nutenzahl \times Anzahl der Leiter pro Nut ist, das giebt oft bei der Serien- oder Serienparallelwicklung unbequeme Verhältnisse.

Bei der Spulenwicklung ist ferner noch zu beachten, dass die vom Wicklungsschritt berührten Drähte auch der Lage nach

zusammengehören. Als Beispiel diene ein 8poliger Anker, vier parallele Ankerstromzweige und drei Windungen pro Segment. Die Drahtzahl sei vorläufig zu 1600 berechnet.

Die drei Drähte pro Segment bilden bezüglich der Wicklung eine Einheit, die Anzahl solcher Einheiten ist $\frac{1600}{3} = \sim 534$. Die Wicklungsschrittsumme ergibt sich demnach bei 8 Polen zu $\frac{534}{4} = \sim 134$, danach die genaue Anzahl der Wicklungseinheiten $4 \cdot 134 \pm 4 = 540$, die Gesamtdrahtzahl $3 \cdot 540 = 1620$. Diese Zahl ist durch 18 teilbar, die Nutanordnung entspricht Figur 16.

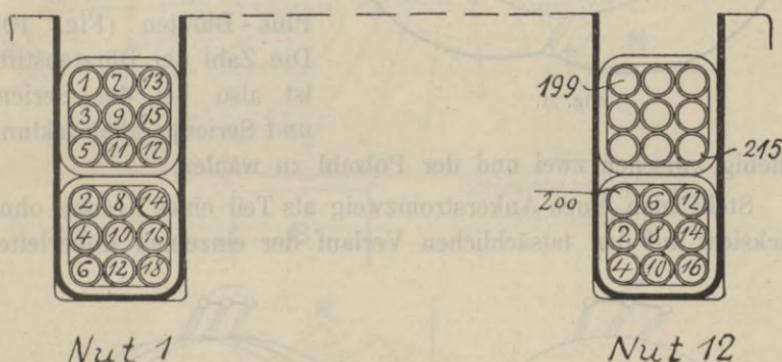


Fig. 16.

Die einzelnen Schritte der Wicklungseinheiten können zu 67 und 69 angenommen werden. Für die Ausführung der Wicklung gilt dann folgendes:

Es gehören in der Spule die Drähte 1, 3, 5 (Nut 1) und 200, 202, 204 (Nut 12) zusammen. Da drei Windungen pro Segment vorhanden sind, wickelt man von Segment 1 nach Draht 1, mit dem Wicklungsschritt 199 auf der Ankerrückseite nach Draht 200, über 3 nach 202, über 5 nach 204, weiter mit dem Wicklungsschritt 205, das Segment 69 berührend, nach Draht 409 (in Nut 23), auf der Ankerrückseite nach 508, über 411 nach 610, über 413 nach 612, weiter auf der Kollektorseite über Segment 137 nach Draht 817 u. s. f.

In den Figuren 17 bis 20 sind die drei Wicklungsarten im Schema dargestellt.

Die Anzahl der Stromabnahmestellen (Bürstenstifte) ist bei der Parallelschaltung gleich der Ankerstromzweigliedzahl, also gleich der Polzahl. Bei der Serienschaltung ist sie gleich zwei (Fig. 18); verfolgt man den

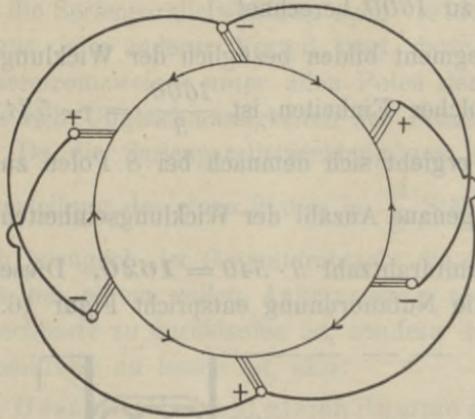


Fig. 21.

Minus-Bürste entsprechenden Leiter nach rechts und links, so kommt man wieder in je eine neutrale Zone, kann also noch zwei Minus-Bürsten anbringen; dasselbe gilt auch für die Plus-Bürsten (Fig. 19). Die Zahl der Bürstenstifte ist also bei der Serien- und Serienparallelwicklung

beliebig zwischen zwei und der Polzahl zu wählen.

Stellt man einen Ankerstromzweig als Teil eines Kreises ohne Rücksicht auf den tatsächlichen Verlauf der einzelnen Ankerleiter

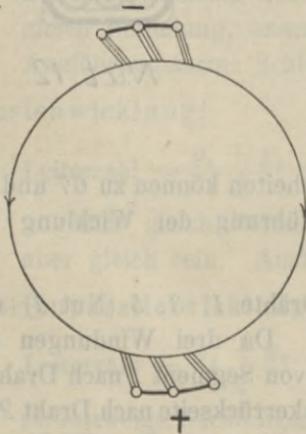


Fig. 22.

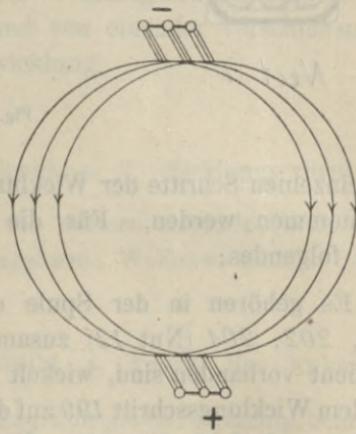


Fig. 23.

dar, so kann man die Stromabnahme durch die Figur 21 für Parallel-, Figur 22 für Serienschaltung, Figur 23 für Serienparallelwicklung wiedergeben.

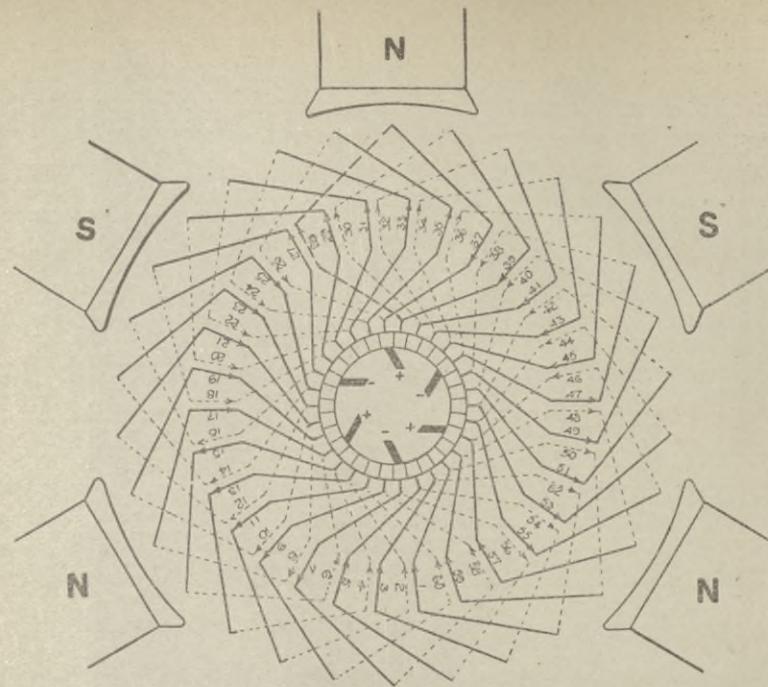


Fig. 17.
Parallelwicklung.

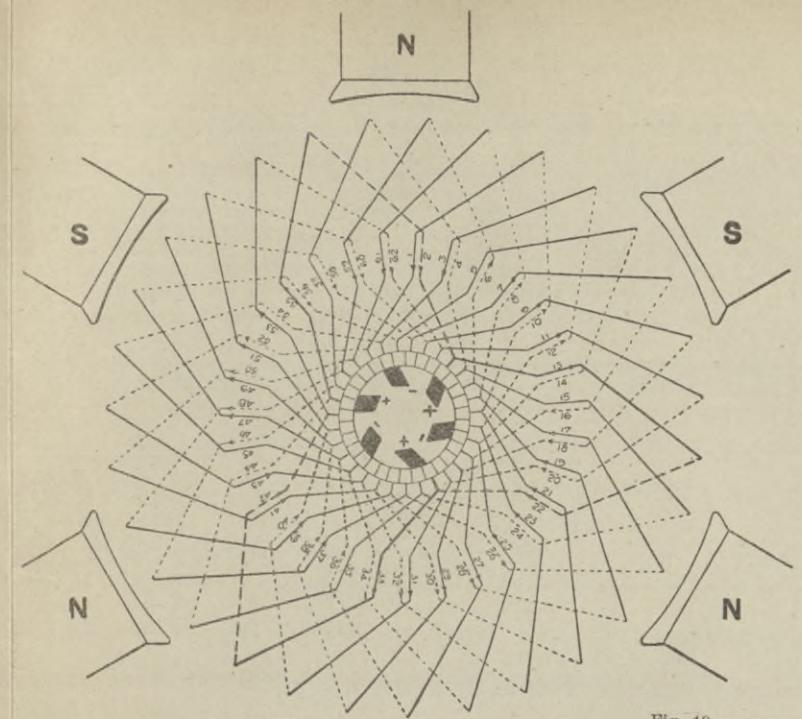


Fig. 19.
Serienvicklung mit sechs
Bürstentippen.

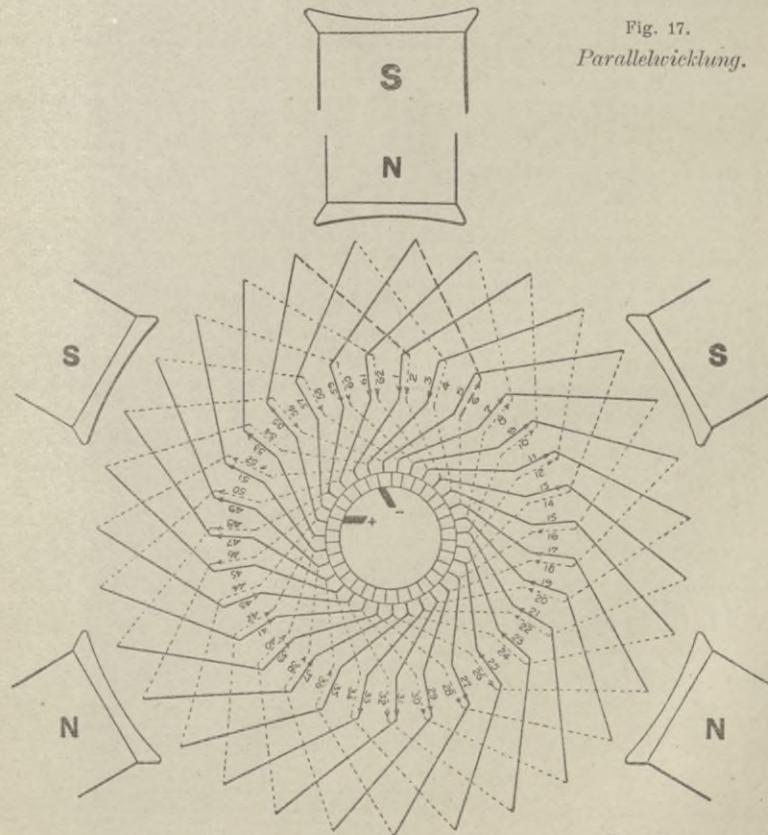


Fig. 18.
Serienvicklung mit zwei
Bürstentippen.

Zu Seite 18.

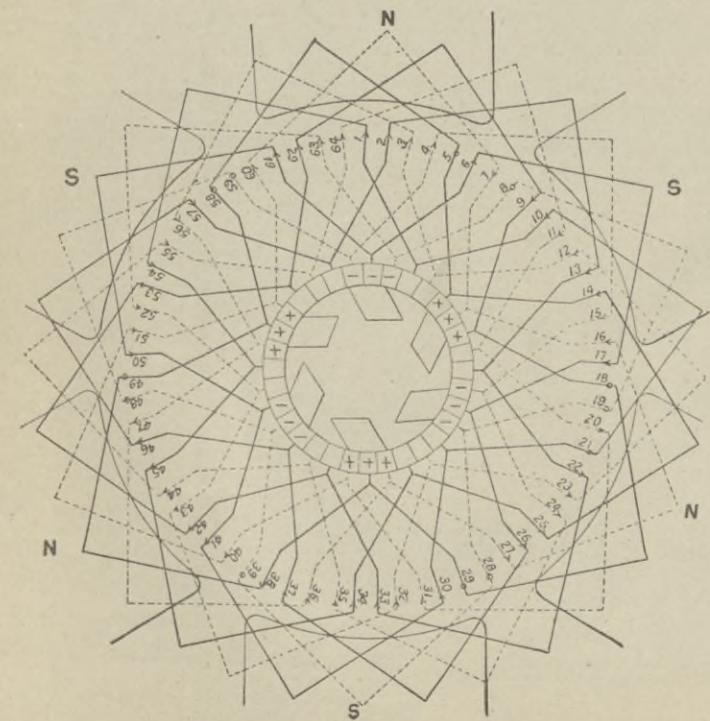


Fig. 20. Serienparallelwicklung mit vier Stromzweigen.

Kapitel II.

Anker.

Zur weiteren Durchrechnung der Maschine, speziell des Ankers wird die bisher für die ungefähren Dimensionen benutzte Gleichung

$$E = \beta \cdot Z \cdot B_l \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}$$

in eine andere Form gebracht: es ist $v = D \pi \frac{n}{60}$, die Polzahl sei P , dann erhalten wir durch Multiplikation mit $4P$ im Zähler und Nenner

$$E = 4 \cdot \beta \cdot \frac{D \pi}{P} \cdot l \cdot B_l \cdot \frac{Z}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8}.$$

Nun ist

$\frac{D \pi}{P}$ die Polteilung,

$\beta \cdot \frac{D \pi}{P}$ der Polbogen,

$\beta \cdot \frac{D \pi}{P} \cdot l$ die Polfläche,

$\beta \cdot \frac{D \pi}{P} \cdot l \cdot B_l$ die Kraftlinienzahl pro Pol = N_0 ,

ferner

Z die Stab- oder Drahtzahl zwischen + und - Bürste,

$\frac{Z}{2}$ die Windungszahl zwischen + und - Bürste = T ,

$\frac{P}{2}$ die halbe Polzahl oder Anzahl der vollen Perioden bei einer Umdrehung,

$\frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60}$ die Zahl der vollen Perioden pro Sekunde = Per .

Also

$$E = 4 \cdot N_0 \cdot T \cdot Per \cdot 10^{-8}.$$

Man hat bei Benutzung dieser Formel auf folgendes zu achten, sie ist für Maschinen mit Trommelanker abgeleitet.

Im Gegensatz zu der Trommelwicklung wird aber bei der Ringwicklung nur eine Spulenseite induziert, sodass bei sonst gleichen Werten für N_0 , T und Per die Ringanker-Maschine nur die halbe E. M. K.

$$E = 2 \cdot N_0 \cdot T \cdot Per \cdot 10^{-8}$$

entwickelt.

Ferner ergibt sich die Windungszahl zwischen + und — Bürsten aus der halben Zahl der Ankerleiter dividiert durch die Stromzweizahl, diese ist bei der reinen Parallelschaltung gleich der Polzahl, bei der Serienschaltung gleich 2, bei der Serienparallelschaltung beliebig.

Die Periodenzahl wird allgemein bei Behandlung der Wechselstromprobleme benutzt. Auch für die Gleichstrommaschine ist sie von grosser Wichtigkeit, da von ihr die Eisenverluste des Ankers, und die Kommutation abhängt. Da die Periodenzahl direkt mit der Polzahl der Maschine zusammenhängt, so ist ihre Bedeutung für den Entwurf klar.

Zur Übung mögen folgende Beispiele dienen:

1. Eine 100 KW-Maschine hat einen Anker mit 140 Nuten zu 4 Stäben, bei reiner Parallelwicklung 8 Pole, 500 Umdr. pro Min. Der Kraftfluss pro Pol ist $2,8 \cdot 10^6$. Dann ist die

$$\text{gesamte Ankerstabzahl } 140 \cdot 4 = 560,$$

$$\text{Windungszahl zwischen zwei Bürsten } \frac{560}{2 \cdot 8} = 35,$$

$$\text{Periodenzahl } \frac{8}{2} \cdot \frac{500}{60} = 33,3,$$

mithin

$$E = 4 \cdot 2,8 \cdot 10^6 \cdot 35 \cdot 33,3 \cdot 10^{-8} = 129 \text{ Volt.}$$

2. Eine 160 KW-Maschine von 230 Volt hat einen Anker mit 103 Nuten zu 4 Stäben bei Reihenparallelschaltung mit 4 parallelen Stromzweigen, 8 Pole, 255 Umdr. pro Min. Dann ist die

$$\text{gesamte Ankerstabzahl } 103 \cdot 4 = 412,$$

$$\text{Windungszahl zwischen zwei Bürsten } \frac{412}{2 \cdot 4} = 51,5,$$

$$\text{Periodenzahl } \frac{8}{2} \cdot \frac{255}{60} = 17,$$

mithin

$$\text{Kraftfluss pro Pol } N_0 = \frac{E \cdot 10^8}{4 \cdot \text{Per} \cdot T}$$

$$N_0 = \frac{230 \cdot 10^8}{4 \cdot 51,5 \cdot 17} = 6,6 \cdot 10^6.$$

Der Polteilung entsprechen $\frac{412}{8} = 51,5$ Stäbe, der Wicklungsschritt ist auf Kollektorseite und Rückseite 51 , $y_1 + y_2 = 102$, halbe Polzahl $= 4$, Ankerstromzweige $A = 4$

$$\text{Leiterzahl } 4 \cdot 102 + A = 412.$$

Die genauen Ankerdimensionen bestimmen sich nach dem Kraftfluss pro Pol und dem Raumbedarf der Ankerleiter. Diese sind fast durchweg in Nuten eingebettet. Da die Nuten ausgestanzt werden, so sind die Ränder scharfkantig, man muss deshalb die einzulegende Wicklung gegen eine Verletzung der Isolation schützen. Man kleidet entweder die Nut mit einem mechanisch festen Isoliermaterial, z. B. Pressspahn, Karton oder Leatheroid

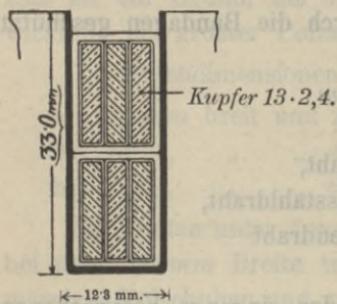


Fig. 24.

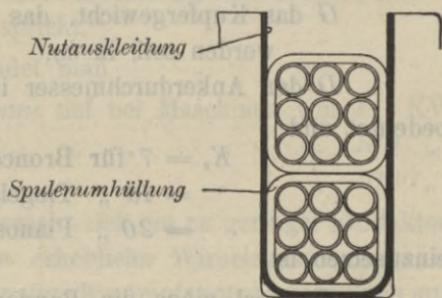


Fig. 25.

aus oder man umwickelt die fertige Spule noch mit einer Schicht von lackiertem Baumwollband oder anderem widerstandsfähigen Material (Fig. 24, 25).

In jedem Fall beträgt diese mechanische Schutzschicht, die auch aus mehreren Lagen bestehen kann, $0,4—0,6$ mm. Die Ankerstäbe sind durch Umwicklung mit geöltem Leinen- oder Baumwollband in Stärken von $0,3—0,6$ mm isoliert. Bestehen die Ankerleiter aus Drähten, so sind diese mit Baumwolle umspinnen, die Spulen sind mit getränktem Band umwickelt; ausserdem tritt die erwähnte Schutzbekleidung hinzu, sodass die Isolations-

stärke zwischen Leiter und Eisen etwa $0,8—1,5$ mm, je nach der Spannung, beträgt. Da zwischen den Stäben oder Spulenseiten oben und unten in der Nut meist die volle Spannung auftritt, so befindet sich zwischen ihnen eine Zwischenlage aus Karton oder Leatheroid von etwa 1 mm Stärke. Bei Reihenparallelschaltung können auch, namentlich bei höheren Maschinenspannungen, erhebliche Spannungsunterschiede zwischen zwei seitlich benachbarten Stäben auftreten, man isoliert dann ebenfalls z. B. durch Papier von etwa $0,2$ mm Stärke.

Die Ankerleiter werden in der Ankernut gehalten durch Keile aus gut getrocknetem, in Öl getränktem Hartholz oder durch sogenannte Bandagen aus Bronze oder Stahldraht von etwa $1—2$ mm Durchmesser.

Nach Fischer-Hinnen*) ergibt sich der für die Bandagedrähte erforderliche Gesamtquerschnitt aus der Formel

$$Q = \frac{0,9 \cdot D \cdot n^2 \cdot G}{10^6 \cdot K_z} \text{ mm}^2,$$

worin

G das Kupfergewicht, das durch die Bandagen geschützt werden soll, in kg ,

D den Ankerdurchmesser in cm

bedeutet und

$$\begin{aligned} K_z &= 7 \text{ für Broncedraht,} \\ &= 10 \text{ „ Tiegelsstahldraht,} \\ &= 20 \text{ „ Pianosaitendraht} \end{aligned}$$

einzusetzen ist.

Als Beispiel möge die Bandage der eingangs besprochenen 150 KW-Maschine berechnet werden. Es war

$$\begin{aligned} n &= 500, D = 75 \text{ cm,} \\ \text{Länge eines Stabes} &620 \text{ mm,} \\ \text{Gesamtstabzahl} &456, q = 28,8 \text{ mm}^2, \end{aligned}$$

daraus

$$G = \frac{456 \cdot (620 - 230) \cdot 28,8 \cdot 9,2}{10^6} = 47 \text{ kg.}$$

Die Stablängen in den Nuten (230 mm) sind durch die Keile gehalten und werden nicht berücksichtigt; als spezifisches Gewicht ist $9,2$ mit Rücksicht auf das Mehrgewicht an Isolation eingesetzt

*) Fischer-Hinnen, Gleichstrom-Maschinen, 5. Aufl.

$$Q = \frac{0,9 \cdot 75 \cdot 500^2 \cdot 47}{10^6 \cdot 7} = 113 \text{ mm}^2,$$

das würde bei Broncedraht von 1,5 mm Durchmesser 65 Drähten entsprechen, die in 5 Bandagen von je 20 mm Breite aufgelegt werden können. Unterhalb der Bandagen wird zum Schutz der Wicklung noch eine Pressspahn- oder eine Glimmerleinen-Isolation von 0,5—1 mm angebracht.

Der für die verschiedenen Isolationen und den Keil bezw. die Bandage erforderliche Raum der Nut geht natürlich für den Kupferquerschnitt verloren. Dieser Verlust ist recht erheblich, sodass der Nutenfüllfaktor, d. h. das Verhältnis vom Kupferquerschnitt zum Nutenquerschnitt meist kleiner als 0,5 ist. *)

Je kleiner der Leiterquerschnitt bezw. je kleiner die Leiterzahl pro Nut ist, um so mehr fällt die spezielle Isolation des Leiters bezw. die Schutzbekleidung ins Gewicht. Rechteckige Leiter geben erheblich bessere Raumaussnutzung als runde, lassen sich aber eigentlich nur in grösseren Dimensionen als „Stäbe“ verwenden. Das ist ein Grund, der für die Verwendung der Reihenparallelwicklung bei grosser Polzahl spricht.

Die Nutendimensionen findet man

von 4 mm	breit	und 15 mm	tief	bei Maschinen	von 1 KW
bis 15	„	„	40	„	„
bis 20	„	„	60	„	„
					100 „
					1000 „

Bei Breiten unter 4 mm ergibt sich ein zu geringer Füllfaktor, bei über 20 mm Breite treten erhebliche Wirbelstromverluste in massiven Polschuhen und ungünstige Kommutationsbedingungen auf.

Bei sehr gedrängter Bauart nimmt man die letztgenannten Nachteile in Kauf mit Rücksicht auf die bessere Raumaussnutzung bei breiten Nuten.

Ankerwiderstand.

Die zur Berechnung erforderlichen genauen Drahtlängen können nach der zeichnerischen Fertigstellung des Entwurfes leicht abgelesen werden; für den ersten Entwurf genügt eine annähernde Bestimmung, die darauf beruht, dass die Längen einer Windung annähernd gleich der doppelten Eisenlänge plus 3 mal Polteilung

*) Turner und Hobart, Die Isolierung elektrischer Maschinen. 1906.

ist. Also

$$\text{Windungslänge} = 2 \cdot l_e + 3 \tau,$$

die gesamte zwischen zwei Bürsten hintereinander geschaltete Drahtlänge

$$T \cdot (2 l_e + 3 \tau),$$

der Kupferquerschnitt zwischen zwei Bürsten bei A parallelen Ankerstromzweigen und q Leiterquerschnitt ist

$$A \cdot q,$$

mithin der Widerstand des Ankers

$$W_a = c \cdot \frac{T(2 l_e + 3 \tau)}{A \cdot q}.$$

Der spezifische Widerstand des Kupfers ändert sich mit der Temperatur: nimmt man bei der Berechnung von vornherein eine Ankertemperatur von $60^\circ C.$ an, so ist hierfür $c = 0,02$.

Der Anker einer 400 KW-Maschine zeigt entsprechend folgende Verhältnisse:

Leistung der Maschine	400 KW,
Klemmenspannung	550 Volt,
Ankerstrom $\frac{400000}{550}$	= 730 Ampère,
Umdrehungszahl	100,
Polzahl	8,
Periodenzahl	$\frac{8 \cdot 100}{2 \cdot 60} = 6,67$
Schaltungsart	Parallel,
Ankerdurchmesser	230 cm,
Polteilung $\frac{230 \cdot \pi}{8}$	= 91 cm,
Ankerlänge	40 cm,
Zahl der Luftspalte	7,
Breite eines Luftspaltes	1,2 cm,
Eisenlänge $(40 - 7 \cdot 1,2) \cdot 0,9$	= 28,4 cm,
Windungslänge $2 l_e + 3 \tau = 56,8 + 273$	= 330 cm,
Nutenzahl	264,
Stäbe pro Nut	6,
Gesamtzahl der Ankerstäbe	1584,
Windungszahl zwischen zwei Bürsten $\frac{1584}{2 \cdot 8}$	= 99,

$$\begin{aligned}
 &\text{Gesamtlänge zwischen zwei Bürsten } 99 \cdot 3,3 = 326,7 \text{ m,} \\
 &\text{Querschnitt eines Stabes } 2,4 \cdot 13 \dots = 31,2 \text{ mm}^2, \\
 &\text{Gesamtquerschnitt zwischen zwei} \\
 &\quad \text{Bürsten } 8 \cdot 31,2 \dots \dots \dots = 250 \text{ mm}^2, \\
 &\text{Ankerwiderstand bei } 60^\circ \text{ C. } 0,02 \cdot \frac{326,7}{250} = 0,0262 \Omega, \\
 &\text{Stromdichte } \frac{730}{250} \dots \dots \dots = 2,92 \text{ Ampère} \\
 &\quad \text{pro mm}^2, \\
 &\text{Gewicht des Ankerkupfers } \frac{326,7 \cdot 250 \cdot 8,9}{10^3} = 730 \text{ kg,} \\
 &\text{Spannungsverlust im Anker } 830 \cdot 0,0262 = 19 \text{ Volt,} \\
 &\quad \text{„ an den Bürsten ge-} \\
 &\quad \text{schätzt auf } \dots \dots \dots 2 \text{ „} \\
 &\text{Elektromotorische Kraft bei Vollast} \\
 &\quad 550 + 21 \dots \dots \dots = 571 \text{ „} \\
 &\text{Stromwärmeverlust im Anker } 730^2 \cdot 0,0262 = 13900 \text{ Watt,} \\
 &\text{Kraftfluss pro Pol } N_0 = \frac{E \cdot 10^8}{4 \cdot T \text{ Per}} \\
 &\quad \frac{571 \cdot 10^8}{4 \cdot 99 \cdot 6,67} \dots \dots \dots = 2,18 \cdot 10^6.
 \end{aligned}$$

In dem rotierenden Anker treten ausser dem Stromwärmeverlust noch die sogenannten Eisenverluste auf, die in folgender Weise entstehen.

Im Ankereisen durchläuft der Magnetismus an irgend einem Punkt bei der Bewegung von einem Nordpol unter dem benachbarten Südpol durch zum nächsten Nordpol, einen vollen Richtungswechsel vom positiven Maximum durch Null zum negativen Maximum und wieder durch Null zurück zum positiven Maximum. Diesem Richtungswechsel entspricht ein Arbeitsverlust, der durch die Hysteresisschleife gegeben ist und vom Material abhängt.

Gleichzeitig werden durch die Änderung der Kraftliniendichte im Ankereisen elektromotorische Kräfte induziert, welche Wirbelströme hervorrufen; durch Unterteilung des Ankereisens in dünne Bleche, die von einander durch Papier oder Lackschichten isoliert sind, wirkt man diesen Strömen entgegen. Je dünner die Bleche sind, um so kleiner werden die E. M. Ke., um so kleiner also auch die Wirbelstromverluste. Mithin sind unter gleichen sonstigen Bedingungen die Hysteresisverluste eine Funktion

der Qualität, die Wirbelstromverluste eine Funktion der Stärke der verwendeten Bleche.

Durch Verbesserung der Qualität und Verkleinerung der Blechstärke könnte man demnach diese Verluste beliebig herabsetzen, wenn dem nicht einerseits übermässig hohe Materialpreise, andererseits schlechte Ausnutzung des Ankervolumens entgegenständen. Es ist klar, dass bei gegebener Ankerbreite der Raumverlust durch die Isolation zwischen den Blechen um so grösser wird, je dünner die Bleche sind.

Bei normalen Ausführungen rechnet man deshalb mit Blechen von $0,3$ — $0,5$ mm Stärke, bei denen der Raumverlust durch Isolation etwa 10 — 15% beträgt, sodass der Eisenquerschnitt 90 — 85% vom Ankerquerschnitt ausmacht.

Ist der Anker mit durchgehenden Bolzen versehen, so scheint durch diese der Stromweg für die Wirbelströme geschlossen zu sein, man hat deshalb die Bolzen durch Papierhülsen isoliert. Diese Massregel wird kaum erheblichen Zweck haben, da der Kontakt zwischen den Blechen und Bolzen schlecht ist, sodass aus diesem Grunde kaum eine Vergrösserung der Wirbelstromverluste zu befürchten ist. Will man aber die in den Bolzen an und für sich auftretenden Wirbelströme niedrig halten, so ordnet man die Bolzen im Ankereisen möglichst tief an.

Die Hysteresis- und Wirbelstromverluste sind ausserdem bedingt durch die Periodenzahl und die magnetische Sättigung.

Die von verschiedenen Autoren angegebenen Berechnungsarten für die einzelnen Verluste sind für die Praxis wenig brauchbar, da die Konstanten der Materialien selbst bei Lieferungen einer Firma nicht unbedingt gleich sind und da auch eine Änderung mit der Zeit zu beobachten ist. Deshalb empfiehlt es sich, diese Verluste nach empirischen Werten zu schätzen. In Figur 26 sind die Verlustkurven für verschiedene Periodenzahlen und Sättigungen zusammengestellt.

Die Kurven sind nach Beobachtungen an 23 Gleichstrommaschinen von erheblich verschiedenen Grössen und Umdrehungszahlen aufgestellt und geben in den meisten Fällen gute Annäherungswerte. In besonderen Fällen können jedoch Abweichungen bis zu 25% von den Kurvenwerten auftreten.

Für die Kernverluste der 400 KW-Maschine ergibt sich Folgendes:

Periodenzahl = 6,67,

äusserer Durchmesser der Ankerbleche 230 cm,

innerer „ „ „ 140 cm,

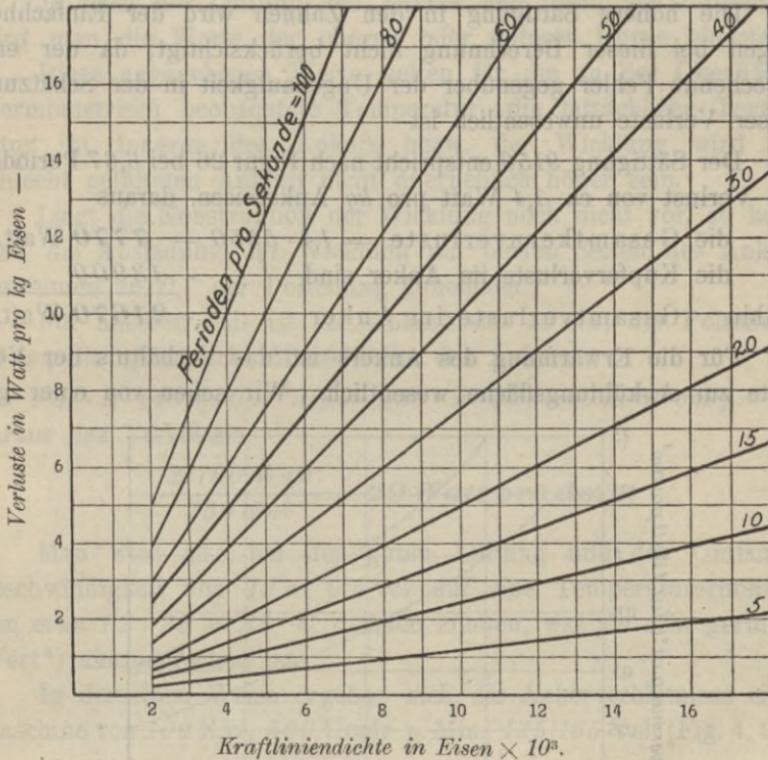


Fig. 26.

Gesamtfläche der Ankerbleche $(230^2 - 140^2) \frac{\pi}{4} = 26200 \text{ cm}^2$,

Nutentiefe 33 mm,

Nutenbreite 12,3 „

Nutenzahl 264 „

Gesamtfläche der Nuten $3,3 \cdot 12,3 \cdot 264 = 1070 \text{ cm}^2$,

Eisenfläche der Ankerbleche = 25130 cm^2 ,

Eisenbreite des Ankers 28,4 cm,

Eisenvolumen des Ankers $25130 \cdot 28,4 = 713000 \text{ cm}^3$,

spezifisches Gewicht 7,8 kg/dm³,

Eisengewicht des Ankers $713 \cdot 7,8 = 5550 \text{ kg}$.

Die Sättigung des Ankers ergibt sich aus dem halben Kraftlinienfluss dividiert durch den Eisenquerschnitt des Ankers unter den Nuten, dieser ist $42 \text{ cm} \cdot 28,4 \text{ cm} = 1190 \text{ cm}^2$,

$$\text{Sättigung im Ankereisen} = \frac{21800000}{2 \cdot 1190} = \mathbf{9150}.$$

Die höhere Sättigung in den Zähnen wird der Einfachheit wegen bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt, da der entsprechende Fehler gegenüber der Ungenauigkeit in der Schätzung dieser Verluste unwesentlich ist

Der Sättigung 9150 entspricht nach Figur 26 bei 6,67 Perioden ein Verlust von ca. 1,4 Watt pro *kg* Ankereisen, daraus

$$\text{die Gesamtkernverluste} = 1,4 \cdot 5550 = \mathbf{7770 \text{ Watt}},$$

$$\text{die Kupferverluste im Anker sind} \quad \frac{13900}{\text{„}}$$

$$\text{mithin Gesamtverluste im Anker} \quad \mathbf{21670 \text{ Watt}}.$$

Für die Erwärmung des Ankers ist das Verhältnis der Verluste zur Abkühlungsfläche wesentlich. Wir sehen von einer ge-

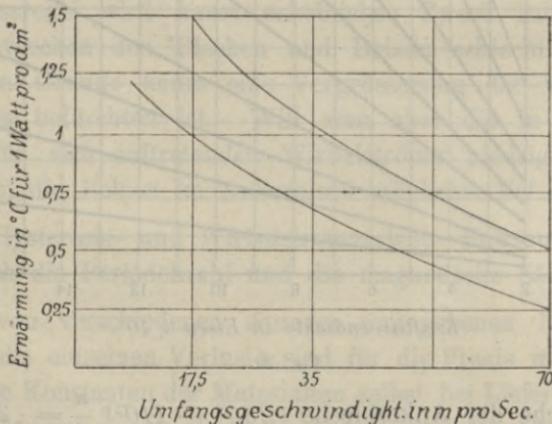


Fig. 27.

nauen Berechnung der von der Luft bespülten Oberfläche des Ankers, die z. B. auch die Seitenflächen an beiden Stirnseiten und in den Ventilationsschlitten einschliessen würde, ab, da der Einfluss dieser zu sehr von anderen Konstruktionsverhältnissen abhängt, z. B. von den seitlichen Eintrittsöffnungen für die Luft, dem Verhältnis von Nut und Zahn, das die Austrittsöffnung bedingt, und den Einlagen innerhalb der Schlitten, die den Durchgangsquerschnitt oft erheblich verkleinern.

Eine genaue Berechnung ist also ziemlich nutzlos, man geht am besten annäherungsweise vor, indem man die Verluste in Watt auf die äussere cylindrische Oberfläche des Ankers bezieht. Die Temperaturerhöhung für 1 Watt pro dm^2 kann aus Figur 27 entnommen werden.

Je nach der Lüftung des Ankers und nach dem Luftzutritt wird man die Werte der oberen oder unteren Kurve einsetzen.

Diese angegebenen Werte gelten für die an der Oberfläche thermometrisch beobachtete Temperatur, die tatsächliche Temperatur im Inneren des Ankers bzw. der Wicklung wird bei schlecht gelüfteten Anker nicht unerheblich höher sein.

Liegt die Konstruktion der Wicklung noch nicht vor, so kann man die Ausladung der Wicklung auf beiden Seiten des Ankers zusammen zu 0,7 der Polteilung annehmen.

Für unseren Fall ist die Ankerbreite 40 cm, die Polteilung 91 cm, die cylindrische Mantelfläche des Ankers

$$D \cdot \pi \cdot (40 + 0,7 \cdot 91) = 230 \cdot \pi \cdot 104 = 75000 \text{ cm}^2,$$

daraus das Verhältnis

$$\frac{21700 \text{ Watt}}{750 \text{ dm}^2} = \mathbf{29 \text{ Watt pro dm}^2}.$$

Man wird also bei der guten Lüftung und der Umfangsgeschwindigkeit von 12 m pro sek auf eine Temperaturerhöhung von etwa $1,2 \cdot 29 = 35^\circ \text{ C}$. rechnen können, was als sehr geringer Wert*) auszuspochen ist.

In derselben Weise ergeben sich die Ankerverhältnisse einer Maschine von 100 KW, 500 Umdr. p. Min., 125/165 Volt (Fig. 4, 28):

Ankerdurchmesser	800 mm,
Umfangsgeschwindigkeit	21 m pro sek,
Ankerlänge	185 mm,
Luftschlitz 1 à	10 mm,
Eisenlänge	$175 \cdot 0,9 = 157 \text{ mm}$,
Nutenzahl	140,
Leiter pro Nut	4,
Leiterdimensionen	$2,4 \cdot 10$,
Schaltungsart	Parallel,

*) Die in England für den Maschinenbau gültigen Vorschriften sind, was Erwärmung und Isolation anlangt, wesentlich strenger als die des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Polzahl	8,
Periodenzahl	$\frac{8 \cdot 500}{2 \cdot 60} = 33,3,$
Polteilung	314 mm,
Windungslänge	$2 \cdot 157 + 3 \cdot 314 = 1254$ mm,
Gesamtzahl der Ankerstäbe	$4 \cdot 140 = 560,$
Windungszahl zwischen zwei Bürsten	$\frac{560}{2 \cdot 8} = 35,$

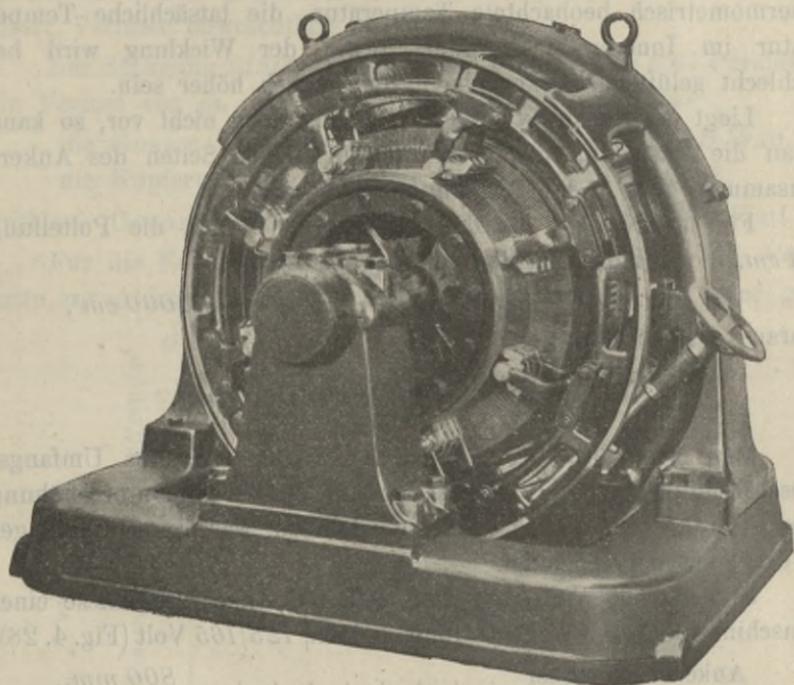


Fig. 28. 100 KW-Generator des Sachsenwerks.

Gesamtlänge zwischen zwei Bürsten	$35 \cdot 1254 = 44$ m,
Kupferquerschnitt zwischen zwei Bürsten	$8 \cdot 24 = 192$ mm ² ,
Gewicht des Ankerkupfers	$\frac{44 \cdot 192 \cdot 8,9}{10^3} = 75$ kg,
Ankerwiderstand bei 60° C.	$0,02 \cdot \frac{44}{192} = 0,0046$ Ω,
Ankerstrom bei 125 Volt	$\frac{100000}{125} = 800$ Amp.,
Stromdichte	$\frac{800}{192} = 4,16$ Amp. pro mm ² ,

Spannungsverlust im Anker $0,0046 \cdot 800 = 3,68$ Volt,

„ an den Bürsten geschätzt 2 Volt,

Elektromotorische Kraft $125 + 5,68 = 130,7$ Volt,

Ankerstrom bei 165 Volt $\frac{100000}{165} = 600$ Amp.,

Spannungsverlust im Anker $0,0046 \cdot 600 = 2,76$ Volt,

„ an den Bürsten 2 Volt,

Elektromotorische Kraft $165 + 4,76 = 169,8$ Volt,

Stromwärme-Verlust bei 125 Volt $800^2 \cdot 0,0046 = 2950$ Watt,

„ „ „ 160 „ $600^2 \cdot 0,0046 = 1650$ „

Kraftfluss pro Pol bei 125 Volt $\frac{130,7 \cdot 10^8}{4 \cdot 35 \cdot 33,3} = 2,8 \cdot 10^6$,

„ „ „ „ 165 „ $\frac{169,8 \cdot 10^8}{4 \cdot 35 \cdot 33,3} = 3,64 \cdot 10^6$,

innerer Ankerdurchmesser 520 mm,

Ankerfläche $(80,0^2 - 52^2) \frac{\pi}{4} = 2900$ cm²,

Ankergewicht $\frac{2900 \cdot 15,7 \cdot 7,8}{10^3} = 355$ kg,

Nutentiefe 28 mm,

Eisentiefe unter den Nuten 112 mm,

Eisenquerschnitt $11,2 \cdot 15,7 = 176$ cm²,

Sättigung im Eisen bei 125 Volt $\frac{2,8 \cdot 10^6}{2 \cdot 176} = 8000$,

„ „ „ „ 165 „ $\frac{3,64 \cdot 10^6}{2 \cdot 176} = 10300$,

Eisenverlust bei 125 Volt $6,5 \cdot 355 = 2300$ Watt,

„ „ 165 „ $8,4 \cdot 355 = 3000$ „

Gesamtverlust „ 125 „ $2950 + 2300 = 5250$ „

„ „ 165 „ $1650 + 3000 = 4650$ „

Oberfläche $80 \cdot \pi \cdot 45 = 11300$ cm²,

Verluste bezogen auf die Oberfläche

bei 125 Volt $\frac{5250}{113} = 46$ Watt/dm²,

„ 165 „ $\frac{4650}{113} = 40$ „

die grösste Temperaturzunahme bei der

hohen Umfangsgeschwindigkeit $0,9 \cdot 46 = 41,5^\circ$ C.

Kapitel III.

Magnetische Verhältnisse.

Bisher waren nur die magnetischen Kraftflüsse und Sättigungen erwähnt, soweit sie für die Erzeugung der E. M. K. und für die Verluste im Anker von Bedeutung sind.

Im Folgenden soll der magnetische Kreis der Maschine und die zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der magnetischen Kraftflüsse erforderliche sogenannte magnetomotorische Kraft (M. M. K.) behandelt werden.

Man kann in ähnlicher Weise wie beim Ohmschen Gesetz den Kraftfluss oder die Linienzahl berechnen aus der M. M. K. und dem magnetischen Widerstande des Kreises. Diese Berechnungsart erfordert aber oft umständliche Rechnungen mit beträchtlichem Aufwand an Zeit und geistiger Arbeit, die man besser auf wichtigere Umrechnungen verwenden kann, zumal die oft angestrebte Genauigkeit der Berechnung durch unumgängliche Erfahrungswerte, empirische Konstanten, beeinträchtigt wird.

Wir gehen deshalb von dem viel einfacheren, für die Praxis vollkommen ausreichenden Verfahren aus, dass wir aus den Materialkurven die für die Sättigung des betreffenden Teiles erforderliche Ampèrewindungszahl pro *cm* Länge des Kraftlinienweges ablesen und mit der wahren Länge multiplizieren. So werden einzeln die Ampèrewindungszahlen für Luft, Zähne, Anker-eisen, Pol und Joch, ferner die zum Ausgleich der Ankerrückwirkung nötigen Ampèrewindungen bestimmt; ihre Summe ergibt die Ampèrewindungszahl, die pro Pol vorgesehen werden muss.

Die Magnetisierungskurven sind in Figur 29 wiedergegeben und zwar zwei für Stahlguss, da dieses Material je nach seiner Herstellung recht verschiedenes magnetisches Verhalten zeigen kann. Die ausgezogene Kurve ist nur zulässig, wenn man das

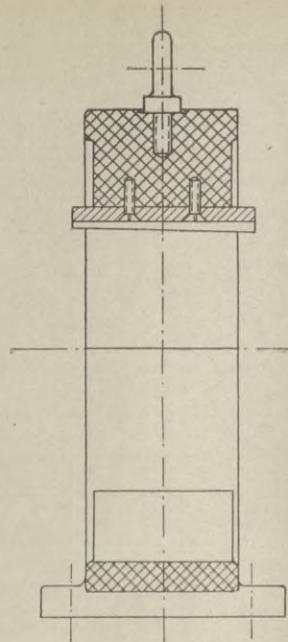


Fig. 30.

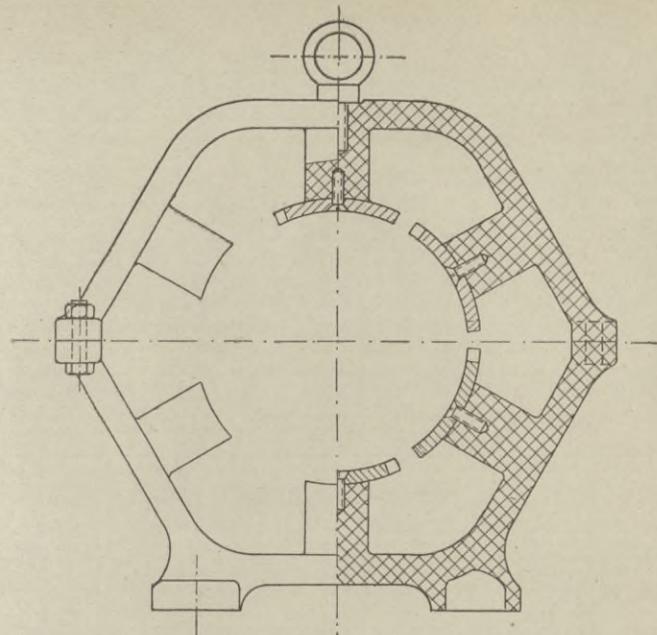


Fig. 31.

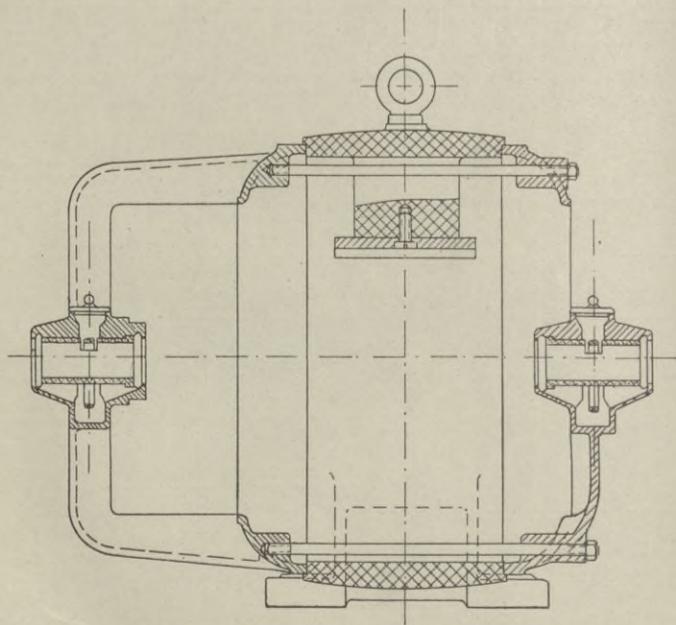


Fig. 32.

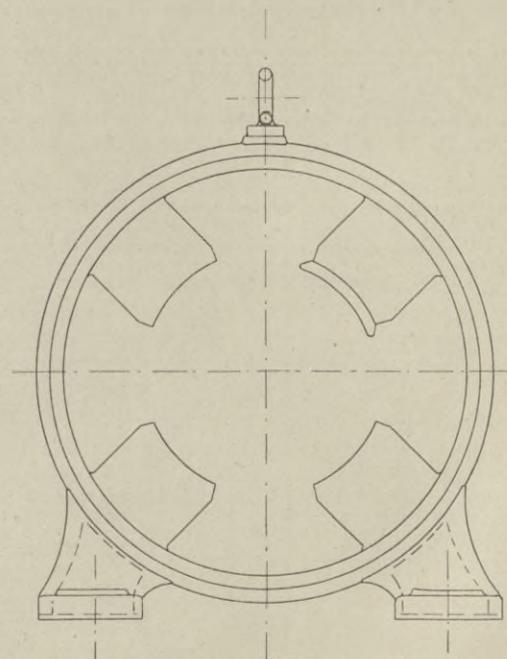


Fig. 33.

zu verwendende Material genau kennt und sich eventuell durch Versuche von Zeit zu Zeit von seiner Zuverlässigkeit überzeugen kann.

Ist dies nicht der Fall, so wird man gut tun, die Ampèrewindungen nach der ungünstigeren, gestrichelten Kurve zu be-

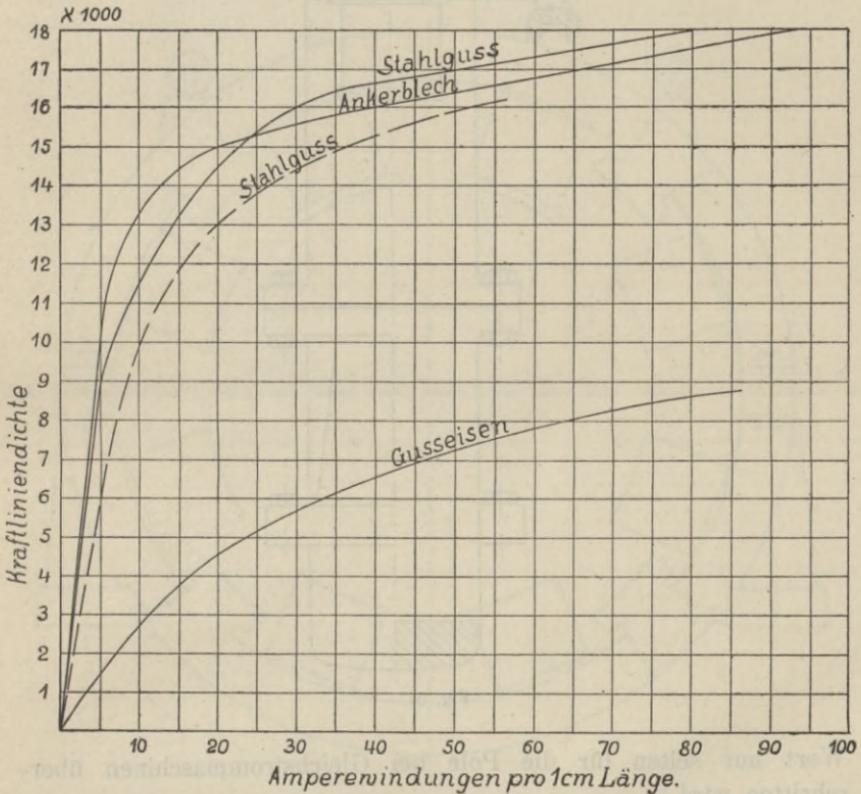


Fig. 29.

stimmen. Die Unterschiede sind namentlich bei höheren Sättigungen recht bedeutend.

Was die Auswahl des Materials anlangt, so wird man für das Gestell Stahlguss (Fig. 30, 31 und 32, 33) oder Eisenblech dem Gusseisen (Fig. 34, 35) vorziehen, sobald entweder die Maschine möglichst leicht sein soll (Schiffsdynamos, Lokomotiv-Kranmotoren) oder die Kosten für Material und Bearbeitung geringer sind.

Man muss beachten, dass bei gleicher Ampèrewindungszahl die Querschnitte bzw. die Gewichte im umgekehrten Verhältnis stehen wie die zulässigen Sättigungen. Als Vergleich diene Tabelle I für M. M. Ke. bis 60 Ampèrewindungen pro *cm* Länge, welcher

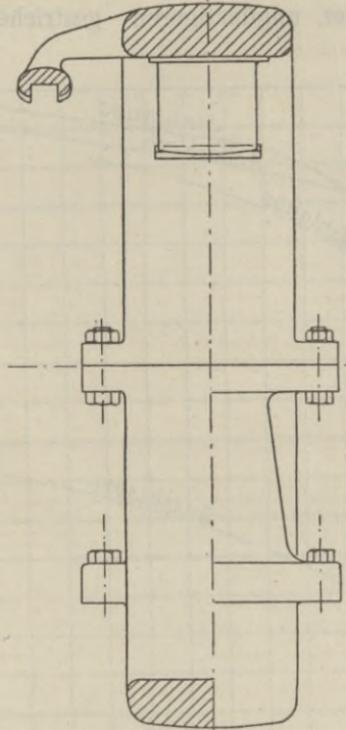


Fig. 34.

Wert nur selten für die Pole bei Gleichstrommaschinen überschritten wird.

Tabelle I.

Ampèrewindungen pro <i>cm</i> Länge	Magnetische Sättigung		
	Eisen- und Stahlblech	Stahlguss	Gusseisen
20	15500	13200	4500
40	16700	15200	6600
60	17200	16300	7900

Das Gewicht des Joches aus Gusseisen ist also je nach der Sättigung 2—3 mal so gross wie bei Stahlguss. Dafür ist Stahlguss, namentlich bei kleineren Gussstücken, annähernd im gleichen Verhältnis teurer. Ferner bekommt man ein brauchbares Guss-

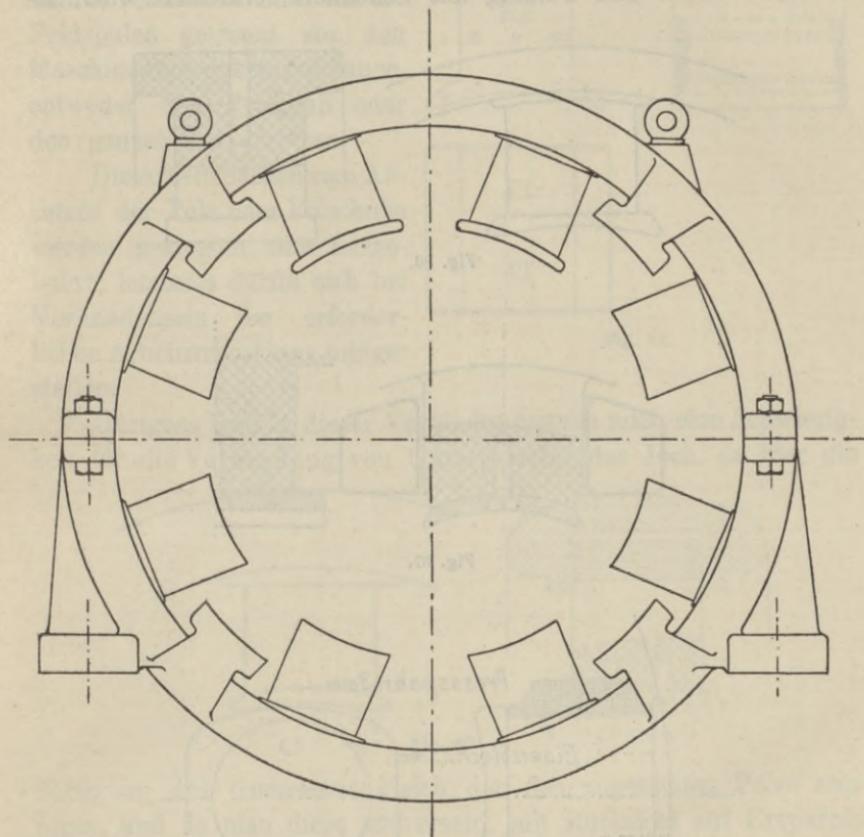


Fig. 35.

eisen fast in jeder Giesserei, während brauchbarer Stahlguss nur von speziell darauf eingerichteten Firmen geliefert werden kann, sodass mitunter Frachtkosten und Lieferzeit den Ausschlag für die Verwendung von Gusseisen geben.

Andrerseits ist das geringere Gewicht der Stahlgussmaschine für den Transport wesentlich.

Hier kann also nur eine genaue Kalkulation der Preise für beide Materialien ausschlaggebend sein. Bei sehr grossen Maschinen wird für die zulässige Sättigung der Querschnitt des Gestelles

mitunter so klein, dass er aus mechanischen Rücksichten vergrößert werden muss, dann ist Gusseisen oft angebracht. Blech wird für das Joch nur ausnahmsweise verwendet.

Für den Pol selbst ist massgebend, dass bei höherer Sättigung der Querschnitt und Umfang des Schenkels verkleinert wird, so-

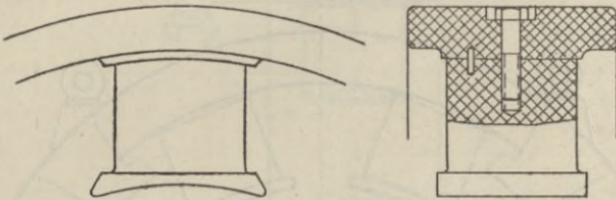


Fig. 36.

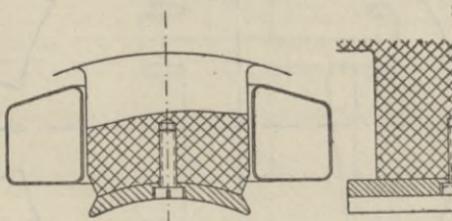


Fig. 37.

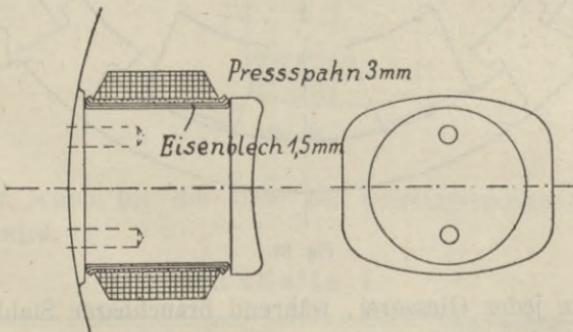


Fig. 38.

dass die Länge und das Kupfergewicht der Feldwindungen entsprechend abnehmen. Der Pol besteht fast immer aus Stahlguss (Fig. 36, 37, 38) oder Eisenblech (Fig. 39), wenn nicht bei Gusseisenmaschinen mit geringer Luftsättigung (z. B. bei Ringankern) die Bearbeitungskosten für das Ansetzen der Pole die Ersparnisse an Feldkupfer aufwiegen.

Da die Sättigungen in Stahlguss oder Schmiedeeisen die normalen Luftsättigungen, die ihrerseits die maximalen Induktionen in den Zähnen bestimmen, bedeutend überschreiten, muss man bei diesen Materialien stets Polschuhe verwenden und, um die Feldspulen getrennt von den Maschinen aufwickeln zu können, entweder den Polschuh oder den ganzen Pol ansetzen.

Die Arbeitsflächen zum Ansetzen der Pole oder Polschuhe werden gestossen oder ausgebohrt, letzteres dürfte sich bei Vorhandensein der erforderlichen Arbeitsmaschinen billiger stellen.

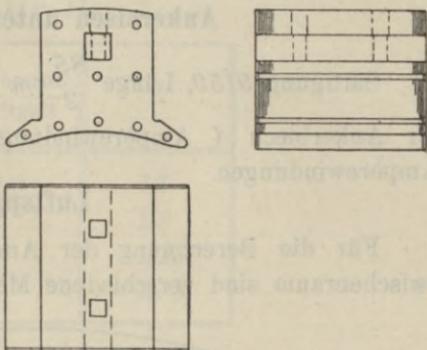


Fig. 39.

Übrigens liegt in dieser Verbindungsstelle noch eine Schwierigkeit für die Verwendung von Gusseisen für das Joch, da hier die

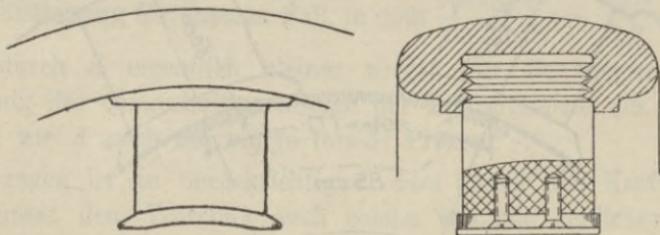


Fig. 40.

Sättigung des Gusseisens gleich der des angesetzten Poles sein muss, und da man diese andererseits mit Rücksicht auf Ersparnis an Feldkupfer möglichst hoch wählen wird. Um den magnetischen Übergangswiderstand zu verkleinern, verwendet man Anordnungen mit eingegossenem Pol (Fig. 40) oder mit verbreitertem Polansatz.

Den Polquerschnitt wählt man, wenn möglich rund, da der Umfang des Kreises kleiner ist als der eines Rechteckes von gleichem Querschnitt. Muss der Pol viereckig sein, so ist bezüglich des Umfangs der quadratische Querschnitt am günstigsten.

Die Berechnung wird am deutlichsten an einem Beispiel erklärt sein.

Der magnetische Kreis des 400 KW-Generators (Seite 24, 25) ist in Fig. 41 mit eingeschriebenen Längen dargestellt.

Die einzelnen Sättigungen werden aus dem magnetischen Kraftlinienfluss $21,8 \cdot 10^6$ Kraftlinien für 574 Volt E. M. K. bzw. 550 Volt Klemmenspannung bei voller Belastung berechnet.

Ankereisen unter den Nuten.

Sättigung 9150, Länge $\frac{85}{2}$ cm für eine Feldspule, nach Fig. 29 für Ankerblech 4 Ampèrewindungen pro cm, $4 \cdot 42,5 = 169$ Ampèrewindungen.

Luftspalt.

Für die Berechnung der Ampèrewindungen für den Luftzwischenraum sind verschiedene Methoden vorgeschlagen, die sich

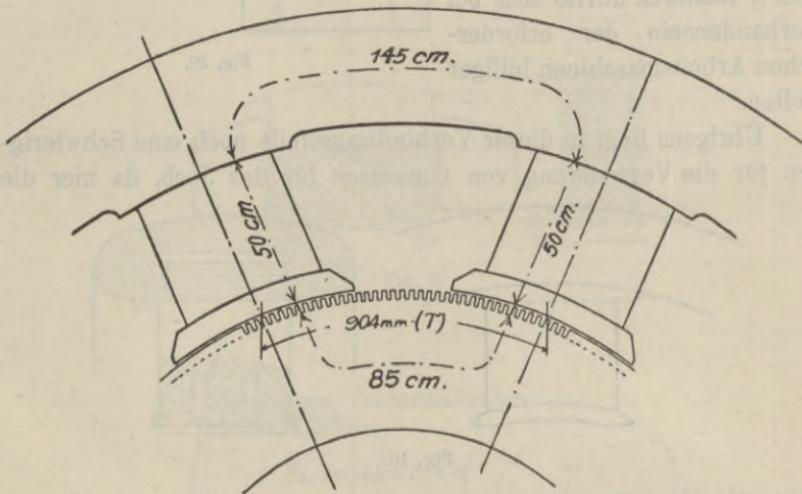


Fig. 41.

namentlich durch die Bestimmung des mittleren Luftquerschnitts für den Kraftlinienfluss zwischen Polschuh und Anker von einander unterscheiden.

Es ist ohne weiteres klar, dass der Eintrittsquerschnitt in das Ankereisen kleiner ist als der Austrittsquerschnitt aus dem Polschuh. Nach Versuchen von H. S. Hele-Shaw, A. Hay und P. A. Powell, die in der E. T. Z. 1905, S. 349 beschrieben sind, ergibt sich die Sättigung in Luft durch Multiplikation der aus der Polschuhfläche berechneten Sättigung mit einer Konstanten, die von dem Verhältnis $\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Zahnbreite}}$ und $\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Luftspalt}}$ abhängt;

aus der gegebenen Tabelle lassen sich folgende Werte bestimmen, die in Tabelle II zusammengestellt sind.

Tabelle II.

$\frac{\text{Zahnbreite}}{\text{Nutbreite}}$	$\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Luftspalt}}$	K
2	1,5	1,1
1,2	2	1,2
1	4	1,25
0,8	4	1,33

In den meisten Fällen werden die Dimensionen sich der zweiten Reihe nähern, z. B. Zahnbreite 12 mm, Nutbreite 10 mm, Luftspalt 5 mm. Dementsprechend kann man den „Kontraktionskoeffizient“ durchschnittlich mit 1,2 einsetzen. Das gilt auch mit guter Annäherung für unseren Fall, in dem $\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Luftspalt}} = \frac{1,23}{0,9} = 1,4$ ist, wodurch K eigentlich kleiner wird. Für die weitere Verkleinerung des Querschnittes infolge der Lüftungsspalte im Anker erhöhen wir K noch um einige (bis 5) Prozent.

Dagegen ist zu berücksichtigen, dass ausser den Kraftlinien direkt unter dem Polschuh auch solche von den seitlichen Polkanten in den Anker übertreten, diese nützliche Streuung hängt wesentlich von der Form der Polschuhe und von der Luftsättigung ab; man kann annehmen, dass sie bei den Polformen nach Fig. 31, 35, 38 20%, nach Fig. 36, 37 10% beträgt.

Für Polschuhe mit sehr langen Vorsprüngen oder Verengungen sinkt der Wert noch weiter.

Für normale Verhältnisse kann man also 10—20% annehmen, wobei man mit Rücksicht auf die Sicherheit die niedrigen Werte wählen wird, solange die höheren nicht durch besondere Anordnung (z. B. wie in Fig. 38) wahrscheinlicher sind.

Setzen wir für unsere Polschuhe die Streuung mit 10% ein und berücksichtigen die Nuten und Lüftungsspalten durch $K = 1,25$, so ergibt sich:

$$\text{die Polschuhfläche } 61 \cdot 40 = 2440 \text{ cm}^2;$$

die mittlere Sättigung in Luft ist aber

$$1,25 \cdot \frac{21,8 \cdot 10^6}{1,10 \cdot 2440} = 10200,$$

der Luftspalt ist $0,9 \text{ cm}$. Mithin aus der Beziehung

$$\text{Kraftliniendichte in Luft } H = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{n \cdot i}{l}$$

$$n \cdot i = \frac{10}{4 \cdot \pi} \cdot H \cdot l = 0,8 \cdot B_L \cdot \delta$$

$$n \cdot i = 0,8 \cdot 10200 \cdot 0,9 = 7350 \text{ Ampèrewindungen}$$

Zähne.

Von den $21,8 \cdot 10^6$ Kraftlinien verlaufen bei 10% nützlicher Streuung nur $\frac{21,8 \cdot 10^6}{1,10} = 19,8 \cdot 10^6$ direkt unter der Polfläche, diese sind also für den Gesamtzahnquerschnitt unter der Polfläche einzusetzen.

Nehmen wir zunächst an, dass dieser Kraftfluss nur durch die Zähne, nicht durch die Nuten geht, so ist es klar, dass die Sättigung über die Zahnlänge verschieden sein muss, da die Zahnbreite sich vom Zahnkopf nach dem Zahnfuß verkleinert. Als Mittelwert nehmen wir die Sättigung in der Zahnmitte an, wodurch wir auch dem Unterschied der erforderlichen Ampèrewindungszahlen einigermaßen gerecht werden.

Der Anker hat 264 Nuten, die Polzahl ist 8, die Polteilung 91 cm , der Polbogen 61 cm , die Polbedeckung also $\frac{61}{91} = 0,67$, mithin fallen auf einen Pol $\frac{0,67 \cdot 264}{8} = 22$ Zähne.

Bei dem Ankerdurchmesser 230 cm , der Nutentiefe $3,3 \text{ cm}$ und der Nutbreite $1,23 \text{ cm}$ ist die Zahnbreite in der Mitte

$$\frac{(230 - 3,3) \pi}{264} - 1,23 = 1,47 \text{ cm},$$

der gesamte Zahnquerschnitt in der Mitte bei $28,4 \text{ cm}$ Eisenlänge

$$22 \cdot 1,47 \cdot 28,4 = 920 \text{ cm}^2,$$

die mittlere Zahnsättigung

$$\frac{19,8 \cdot 10^6}{920} = 21600.$$

Dieser Wert gilt aber nur unter der oben gemachten Voraussetzung, dass die Kraftlinien nur durch die Zähne gehen, in Wirklichkeit verläuft ein beträchtlicher Teil durch die Nuten, sodass die wirkliche Zahnsättigung geringer ist als die berechnete „scheinbare“.

Das Verhältnis zwischen beiden ist wesentlich abhängig von dem Verhältnis der Zahnbreite zur Nutbreite und dem Verhältnis Luftspalt + Nuttiefe zur Nuttiefe, wie eine einfache Überlegung ergibt.

Für mittlere Dimensionen kann man sich der in Fig. 42 links wiedergegebenen Kurven bedienen. Als Ordinaten sind die

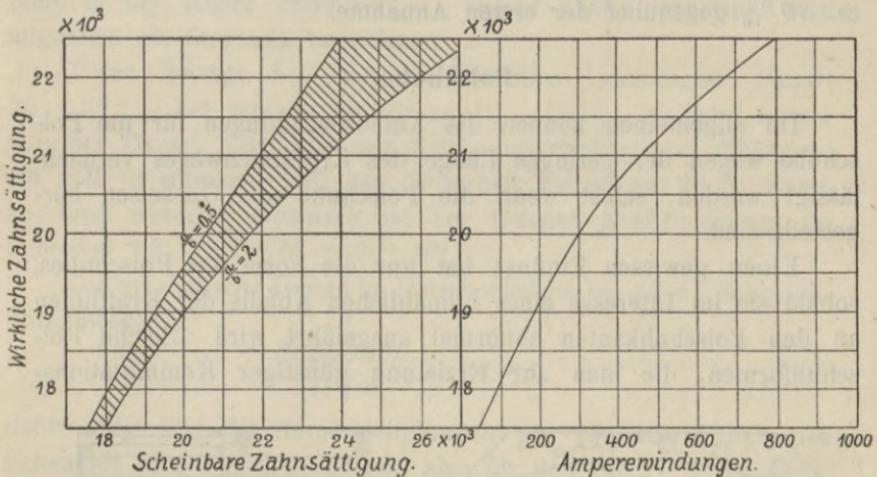


Fig. 42.

wirklichen Sättigungen, als Abscissen die scheinbaren aufgetragen.

Die obere Begrenzungslinie gilt für $\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Zahnbreite}} = 0,5$, die untere für $\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Zahnbreite}} = 2$.

Für dazwischenliegende Werte muss man sinngemäss interpolieren. In derselben Figur rechts ist die Magnetisierungskurve für Blech bei so hohen Sättigungen wiedergegeben.

Der Bequemlichkeit wegen sind beide Kurven in einer Figur dargestellt, sodass die Ordinaten für beide gleich sind. Für unseren Fall ist die scheinbare Sättigung berechnet zu 21600, $\frac{\text{Nutbreite}}{\text{Zahnbreite}}$ ungefähr = 0,8; die wirkliche Sättigung aus der

linken Kurve 20600, dafür aus der rechten Kurve 400 Ampèrewindungen pro *cm*. Bei 3,3 *cm* Zahnlänge $3,3 \cdot 400 = 1320$ Ampèrewindungen.

Die oben zu 10 % geschätzte Verbreiterung ist von grosser Wichtigkeit, wie folgende Überlegung zeigt: Wäre sie zu 15 % angenommen, so hätte sich ergeben die scheinbare Sättigung $\frac{1,10}{1,15} \cdot 21800 = 20800$, die tatsächliche aus Fig. 42 = 19800, die M. M. K. = 280

pro Feldspule $3,3 \cdot 280 = 920$ Ampèrewindungen.

Das bedeutet eine Verkleinerung um 400 Ampèrewindungen oder ca. 30 % gegenüber der ersten Annahme.

Polschuhe.

Im allgemeinen können die Ampèrewindungen für die Polschuhe wegen der geringen Länge des Kraftlinienweges vernachlässigt werden, selbst wenn die Polschuhe aus Gusseisen hergestellt sind.

Einen gewissen Einfluss hat nur die Form des Polschuhes, sobald sie im Interesse eines allmählichen Abfalls der Kraftlinien an den Polschuhkanten abnormal ausgeführt wird. Solche Polschuhformen, die man zur Erzielung günstiger Kommutations-

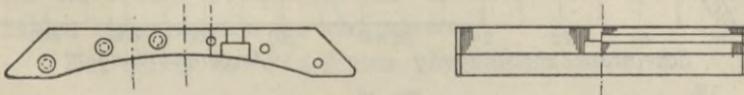


Fig. 43.

bedingungen vorgeschlagen hat und auch oft anwendet, sind in den Figuren 40 und 43 dargestellt.

Ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Kommutationsverhältnisse sind sie im allgemeinen wohl kaum, wenn auch mitunter eine Maschine, die zum Funken neigt, durch Verwendung spezieller Polschuhe verbessert werden kann.

Der Zweck der Anordnung ist jedesmal der, die Zahl der Kraftlinien nach den Enden der Schuhe zu allmählich abnehmen zu lassen, um ein allmählich wachsendes Kommutierungsfeld zu erhalten. Dies wird erreicht durch grösseren Abstand der Pol-ecken vom Anker (Fig. 43), Einfräsen von Schlitz in die Kanten oder Querschnittsverengung vor den Kanten u. a. m.

Solche Formen werden bei der Berechnung der Ampèrewindungen für den Luftspalt berücksichtigt durch Bestimmung der mittleren Fläche des Polschuhs oder des mittleren Abstandes.

Ist durch die Verhältnisse des Ankers (breite Nuten) starke Erwärmung der Polschuhe infolge von Wirbelströmen zu befürchten, so stellt man sie zweckmässig aus Blechen nach Figur 43 her.

Pol und Joch.

Der magnetische Fluss in den Polen und im Joch ist grösser als der in den Anker eintretende, da sich ein Teil der in den Schenkeln erzeugten Kraftlinien direkt durch die Luft schliesst, ohne in den Anker einzudringen. Dieser Kraftlinienverlust wird allgemein als Streuung bezeichnet.

Diese beträgt bei kleinen Maschinen gedrängter Bauart 25 — 30 %, bei grossen Maschinen 10 — 15 %; sie wird ausser von der Bauart auch von den Sättigungsverhältnissen abhängen; sie soll in unserem Fall der Sicherheit halber zu 20 % angenommen werden. Demnach ist der Gesamt-Kraftlinienfluss im Schenkel $1,2 \cdot 21,8 \cdot 10^6 = 26 \cdot 10^6$.

Die magnetische Dichte im Polschenkel ist bei 47 cm Schenkel-durchmesser

$$\frac{26000000}{1740} = 14900,$$

dafür (Fig. 29) 23 Ampèrewindungen pro cm, die Länge des Schenkels plus Polschuh 50 cm, also für den Pol

$$50 \cdot 23 = 1150.$$

Die Kraftlinienzahl im Joch wird etwas kleiner sein als die im Schenkel, sie soll aber der Einfachheit halber gleich gesetzt werden.

Der Jochquerschnitt ist 1386 cm^2 , in ihm verläuft der halbe Kraftlinienfluss, daraus Sättigung im Joch

$$\frac{26000000}{2 \cdot 1386} = 9400,$$

nach Fig. 29 erforderliche Ampèrewindungen = 6,
Länge des Kraftlinienweges für eine Feldspule

$$\frac{145}{2} = 72,5 \text{ cm},$$

also für das Joch $72,5 \cdot 6 = 435$ Ampèrewindungen.

Die gesamte Ampèrewindungszahl einer Feldspule bei 574 Volt E. M. K. setzt sich aus den für die einzelnen Teile berechneten Werten nach Tabelle III zusammen:

Tabelle III.

	Ampèrewindungen	in %
Ankereisen unter den Nuten	169	1,6
Zähne	1320	12,5
Luftspalt	7350	70,6
Pol	1150	11
Joch	435	4,3
Summe:	10424	100,0

Danach sind rund 10450 Ampèrewindungen pro Feldspule nötig, um den Widerstand des gesamten magnetischen Kreises zu überwinden, bei einem Gesamtkraftlinienfluss von $26 \cdot 10^6$ in den Polen, von $21,8 \cdot 10^6$ im Ankereisen, unter der Voraussetzung, dass sich die Kraftlinien gleichmässig über die verschiedenen Querschnitte verteilen. Das wird aber nur bei Leerlauf der Maschine zutreffend sein, wobei dann die E. M. K. 574 entsprechend 10450 Ampèrewindungen beträgt.

Kapitel IV.

Ankerrückwirkung.

Sobald in den Ankerleitern Ströme fließen, versuchen diese ebenfalls magnetische Felder hervorzurufen. In Wirklichkeit bestehen diese Felder nicht selbständig für sich, sondern sie setzen sich mit den durch die Feldspulen hervorgerufenen Hauptfeldern zu resultierenden Kraftflüssen zusammen; es ist nun zu untersuchen, wie das Hauptfeld durch diese Zusammensetzung beeinflusst wird. Man bezeichnet die Einwirkung der Ankerfelder auf die Hauptfelder als Ankerrückwirkung.

In Figur 44 befinden sich die Bürsten in der neutralen Zone, der Strom teilt sich in die beiden Ankerzweige, sodass die Ströme in den Ankerleitern die durch Punkt und Kreuz bezeichneten Richtungen haben. Diese Stromverteilung ruft ein magnetisches Feld hervor, senkrecht zu dem ursprünglichen Feld.

Das aus diesen beiden resultierende Gesamtfeld weicht von der Lage des ursprünglichen ab und zwar ist es in der Drehrichtung verschoben. Bei dieser Bürstenstellung wird also lediglich eine Verdrehung des Feldes hervorgerufen.

Liegen dagegen die Bürsten (wie in Figur 45) mitten unter dem Pol und fließen wiederum Ströme der bezeichneten Richtung — sie müssen

natürlich von aussen hervorgerufen werden, da die E. M. K. der Maschine bei dieser Bürstenstellung gleich Null ist —, so wird durch die Ankerwindungen ein Feld hervorgerufen, das dem ursprünglichen entgegengesetzt gerichtet ist, also eine Schwächung hervorruft.

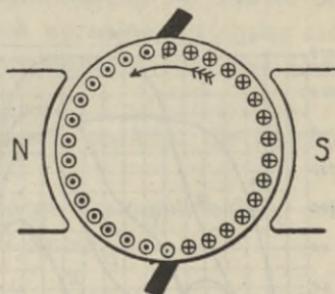


Fig. 44.

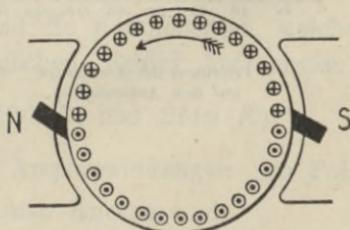


Fig. 45.

In jeder Zwischenstellung der Bürsten, z. B. Fig. 46, kann man die magnetomotorische Kraft der Ankerwindungen in zwei Komponenten zerlegen, die eine mit schwächender Wirkung auf das ursprüngliche Feld, hervorgerufen durch die Ankerleiter zwischen den durch die Bürsten senkrecht zur Richtung des Hauptfeldes gezogenen Linien (a, a), die andere mit drehender Wirkung, hervorgerufen durch die übrigen Ankerleiter.

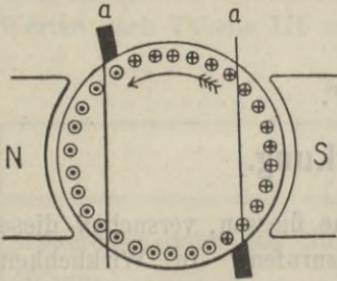


Fig. 46.

Fig. 46 entspricht ungefähr den normalen Verhältnissen, Figur 44 und 45 geben die beiden Grenzfälle, die in der Praxis überhaupt nicht oder nur selten (Fig. 44) erreicht werden.

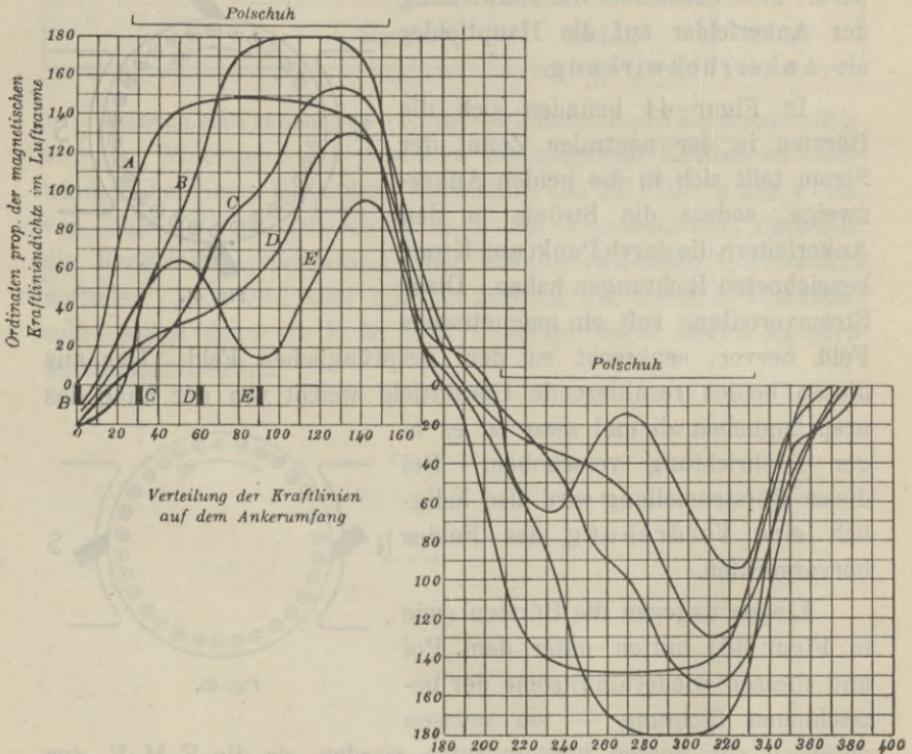


Fig. 47.

Fig. 47 zeigt die Prüfungsergebnisse eines vierpoligen Trommelankers mit Parallelwicklung für 17 KW Leistung und 250 Volt.

Die Messungen wurden ausgeführt bei Leerlauf (*A*) und bei Voll-Last für verschiedene Bürstenstellungen (*B*, *C*, *D*, *E*).

Die Kurve *B* für Voll-Last und Bürsten in der neutralen Zone zeigt die Verschiebung des magnetischen Feldes, die gleichzeitig eine gewisse Verzerrung bedeutet, in dem die Feldstärke an der einen Polkante geschwächt, an der anderen verstärkt wird; der Flächeninhalt der Kurve *B* ist im übrigen gleich dem der Kurve *A*. Der Gesamtkraftlinienfluss hat also keine Schwächung erfahren.

Die Kurven *C* und *D* entsprechen der Voll-Last bei Bürstenverschiebungen um $\frac{1}{6}$ und $\frac{1}{3}$ des Bürstenabstandes, zu der Verdrehung des Feldes tritt die Schwächung.

In Kurve *E* für Voll-Last und Verschiebung der Bürste bis unter die Mitten der Pole tritt wesentlich nur die Schwächung auf, die bemerkbare Verschiebung ist auf Ungleichmässigkeit des Luftspaltes zurückzuführen.

Eine genaue Auswertung der Kurven bestätigt die Theorie der Anker-Rückwirkung.

Die Versuchsmaschine hatte vierpolige Trommelwicklung mit 79 Spulen von je 6 Windungen in 79 Nuten.

Es fallen also auf jeden Pol $\frac{79 \cdot 6}{4} = 119$ Windungen. Der Ankerstrom war 71,5 Ampère, pro Zweig $\frac{71,5}{4} = 18$ Ampère, folglich $119 \cdot 18 = 2140$ Ampèrewindungen pro Pol.

Für die Kurven *C*, *D* und *E* sind die Komponenten, welche nur eine Schwächung des ursprünglichen Feldes hervorrufen: $\frac{1}{3} \cdot 2140 = 710$ (*C*), $\frac{2}{3} \cdot 2140 = 1420$ (*D*) und 2140 (*E*).

Die Felderregung betrug 3000 Ampèrewindungen pro Pol.

Die Flächeninhalte der verschiedenen Kurven sind:

<i>A</i>	. . . .	49 cm ²	= 100 ‰
<i>B</i>	. . . .	49 „	= 100 ‰
<i>C</i>	. . . .	36 „	= 74 ‰
<i>D</i>	. . . .	27 „	= 55 ‰
<i>E</i>	. . . .	20 „	= 41 ‰

Diesen Zahlen entsprechen die Kraftlinienzahlen pro Pol.

Die Werte sind in Tabelle IV zusammengestellt:

Tabelle IV.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	
Kurve	Kraft- linienzahl pro Pol in %	Feld- erregung in Ampère- win- dungen	Ampère- win- dungen des Ankers	Ent- magneti- sierende Anker- ampère- win- dungen	Resultierende Erregung aus 3 und 5	
					in Ampère- win- dungen	in %
<i>A</i>	100	3000	0	0	3000	100
<i>B</i>	100	3000	2140	0	3000	100
<i>C</i>	75	3000	2140	710	2200	76
<i>D</i>	55	3000	2140	1420	1580	53
<i>E</i>	41	3000	2140	2140	860	29

Man erkennt, dass die Magnetisierung nach Spalte 2 prozentual der resultierenden Erregung in Spalte 6 gleich ist, mit Ausnahme der Kurve *E*. Der Unterschied für diese Bürstenstellung zwischen der resultierenden Erregung von 29 % und der Magnetisierung von 41 % erklärt sich leicht aus der Stellung der Bürsten mitten unter dem Pol. Hierbei liegt eine grosse Zahl der Ankerwindungen so, dass ihr Einfluss nur auf einen geringen Teil der Kraftlinien beschränkt ist und ihre entmagnetisierende Wirkung nicht so wirksam ist, als wenn sie nach Art einer Spule auf dem Ankerumfang verteilt sind (Fig. 45). Auf eine genaue Berechnung ihrer Wirksamkeit kann hier verzichtet werden, da für die Praxis diese äusserste Stellung ja nicht in Frage kommt.

Aus den Versuchen ergibt sich, dass der Einfluss der Ankerampèrewindungen, welche eine verdrehende Wirkung ausüben, auf die Gesamtzahl der Kraftlinien in diesem Fall ohne Einfluss ist. Nach andern Versuchen des Verfassers gilt dies aber nur für Maschinen mit geringer Zahnsättigung und grossem Luftzwischenraum.

Das ergibt auch die einfache Überlegung: Der geringeren Sättigung an der einen Polkante entspricht die höhere Sättigung an der anderen Polkante, solange die Gesamtkraftlinienzahl gleich bleibt. Für die höhere Sättigung ist aber eine grössere Erregung

erforderlich. So entspricht in unserem Falle der resultierenden Erregung bei Voll-Last, $\sqrt{3000^2 + 2140^2} = 3680$, die höhere Sättigung der Kurve B . In dem Ordinatenmassstab ist die Sättigung bei Kurve $A = 148$, bei Kurve $B = 180$, es ist aber $\frac{3680}{3000} \cdot 148 = 181$.

Sind aber die Zahnsättigungen sehr hoch, so ist die infolge der verdrehenden Wirkung an der einen Polkante auftretende Zunahme der Sättigung kleiner als die Abnahme an der anderen Polkante und die Gesamtkraftlinienzahl nimmt ab.

Je grösser das Verhältnis Ampèrewindungen für Zähne durch Ampèrewindungen für Luft ist, um so mehr muss sich die Schwächung des Feldes bemerkbar machen; andererseits müssen z. B. bei Ringanker-Maschinen die verdrehenden Ankerwindungen ohne Einfluss auf die Kraftlinienzahl sein.

Einfluss der entmagnetisierenden Ankerampèrewindungen.

Der magnetisierende und entmagnetisierende Einfluss der Ankerampèrewindungen ist leicht bestimmt. Stehen die Bürsten in der neutralen Zone, so ist die entmagnetisierende Wirkung gleich Null, werden sie in der Drehrichtung verschoben, so tritt eine das ursprüngliche Feld abschwächende Wirkung auf, werden sie entgegengesetzt der Drehrichtung verschoben, so tritt eine verstärkende Wirkung auf. Aus Fig. 46 ist ersichtlich, dass bei einer Verschiebung der Bürsten um B Kommutatorsegmente in der Drehrichtung, die Windungen zwischen $2 \cdot B$ Segmenten zur Wirkung kommen. Ist die Zahl der Windungen zwischen zwei Segmenten S , so ist die Windungszahl $2 \cdot B \cdot S$. Aus dem Ankerstrom J , der Anzahl der parallelen Stromzweige A folgt der Strom der Windung $\frac{J}{A}$.

Mithin ist die entmagnetisierende Wirkung gleich

$$2 \cdot \frac{B \cdot S \cdot J}{A}$$

Sobald wir also die Bürstenverschiebung kennen, können wir diese Gegen-Ampèrewindungen berechnen und durch Vergrösserung der Windungszahl pro Feldspule ausgleichen.

Eine sichere Methode zur Vorausberechnung der Bürstenverschiebung giebt es nicht; wir sind dabei auf Schätzungen angewiesen und können, um einen Anhalt für die Rechnung zu haben, bei mehrpoligen Maschinen folgende Tabelle V benutzen.

Tabelle V.

Ankerampèrewindungen pro Pol Feldampèrewindungen pro Pol	Bürstenverschiebung in % des Bürstenabstandes
0,4	6 ‰
0,6	8 ‰
0,8	10 ‰

Z. B. bei einer Maschine von 600 Ampère mit 8 Polen, 280 Windungen und reiner Parallelschaltung sind die Ankerampèrewindungen pro Pol

$$\frac{280}{8} \cdot \frac{600}{8} = 2620,$$

die Feldampèrewindungen für Leerlauf 6000,

$$\frac{\text{Ankerampèrewindungen}}{\text{Feldampèrewindungen}} = \frac{2620}{6000} = 0,44,$$

Bürstenverschiebung 6 ‰,

$$\text{Gegenwindungen } 2 \cdot \frac{6}{100} \cdot 2620 = 315.$$

Einfluss der verdrehenden Ankerampèrewindungen.

Die Wirkung der sogenannten Querwindungen erstreckt sich fast ausschliesslich auf den Luftspalt und die Zähne; wir könnten also

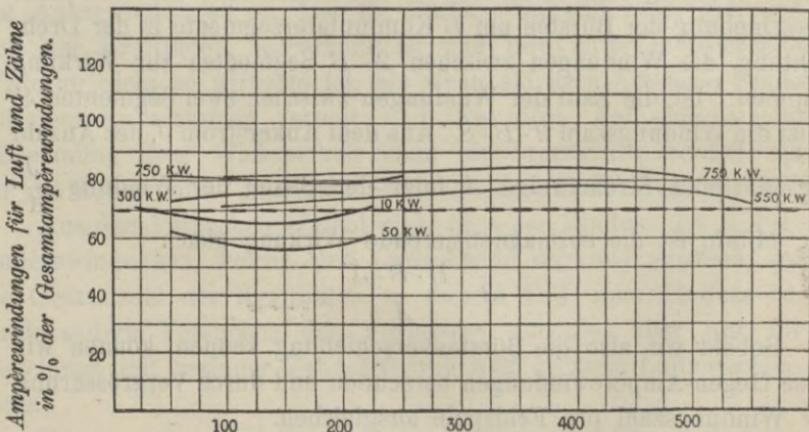


Fig. 48. Spannung der Maschinen in Volt.

die Querwindungen in ein bestimmtes Verhältnis zu den für Luft und Zähne erforderlichen Ampèrewindungen setzen Diese machen

den grössten Teil der Gesamtampèrewindungen für Leerlauf aus und stellen für eine Maschine einen nahezu konstanten Prozentsatz derselben dar.

Das ergibt sich aus Fig. 48 und Tabelle VI, in denen der prozentuale Anteil der magnetomotorischen Kräfte für Luft und Zähne bei verschiedenen Sättigungen an sechs Maschinen verschiedener Grösse dargestellt ist.

Tabelle VI.

Kilowatt	Spannung	Ampèrewindungen						Luftspalt + Zähne	
		Kern	Pol	Joch	Luftspalt	Zähne	Gesamt	in %	
10	50	8	43	58	237	5	351	242	69
10	100	20	67	160	472	14	733	486	66
10	150	32	95	314	710	138	1289	848	66
10	220	68	210	515	950	1000	2743	1950	71
50	50	30	60	102	306	8	506	315	62
50	100	45	105	306	612	15	1083	627	58
50	150	60	135	612	918	42	1767	960	56
50	200	75	210	950	1224	510	2969	1734	58
50	225	105	405	1260	1460	1410	4640	2870	61,8
300	50	38	170	200	1120	9	1537	1129	73,5
300	100	58	272	400	2240	21	2991	2261	75
300	150	76	340	680	3360	101	4577	3461	76
300	200	142	770	1360	4770	2500	9542	7270	76,5
550	100	35	160	180	940	5	1320	945	71,5
550	200	63	276	330	1870	15	2554	1885	74
550	300	88	345	420	2800	25	3678	2825	77
550	400	105	415	510	3760	50	4840	3810	79
550	450	122	505	570	4200	90	5487	4290	78,5
500	500	140	690	660	4700	250	6440	4950	77
550	550	175	1060	900	5170	750	8055	5920	73,5
750	50	17	120	120	1084	9	1350	1093	81
750	100	37	210	270	2170	37	2703	2186	81
750	150	41	270	480	3250	41	4086	3295	81
750	200	66	450	780	4320	66	5976	4680	78,5
750	230	74	600	1100	5100	2000	8847	7100	80,2
750	100	25	160	87	1190	15	1477	1205	81,7
750	200	63	280	174	2390	20	2927	2410	82,4
750	300	75	360	290	3580	70	4375	3650	83,5
750	400	100	480	435	4780	400	6195	5180	83,7
750	500	175	1100	580	6100	2000	10555	8100	80,5

Für alle diese Entwürfe ergeben die Ampèrewindungen für Luftspalt und Zähne nahezu konstant bleibende prozentuale

Werte und zwar zwischen 60 und 80 % der Gesamt-Ampèrewindungen.

Sind somit die Ampèrewindungen für Luft und Zähne fast für alle Verhältnisse ein konstanter Teil der Gesamt-Ampèrewindungen für Leerlauf, so kann man die Querwindungen auch direkt auf die Gesamt-Ampèrewindungen beziehen.

Man wird also die Ampèrewindungszahl, welche erforderlich ist, den Einfluss der Querwindungen aufzuheben, durch Multi-

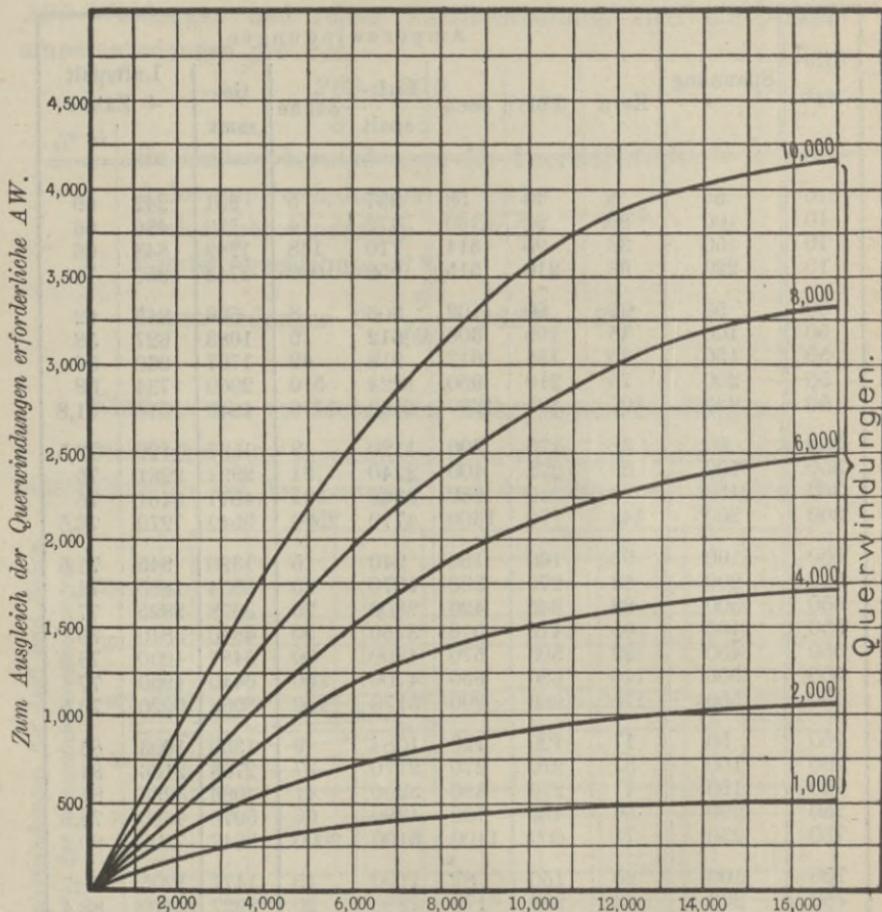


Fig. 49. Gesamt-Ampèrewindungen für Leerlauf.

pplikation der Gesamt-Ampèrewindungen mit einem Koeffizienten bestimmen können.

Die Grösse des Koeffizienten hängt wiederum von dem Verhältnis der Querwindungen zu den Feldampèrewindungen ab;

die Kurven der Fig. 49 sind von diesem Gesichtspunkte aus zusammengestellt und geben einen bequemen Anhalt bei der Schätzung der zusätzlichen Ampèrewindungen für die Erregung.

Die Anzahl der Querwindungen ergibt sich pro Pol, aus der Differenz: Anker-Ampèrewindungen minus Gegenwindungen. In dem Beispiel S. 50 waren die Anker-Ampèrewindungen pro Pol

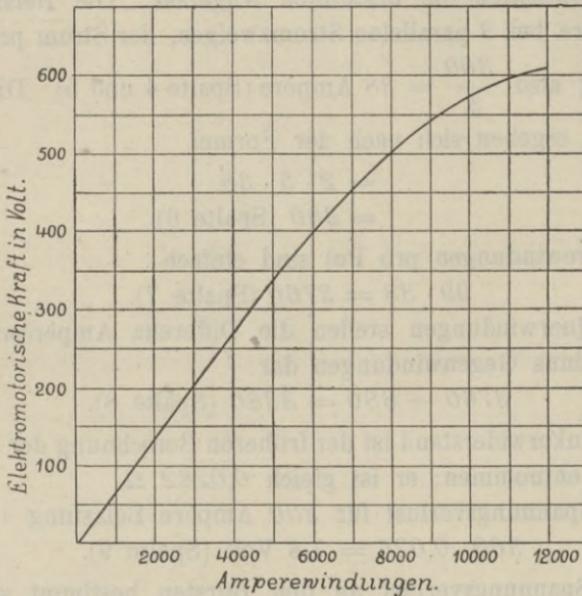


Fig. 50.

2620, die Gegenwindungen 315, mithin die Querwindungen $2620 - 315 = 2305$.

Bei 6000 Ampèrewindungen für Leerlauf ergeben sich aus Fig. 49 800 bis 850 Ampèrewindungen zum Ausgleich der Querwindungen.

Benutzen wir wieder als Beispiel für die ganze Durchrechnung der Erregung den Spoligen 400 KW-Generator, so haben wir zunächst die Magnetisierungskurve (Fig. 50) dieser Maschine für Leerlauf nach den in der Tabelle VII zusammengestellten Werten zu konstruieren.

Nehmen wir nun zunächst an, die Bürsten seien um 5 Segmente in der Drehrichtung von der neutralen Zone aus verschoben, die Belastung der Maschine sei veränderlich, so ergeben sich die Werte der Tabelle VIII. Die Rechnung sei für eine Belastung von 300 Ampère (zweite Reihe) durchgeführt.

Nach Seite 24 ist die Gesamtzahl der Ankerleiter 1584, die der Windungen $\frac{1584}{2} = 792$; bei einer Windung zwischen zwei Lamellen ist dann die Anzahl der Kollektorsegmente ebenfalls 792, oder pro Pol $\frac{792}{8} = 99$ (Spalte 1). Die Werte der Spalten 2 und 3 enthalten die bekannten Angaben. Die Belastung ist 300 Ampère bei 8 parallelen Stromzweigen, der Strom pro Ankerstromzweig also $\frac{300}{8} = 38$ Ampère (Spalte 4 und 5). Die Gegenwindungen ergeben sich nach der Formel

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot 5 \cdot 38 \\ &= 380 \text{ (Spalte 6).} \end{aligned}$$

Die Ampèrewindungen pro Pol sind einfach

$$99 \cdot 38 = 3760 \text{ (Spalte 7).}$$

Die Querwindungen stellen die Differenz Ampèrewindungen pro Pol minus Gegenwindungen dar:

$$3760 - 380 = 3380 \text{ (Spalte 8).}$$

Der Ankerwiderstand ist der früheren Berechnung der Maschine (Seite 25) entnommen; er ist gleich $0,0262 \Omega$.

Der Spannungsverlust für 300 Ampère Belastung

$$300 \cdot 0,026 = 7,8 \text{ Volt (Spalte 9).}$$

Der Spannungsverlust an den Bürsten bestimmt sich nach dem Härtegrade der Kohle und der Auflagefläche, er ist nahezu unabhängig von dem Strom, da der Bürstenwiderstand bei abnehmender Stromdichte zunimmt. Nach Seite 25 waren Bürsten mit 2,4 Volt Spannungsverlust gewählt (Spalte 10), daraus der Gesamtspannungsverlust $7,8 + 2,4 = 10,2$ Volt (Spalte 11).

Die elektromotorische Kraft der Maschine muss grösser sein als die Klemmenspannung und zwar um den Gesamtspannungsverlust im Inneren der Maschine, $550 + 10,2 = 560,2$ Volt (Spalte 12).

Dieser Spannung entspricht bei Leerlauf nach Fig. 50 eine Ampèrewindungszahl von 9600 (Spalte 13); bei der Belastung von 300 Ampère treten störend als Querwindungen auf 3380 Ampèrewindungen. Zu ihrer Überwindung sind nach Fig. 49. 1300 zusätzliche Ampèrewindungen erforderlich (Spalte 14), ausserdem müssen die 380 Gegenwindungen (Spalte 6) ausgeglichen

Tabelle VII.

Erregung für den 400 KW-Generator bei Leerlauf.

Spannung in Volt	Kraftfluss, der in den Anker eintritt	Luftspalt:			Anker:						Kraftfluss im Pol bei einer Streuung von 1,2	Schenkel:			Joch:			Gesamt-Ampèrewindungen bei Leerlauf	
		Polshuhfläche 2440 cm ² Abstand 0,9 cm Nützliche Streuung 1,10 Kontraktionskoeffizient 1,25	mittlere Luftsättigung	Ampèrewindungen pro 1 cm Länge	erforderliche Ampèrewindungen	scheinbare Sättigung	wirkliche Sättigung	Ampèrewindungen pro 1 cm Länge	erforderliche Ampèrewindungen	Sättigung		Ampèrewindungen pro 1 cm Länge	erforderliche Ampèrewindungen	Sättigung	Ampèrewindungen pro 1 cm Länge	erforderliche Ampèrewindungen	Ampèrewindungen pro 1 cm Länge		erforderliche Ampèrewindungen
10 ⁶ ×																			
150	5,7	2130	2130	1910	5650	5650	2	6,6	2400	1	42	6,85	3900	2	100	2500	2	146	2205
300	11,3	4260	4260	3850	11300	11300	5	16	4800	2	84	13,5	7800	5	250	4900	3	219	4419
450	17	6350	6350	5700	17000	17000	65	215	7200	3,5	147	20,2	11600	11	550	7300	4	292	6904
500	19	7100	7100	6400	18800	18400	130	430	8000	3,8	160	22,8	13100	15	750	8200	4,5	330	8070
550	20,8	7720	7720	6950	20600	19600	260	860	8800	4,5	190	25,0	14300	19	950	9000	5	365	9315
600	22,6	8700	8700	7800	22400	20800	430	1420	9600	5	210	27,0	15500	27	1350	9800	7	510	11290
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Tabelle VIII.

Erregung für den 400 KW-Generator bei 550 Volt Klemmenspannung und verschiedenen Belastungen.

Die Bürsten sind um 5 Kollektorsegmente in der Drehrichtung verschoben.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Kommutatorsegmente pro Pol	Bürstenverschiebung in Segmenten	Windungszahl zwischen zwei Segmenten	Belastung in Ampère	Strom pro Zweig bei 8 parallelen Stromkreisen	Gegenwindungen des Ankers	Ankerwindungen pro Pol	Querwindungen des Ankers	Spannungsverlust im Anker bei 0,026 Ω Ankerwiderstand (Seite 25)	Spannungsverlust an den Bürsten 2,4 Volt bei voller Belastung (Seite 25)	Gesamtspannungsverlust	Elektromotorische Kraft 550 + Spalte 11	Ampèrewindungen für die E. M. K. bei Leerlauf (Fig. 50)	Zusätzliche Ampèrewindungen für die Querwindungen, Spalte 8 (Fig. 49)	Erforderliche Gesamt-Ampèrewindungen Spalten 6 + 13 + 14
99	5	1	150	19	190	1880	1690	3,9	2,4	6,3	556,3	9400	800	10390
99	5	1	300	38	380	3760	3380	7,8	2,4	10,2	560,2	9600	1300	11280
99	5	1	450	56	560	5540	4980	11,7	2,4	14,1	564,1	9700	1800	12060
99	5	1	600	75	750	7420	6670	15,6	2,4	18,0	568,0	9800	2300	12850
99	5	1	750	94	940	9300	8360	19,5	2,4	21,9	571,9	9900	3000	13840

werden, sodass die Gesamterregung bei 300 Ampère Belastung sich zusammensetzt

aus den Ampèrewindungen für Leerlauf	9600
den zusätzlichen „ für die Querwindungen .	1300
„ „ „ „ „ „ Gegenwindungen .	380
	11280

Die für die verschiedenen Belastungen erforderlichen Gesamtampèrewindungen sind in Fig. 51 (mittelste Kurve) zusammengestellt, man sieht, dass die Beziehung zwischen der Belastung der Maschine und der Gesamtampèrewindungszahl für gleiche Klemmenspannung durch eine gerade Linie bestimmter Neigung gegeben ist. In derselben Weise sind die erforderlichen Ampèrewindungszahlen für andere Bürstenstellungen berechnet und

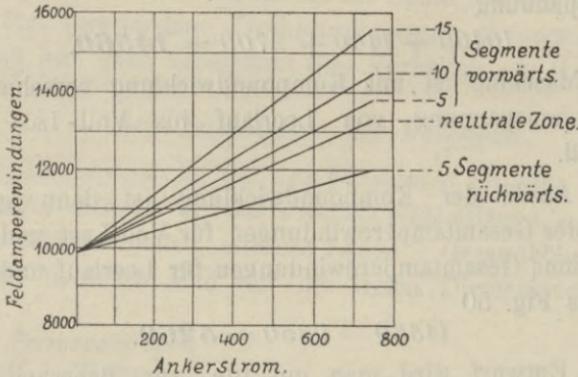


Fig. 51.

in derselben Fig. 51 zusammengestellt. Die Neigungen der geraden Linien hängen von den Bürstenstellungen ab, sodass vom neutralen Punkt aus gerechnet, die Neigung bei Rückwärtsstellen der Bürsten kleiner, bei Vorwärtsstellen grösser wird.

Der Einfluss der Bürstenstellung auf die notwendigen Gesamtampèrewindungen ist also klaggestellt. Die Bürstenstellung ist aber abhängig von den Kommutationsverhältnissen und lässt sich, wie bereits erwähnt, nicht vorausberechnen.

Für volle Belastung unseres 400 KW-Generators wird die günstigste Bürstenstellung etwa 8 Segmente in der Drehrichtung von der neutralen Zone verschoben liegen.

Es sind dann die Gegenwindungen des Ankers, da der vollen Belastung ein Strom von 730 Ampère entspricht,

$$2 \cdot 8 \cdot \frac{730}{8} = 1460,$$

die Ankerampèrewindungen pro Pol

$$99 \cdot \frac{730}{8} = 9040,$$

die Querwindungen

$$9040 - 1460 = 7580.$$

Die Feldampèrewindungen für die erforderliche E. M. K. von 572 Volt bei Leerlauf nach der Magnetisierungskurve (Fig. 50) sind **10400**, mithin aus Fig. 49 die zusätzlichen Ampèrewindungen zur Ausgleichung der 7580 Querwindungen **2700**.

Die Gesamtampèrewindungen bei Voll-Last und 550 Volt Klemmenspannung

$$10400 + 1460 + 2700 = 14560.$$

Die Maschine ist mit Kompoundwicklung versehen, sodass die Klemmenspannung von Leerlauf bis Voll-Last konstant bleiben soll.

Der Anteil der Kompoundwicklung ist dann gleich der Differenz der Gesamtampèrewindungen für Voll-Last und 550 Volt (14560) minus Gesamtampèrewindungen für Leerlauf und 550 Volt (9350) aus Fig. 50

$$14560 - 9350 = 5260.$$

Beim Entwurf wird man gut tun, zur Sicherheit eine um 5 bis 10 % höhere Erregung vorzusehen, als die Berechnung ergeben hat. So werden wir für unseren Fall

die Nebenschlusswicklung für **10300** (10 % Erhöhung),

die Hauptstromwicklung „ **5400** (4 % „)

entwerfen.

Kapitel V.

Feldspule. Berechnungsbeispiele.

Die berechnete Ampèrewindungszahl muss auf dem Pol untergebracht werden und beansprucht einen bestimmten Wickelraum, den man zunächst schätzungsweise bestimmen muss. Man benutzt dazu das Verhältnis zwischen dem Gesamt-Kupferquerschnitt und dem Wickelquerschnitt der Spule, das durch Erfahrungswerte für verschiedene Drahtdurchmesser einigermaßen genau festgelegt ist. Man bezeichnet dies Verhältnis als Raumfaktor.

Der Raumfaktor der Feldspule.

Der Raumfaktor ist bei den Feldspulen oft sehr gering. Als Wickelraum rechnen wir das Produkt Gesamtlänge \times Gesamthöhe bei rechteckigen Spulen, mittlere Länge \times Gesamthöhe bei trapezförmigen; natürlich sind nur die freien Dimensionen, also der

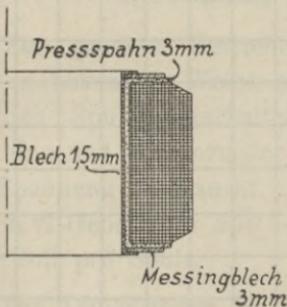


Fig. 52. Nebenschlußspule.

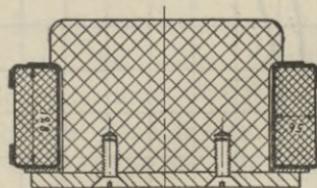


Fig. 53. Nebenschlußspule.

innere Abstand zwischen den Spulenflanschen, wenn solche vorhanden, einzusetzen.

Der Raumfaktor ist um so höher, je kleiner die Spannung pro Spule ist, deshalb wird bei gegebener Leistung, Tourenzahl und Spannung der Raumfaktor um so grösser sein, je grösser die Anzahl der Pole ist.

Für Nebenschlusspulen der Gleichstrommaschinen liegt der Raumfaktor gewöhnlich zwischen $0,40$ und $0,65$, abhängig von

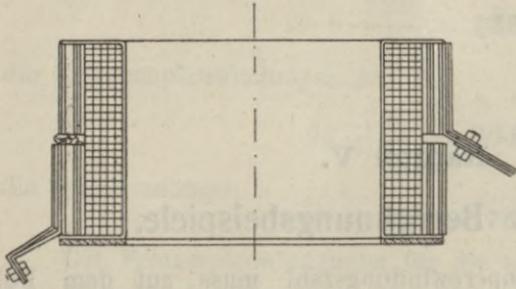


Fig. 54.

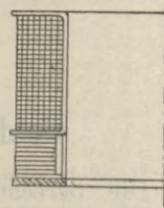
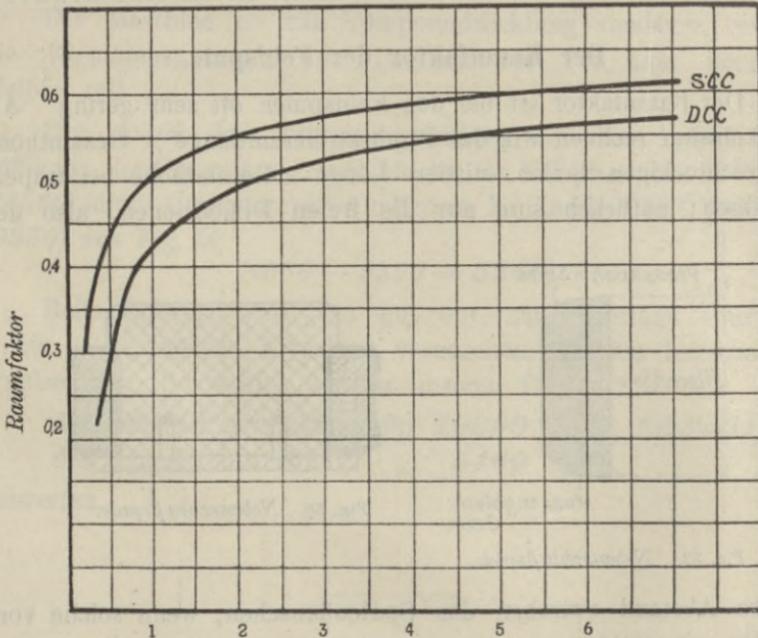


Fig. 55.

Tourenzahl, Spannung und Polzahl; bei kleinen Maschinen für 600 Volt und hohe Tourenzahlen findet man den Raumfaktor mitunter kleiner als $0,25$.

In Hauptstromspulen (Fig. 54) von Compoundmaschinen ist



Drahtdurchmesser in mm; die obere Kurve gilt für einfache Baumwoll-Umspinnung, die untere für doppelte Umspinnung.

Fig. 56.

die Raumausnutzung günstiger, namentlich wenn die Spulen aus Flachkupfer, hochkant (Fig. 55) aufgewickelt sind.

Raumfaktoren von 0,7 und darüber kann man bei den Kompoundwicklungen grosser, langsam laufender Maschinen niedriger Spannung mit hochkant gewickeltem Flachkupfer günstiger Dimensionen wohl erreichen.

Eine bequeme Annäherungsformel zur Bestimmung des Raumfaktors bei Nebenschlusspulen ist für runde Drähte:

$$\left(\frac{\text{Drahtdurchmesser, blank}}{\text{Drahtdurchmesser, isoliert}} \right)^2 \cdot 0,63.$$

Einfacher ist die Benutzung der Kurven der Fig. 56, die für einfache und doppelte Baumwollumspinnung gelten.

Für die 400 KW-Maschine kann bei der 8poligen Anordnung jedenfalls für beide Spulen ein Raumfaktor von 0,56 leicht erreicht werden, der hiernach erhaltene Raum wird ganz roh im Verhältnis der Ampèrewindungen beider Spulen geteilt.

Der Wickelraum kann in unserem Beispiel angenommen werden zu 42 cm Länge bei 4 cm Höhe; von den 42 cm rechnen wir 30 cm am oberen Ende für die Nebenschlusspule, 12 cm am unteren Ende für die Hauptstromspule.

Berechnung der Nebenschlusspule.

Zur genauen Einstellung des Nebenschlussstromes benutzt man in bekannter Weise einen Regulierwiderstand, der in Serie mit den Spulen geschaltet ist und, bei voller Belastung der Maschine und bei normaler Spulentemperatur (60° C.) etwa 10 % der Spannung verbraucht. Es bleiben dann in dem Beispiel des 400 KW-Generators 550 — 50 = 500 Volt für alle Spulen oder 62,5 Volt pro Spule.

Die Dimensionen der Spule sind:

Innerer Spulendurchmesser	. . .	48 cm,
Dicke der Spule	. . . . .	4 „
Äusserer Spulendurchmesser	. . .	56 „
Innerer Spulenumfang	. . . . .	150 „
Äusserer	„	176 „
Mittlere Windungslänge (l_m)	. . .	1,63 m,
Ampèrewindungen pro Spule ($n \cdot i$)	. . . . .	10300.

Benutzt man weiter die bequeme Formel*)

$$Watt_{\text{pro Spule}} = \frac{0,000178 \cdot (l_m \cdot n \cdot i)^2}{G},$$

worin G das Kupfergewicht der Spule in kg ist, so ergibt sich

$$l_m \cdot n \cdot i = 1,63 \cdot 10300 \dots = 16800,$$

$$0,000178 \cdot (l_m \cdot n \cdot i)^2 \dots = 50800,$$

$$\text{Querschnitt der Spule } 4 \cdot 30 \dots = 120 \text{ cm}^2,$$

$$\text{Raumfaktor} \dots = 0,56,$$

$$\text{Kupferquerschnitt der Spule } 0,56 \cdot 120 \dots = 67 \text{ cm}^2,$$

$$\text{Kupfervolumen der Spule } 163 \cdot 67 \dots = 10900 \text{ cm}^3,$$

$$\text{Kupfergewicht in } kg \text{ bei einem spezifischen Gewicht } 8,9 \text{ pro } dm^3$$

$$\frac{10900}{1000} \cdot 8,9 \dots = 97 \text{ kg},$$

$$Watt_{\text{pro Spule}} = \frac{50800}{97} \dots = 525 \text{ Watt},$$

$$\text{äussere Cylinderfläche der Spule } 17,6 \cdot 3,0 = 53 \text{ dm}^2,$$

$$\text{Watt pro } dm^2 \text{ äusserer Fläche } \frac{525}{53} \dots = 9,9.$$

Dieser Wert entspricht einer Temperaturerhöhung von etwa 40° C .

Es wären nun noch die genaue Zahl und die Dimensionen der Spulendrähte festzustellen, aus denen sich das berechnete Kupfergewicht von 97 kg zusammensetzt:

$$\text{Strom pro Spule } \left(\frac{\text{Watt}}{\text{Spannung}} = \frac{525}{62,5} \right) 8,4 \text{ Ampère},$$

$$\text{Windungszahl } \frac{10300}{8,4} \dots = 1240,$$

*) Die Ableitung dieser Formel ist folgende:

$$Watt_{\text{pro Spule}} = i^2 \cdot w, \quad i \text{ der Strom, } w \text{ der Widerstand einer Spule,}$$

$$= i^2 \cdot \frac{c \cdot l_m \cdot n}{q}, \quad n \text{ die Windungszahl, } q \text{ der Querschnitt,}$$

$$= i^2 \cdot c \cdot \frac{l_m}{q} \cdot n \cdot \frac{0,0089 \cdot l_m \cdot n}{0,0089 \cdot l_m \cdot n},$$

$$= \frac{0,000178 \cdot (l_m \cdot n \cdot i)^2}{\frac{l_m \cdot q \cdot n}{1000} \cdot 8,9}, \quad c \text{ mit } 0,02 \text{ eingesetzt,}$$

Der Nenner dieses Ausdruckes ist aber das Kupfervolumen der Spule in dm^3 multipliziert mit dem spezifischen Gewicht des Kupfers, oder das Kupfergewicht der Spule.

Kupferquerschnitt pro Windung = Kupferquerschnitt pro Spule

$$\text{durch Windungszahl } \frac{67}{1240} \cdot 100 \dots = 5,4 \text{ mm}^2,$$

$$\text{Stromdichte } \frac{8,4}{5,4} \dots = 1,55,$$

$$\text{Drahtdurchmesser, blank } \dots = 2,62 \text{ mm},$$

$$\text{„ isoliert, bei einfacher Baumwoll-
umspinnung } \dots = 2,8 \text{ mm},$$

$$\text{Wattverbrauch in allen Nebenschluss-Spulen } 8 \cdot 525 = 4200,$$

$$\text{„ im Regulierwiderstand } 50 \cdot 8,4 \dots = 420,$$

$$\text{Gesamtwattverbrauch für den Nebenschluss } \dots = 4620.$$

Die sich aus der Berechnung ergebende Erwärmung ist zulässig, der ursprünglich angenommene Raumfaktor stimmt nach Fig. 56. Die Spule ist also in diesen Dimensionen ausführbar.

Berechnung der Hauptstromspule.

Für die Hauptstromwicklung waren 12 cm am unteren Teil des Wicklungsraumes vorgesehen. Um eine gewisse Regulierungsmöglichkeit zu haben, wird in den Nebenschluss zu dieser Wicklung ein Widerstand gelegt, sodass nur etwa 80% des Gesamtstromes durch die Hauptstromwicklung fließen, das sind 580 Ampère; bei 5400 Ampèrewindungen ist die Windungszahl pro Pol $\frac{5400}{580} = 9,5$.

Die halbe Windung ist oft bequem wegen der Anschlüsse zu den nächsten Spulen. Die Dimensionen der Leiter sind an Hand der Ergebnisse für die Nebenschlusspule leicht zu bestimmen. War die Stromdichte dort 1,55, so wird man sie hier mit Rücksicht auf die bessere Wärmeabgabe zu 1,8 annehmen können, daraus der Leiterquerschnitt $\frac{580}{1,8} = 320 \text{ mm}^2$. Wählt man Flachkupfer von 40 mm Höhe, so muss die Dicke 8 mm betragen oder man verwendet zwei Flachkupferstreifen von je 4 mm Dicke parallel.

Das Kupfergewicht der Hauptstromspule ist bei der mittleren Windungslänge von 1,63 m

$$\frac{9,5 \cdot 1,63 \cdot 320 \cdot 8,9}{1000} = 44 \text{ kg},$$

Widerstand der 8 Hauptstromspulen

$$8 \cdot \frac{9,5 \cdot 1,63}{320} \cdot 0,02 = 0,0077 \Omega,$$

Wattverbrauch pro Spule $\frac{0,0077 \cdot 580^2}{8} = 325$ Watt,

cylindrische Oberfläche $17,6 \cdot 1,2 = 21 \text{ dm}^2$,

Watt pro dm^2 $\frac{325}{21} = 15,5$.

Dieser Wert mag mit Rücksicht auf die günstigere Wärmeableitung und auf die selten eintretende Vollbelastung noch als zulässig gelten.

Rechnen wir als Isolation Baumwollbandumwicklung von 0,5 mm Stärke, so ist der Raumbedarf in der Länge

$10 \cdot (8 + 2 \cdot 0,5) = 90 \text{ mm}$ bei einem Flachkupferstreifen,

$20 \cdot (4 + 2 \cdot 0,5) = 100 \text{ mm}$ bei zwei „

Um einen Anhalt zu haben, inwieweit die für die Berechnung des magnetischen Kreises und der Feldspulen angegebenen Be-

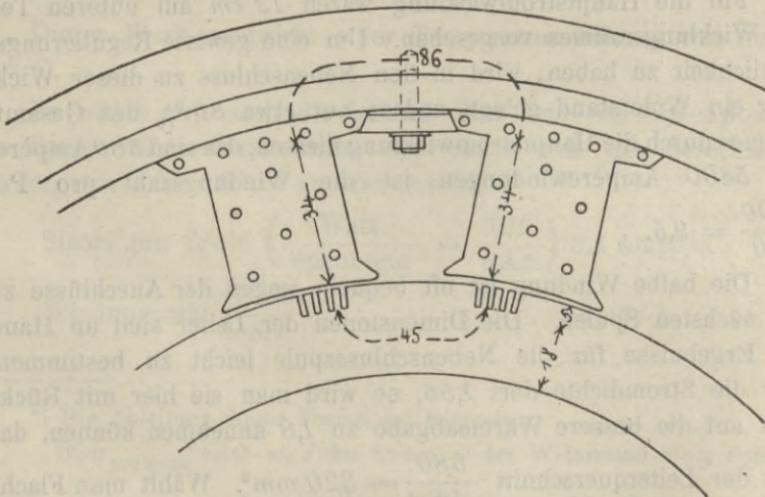


Fig. 57.

rechnungsarten zuverlässig sind, sollen sie im folgenden auf ein ebenfalls von Fischer-Hinnen benutztes Beispiel angewendet werden, es handelt sich um eine 1000 KW-Maschine von 550 Volt 95 U. p. m.

Die erforderlichen Angaben sind zum Teil in Fig. 57, 58, 59 enthalten, zum Teil im folgenden angeführt:

Ankerstrom 1820 Ampère,
 Nutenzahl 286 à 4 Stäbe,
 Stabdimensionen 4 · 18,
 Schaltungsart: Serienparallel mit 10 Stromzweigen,
 Polzahl 14,
 Periodenzahl 11,1,
 Windungslänge 2,56 m,
 Windungszahl zwischen zwei Bürsten 57,7,
 Gesamtlänge " " " 57,7 · 2,56 = 147,5 m,

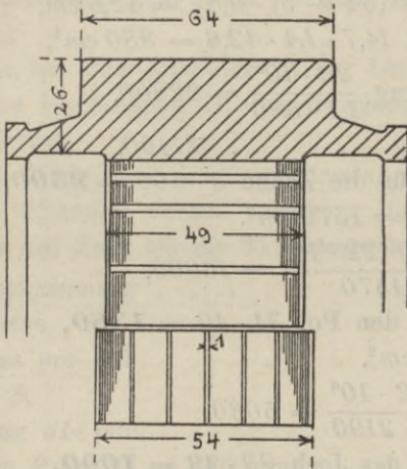


Fig. 58.

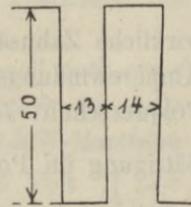


Fig. 59.

Kupferquerschnitt zwischen zwei Bürsten $10 \cdot 72 = 720$,

Ankerwiderstand $\frac{0,02 \cdot 147,5}{720} = 0,0041 \Omega$,

Spannungsverlust im Anker $0,0041 \cdot 1820 = 7,5$ Volt,

„ an den Bürsten geschätzt 2 Volt,

Elektromotorische Kraft $550 + 7,5 + 2 = 560$ Volt,

Kraftfluss pro Pol $\frac{560 \cdot 10^8}{4 \cdot 57,7 \cdot 11,1} = 22 \cdot 10^6$,

Polbogen 40,7 cm,

Pollänge 49 cm,

Polfläche 2000 cm²,

$K = 1,25$, nützliche Streuung 10 %,

mittlere Luftsättigung $\frac{1,25 \cdot 22 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 2000} = 12500$.

Der Luftzwischenraum ist zur Verminderung der Ankerrückwirkung an der einen Polkante $0,8\text{ cm}$, an der anderen $1,2\text{ cm}$, im Mittel 1 cm ,

Ampèrewindungszahl für Luft $\frac{12500 \cdot 1}{1,25} = 10000$,

Zahnbreite in der Mitte 14 mm ,

Polbedeckung $0,72$,

Zähne pro Pol $\frac{286}{14} \cdot 0,72 = 14,7$,

Eisenlänge des Ankers $(54 - 5) \cdot 0,87 = 42,6\text{ cm}$,

Gesamtzahnquerschnitt $14,7 \cdot 1,4 \cdot 42,6 = 880\text{ cm}^2$,

scheinbare Zahnsättigung $\frac{22 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 880} = 22800$,

wirkliche Zahnsättigung 21400 ,

Ampèrewindungszahl für die Zähne $5 \cdot 500 = 2500$,

Polquerschnitt $49 \cdot 32 = 1570\text{ cm}^2$,

Sättigung im Pol $\frac{1,15 \cdot 22 \cdot 10^6}{1570} = 16000$,

Ampèrewindungen für den Pol $34 \cdot 40 = 1360$,

Jochquerschnitt 2190 cm^2 ,

Sättigung im Joch $\frac{22 \cdot 10^6}{2 \cdot 2190} = 5030$,

Ampèrewindungen für das Joch $23 \cdot 43 = 1000$,

Eisenquerschnitt des Ankers $42,6 \cdot 18 = 770\text{ cm}^2$,

Sättigung im Anker $\frac{22 \cdot 10^6}{2 \cdot 770} = 14400$,

Ampèrewindungen für den Anker $15 \cdot 22,5 = 350$,

Gesamtampèrewindungen für Leerlauf **15210**.

Nach Versuch betrug die Erregung bei Leerlauf und 560 Volt 15500 , sodass die Abweichung des berechneten Wertes 2% beträgt.

Die Ankerrückwirkung pro Pol ist $\frac{1820 \cdot 572}{10 \cdot 14} = 7500$,

bei 8% Bürstenverschiebung sind

Gegenwindungen $0,16 \cdot 7500 = 1200$,

Querwindungen 6300 ,

Zum Ausgleich der Querwindungen 1300 .

Mit Rücksicht auf die erwähnte Polschuhordnung wird nur die Hälfte des Kurvenwertes eingesetzt.

Gesamtampèrewindungen für 550 Volt Klemmenspannung und Voll-Last $15210 + 1200 + 1300 = 17710$, nach Versuch **17100**.

Es soll noch erwähnt werden, dass die aus Fig. 49 ermittelten Ampèrewindungszahlen zum Ausgleich der Querwindungen ziemlich reichlich sind. Nach einer Tabelle aus dem erwähnten Buche von Fischer-Hinnen, welche für 11 Maschinen den gesamten Spannungsabfall und die beobachteten Ampèrewindungen für Leerlauf und Voll-Last angiebt, stimmen die nach unserem Verfahren berechneten Werte gut mit den beobachteten Werten, geben allerdings durchschnittlich etwas zu hohe Ampèrewindungszahlen (bis zu 6 ‰).

Nur bei einer Maschine ist der berechnete Wert viel zu hoch, was seine Begründung in den verschiedenen Abständen der Polkanten findet.

Der Wichtigkeit des Gegenstandes wegen soll noch ein drittes Beispiel behandelt werden und zwar die bezüglich der Ankerverhältnisse auf Seite 29 bis 31 untersuchte 100 KW-Maschine.

Klemmenspannung	165 Volt	125 Volt
Ankerstrom	600 Amp.	800 Amp.
Kraftfluss pro Pol	$3,64 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$
Polzahl 8,		
Polteilung 314 mm,		
Polbogen $0,7 \cdot 314 = 220$ mm,		
Pollänge 185 mm,		
Polfläche $22 \cdot 18,5 = 407$ mm ² ,		
Nutzenzahl 140,		
Nutenbreite 8,5 mm,		
Nutentiefe 28 mm,		
Zahnbreite am Kopf 9,5 mm,		
$K = 1,25$, nützliche Streuung 1,1,		
Mittlere Luftsättigung $1,25 \cdot \frac{3,64 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 407} = 10200$		7800
Luftzwischenraum 6 mm,		
Ampèrewindungen für Luft $\cdot \frac{10200 \cdot 0,6}{1,25} = 4900$		3800
Zahnbreite in der Mitte $\frac{(800 - 28) \pi}{140} - 8,5 = 8,8$ mm,		
Zähne pro Pol $\frac{140}{8} \cdot 0,7 = 12,2$,		

Eisenlänge 157 mm,		
Gesamtzahnquerschnitt $12,2 \cdot 0,88 \cdot 15,7 = 168 \text{ cm}^2$,		
Scheinbare Zahnsättigung . . . $\frac{3,64}{1,1 \cdot 168} = 19700$		15000
Wirkliche „ 19100		15000
Ampèrewindungen für die Zähne $200 \cdot 2,8 = 560$		60
Ankereisentiefe 112 mm,		
Eisenquerschnitt $11,2 \cdot 15,7 = 176 \text{ cm}^2$,		
Eisensättigung $\frac{3,64 \cdot 10^6}{2 \cdot 176} = 10300$		8000
Kraftlinienweg $\frac{40}{2} = 20$,		
Ampèrewindungen für das Ankereisen $20 \cdot 5 = 100$		80
Schenkeldurchmesser 185 mm,		
Schenkelquerschnitt 270 cm^2 ,		
Schenkelsättigung $\frac{1,2 \cdot 3,64 \cdot 10^6}{270} = 16200$		12500
Schenkellänge 20 cm,		
Ampèrewindungen für den Schenkel $20 \cdot 32 = 640$		260
Jochquerschnitt $8 \cdot 32 = 256 \text{ cm}^2$,		
Jochsättigung $\frac{1,2 \cdot 3,64 \cdot 10^6}{2 \cdot 256} = 8500$		6500
Kraftlinienweg $\frac{60}{2} = 30 \text{ cm}$,		
Ampèrewindungen für den Schenkel $30 \cdot 5 = 150$		90
Gesamtampèrewindungszahl für Leerlauf 6350 . . .		4290
Gesamtwindungszahl des Ankers . $\frac{140 \cdot 4}{2} = 280$,		
Strom pro Ankerzweig $\frac{600}{8} = 75 \text{ Amp.}$		100 Amp.
Ankerampèrewindungen pro Pol $\frac{280 \cdot 75}{8} = 2620$		3500
Gegenwindungen 315		560
Querwindungen $2620 - 315 = 2300$		2940
Ampèrewindungen zum Ausgleich 835		1060
Gesamtampèrewindungen bei Voll-Last 7500		5910

Zur Vorausberechnung der Spule für die höchste Ampèrewindungszahl bringen wir die auf Seite 60 erwähnte Gleichung

$$\text{Watt}_{\text{pro Spule}} = \frac{0,000178 \cdot (l_m \cdot n \cdot i)^2}{G}$$

in eine andere Form,

$$\frac{G}{10 \cdot l_m \cdot 8,9} = \frac{0,000178 (l_m \cdot n \cdot i)^2}{\text{Watt} \cdot 10 \cdot l_m \cdot 8,9} = \frac{0,0000178 \cdot l_m (n \cdot i)^2}{8,9 \cdot \text{Watt}}$$

Die linke Seite enthält den Kupferquerschnitt der Spule in dm^2 , durch Multiplikation mit 10^4 erhalten wir den Kupferquerschnitt in mm^2 (Q)

$$Q = \frac{0,178 \cdot l_m \cdot (n \cdot i)^2}{8,9 \cdot \text{Watt}}$$

dividieren wir weiter durch den Raumfaktor σ , so ist der Spulenquerschnitt

$$Q' = \frac{Q}{\sigma},$$

bei d Spulendicke die Spulenhöhe

$$h = \frac{Q'}{d},$$

Spulenhöhe \times Spulenumfang ergibt die Abkühlungsfläche.

Nehmen wir für unseren Fall 2% Verlust in der Magnetwicklung, so sind die Watt pro Spule

$$\frac{0,02 \cdot 100000}{8} = 250 \text{ Watt.}$$

Wir führen die Rechnung für 150, 200 und 250 Watt durch.

Spulendicke angenommen 55 mm,

mittlere Windungslänge bei 5 mm für Spulenrahmen

$$l_m = (185 + 10 + 55) \pi = 0,785 \text{ m,}$$

$$\text{Spulenumfang } (185 + 10 + 2 \cdot 55) \pi = 0,955 \text{ m,}$$

$$\text{Raumfaktor } \sigma = 0,53,$$

	150	200	250	Watt
$Q' = \frac{0,178 \cdot 0,785 \cdot 7500^2}{8,9 \cdot \text{Watt} \cdot 0,53} =$	1110	835	665	mm^2
$h = \frac{Q'}{55} \dots \dots \dots =$	202	152	121	mm
Abkühlungsfläche $9,55 \cdot \frac{h}{100} =$	19,3	145	116	dm^2
Watt pro $dm^2 \dots \dots \dots =$	7,8	13,8	21,6	

Tragen wir Watt pro dm^2 und h als Ordinaten zu den Watt als Abscissen auf, so können wir leicht nach dem zulässigen Wert für $Watt/dm^2$ die erforderliche Spulenhöhe bestimmen.

Nehmen wir einen Wert von $10 \text{ Watt}/dm^2$ an, so erhalten wir aus den Kurven:

Wattverlust 170 ($1,7\%$),

Spulenhöhe 177 mm ,

daraus Spulenquerschnitt $55 \cdot 177 = 9730$,

Kupferquerschnitt $0,53 \cdot 9730 = 5150$,

Magnetstrom i schätzungsweise $0,02 \cdot 600 = 12$ Ampère,

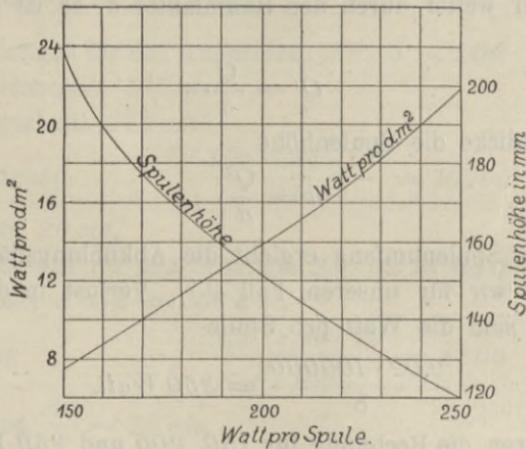


Fig. 60.

$$\text{Windungszahl } n \dots \frac{7500}{12} = 625,$$

$$\text{Drahtquerschnitt } \frac{5150}{625} = 8,25 \text{ mm}^2,$$

$$\text{Widerstand pro Spule } 0,02 \cdot \frac{625 \cdot 0,785}{8,25} = 1,19 \Omega,$$

$$i^2 w = 12^2 \cdot 1,19 = 170 \text{ Watt},$$

Drahtdurchmesser **3,24 mm**.

Ausgeführt: Drahtdurchmesser 3,2, Windungszahl 630.

Spannung pro Spule . . . $1,19 \cdot 12 = 14,3$ Volt,

„ für alle Spulen . $8 \cdot 14,3 = 114$ „

Spannungsverlust im Regulierwiderstand 50 Volt;

bei der Spannung von 125 Volt ist

$$\text{der Magnetstrom } \frac{5910}{625} = 9,5 \text{ Ampère,}$$

$$\text{der Wattverlust } 9,5^2 \cdot 1,19 = 107 \text{ Watt pro Spule.}$$

Die Spannung für alle Spulen $8 \cdot 9,5 \cdot 1,19 = 900$ Volt,
Spannungsverlust im Regulierwiderstand 35 Volt.

Die Erwärmung der Magnetspulen kann auf $(3-4)^\circ \text{C.}$ pro Watt/dm^2 bei Maschinen mit offen liegenden Spulen, auf $(4-5)^\circ \text{C.}$ pro Watt/dm^2 bei Maschinen mit Lagerschildern geschätzt werden. Die niedrigen Werte gelten für hohe Umfangsgeschwindigkeiten, bezw. besonders unterteilte Spulen.

Kapitel VI.

Kommutator.

Ist der Anker im allgemeinen massgebend für die Ausnutzung des Materials und den Wirkungsgrad der Maschine, so ist der Kollektor ausschlaggebend für die Betriebssicherheit der Maschine. So wichtig geringe Kosten und guter Wirkungsgrad sind, so ist doch für den Betrieb die Brauchbarkeit einer Maschine in erster Linie bedingt durch gutes, funkenfreies Arbeiten des Kollektors.

Der funkenfreie Gang ist allerdings nicht allein bestimmt durch den Kommutator, sondern auch durch die Verhältnisse des Ankers und der Magnete. Aber jede im übrigen auch noch so gut entworfene Maschine feuert, wenn der Kollektor fehlerhaft ist.

Die Zahl der Kommutatorsegmente ergibt sich aus der Zahl der Ankerwindungen und der Zahl der Windungen pro Segment.

Im allgemeinen sollte man für eine gegebene Anzahl von Ankerwindungen die Segmentzahl so gross wie möglich machen, da die Kommutation dadurch besser wird, andererseits wird dadurch der mechanische Aufbau beeinträchtigt.

Die Segmentzahl ist auch bedingt durch den Kollektordurchmesser, da man die Dicke eines Segmentes nicht zu klein, die Umfangsgeschwindigkeit nicht zu gross nehmen darf.

Die Dicke eines Segmentes kann bei kleinen Maschinen von 3 mm , bei grossen Maschinen von etwa 4 mm an bis 15 und darüber betragen. Als Material dient neuerdings meist Kupfer, geschmiedet und bearbeitet, oder aus hart gezogenen Profilstäben ausgeschnitten.

Die Isolation zwischen den Lamellen besteht aus weichem, bestem Glimmer oder einem schellackfreien Glimmerprodukt (Mikanit, Megohmit etc.) von $0,6$ bis $1,2\text{ mm}$ Stärke, je nach der Spannung und der Grösse der Segmente.

Die Segmente werden in dem Kollektorkörper isoliert zusammengefasst und gehalten, als Isolation dienen formgepresste

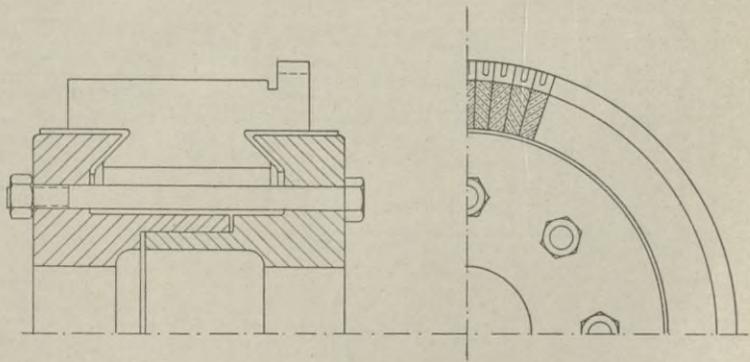


Fig. 61. Kollektor für 4,5 KW.

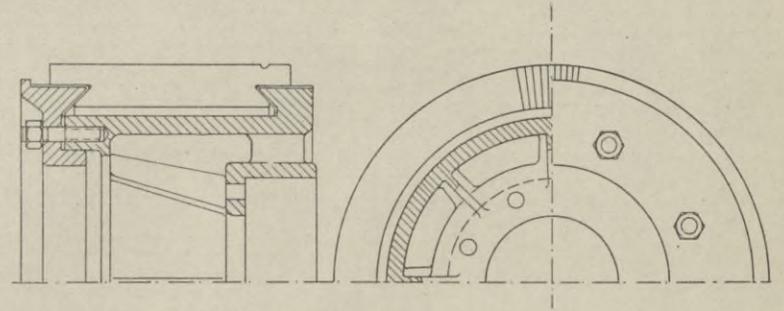


Fig. 62. Kollektor für 100 KW.

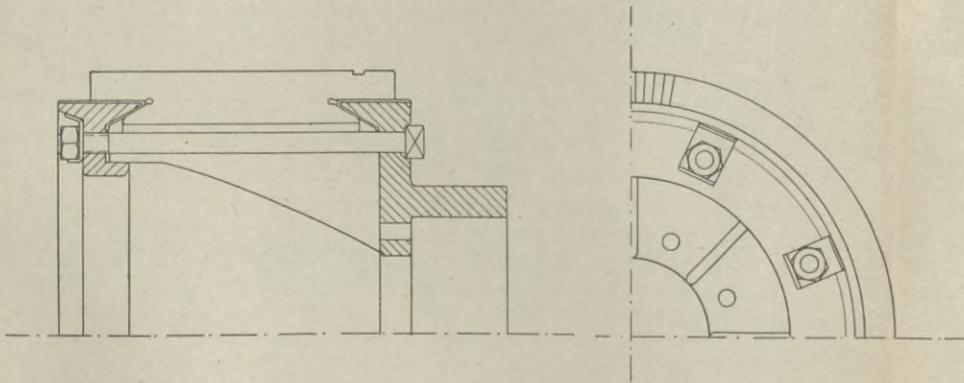


Fig. 63. Kollektor für 150 KW.

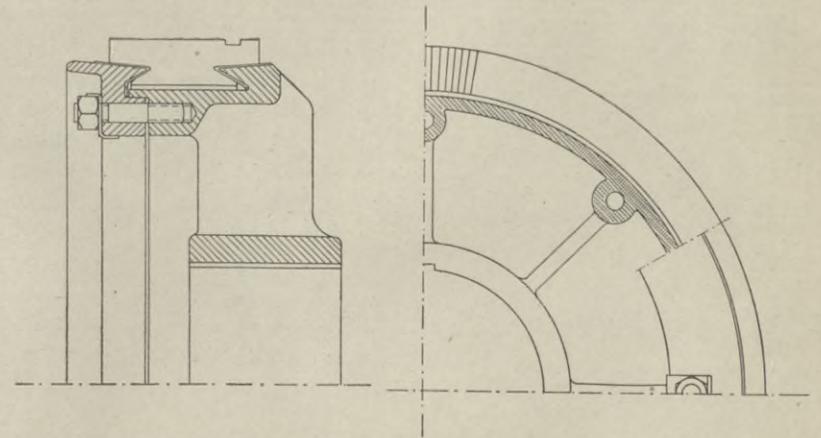


Fig. 64. Kollektor für 300 KW.

Hülsen und Ringe aus einem Glimmerprodukt von 1,5 bis 2 mm, bei sehr grossen Kollektoren auch 3 mm.

Das Verbinden der Ankerleiter mit den Kollektorsegmenten erfolgt durch Verlöten oder Verschrauben nach Fig. 65, 66, 67.

Die Stromabnahme erfolgt durch Kohle oder Metallbürsten. Für normale Tourenzahlen und Spannungen verwendet man fast ausschliesslich Kohlenbürsten. Bei sehr grossen Umfangsgeschwindigkeiten Metallbürsten.

Die Kohlen oder Bürsten sind in Bürstenhalter gefasst, welche auf den Bürstenstiften aufsitzen. Die Bürstenstifte sind befestigt

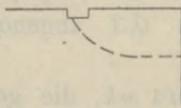
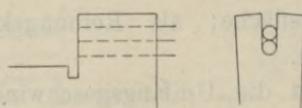


Fig. 65.



Fig. 66.



an den Bürstenbrücken, welche am Lager (Fig. 68, 69) oder am Magnetgestell (Fig. 70) drehbar angeordnet sind, um die genaue Einstellung der Bürsten auf funkenfreien Gang zu ermöglichen.

Die am Kollektor auftretenden Verluste sind Stromwärme und Reibung. Für den Stromwärmeverlust ist massgebend,

dass der Spannungsverlust nahezu unabhängig von der Stromstärke ist, infolgedessen ist der Stromwärmeverlust am Kommutator angenähert proportional dem Strom.

Der Spannungsverlust hängt von dem Material der Bürsten ab; für sehr weiche Kohlen findet man 1,2 Volt, für sehr harte 2,8 Volt (für + und - Bürste zusammen).

Mit Rücksicht auf geringe Kommutatorverluste wird man möglichst weiche, mit Rücksicht auf die Kommutation möglichst harte Bürsten wählen.

In der Regel muss man beides gegen einander abwägen.

Bei 110 Volt-Maschinen sind mit Rücksicht auf den Spannungsverlust weiche Bürsten zu verwenden. Bei Maschinen mit höherer Spannung sind harte Bürsten zulässig.

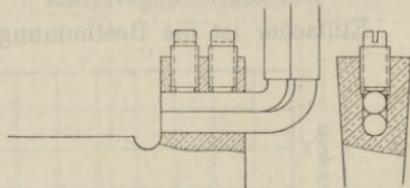


Fig. 67.

Tabelle IX.

Spannungsverlust an + und - Bürste in Volt	Zulässige Stromdichte pro cm^2 der Bürstenfläche	
	bei sehr guten Kommutationsverhältnissen	bei mittleren Kommutationsverhältnissen
1,6	12	8
2,4	5	4

Der Auflagedruck der Bürsten ist wegen des Reibungsverlustes möglichst klein zu halten, man findet meist $0,1 \text{ kg}$ pro cm^2 Auflagefläche; als Reibungskoeffizient kann $0,3$ angenommen werden.

Ist die Umfangsgeschwindigkeit $v_k \text{ m}$ pro sek , die gesamte Bürstenaufgelegfläche $F \text{ cm}^2$, so ist

$$\text{Bürstendruck} \dots\dots F \cdot 0,1 \text{ kg},$$

$$\text{Bürstenreibung} \dots\dots F \cdot 0,1 \cdot 0,3 \text{ kg},$$

$$\text{Reibungseffekt} \dots\dots F \cdot 0,1 \cdot 0,3 \cdot v_k \text{ mkg/sek},$$

$$\text{Bürstenreibungsverlust} \dots\dots 9,81 \cdot F \cdot 0,1 \cdot 0,3 \cdot v_k \text{ Watt}.$$

Einfacher ist die Bestimmung aus den Kurven der Fig. 71.

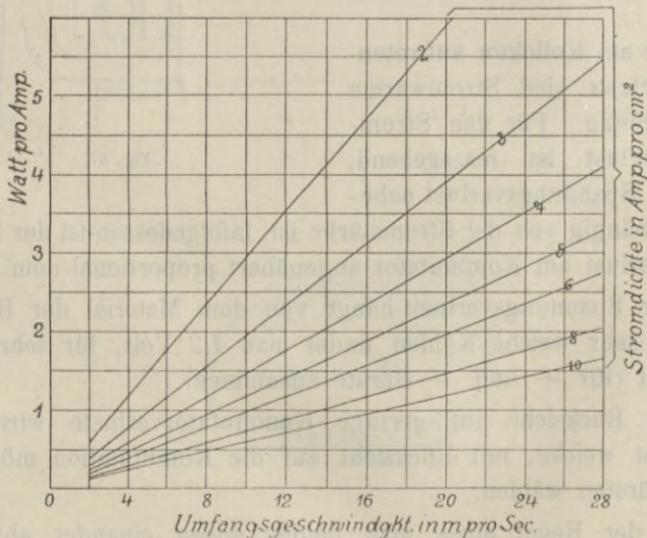


Fig. 71. Verluste durch Bürstenreibung.

Die Bestimmung der Kontaktfläche für die Bürsten geschieht in folgender Weise:

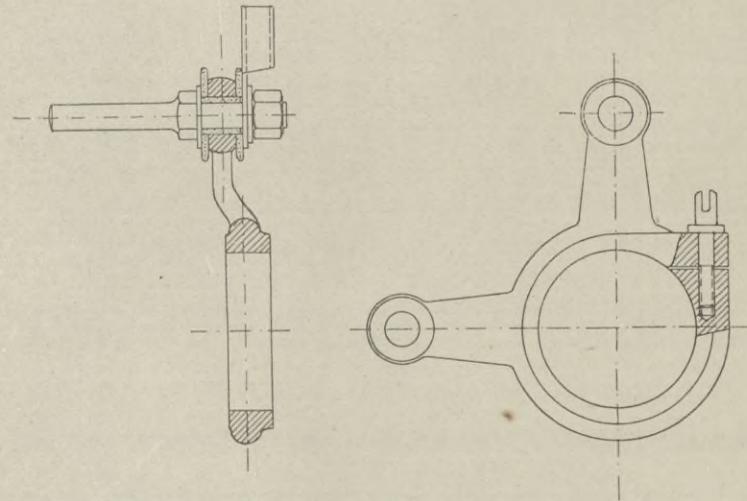


Fig. 68.

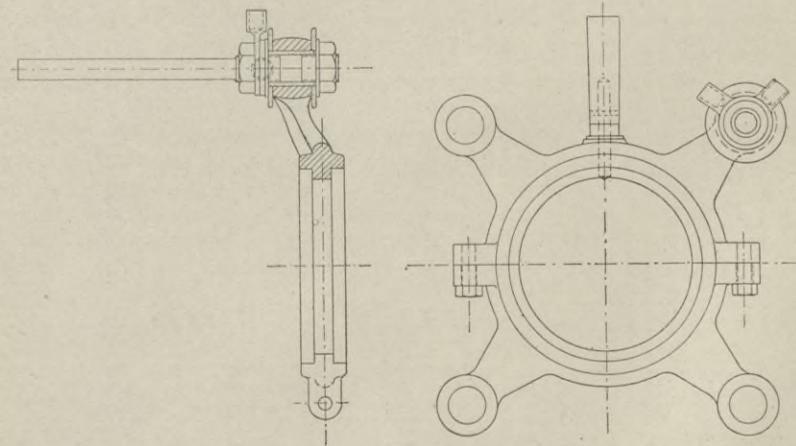


Fig. 69.

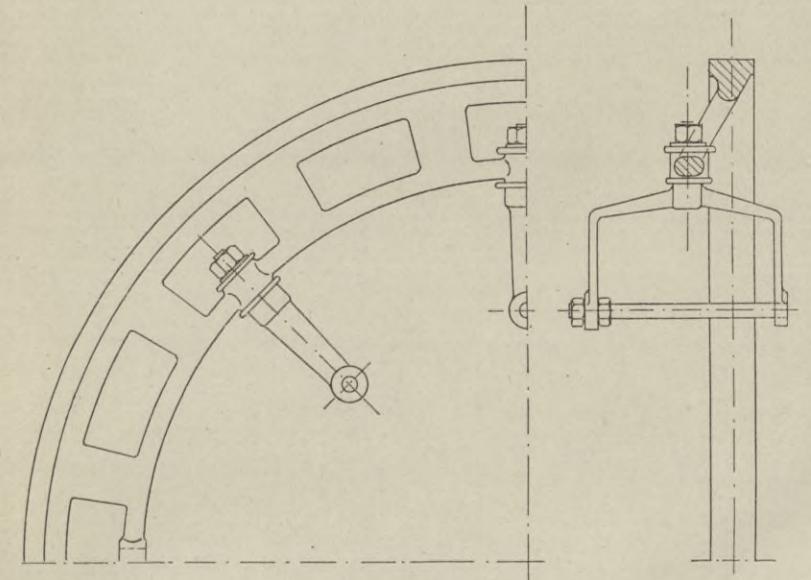


Fig. 70. Bürstenbrücke zu Fig. 34, 35.

Der Gesamtstrom der Maschine teilt sich in die halbe Zahl der Bürstenstifte, da z. B. bei 8 Bürstenstiften 4 + und 4 — Stifte sind, also Strom pro Stift $\frac{J}{4}$.

Je nach dem zulässigen Spannungsverlust und den Kommutationsverhältnissen wird die Stromdichte festgelegt und die Bürstenauf­fläche ermittelt: z. B. bei 110 Volt Maschinenspannung 100 Ampère Strom pro Stift, Spannungsverlust 1,6 Volt, Stromdichte 8 Ampère pro cm^2 , Bürstenauf­fläche $\frac{100}{8} = 12,5 cm^2$.

Den Bürstenbogen wählt man 2—3,5 mal so gross, wie die Lamellenteilung (Segment + Isolation); die Länge einer Bürste je nach dem Bürstenbogen 15—50 mm. Gebräuchliche Abmessungen der Bürsten für normale Maschinen sind 10 · 15 bis (15—20) · 30.

Die Kabel und Kupferringe der Bürstenbrücken und die Verbindungen zu den Maschinenklemmen kann man mit 1—2 Amp. pro mm^2 belasten.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators sollte mit Rücksicht auf die Kommutation so gering wie möglich sein. Immerhin muss man oft aus anderen Gründen eine verhältnis­mässig grosse Geschwindigkeit zulassen. Günstige Verhältnisse ergeben sich im allgemeinen bei etwa 10 m pro sek bis hinauf zu 15 m pro sek; darüber hinaus werden die Verhältnisse erheblich ungünstiger, sodass die übrigen Kommutationsbedingungen hervorragend günstig sein müssen, wenn die Maschine funkenfrei arbeiten soll.

Was die Erwärmung anlangt, so ist wieder das Verhältnis Wattverlust durch cylindrische Oberfläche aufzusuchen; man kann eine Temperaturzunahme von 0,8 bis 1,2 ° C. für 1 Watt pro dm^2 rechnen.

Vielfach findet man die Anschauung vertreten, dass die Temperatur des Kollektors noch um 10° höher liegen kann, als die des Ankers. In Wirklichkeit scheint dies bedenklich, denn die Ausdehnung und Zusammenziehung muss natürlich um so grösser sein, je grösser die Temperaturschwankungen sind. Da die beständigen Änderungen den ganzen Aufbau schädlich beeinflussen, muss man beim Kommutator die Temperaturerhöhung eher niedriger halten als beim Anker.

Für die 400 KW- (Fig. 72) bez. die 100 KW-Maschine ergeben sich folgende Verhältnisse:

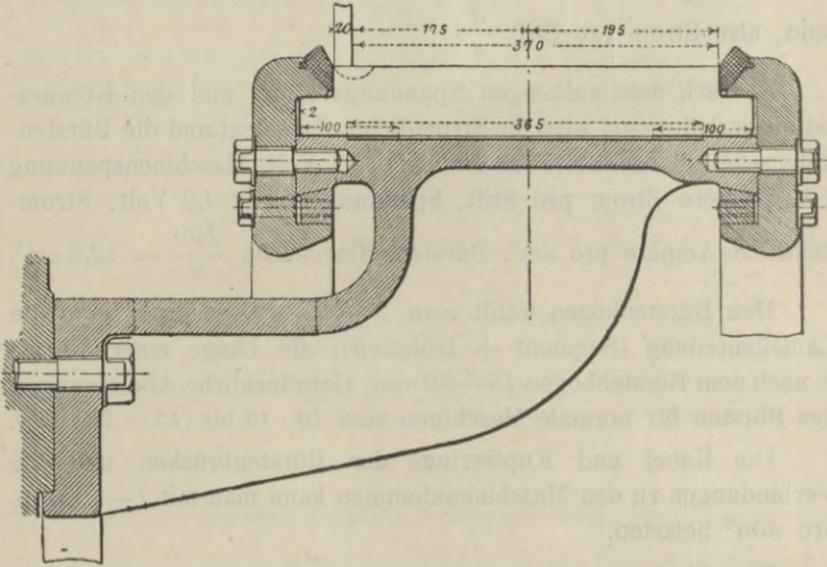


Fig. 72.

	400 KW	100 KW
Klemmenspannung	550 Volt	125 Volt
Kollektordurchmesser	1650 mm	480 mm
Kollektorumfang $D_k \pi$	5200	1500
Kollektorgeschwindigkeit	8,65 m/sek	12,5 m/sek
Gesamtwindungszahl	792	280
Windungen pro Segment	1	1
Segmentenzahl N_k	792	280
Segment + Isolation $\frac{D_k \pi}{N_k}$	6,55 mm	5,35 mm
Isolation i	0,55	0,55
Segment β	6	4,8
Bürstenbogen $3 \cdot (\beta + i)$	20 mm	16 mm
Strom pro Bürstestift	183 Amp.	200
Stromdichte	4 Amp./cm ²	7
Bürstenfläche	46 cm ²	28,6 cm ²
Gesamtlänge der Bürsten	23 cm	18 cm

	400 KW	100 KW
Bürstenzahl	8	6
Bürsten	$30 \cdot 20 \text{ mm}^2$	$30 \cdot 16 \text{ mm}^2$
Lauflänge des Kollektors l_k	295 mm	230 mm
Stromwärmeverlust	$2,4 \cdot 730$ = 1750	$1,6 \cdot 800$ = 1280
Reibungsverlust	$1,3 \cdot 730$ = 950	$1,0 \cdot 800$ = 800
Gesamtverlust	2700 Watt	2080
Abkühlungsfläche $D_k \pi l_k$	153 dm ²	34,5
Verlust bezogen auf die Kühlfläche $\frac{2700}{153}$	17,6 Watt/dm ²	60 Watt/dm ²

Für die 400 KW-Maschine kann man bei der geringen Umfangsgeschwindigkeit die Erwärmung auf 1,2° C. für 1 Watt pro dm² schätzen, danach

$$\text{Erwärmung} \dots 1,2 \cdot 17,6 = 21^\circ \text{ C.}$$

Für die 100 KW-Maschine dürfte die spezifische Erwärmung mit 0,8 einzusetzen sein, danach

$$\text{Erwärmung} \dots 0,8 \cdot 60 = 48^\circ \text{ C.}$$

Allgemein ist der Verlust und damit die Übertemperatur des Kollektors um so kleiner, je höher die Spannung der Maschine ist.

Kapitel VII. Wirkungsgrad.

Für die Berechnung des Wirkungsgrades sind die sämtlichen Verluste in der Maschine zu addieren.

Der Reihe nach sind die Verluste im Ankerkupfer und im Ankereisen, der Wattverbrauch für die Erregung und die Ver-

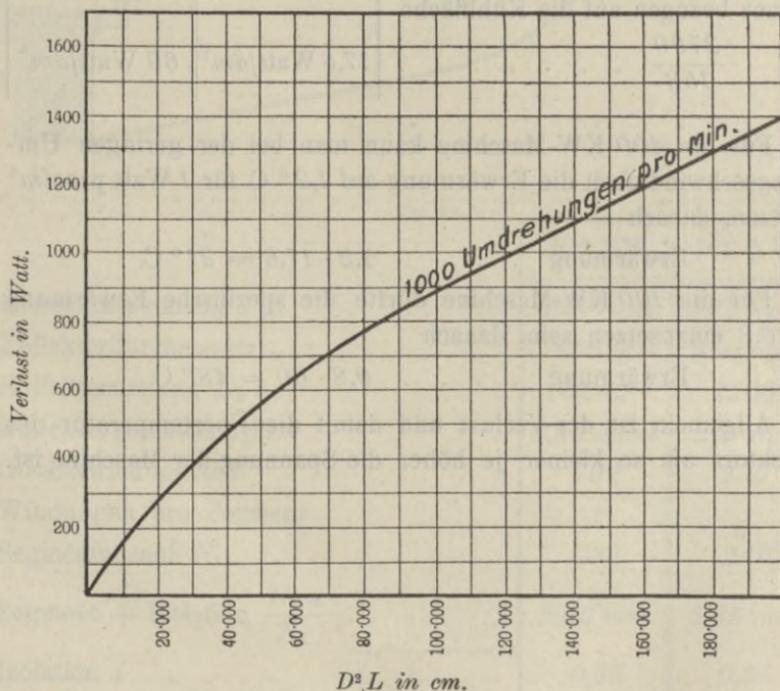


Fig. 73.

luste am Kommutator besprochen; es wären noch zu berücksichtigen die Verluste durch Lager- und Luftreibung. Für diese ist bei mittleren Verhältnissen die Kurve der Fig. 73 massgebend. Die Verluste sind als Funktion der Ankerdimensionen für 1000 U. p. m. aufgetragen.

Für unsere 400 KW-Maschine mit dem Ankerdurchmesser 230 cm, der Gesamtankerlänge 104 cm und 100 Umdrehungen pro Minute, ist

$$D^2 L = 5500000,$$

oder reduziert auf die Tourenzahl 1000

$$550000.$$

Die Kurve verläuft von dem Abscissenwert $D^2 L = 100000$ bzw. Ordinatenwert 900 an als gerade Linie; bis $D^2 L = 200000$ hat der Ordinatenwert eine Zunahme von 500 erfahren, dem entspricht bei einem Abscissenwert 550000 eine Zunahme um $4,50 \cdot 500 = 2250$, also ein Ordinatenwert $900 + 2250 = 3150$ Watt.

Die Gesamtverluste unserer Maschine bei Voll-Last sind:

Ankerkupfer	13900,
Ankereisen	7800,
Kommutator	2700,
Nebenschlusswicklungen . . .	4640,
Hauptstrom	3300,
Lager und Luftreibung	3150,
	<hr/>
	35490.

Effektverbrauch der Maschine

$$400000 + 35490 = 435,5 \text{ KW,}$$

Nutzeffekt 400 KW,

$$\text{Wirkungsgrad } \frac{400}{435,5} = 0,92.$$

Bei der Beurteilung des Wirkungsgrades ist zu beachten, dass die Maschinen, in den meisten Fällen auch die Motoren, nur selten mit voller Belastung arbeiten, deshalb ist es wesentlich, darauf zu achten, dass der Wirkungsgrad auch bei kleinerer Belastung nicht erheblich sinkt, das hängt aber ab von der richtigen Verteilung der konstanten und der mit der Belastung veränderlichen Verluste. Überwiegen die konstanten Verluste, so werden bei kleinerer Belastung die Gesamtverluste nicht wesentlich geändert, der Wirkungsgrad muss also sehr abnehmen. Man wird

deshalb die konstanten Verluste möglichst klein, die veränderlichen dagegen gross halten.

Konstante Verluste sind die Eisen- und Reibungs-Verluste und Nebenschlusserregung, veränderliche sind Anker- und Kommutatorstromwärme und Hauptstromerregung.

Untersuchen wir die Wirkungsgrade unserer 400 KW-Maschine für verschiedene Belastungen, so ergeben sich folgende Werte:

Konstante Verluste:	Voll-Last	$\frac{1}{2}$ -Last	$\frac{1}{4}$ -Last
Ankereisen	7800		
Lager und Luftreibung	3150		
Kommutatorreibung	950		
Nebenschlusserregung	4640		
	16540	16540	16540
Veränderliche Verluste:			
Ankerkupfer	13900	3480	950
Kommutator	1750	875	440
Hauptstromwicklung	3300	825	205
	18950	5180	1595
Gesamtverlust . . . KW	35490	21720	18140
Abgegebener Effekt . . KW	400	200	100
Verbrauchter Effekt . . KW	435,5	221,7	118,1
Wirkungsgrad	0,92	0,90	0,85

Kapitel VIII.

Einfluss der Ankerwindungs- und Polzahl auf den Entwurf. Kommutierung.

Wenn nicht beim Entwurf einer Maschine der Einfluss der Ankerrückwirkung von so grosser Bedeutung wäre, würde es sich bei der Dimensionierung der Maschinen lediglich um Bestimmung solcher Werte von T und N_0 in der Formel

$$E = 4 \cdot T \cdot N_0 \cdot Per \cdot 10^{-8}$$

handeln, bei denen die geringsten Materialkosten für eine gegebene Spannung und Stromstärke auftreten, unter Berücksichtigung der erforderlichen Kupfer- und Eisenquerschnitte, um die Erwärmung in den zulässigen Grenzen zu halten.

Angenommen, es handelt sich um einen 100 KW-Generator für 500 Volt 600 U. p. m., also 200 Ampère Ankerstrom: Versuchen wir es zunächst mit einem zweipoligen Modell und einem Trommelanker mit 20 Leitern. Dann ist

$$T = 5, Per = 10$$

und

$$500 = 4 \cdot 5 \cdot 10 \cdot N_0 \cdot 10^{-8}$$

oder

$$N_0 = 250000000 \text{ Kraftlinien.}$$

Nehmen wir die Sättigung im Ankereisen zu 15000 an, so ist ein Eisenquerschnitt von 17000 cm² erforderlich, der Anker hätte also z. B. bei 130 cm Durchmesser etwa 130 cm Länge. Deuten schon diese Dimensionen auf ungünstige Anordnung hin, so werden die tatsächlichen Verhältnisse noch deutlicher, wenn wir überlegen, dass die Länge der Feldwindungen entsprechend dem obigen Querschnitt sehr gross und ihre Zahl bei der hohen Luftsättigung ebenfalls sehr gross ist.

Die Maschine würde ausserordentlich viel Feldkupfer haben, sodass sie, ganz abgesehen von ihrer Wirkungsweise, allein mit Rücksicht auf die hohen Materialkosten, schlecht entworfen wäre.

Versuchen wir es dagegen mit dem entgegengesetzten Extrem, z. B. 4000 Ankerleitern, so wird

$$T = 1000,$$

$$500 = 4 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot M \cdot 10^{-8} \text{ und } M = 1250000,$$

der erforderliche Eisenquerschnitt 85 cm^2 , Durchmesser der Magnetstange 10 cm .

Zweifellos würden die Kosten für das Feldkupfer diesmal sehr gering sein, dagegen müssen auf dem Anker 4000 Leiter für je 100 Ampère untergebracht werden, deshalb werden die Ankerabmessungen und die Kosten für das Ankerkupfer wieder sehr hoch. Vielleicht liesse sich bei dem zweipoligen Modell, abgesehen von der Ankerrückwirkung und von den Kommutationsverhältnissen, bei mittlerer Zahl von Ankerleitern ein vom ökonomischen Standpunkt aus gutes Resultat erzielen.

Einfluss der Ankerrückwirkung bei diesen beiden Grenzfällen.

Im ersten Fall, bei 10 Windungen auf den Anker, ist die Ampèrewindungszahl des Ankers $\frac{10 \cdot 100}{2} = 500$ pro Pol, sie wäre praktisch zu vernachlässigen. Dagegen ist die mittlere Spannung zwischen zwei Kommutatorsegmenten $\frac{500}{5} = 100$ Volt, die Spule würde also eine solche Induktanz haben, dass die Umkehrung des Stromes von 100 Ampère 20 mal in der Sekunde bei vernünftigen Anordnungen direkt als unmöglich zu bezeichnen ist.

Im zweiten Fall, bei 2000 Windungen auf den Anker, wäre die Spannung pro Windung $\frac{500}{1000} = 0,5$ Volt, ein bezüglich der Kommutation jedenfalls sehr günstiger Wert. Dagegen hat der Anker $\frac{2000 \cdot 100}{2} = 100000$ Ampèrewindungen pro Pol, seine Rückwirkung würde das ursprüngliche Feld vollständig erdrücken.

War also im ersten Fall bei einer unmerklichen Ankerrückwirkung die Spannung zwischen zwei Segmenten zu hoch, so ist im zweiten Fall bei kleiner Spannung pro Windung, die Ankerrückwirkung zu gross. Beide Grenzfälle sind also unausführbar. Vielleicht liesse sich aber immer noch bei zwei Polen für eine

mittlere Windungszahl, etwa 100, ein einigermaßen zufriedenstellendes Resultat erreichen.

Bestimmung der Polzahl für eine gegebene Leistung.

Wir erleichtern uns aber die gestellte Aufgabe, eine möglichst billige Maschine bei zulässiger Ankerampèrewindungszahl und Spannung zwischen den Kommutatorsegmenten zu entwerfen, wenn wir die Polzahl mit wachsender Grösse der Maschine vergrössern. Das mag durch folgende Beispiele erläutert werden.

Es handle sich um einen zweipoligen 50 KW-Generator von 400 Volt: Gehen wir aus von zwei Annahmen, die nach praktischen Erfahrungen noch gute Resultate geben können: Ampèrewindungszahl des Ankers 3000 pro Pol, mittlere Spannung zwischen zwei Segmenten 16 Volt.

$$\text{Ankerstrom } \frac{50000}{400} = 125 \text{ Ampère,}$$

$$\text{Strom pro Leiter } \frac{125}{2} = 62,5 \text{ Ampère,}$$

$$\text{Windungen pro Pol } \frac{3000}{62,5} = 48,$$

$$\text{Gesamtwindungszahl } 2 \cdot 48 = 96,$$

$$\text{Kollektorsegmente zwischen zwei Bürsten } \frac{400}{16} = 25,$$

$$\text{Gesamtzahl der Segmente } 2 \cdot 25 = 50.$$

$$\text{Also } \frac{96}{50} = \sim 2 \text{ Windungen pro Segment.}$$

Sollten bei einer 100 KW-Maschine gleicher Spannung dieselben Werte für Ankerampèrewindungszahl und Spannung zwischen den Segmenten erreicht werden, so muss mit Rücksicht auf die doppelte Stromstärke die Gesamt-Windungszahl auf die Hälfte, d. h. 48 reduziert werden, sodass nur noch eine Windung pro Segment vorhanden ist.

Damit ist die Grenze für dieses Modell gegeben, denn wie würden sich die Verhältnisse für die nächste Grösse doppelter Leistung, also 200 KW stellen?

Weniger als eine Windung pro Segment ist normal nicht ausführbar; wir müssen also entweder bei gleicher Spannung zwischen den Segmenten die Ankerwindungszahl und damit die Ankerückwirkung verdoppeln, oder bei gleicher Ankerwindungszahl die Spannung pro Segment verdoppeln, oder schliesslich beide Grössen

gleichzeitig in geringerem Masse abändern. Das letzte würde vielleicht den besten Erfolg versprechen, indes würde der Entwurf bezüglich der Kommutationsverhältnisse ungünstig werden. Selbst wenn schliesslich diese Maschine noch leidlich ausfallen würde, so tritt dieselbe Schwierigkeit bei der nächstgrösseren Maschine als unüberwindlich auf. Anders stellt sich die Sache, wenn wir zu der mehrpoligen Anordnung greifen.

Führen wir unsere 200 KW-Maschine von 400 Volt mit vier Polen aus, so ist der Strom pro Ankerleiter, da 4 Ankerstromkreise möglich sind,

$$\frac{200000}{4 \cdot 400} = 125 \text{ Ampère;}$$

$$\text{Windungen pro Pol } \frac{3000}{125} = 24.$$

Bei 24 Kollektorsegmenten zwischen zwei Bürsten mithin $\frac{400}{24} = 16,6$ Volt zwischen zwei Segmenten.

So kann man jede Maschine bei richtig gewählter Polzahl für funkenfreien Gang entwerfen, wenigstens innerhalb ziemlich weiter Grenzen der Tourenzahlen und Spannungen. Zunächst müssen wir jetzt das Verhalten der verschiedenen Wicklungsarten in dieser Beziehung kennen lernen.

Parallel-Wicklungen.

Diese lassen eine Reduzierung der Ampèrewindungen des Ankers pro Pol und der mittleren Spannung zwischen zwei Segmenten in jedem gewünschten Masse durch Erhöhung der Polzahl zu, soweit nicht Grenzen durch Kostenaufwand, Umfangsgeschwindigkeit und geringste Lamellenstärke gezogen sind.

Sind in irgend einem Fall die Bedingungen gegeben, dass ein 500 KW-Generator bei 600 Volt mit 4000 Ampèrewindungen pro Pol und 15 Volt pro Kommutatorsegment ausgeführt wird, so ergibt sich Folgendes:

$$\text{Segmente pro Pol } \frac{600}{15} = 40,$$

entsprechend bei einer Windung pro Segment 40 Windungen pro Pol, daraus

$$\text{pro Ankerzweig } \frac{4000}{40} = 100 \text{ Ampère,}$$

$$\text{Ankerstrom } \frac{500000}{600} = 833 \text{ Ampère;}$$

$$\text{mithin } \frac{833}{100} = \sim 8 \text{ Pole.}$$

Ist dagegen nur 3000 als Ankerwindungszahl und 8 Volt pro Segment zulässig, so wird

$$\text{die Zahl der Segmente pro Pol } \frac{600}{8} = 75,$$

$$\text{Ampère pro Leiter } \frac{3000}{75} = 40,$$

$$\text{Polzahl } \frac{833}{40} = \sim 20.$$

Serien-Wicklung.

Bei der reinen Serienwicklung sind nur zwei parallele Ankerstromkreise vorhanden, unabhängig von der Polzahl, dadurch ist es unmöglich, bei bestimmter Spannung pro Segment die Zahl der Ankerampèrewindungen beliebig herunterzudrücken.

Bleiben wir bei dem Entwurf des 500 KW-Generator von 600 Volt für 4000 Ampèrewindungen pro Pol und 15 Volt pro Segment, so berechnet sich die

$$\text{Zahl der Segmente pro Ankerstromzweig } \frac{600}{15} = 40,$$

$$\text{Strom pro Ankerstromzweig } \frac{833}{2} = 417,$$

$$\text{Ampèrewindungen pro Ankerstromzweig } 40 \cdot 417 = 16700,$$

$$\text{Polzahl pro Ankerstromzweig } \frac{16700}{4000} = \sim 4;$$

mithin 8 Pole im ganzen.

Es ist aber gleich zu bedenken, dass die zu kommutierende Stromstärke pro Leiter 417 Ampère beträgt, dass also funkenfreier Gang nur unter besonders günstigen anderen Umständen (geringe Tourenzahl) zu erwarten ist.

Die Verringerung dieser Stromstärke kann in beliebigem Masse erreicht werden, indem man statt eines Leiters mehrere parallel geschaltete Leiter anordnet, wie wir es bei der Serienparallelwicklung kennen gelernt haben.

Wie ohne weiteres ersichtlich, ist die Anzahl der parallelen Leiter, die statt des einen ursprünglichen verwendet werden, unabhängig von der Polzahl, sodass in gewisser Beziehung diese Wicklungsart noch günstigere Anordnungen namentlich bez. der Dimensionen der Ankerleiter zulässt, als die reine Parallelwicklung. Dazu kommt noch, dass bei der Serienparallelwicklung naturgemäss jeder einzelne der parallelen Stromzweigteile der Reihe nach alle magnetischen Felder durchläuft, sodass sich Ungleichheiten der Felder in jedem Stromkreis ausgleichen, während bei der reinen Parallelschaltung die einzelnen Stromkreise immer nur unter je einem Polpaar verlaufen und in ungünstigen Fällen bei ungleichen Feldern abweichende E. M. Ke. aufweisen können.

Einen weiteren Vorteil bietet schliesslich die Möglichkeit, bei der Serienparallelwicklung die Anzahl der $+$ und $-$ Bürsten zwischen 2 und der Polzahl zu wählen, und die Bürstenstifte mit Rücksicht auf die Bedienung so anzuordnen, dass man die unteren Bürstenstifte, die bei grossen Maschinen innerhalb der Fundamentgrube schwer zugänglich sind, fortlässt.

Diese Vorteile haben die Serienparallelschaltung in Deutschland ziemlich allgemein eingeführt, dagegen wird sie in England sehr wenig, in Amerika gar nicht benutzt.

Als Nachteil der Serienparallelschaltung ist eine grosse Empfindlichkeit bezüglich des funkenfreien Ganges zu nennen, indem bei mehr als zwei Bürstenstiften sehr leicht die Belastungen der Bürsten verschieden sind, wodurch dann Funkenbildung hervorgerufen wird. Die Empfindlichkeit wächst mit der Anzahl der parallelen Stromzweigteile und Bürstenstifte.

Als Gegenmittel verwendet man Ausgleichsleitungen zwischen den einzelnen parallelen Teilen der beiden Stromkreise, sogenannte Äquipotentialverbindungen, oder führt den Kollektor so breit aus, dass sämtliche Bürstensätze bis auf zwei fortfallen können. Das führt natürlich zu einer Erhöhung der Maschinenkosten. Verfasser glaubt, bei grossen Maschinen die Serienparallelschaltung nur in besonderen Fällen empfehlen zu können.*)

Es seien für einen 350 KW-Generator von 250 Volt mit Wellenwicklung aus bestimmten Gründen 14 Pole vorgesehen,

*) Demgegenüber sei hervorgehoben, dass z. B. die Felten-Guilleaume-Lahmeyer-Werke in Frankfurt bei grossen Maschinen nur Serienparallelwicklung mit sehr gutem Erfolge verwenden. Anm. d. Übersetzers.

ausserdem seien 5000 Ampèrewindungen für den Anker, 4,5 Volt pro Kommutatorsegment verlangt.

$$\text{Kommutatorsegmente pro Stromzweig } \frac{250}{4,5} = 56,$$

Ampèrewindungszahl pro Pol 5000,

$$\text{„ für den ganzen Anker } 14 \cdot 5000 = 70000,$$

$$\text{„ pro Stromzweig } \frac{70000}{2} = 35000,$$

$$\text{Ankerstrom } \frac{350000}{250} = 1400,$$

$$\text{pro Stromzweig } \frac{1400}{2} = 700,$$

$$\text{Windungszahl eines Stromzweiges } \frac{35000}{700} = 50,$$

statt dessen ausgeführt 56, also 1 Windung pro Segment.

Da der Strom in einem Leiter 700 Ampère beträgt, die Dimensionen und Kommutierungsverhältnisse hierfür unbequem werden, so verwendet man statt des einen Leiters mehrere parallel geschaltete, z. B. 4, dann ist die Stromstärke in einer Strombahn $\frac{700}{4} = 175$ Ampère.

Die Gesamtwindungszahl ist

$$2 \cdot 56 \cdot 4 = 448,$$

die Kollektorlamellenzahl erhöhen wir zweckmässig, indem wir jeden einzelnen der vier parallelen Leiter eines Stromzweigs an ein besonderes Segment anschliessen, auf

$$2 \cdot 56 \cdot 4 = 448,$$

eine Windung pro Segment ist also auch jetzt vorhanden.

Statt dessen können wir aber auch, wenn es besser passt, 3 oder 5 parallele Strombahnen pro Zweig nehmen, und erhielten dann

$$2 \cdot 56 \cdot 3 = 336 \text{ oder } 2 \cdot 56 \cdot 5 = 560 \text{ Windungen,}$$

und entsprechend 336 oder 560 Segmente.

In jedem Fall ist die Ampèrewindungszahl des Ankers pro Pol gleich, nämlich

$$\frac{448}{14} \cdot 175 = 5600.$$

Die Abweichung von den geforderten 5000 Ankerampèrewindungen ist durch die Abänderung der berechneten Windungszahl pro Stromzweig 50 auf die berechnete Segmentenzahl 56 bedingt. Eine genaue Einhaltung der gesetzten Ampèrewindungszahl und Spannung pro Segment ist in den meisten Fällen nicht möglich und auch nicht nötig.

Bezüglich der Grösse der Ankerrückwirkung, welche man in dem einzelnen Entwurf zulassen wird, lässt sich von vornherein wenig bestimmen.

Es ist zu berücksichtigen, dass mit den Ankerampèrewindungen auch die zum Ausgleich der Ankerrückwirkung erforderlichen Ampèrewindungen für die Erregung zunehmen, d. h. dass die Kosten für das Feldkupfer steigen. Ferner wächst der Spannungsabfall einer Maschine entsprechend, sodass auch bei geringen Belastungsschwankungen eine Nebenschlussregulierung nötig ist; eine solche Maschine ist für den Betrieb wenig brauchbar.

Zum Schluss ist von der Ankerrückwirkung auch die Güte der Kommutation abhängig. Fischer-Hinnen*) hat dafür eine verhältnismässig umständliche Formel aufgestellt, aus welcher folgende vereinfachte Gleichungen abgeleitet werden können.

Für gute Maschinen gilt:

$$AW_a < (0,1 - 0,12) \frac{b_1}{\beta} \cdot B_l \cdot \frac{\delta}{1 - \alpha},$$

worin AW_a Ankerampèrewindungen pro Pol, b_1 Bürstenbogen, β Segmentbreite, B_l Sättigung in Luft, δ Luftzwischenraum, α Polbedeckung ist.

Da $\frac{b_1}{\beta}$ meist 2—3, $\alpha = 0,7$ ist, so kann man für mittlere Verhältnisse setzen:

$$AW < (0,8 - 1) \cdot B_l \cdot \delta.$$

Mittlere Spannung zwischen zwei Kommutatorsegmenten.

Wie bereits erwähnt, ist die Spannung pro Segment ein Merkmal für die Kommutationsbedingung, in dem man bei dem auf Seite 6 angegebenen Werten auf funkenfreien Gang mehr oder weniger rechnen kann, tatsächlich aber bietet die Einhaltung dieser Werte noch keine Sicherheit. Die Funkenbildung hängt

*) Die Gleichstrommaschine.

wesentlich ab von der Induktanz der Windung, die durch die Nutenform und durch die Lage der Leiter zu einander und in der Nut bedingt ist. Liegen die Ankerleiter in geschlossenen Nuten, so ist die Induktanz sehr gross, die Spannung pro Segment muss also klein genommen werden. Liegen die Drähte auf der glatten Ankeroberfläche, so ist die Induktanz klein, der Spannungswert kann erheblich höher gewählt werden.

Die angegebenen Werte gelten unter Voraussetzung normaler Verhältnisse bei offenen Ankernuten und für Bürsten mittlerer Härte. Für Kupferbürsten ist nur etwa ein Drittel der angegebenen Werte einzusetzen.

Die Schätzung der Kollektorlamellenzahl nach der mittleren Spannung ist also ziemlich roh, sodass eine genauere Untersuchung der Kommutationsverhältnisse und unter Umständen eine nicht unerhebliche Änderung des Entwurfes unerlässlich ist.

Die Kommutierung.

In jeder Windung muss der Strom, sobald dieselbe von der einen Seite einer Bürste auf die andere bewegt wird, von seinem zeitweiligen Wert J auf Null und in der entgegengesetzten Richtung wieder auf den Wert J gebracht werden.

In Figur 74 bewegt sich der Anker in der Pfeilrichtung, Spule 3 führt noch den vollen Strom, erst wenn die Kante A' des entsprechenden Segmentes die Kante A der Bürste berührt, verringert sich die Stromstärke in Spule 3.

Der Strom aus Spule 4 erhält einen parallel geschalteten Weg durch Segment 4 nach der Bürste.

Die beiden Parallelströme müssen sich, abgesehen von den durch die magnetischen Vorgänge hervorgerufenen Spannungen, umgekehrt, wie die Widerstände ihrer Bahnen, verhalten. Je weiter also die Lamelle 4 auf die Bürste aufgelaufen ist, um so kleiner wird der Widerstand der Strombahn 4, um so grösser also der Anteil an dem Strom.

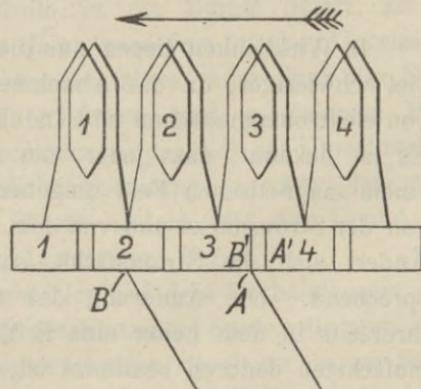


Fig. 74.

Der Strom in Strombahn 3 nimmt entsprechend ab bis zum Werte Null für die mittlere Stellung des Segmentes 3. Bei der weiteren Bewegung tritt in die Spule 3 der Strom von der anderen Seite, die Stromrichtung kehrt sich um und die Stromstärke nimmt zu, in dem Masse, wie sich Segment-Kante B' der Bürstenkante B nähert; inzwischen sind hier wiederum die Spulen 3 und 2 parallel geschaltet, bis B' über und B hinausgegangen ist, in diesem Augenblick führt Spule 3 wieder die volle Stromstärke. Die Zeit für den vollen Stromwechsel von $+J$ bis $-J$ ist also gleich der Dauer zwischen dem Auflaufen von A' auf A und dem Ablaufen von B' auf B ; mit genügender Genauigkeit können wir annehmen, dass A' und B' zusammenfallen, dann ist die Zeit für die Stromwendung (T') gleich der Bürstenbreite (b_1) dividiert durch Kommutatorumfangsgeschwindigkeit (v_k)

$$T' = \frac{b_1}{v_k} = \frac{b_1 \cdot 60}{D_k \cdot \pi \cdot n},$$

oder, wenn β Breite eines Segmentes + Isolation, N_k die Anzahl der Lamellen ist,

$$T' = \frac{b_1 \cdot 60}{\beta \cdot N_k \cdot n}.$$

In Wirklichkeit liegen nun die Verhältnisse der Stromwendung viel schwieriger, da das Abnehmen und Anwachsen des Stromes von elektromagnetischen und Induktionserscheinungen begleitet ist. Es ist bekannt, dass jeder vom Strom durchflossene Leiter von einem magnetischen Feld umgeben ist, dessen Intensität abhängt von der Stromstärke und von dem den Leiter umgebenden Medium. Ändert sich die Stromstärke, so ändert sich die Intensität entsprechend. Die Änderung des magnetischen Feldes ruft aber ihrerseits in dem Leiter eine E. M. K. hervor, deren Richtung am einfachsten dadurch bestimmt ist, dass sie die Stromänderung zu hindern sucht. Bei Stromabnahme ist sie der Stromrichtung gleich, bei Stromzunahme der Stromrichtung entgegengesetzt gerichtet.

Man bezeichnet diese Erscheinung als Selbstinduktion, sie wirkt verzögernd auf die Änderungen der Stromstärke.

Läuft also ein Segment von der Bürste ab, so ist die Stromstärke nicht Null, sondern sie hat noch einen bestimmten, endlichen Wert, der im Augenblick des Ablaufens die Segmentkante (deren Kontaktfläche sich dem Werte Null nähert), zu stark erhitzt und

ein Abschmelzen verursacht. Der hierdurch gebildete Lichtbogen reisst in der Regel gleich nach der Trennung des Segments von der Bürste ab, er kann aber unter ungünstigen Umständen so lang werden, dass er über die Länge von einem oder gar zwei Segmenten stehen bleibt und dann erst unter lebhaft klatschendem Geräusch abreisst. Dass unter solchen Umständen ein ordnungsgemässer Betrieb nicht möglich ist, leuchtet ohne weiteres ein, aber auch eine mässige Funkenbildung ist zu verhüten, da sie den Kollektor bald zerstört.

Fassen wir aber die Vorgänge schärfer, so sehen wir: z. B. in Spule 3 nimmt kurz nach der Stellung in Fig. 74 die Stromstärke ab, dadurch entsteht in ihr eine Spannung der Selbstinduktion, die der Stromrichtung gleich gerichtet ist. Diese Spannung ruft nun in dem Stromkreis, der aus Spule 3, Segment 3, Bürste und Segment 4 besteht, einen Kurzschlussstrom hervor, der die Stromdichte an der Berührungsstelle von Bürste und Segment wesentlich erhöht. Ähnliches gilt für die Spannung, die in der Spule 3 beim Ablaufen des Segmentes 3 von der Bürste infolge der Zunahme des Stromes in entgegengesetzter Richtung auftritt, sie drückt das Anwachsen der Stromstärke in Spule 3 herunter, sodass Spule 2 durch Segment 3 mehr Strom in die Bürste liefert, als der Kontaktfläche entspricht; es folgt wiederum starke Überlastung dieser Stelle. Gegen Ende des Kontaktes muss dann der Strom in Spule 3 um so schneller zunehmen, und in gleichem Masse die Kurzschluss-Spannung, sodass im Augenblick der Unterbrechung an der Kante *B* eine erhebliche Spannung zwischen dem abgelaufenen Segment und der Bürste besteht, die den Grund zum Stehenbleiben des gebildeten Lichtbogens liefert.

Die Funkenbildung beruht also auf dem Vorhandensein einer Spannung innerhalb der kurzgeschlossenen Spule, die nun ihrerseits ein Verbrennen der Segmentkanten durch zu grosse Stromdichte hervorruft; im Folgenden soll diese Spannung als Reaktanzspannung bezeichnet werden. Ein Mittel, die Funkenbildung zu verhindern, besteht darin, dass man in der Spule eine der Reaktanzspannung gleiche aber entgegengesetzte Spannung erzeugt, das geschieht, indem man die Bürsten soweit vorwärts oder rückwärts verschiebt, bis sie Spulen kurz schliessen, die sich noch in einem Teil des nützlichen Streufeldes befinden. Dabei ist folgendes zu beachten: erstens wächst mit der Belastung die Reaktanzspannung,

zweitens findet durch die Ankerrückwirkung eine Verzerrung des Feldes statt, die das Feld gerade an der Kommutierungsstelle schwächt (Fig. 75). Es müssen deshalb die Bürsten bei wachsender Belastung immer weiter verschoben werden. Wie diese Bürstenverschiebung auf das Hauptfeld einwirkt, haben wir früher gesehen, hier kommt nur die praktische Seite in Frage, dass die Bürsten während des Betriebes je nach der Belastung verschoben werden müssen.

Je kleiner der Betrag der Bürstenverschiebung ist, um so weniger empfindlich wird die Maschine sein, deshalb soll auf der einen Seite die Ankerrückwirkung nicht zu gross sein, siehe Seite 86, auf der andern Seite soll die durch die Reaktanz-

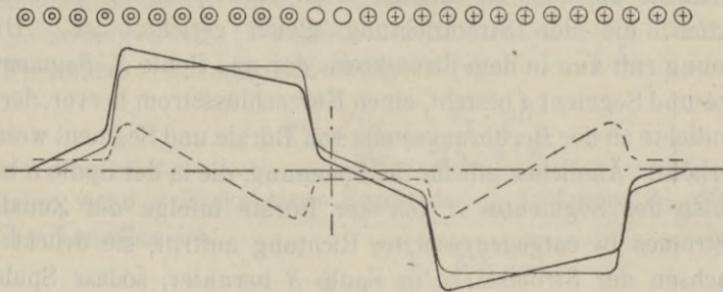


Fig. 75.

spannung hervorgerufene Kurzschlussstromstärke nicht zu gross werden.

Diese hängt aber ab von der Reaktanzspannung und von dem Widerstand der kurzgeschlossenen Stromkreise, der hauptsächlich durch den Übergangswiderstand der Bürsten bedingt ist.

Kupferbürsten haben sehr kleinen, weiche Kohlenbürsten mittleren, harte Kohlenbürsten hohen Widerstand.

Als Mittel gegen die Funkenbildung wird man demnach hohen Übergangswiderstand der Bürsten und kleine Selbstinduktionsspannung anwenden. Der Übergangswiderstand findet seine Grenzen in dem an den Bürsten auftretenden Spannungsverlust, den man je nach der Betriebsspannung nicht über 1,5 bzw. 2,5 Volt zulassen darf und der durch das Material der Bürsten bedingt ist.

Die Spannung der Selbstinduktion hängt ab von der Kraftlinienzahl, die den Leiter umgibt, und von der Zeit der Stromwendung.

Ist Φ die Kraftlinienzahl, die einen Draht von gegebener Länge bei einem Strom von 1 Ampère umkreist, T die Zeit einer

vollen Periode, d. h. vom positiven Strom I durch Null zum negativen Strom I und wieder zurück durch Null zum positiven Strom I , so ist die E. M. K. der Selbstinduktion dieses Drahtes

$$E = 2\pi \cdot \Phi \cdot \frac{I}{T}, \text{ für den Strom } J \text{ ergibt sich } E = 2\pi \cdot \Phi \cdot \frac{J}{T}.$$

Die Kraftlinienzahl hängt ab von der Leiterlänge, dem Strom im Leiter und dem umgebenden Medium.

Auf genaue Rechnungen kann hier nicht eingegangen werden.

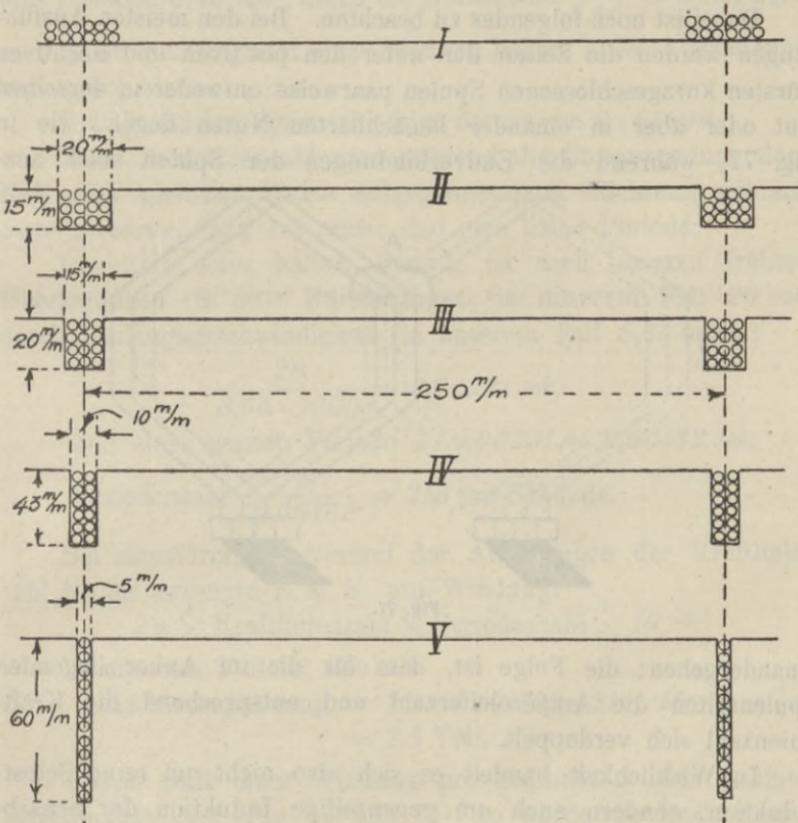


Fig. 76.

Versuche haben ergeben, dass ein gestreckter Leiter von 1 cm Länge, wenn er von 1 Ampère durchflossen wird, in Luft von ungefähr $0,8$ Kraftlinien umgeben ist.

Für Leiter, die in Eisen eingebettet sind oder auf Eisen aufliegen (Fig. 76), ergeben sich ebenfalls pro 1 cm Länge und 1 Ampère, je nach der Anordnung

I	1,9	Kraftlinien.
II	2,8	„
III	3,2	„
IV	4,2	„
V	7,5	„

Da die Nutenform meist III und IV entspricht, kann also als Mittelwert für in Nuten eingebettete Leiter 4 Kraftlinien pro 1 cm und 1 Ampère gesetzt werden.

Dabei ist noch folgendes zu beachten. Bei den meisten Ausführungen werden die Seiten der unter den positiven und negativen Bürsten kurzgeschlossenen Spulen paarweise entweder in derselben Nut oder aber in einander benachbarten Nuten liegen, wie in Fig. 77, während die Endverbindungen der Spulen stark aus-

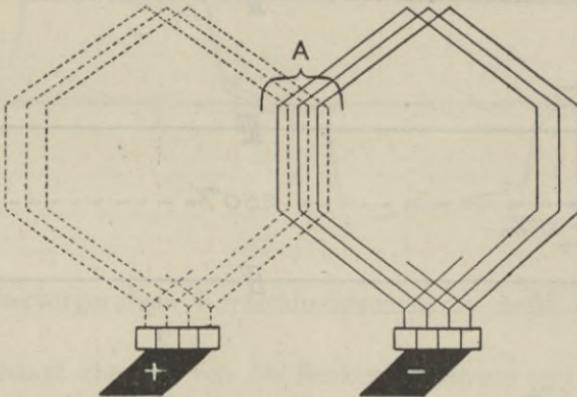


Fig. 77.

einandergoßen; die Folge ist, dass für die im Anker liegenden Spulenseiten die Ampèreleiterzahl und entsprechend die Kraftlinienzahl sich verdoppelt.

In Wirklichkeit handelt es sich also nicht um reine Selbstinduktion, sondern auch um gegenseitige Induktion der benachbarten, kurzgeschlossenen Leiter.

Ein Beispiel mag dies erläutern.

Bei dem früher durchgerechneten 400 KW-Generator war
 die mittlere Länge einer Windung 330 cm (Seite 24),
 die Ankereisenlänge 28,4 cm,
 die in Eisen eingebettete Länge einer Windung 56,8 cm,
 die in Luft " " " " 273,2 cm,

der Strom pro Windung bei voller Belastung $\frac{730}{8} = 91$ Amp.,

die Kraftlinien für die Windungslängen

in Eisen . . . $2 \cdot 56,8 \cdot 91 \cdot 4 = 41300$,

in Luft . . . $273,2 \cdot 91 \cdot 0,8 = 19800$,

zusammen = 61100.

Die Breite der Bürste beträgt 20 mm, die eines Segmentes plus Isolation 6,55 mm, durch die Bürste sind $\frac{20}{6,55} = 3$ Segmente, und da wir pro Segment eine Windung haben, auch 3 Windungen kurz geschlossen.

Die Gesamtkraftlinienzahl folgt daraus zu $3 \cdot 61000$.

Diese Kraftlinienzahl wird während der Stromwendung durch Null zum gleichen Werte entgegengesetzter Richtung gebracht, einer Stromwendung entspricht also eine halbe Periode.

Die Zeit einer halben Periode ist nach unseren früheren Überlegungen (S. 88): Bürstenbogen (in unserem Fall 20 mm) durch Umfangsgeschwindigkeit (in unserem Fall 8,65 m/sek)

$$\frac{20}{8,65 \cdot 1000} = 0,00231 \text{ sek,}$$

Zeit einer ganzen Periode $2 \cdot 0,00231 = 0,00462 \text{ sek,}$

Periodenzahl $\frac{1}{0,00462} = 216$ pro Sekunde.

Bei sinusförmigem Verlauf der Änderungen der Kraftlinienzahl ist die erzeugte E. M. K. pro Windung

$$2\pi \times \text{Kraftlinienzahl} \times \text{Periodenzahl} \times 10^{-8}.$$

In unserem Fall ist also die

$$\begin{aligned} \text{Reaktanzspannung} &= 2\pi \cdot 3 \cdot 61100 \cdot 216 \cdot 10^{-8} \\ &= 2,5 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Wären statt einer Windung pro Segment 2 oder 3 hintereinandergeschaltet (Fig. 14 und 15), so würde die Reaktanzspannung, abgesehen von der Gesamtkraftlinienzahl, 2 oder 3mal so gross sein.

Fassen wir die Berechnungsformeln für die Reaktanzspannung zusammen, indem wir folgende Bezeichnungen einführen:

die Länge einer Windung im Eisen L_e ,

„ „ „ „ in Luft L_l ,

„ Zahl der Windungen pro Segment n_s ,

- die Zahl der gleichzeitig von der Bürste berührten Segmente s ,
 „ Bürstenbreite in mm b_1 ,
 „ Umfangsgeschwindigkeit des Kollektors in m pro sek v_k ,
 „ Anzahl der parallelen Ankerstromkreise A ,
 „ Ankerstromstärke J ,

so ist die Kraftlinienzahl pro Windung $(0,8 \cdot L_f + 2 \cdot 4 \cdot L_e) \frac{J}{A}$,

„ Gesamtkraftlinienzahl $s \cdot n_s (0,8 L_f + 2 \cdot 4 \cdot L_e) \frac{J}{A}$,

„ Zeit einer Stromwendung $\frac{b_1}{v_k \cdot 1000}$,

„ Periodenzahl $\frac{v_k \cdot 1000}{2 b_1}$,

$$\text{Reaktanzspannung} = n_s \cdot 2 \pi \cdot s \cdot n_s (0,8 L_f + 8 L_e) \frac{J}{A} \cdot \frac{v_k \cdot 1000}{2 \cdot b_1} \cdot 10^{-8}$$

$$= n_s^2 \cdot \pi \cdot s \cdot (0,8 L_f + 8 L_e) \frac{J}{A} \cdot \frac{v_k}{b_1} \cdot 10^{-5}$$

oder, indem wir $8 \pi = 25$ setzen,

$$= n_s^2 \cdot s \cdot 25 \cdot (0,1 L_f + L_e) \frac{J}{A} \cdot \frac{v_k}{b_1} \cdot 10^{-5}$$

$$= \frac{n_s^2 \cdot s (0,1 L_f + L_e) J \cdot v_k}{4000 \cdot A \cdot b_1}$$

Diese Formel ist verhältnismässig umständlich, man kann ihr deshalb folgende Form geben:

$$25 \cdot n_s \cdot \frac{n_s \cdot D_k \pi}{A \cdot \frac{b_1}{s}} \cdot \frac{n}{60} \cdot J \cdot (0,1 L_f + L_e) \cdot 10^{-5},$$

da $\frac{b_1}{s}$ die Breite eines Segmentes, $\frac{D_k \cdot \pi \cdot 10^3}{\frac{b_1}{s}}$ die Lamellenzahl, $n_s \cdot \frac{D_k \cdot \pi}{\frac{b_1}{s}}$

die Gesamtwindungszahl gleich $A \cdot T$ ist,

$$R = 25 \cdot n_s \cdot T \cdot \frac{n}{60} \cdot J \cdot (0,1 L_f + L_e) \cdot \frac{P \cdot N_0}{P \cdot N_0} \cdot 10^{-8},$$

wenn P die Polzahl, ist $\frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60}$ die Periodenzahl,

$$4 N_0 T \cdot \text{Per} \cdot 10^{-8} = E,$$

ferner $\frac{0,1 L_f + L_e}{2} = 0,15 \tau + l_e$, da die Länge in Luft gleich

3τ nach Seite 23 ist, also

$$R = \frac{25 \cdot n_s \cdot E \cdot J \cdot (0,15 \tau + l_e)}{P \cdot N_0}$$

$$R = \frac{25 \times \text{Windungen pro Segment} \times \text{Leistung in Watt} \times (l_e + 0,15 \tau)}{\text{Polzahl} \times \text{Kraftfluss pro Pol}}$$

Diese Berechnung gilt nur für Parallelschaltung. Bei der Serien- und Serienparallelwicklung ergibt sich folgendes: Es wurde schon erwähnt, dass die Anzahl der Bürstenstifte bei diesen Schaltungsarten von 2 an aufwärts bis gleich der Polzahl gewählt werden kann. Nehmen wir zunächst die geringste Stifzahl 2 an, so ersieht man aus Fig. 78, dass bei 6 Polen durch eine Bürste 3 Windungen hintereinander geschaltet sind, obwohl jedem Segment nur eine Windung entspricht.

Die Reaktanzspannung ist also 3 mal so gross, wie die unter gleichen Bedingungen für die Parallelwicklung berechnete. All-

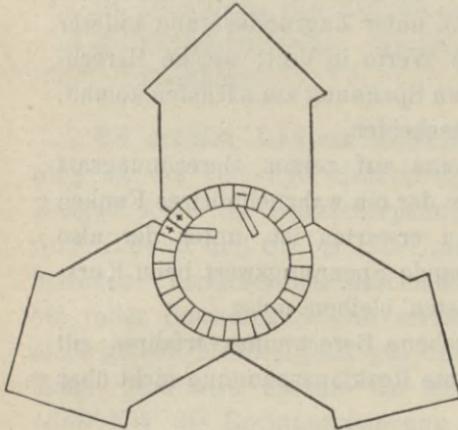


Fig. 78.

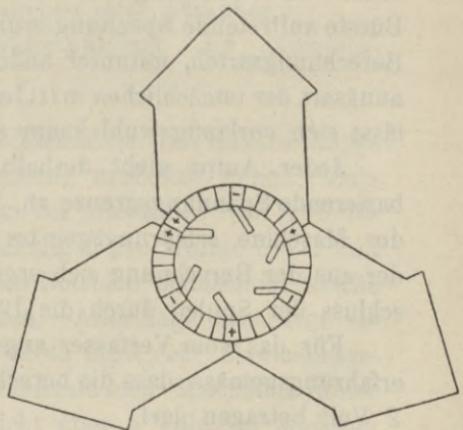


Fig. 79.

gemein ist bei 2 Bürstenstiften und P Polen die berechnete Reaktanzspannung für Serienwicklung mit $\frac{P}{2}$ zu multiplizieren. Dasselbe gilt für Reihenparallelwicklung.

Nehmen wir dagegen die Anzahl der Bürsten gleich der Polzahl (Fig. 79), so wird durch je zwei positive Bürsten immer nur eine Windung kurz geschlossen. Die Reaktanzspannung muss also den gleichen Wert haben, wie er für Parallelwicklung berechnet ist.

Durch geringe Abweichungen der Übergangswiderstände der gleichnamigen Bürsten kann aber der Fall eintreten, dass der

Kurzschluss nicht durch die nächstfolgende, sondern durch die dritte Bürste u. s. w. stattfindet, dann sind wieder zwei oder mehrere Windungen hintereinander geschaltet, dementsprechend steigt die Reaktanzspannung wieder auf das doppelte oder dreifache.

Da man nun dieser Übergangswiderstände nie ganz sicher ist, so wird man gut tun, bei der Reihen- und Reihenparallelwicklung, wenn alle Bürsten aufliegen, die Reaktanzspannung als Mittelwert zwischen dem ersten (Fig. 78) und zweiten Fall (Fig. 79) zu schätzen; je mehr Bürstenstifte fortgelassen sind, um so mehr wird man sich dem Höchstwerte nach Fig. 78 nähern.

Um die erwähnten Stromverschiebungen zu vermeiden, verwendet man mit gutem Erfolge Ausgleichsleitungen bei Reihenparallelwicklung.

Was die Grösse der berechneten Reaktanzspannung anbelangt, so ist es wohl klar, dass immer nur ihr relativer, nicht der absolute Wert von Bedeutung ist. Die bei dem Kurzschluss unter der Bürste auftretende Spannung ergibt, unter Zugrundelegung anderer Berechnungsarten, mitunter andere Werte in Volt; welche Berechnungsart der tatsächlichen mittleren Spannung am nächsten kommt, lässt sich vorläufig wohl kaum entscheiden.

Jeder Autor giebt deshalb eine auf seiner Berechnungsart basierende Spannungsgrenze an, bei der ein wahrnehmbares Funken der Maschine erfahrungsgemäss zu erwarten ist, unter der also der aus der Berechnung sich ergebende Spannungswert beim Kurzschluss der Spulen durch die Bürsten bleiben muss.

Für das vom Verfasser angegebene Berechnungsverfahren gilt erfahrungsgemäss, dass die berechnete Reaktanzspannung nicht über 2 Volt betragen darf.

Bei Reaktanzspannungen über 2 Volt ist Funkenbildung wahrscheinlich, doch ist sie, solange die 2 Volt nicht wesentlich überschritten werden, meist dem Hinzukommen anderer ungünstiger Ursachen zuzuschreiben.

Als solche Ursachen sind anzusehen:

1. das Verhältnis Polbogen zu Polteilung ist zu gross, die Kommutierungszone daher zu klein;
2. die Zahl der Kommutatorsegmente ist bei Parallelschaltung nicht ein vielfaches der Polzahl; bei grosser Segmentzahl ist dieses ziemlich unwesentlich, bei geringer Anzahl von Segmenten pro Pol sollte man es jedoch vermeiden;
3. Ungleichmässigkeit im Luftspalt;

4. Ungleichmässigkeit im Material der magnetischen Kreise;
5. unsymmetrischer oder exzentrischer Kollektor;
6. unsymmetrische Bürstenbrücke;
7. ungeeigneter Bürstenhalter;
8. unrichtiger Auflagedruck der Bürsten;
9. ungenaue Einstellung der Bürsten;
10. schlechte Befestigung der Bürsten;
11. nicht ausreichende Auflagefläche der Bürsten;
12. nicht geeignetes Material der Bürsten;
13. zu harte Glimmerisolation zwischen den Segmenten;
14. ungeeignetes Material der Segmente;
15. zu schwache Fundamente;
16. zu schwache Welle;
17. zu schwache Kollektorkonstruktion;
18. Oberfläche des Kollektors uneben oder unsauber;
19. ungleichmässige Winkelgeschwindigkeit der Antriebsmaschine.

Bei grossen, langsam laufenden Maschinen für direkte Kuppung ist die zulässige Reaktanzspannung erheblich höher. Zum Beispiel kann die Reaktanzspannung bei Maschinen von 400 bis 800 Kilowatt und 80 bis 120 Umdrehungen pro Minute 3—4 Volt betragen. Verfasser hat Maschinen im Betriebe beobachtet, welche bei voller Belastung 6 Volt erreichten. Allerdings arbeiteten sie nicht gerade hervorragend gut und waren nicht sehr überlastungsfähig. Man wird deshalb bei langsamlaufenden Maschinen unter 1000 KW die Reaktanzspannung nicht über 4 Volt, im höchsten Falle 5 Volt, zulassen.

Je grösser die Maschine ist, um so schwieriger ist eine geringe Reaktanzspannung zu erreichen. Man muss sie deshalb so niedrig halten, wie es mit Rücksicht auf Materialkosten und Wirkungsgrad möglich ist. In manchen Fällen wird man sogar versuchen, unter 1 Volt zu bleiben, solange man nicht dadurch andere Vorteile preisgeben muss.

Was die Ursache anlangt, dass grosse Maschinen gegen hohe Reaktanzspannung weniger empfindlich sind als kleine, so muss Verfasser zugeben, dass ihm dafür eine befriedigende Erklärung nicht bekannt ist.

Vielleicht liegt der Grund darin, dass die für die Berechnung benutzte Formel

$$\text{Reaktanzspannung} = 2 \pi \cdot \Phi \cdot \frac{J}{T} \quad (\text{S. 91})$$

den tatsächlichen Verhältnissen nicht genügend Rechnung trägt, vielleicht auch, dass die Kurve der Stromwendung zu weit von der angenommenen Sinusform abweicht und für manche Fälle besonders abnormal wird.

Jedenfalls giebt unter Berücksichtigung der gemachten Angaben die von dem Verfasser vorgeschlagene Berechnungsart für praktische Verhältnisse gute Resultate bei leichter und übersichtlicher Handhabung.

Genauere Berechnungsarten für die Kommutationsverhältnisse sind in der Literatur von verschiedenen Seiten gegeben worden. Eine besonders exakte Darstellung der Kommutationsvorgänge hat Prof. E. Arnold in der Zeitschrift für Elektrotechnik 1905, S. 698, veröffentlicht.

Kapitel IX.

Maschinenkonstante.

Für den ersten Entwurf von Maschinen benutzt man meist irgend eine Konstante zur Festlegung der wichtigsten Dimensionen, die unter normalen Bedingungen zu günstigen Verhältnissen führt, besser gesagt, ungünstige Verhältnisse vermeidet.

Zum Beispiel geht man von dem Stromvolumen pro *cm* Ankerumfang aus, das bestimmte Werte nicht überschreiten soll; dies giebt eine gewisse Sicherheit, dass die Ankerrückwirkung nicht zu gross wird.

Von vielen Autoren wird der Ausdruck $\xi = \frac{Watt}{D^2 \cdot l \cdot n}$ oder der reciproke Wert (Arnold) als Maschinenkonstante benutzt, es bedeutet darin

Watt die Normalleistung der Maschine in Watt,

D Ankerdurchmesser in *cm*,

l Ankerlänge in *cm*,

n minutliche Umdrehungszahl.

Es ist nun interessant, zu sehen, wie sich diese Maschinenkonstante mit der Zeit geändert hat, woraus man deutlich die Weiterentwicklung des Maschinenbaues erkennen kann.

In der ersten Auflage der Elektromechanischen Konstruktionen (1898) giebt Dr. Kapp Werte für die Konstante in Abhängigkeit vom Ankerdurchmesser, die auf unsere Formel umgerechnet, folgendes ergeben:

<i>D</i>	ξ
50	0,00100
100	115
200	145
300	175

Kapp schreibt dazu: „Diese Werte sind nur als grobe Annäherungen zu betrachten und sollen bloss dazu dienen, beim ersten Entwurf einer Maschine das Ansetzen der Zeichnung zu erleichtern oder die rasche Bestimmung der Dimensionen einer Maschine aus jenen einer anderen Maschine gleicher Type, aber verschiedener Grösse, zu ermöglichen. Je nach der Geschicklichkeit des Konstrukteurs, der Genauigkeit der Ausführung und der Beanspruchung inbezug auf Erwärmung und Funken kann die Konstante von den hier gegebenen Werten bedeutend abweichen.“

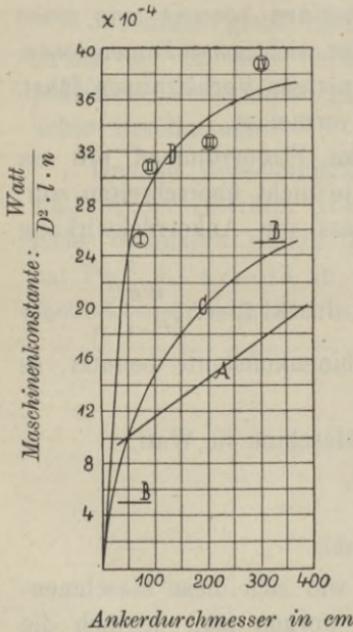


Fig. 80.

Die Werte sind in Fig. 80 zu einer Kurve A vereinigt.

In der zweiten Ausgabe desselben Werkes (1902) werden als Grenzen für die Konstante $0,0005$ in sehr kleinen Maschinen mit Ringanker, $0,0025$ in grossen vielpoligen Maschinen mit Trommelanker angegeben (Fig. 80, B, B).

Die fünfte Ausgabe von Fischer-Hinnen, Gleichstrommaschinen, enthält eine Tabelle von 62 angeführten Gleichstrommaschinen der verschiedensten Grössen und Tourenzahlen aus den Jahren 1895—1902, die Konstanten ergeben die Kurve der Fig. 80, C.

In einem Artikel „Beitrag zum Entwurf von Gleichstrommaschinen“

(Zeitschrift für Elektrotechnik 1. Oktober 1905) giebt Herr Arthur Müller neuere Werte, welche zu der Kurve der Fig. 80, D führen.

Man kann diese Werte wohl als massgebend für den augenblicklichen Stand der Entwicklung der Dynamokonstruktion auf dem Festland ansehen. Vergleicht man damit Entwürfe, die in England und Amerika ausgeführt sind, so sieht man aus Fig. 80, in der neben der Kurve Müllers einige Konstanten aus der Praxis des Verfassers durch Kreise wiedergegeben sind, dass eine gute Übereinstimmung gegeben ist.

Berücksichtigt man, dass die zulässigen Temperaturen in England durchweg niedriger sind als auf dem Festland, so ist man

geneigt, auf einen höheren Entwicklungsstand des Maschinen-Entwurfes in England zu schliessen. Allerdings würde dieser Schluss ohne genauere Sichtung des vorhandenen Materials voreilig sein.

Jedenfalls zeigt das allmähliche Steigen der Konstanten, dass es verfehlt wäre, den Maschinenentwurf auf bestimmte Konstanten festzulegen und diese als massgebend für die Beurteilung eines Entwurfes anzusehen. Die meisten Autoren warnen auch ausdrücklich davor. Der Anfänger verfällt in diesen Fehler nur zu leicht, sodass er sich nicht getraut, die „bewährten“ Konstanten zu verlassen, sondern sich ängstlich an ihnen festklammert. Andererseits soll nicht geleugnet werden, dass für den ersten Entwurf bei richtiger Auswahl der Konstanten manche sonst erforderliche Berechnung gespart wird. Aber gerade für den Anfänger ist es viel wichtiger, durch vergleichende Berechnungen den Einfluss kennen zu lernen, den Abänderungen des Entwurfes in seinen einzelnen Teilen auf das Ganze ausüben, als auf den Krücken solcher Konstanten in einem Minimum von Zeit die ökonomisch günstigste Maschine, mit geringster Funkenbildung und bestem Wirkungsgrad — nachzuempfinden.

Dass diese Maschinenkonstanten mitunter direkt irre führen können, beweisen einige Entwürfe des Verfassers für 250 KW, 250 Umdr. p. Min., 250 Volt, deren Einzelheiten in den Tabellen X und XI gegeben sind.

Die Maschinen sind für 6polige und 8polige Anordnung bei verschiedenen Ankerdurchmessern und Ankerwindungszahlen durchgerechnet und geben folgende Konstanten:

Tabelle IX.

Ankerdurchmesser in <i>cm</i>	Ankerkonstante	
	6 Pole	8 Pole
80	0,00193	—
90	230	—
95	292	—
100	304	0,00182
105	334	—
110	—	230
115	—	270
120	—	290

Diese Werte sind in Fig. 81 mit einem Teil der Müllerschen Kurve zusammengestellt; eine genaue Berechnung der Dimensionen und Kosten ergibt, dass der durch den doppelten Kreis gekennzeichnete Entwurf der günstigste ist und nur etwa 8 % höhere

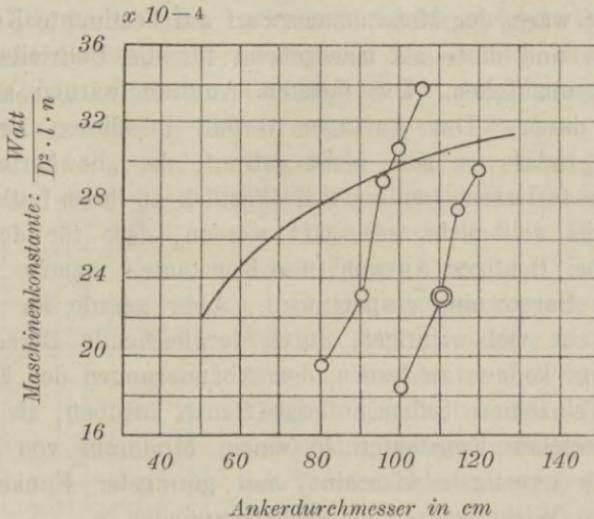


Fig. 81.

Kosten ergibt, als der Entwurf mit dem höchsten Koeffizienten, obwohl dieser 45 % grösser ist.

Dies ist ein deutliches Zeichen, dass es sich durchaus nicht immer empfiehlt, den Koeffizienten so hoch wie möglich zu wählen, sondern dass nur eine genaue Zusammenstellung verschiedener Entwürfe ein klares Urteil über die günstigsten Verhältnisse ermöglicht.

Ähnliches zeigt Fig. 82, in der die Konstanten für verschiedene Gleichstrommaschinen von 115, 230 und 550 Volt für 80, 100, 125, 150 KW bei 580, 500, 450, 425 Umdr. p. Min. wieder mit einem Teil der Müllerschen Kurve zusammengestellt sind. Die Maschinen waren aus dem Gesichtspunkt heraus entworfen, die Zahl der erforderlichen, auf Lager gehaltenen Einzelteile auf ein Minimum herabzudrücken, andererseits für jede Spannung die besten Resultate zu erhalten. Die Tourenzahlen sind ziemlich normal. Der Schwerpunkt dieser Betrachtung liegt nicht darin, einen Anhalt über den günstigsten Koeffizienten zu geben, sondern

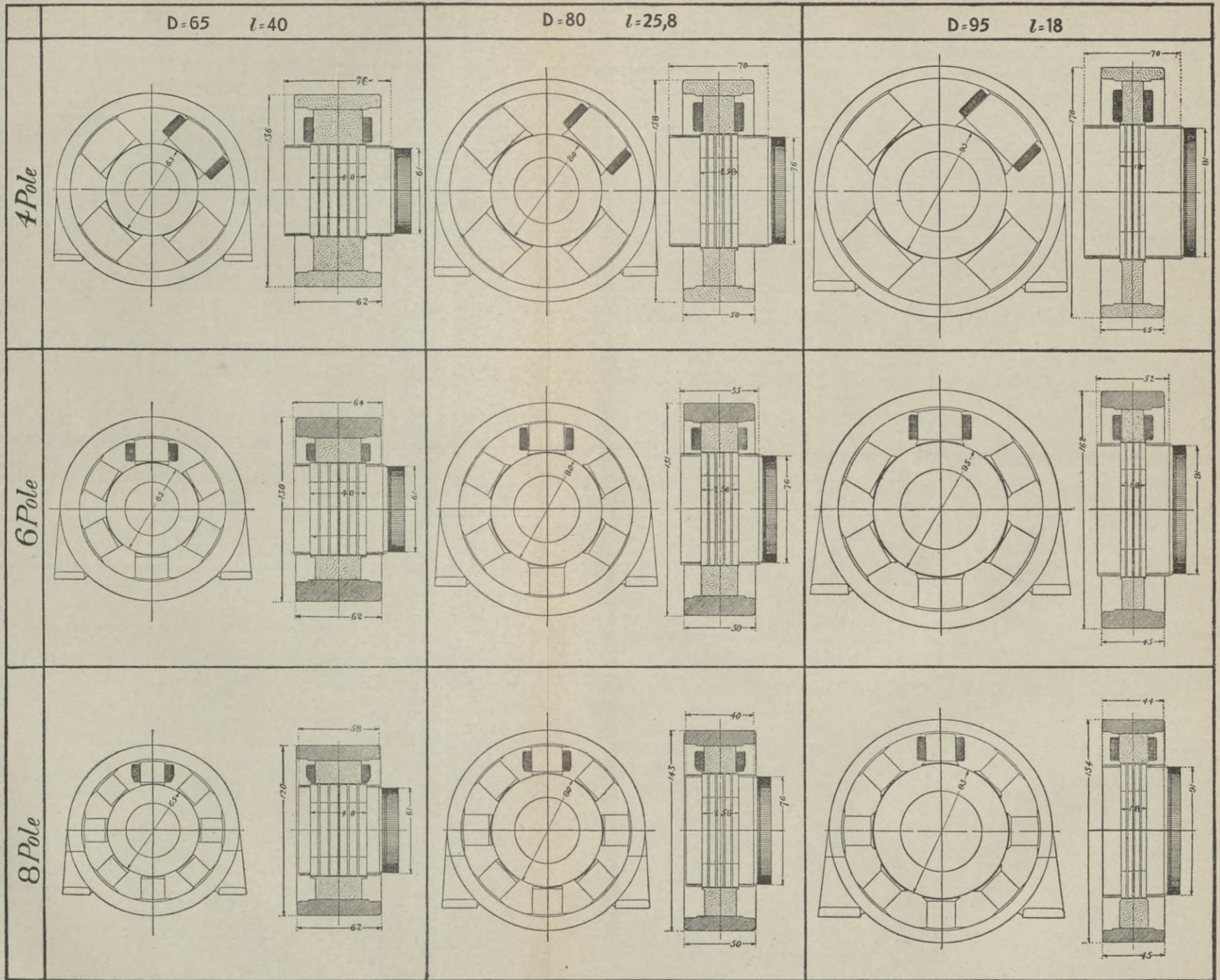


Fig. 96.

nachzuweisen, dass dieser in dem speziellen Fall nahezu unabhängig ist von dem Durchmesser.

Die ausgezogene Linie verbindet die Konstanten von fünf 100 KW-Generatoren für 350 Volt bei Tourenzahlen von 78 bis 1248.

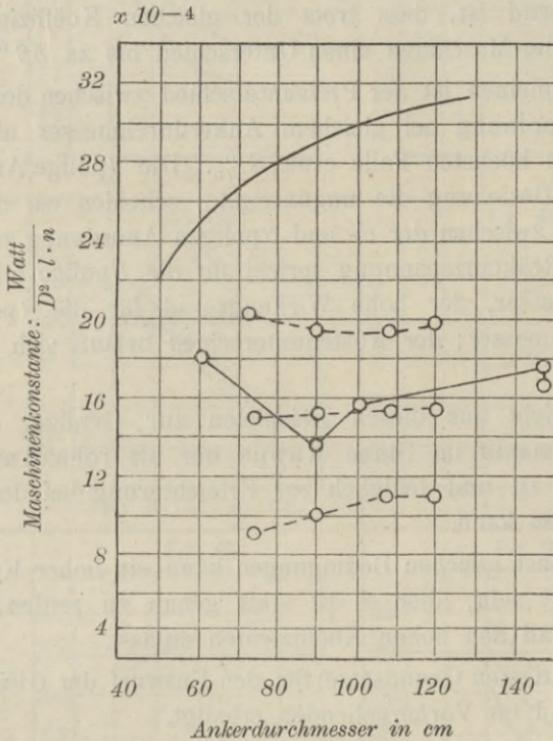


Fig. 82.

Die Tourenzahlen wachsen von rechts nach links jedesmal um das Doppelte.

Um schliesslich zu beweisen, dass die Gesamtkosten durchaus nicht immer von den Ankerkonstanten abhängen, ist ein 100 KW-Nebenschluss-Generator für 500 Volt, 400 Umdr. p. Min. in verschiedenen Entwürfen durchgerechnet und zwar für 4, 6 und 8 Pole mit 65, 80, 95 cm Ankerdurchmesser. Bei allen Anordnungen ist $D^2 \cdot l$ und damit der Koeffizient gleich. Die Figurentafel 96 enthält die Skizzen.

Die Maschinen der obersten Reihe haben Magnetgestelle aus Stahlguss, alle übrigen aus Gusseisen. Auf den Herstellungspreis wird dies keinen wesentlichen Einfluss haben.

Die Kurven der Figuren 88 bis 95 zeigen die Beziehungen zwischen Reaktanzspannung, Wirkungsgrad bei Voll-Last, Materialkosten, Herstellungskosten und dem Ankerdurchmesser bez. der Polzahl.

Bezeichnend ist, dass trotz der gleichen Koeffizienten die Selbstkosten der Maschinen einen Unterschied bis zu 56 % zeigen.

Im allgemeinen ist der Preisunterschied zwischen der 6- und 8poligen Anordnung bei gleichem Ankerdurchmesser nicht sehr bedeutend, im höchsten Falle etwa 8 %. Die 4polige Anordnung ist in jeder Beziehung die ungünstigste, scheiden wir diese aus, so hätten wir zwischen der 6- und 8poligen Anordnung zu wählen. Die geringe Reaktanzspannung spricht für die 8polige mit 80 cm Ankerdurchmesser, der hohe Wirkungsgrad für die 6polige mit 65 cm Durchmesser; der Kostenunterschied beläuft sich auf etwa 3,5 %.

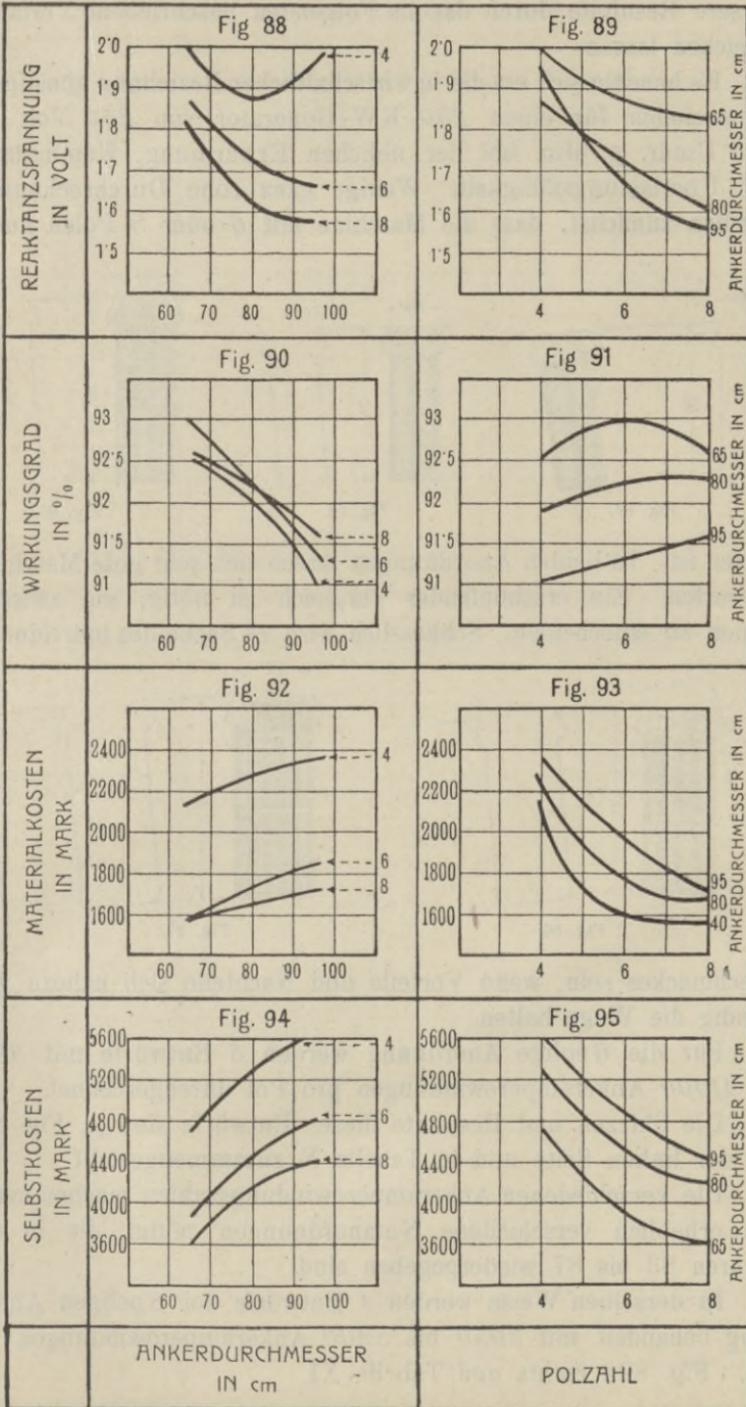
Man ersieht aus diesen Beispielen zur Genüge, dass die Maschinenkonstante im Sinne Kapps nur als rohe Annäherung zu betrachten ist und lediglich zur Erleichterung bei dem ersten Entwurf dienen kann.

Unter sonst gleichen Bedingungen kann ein hoher Koeffizient wünschenswert sein, aber es ist stets genau zu prüfen, ob der vorliegende Fall den hohen Koeffizienten zulässt.

Die wichtigsten Grundsätze für den Entwurf der Gleichstrommaschinen sind im Vorhergehenden erledigt.

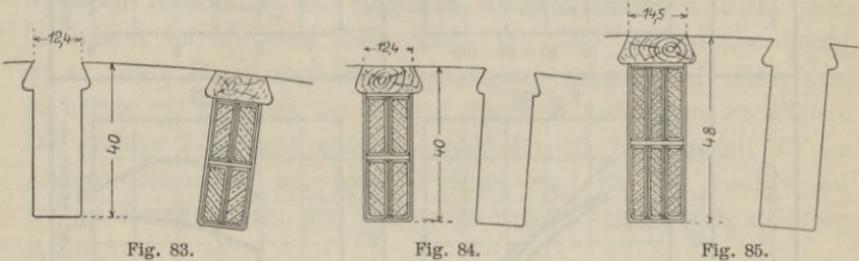
Wenn nun auch der Anfänger, der diese Grundsätze beherrscht, überzeugt ist, dass er eine gute Maschine entwerfen kann, so weiss er doch noch nicht, wie er die Maschine dimensionieren muss, um sicher zu gehen, dass er den für den vorliegenden Fall besten Entwurf getroffen hat. Manche Konstrukteure und wohl die meisten Lehrbücher versuchen dies Resultat, wie vorher angegeben, auf dem Wege von Erfahrungswerten und Formeln zu erreichen, zum Beispiel ausgehend von der Maschinenkonstante, der Ankerumfangsgeschwindigkeit oder von einer Formel, in der der günstigste Ankerdurchmesser durch sein Verhältnis zur Leistung, Spannung, Tourenzahl und Temperaturerhöhung ausgedrückt ist.

Der Verfasser ist der festen Überzeugung, dass diese Methoden mehr oder weniger unzureichend sind, und dass sich erheblich

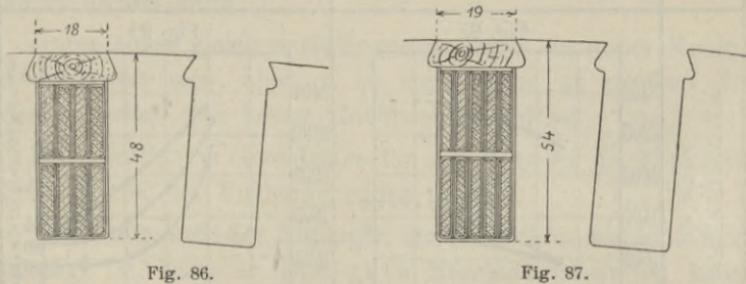


bessere Resultate durch das im Folgenden beschriebene Verfahren erreichen lassen.

Es handele sich um die in wirtschaftlicher Beziehung günstigsten Dimensionen für einen 250 KW-Generator von 250 Volt und 250 Umdr. p. Min. bei der üblichen Erwärmung, Kommutation und Überlastungsfähigkeit. Wenige ganz rohe Durchrechnungen ergeben zunächst, dass die Maschine mit 6 oder 8 Polen auszu-



führen ist. In beiden Anordnungen lassen sich sehr gute Maschinen entwerfen. Ein erschöpfender Vergleich ist nötig, um zwischen beiden zu entscheiden. Schliesslich wird es Sache des individuellen



Geschmackes sein, wenn Vorteile und Nachteile sich nahezu vollständig die Wage halten.

Für die 6polige Anordnung werden 5 Entwürfe mit 3000 bis 11000 Ankerampèrewindungen pro Pol durchgerechnet.

Die Skizzen und Resultate dieser Entwürfe sind in Fig. 82a auf der linken Seite und in Tabelle X zusammengestellt.

Die verschiedenen Ankerampèrewindungszahlen machen natürlich erheblich verschiedene Nutanordnungen nötig, die in den Figuren 83 bis 87 wiedergegeben sind.

In derselben Weise werden 4 Entwürfe der 8poligen Anordnung behandelt mit 3050 bis 8800 Ankerampèrewindungen pro Pol. Fig. 82a rechts und Tabelle XI.

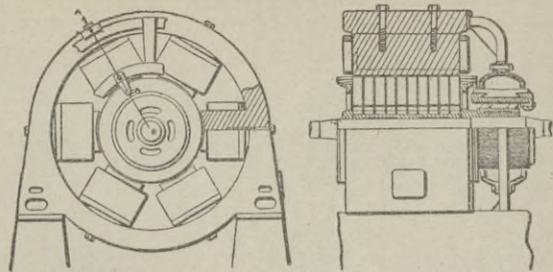
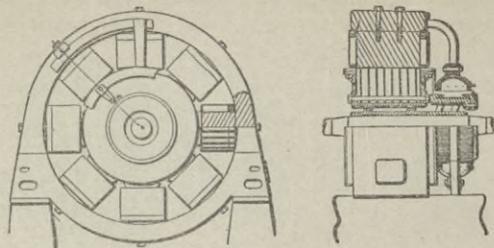
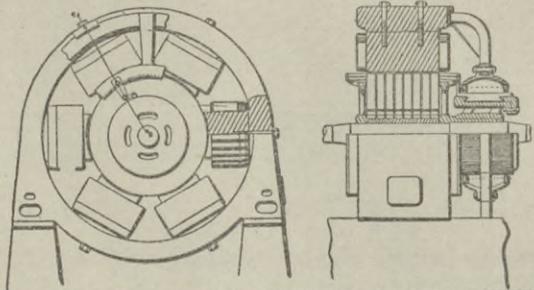
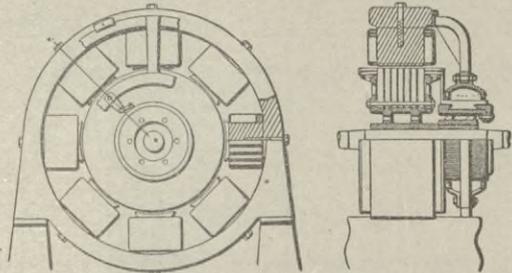
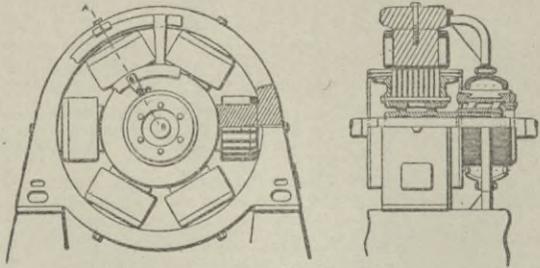
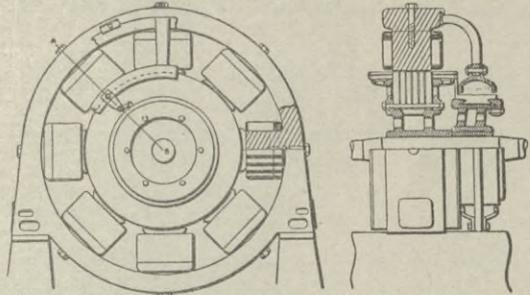
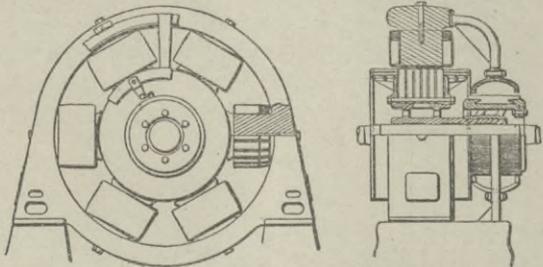
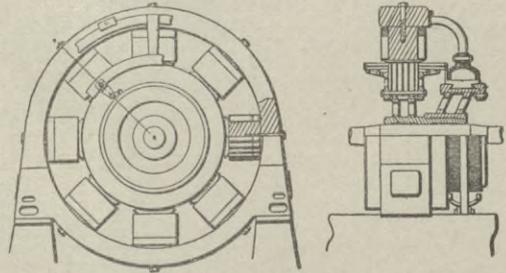
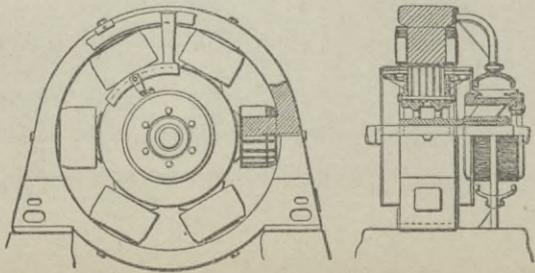
		6 Pole	8 Pole
A	$D^2 l = 535,000$ Anker-Amperewindungen pro Pol = 3000		
B	$D^2 l = 485,000$ Anker-Amperewindungen pro Pol = 5000		
C	$D^2 l = 355,000$ Anker-Amperewindungen pro Pol = 7000		
D	$D^2 l = 345,000$ Anker Amperewindungen pro Pol = 9000		
E	$D^2 l = 300,000$ Anker-Amperewindungen pro Pol = 11,000		

Tabelle X.

6 polige Maschinen für 250 KW, 250 Umdr. p. Min., 250 Volt.

	A	B	C	D	E
Anker.					
Äusserer Durchmesser in <i>mm</i>	800	900	950	1000	1050
Umfangsgeschwindigkeit in <i>m/sek</i>	10,5	11,8	12,4	13,1	13,7
Innerer Durchmesser in <i>mm</i>	303	430	400	524	559
Eisenlänge in <i>mm</i>	650	420	290	250	200
Anzahl der Schlitze (je 10 <i>mm</i>)	9	7	6	6	5
Ankerlänge in <i>mm</i>	810	536	382	338	272
Nutzenzahl	54	90	84	78	78
Nutendimensionen in <i>mm</i>	40 · 12,4	40 · 12,4	48 · 14,5	48 · 18	54 · 19
Zahnbreite am Kopf in <i>mm</i>	34,1	19,1	22,1	22,3	23,3
„ „ Fuss in <i>mm</i>	29,5	16,4	17,4	18,5	19
„ in der Mitte in <i>mm</i>	31,8	17,7	19,7	20,4	21,2
Anzahl der Ankerleiter	216	360	504	624	780
Leiter pro Nut	4	4	6	8	10
Leiterquerschnitt in <i>mm</i> ²	56	56	56	56	56
Gesamtankerwindungen	108	180	252	312	390
Windungen zwischen den Bürsten	18	30	42	52	65
Länge einer Windung in <i>cm</i>	262	224	202	202	195
Windungslänge zwischen den Bürsten in <i>m</i>	47,10	67,4	84,8	105	126,5
Gesamtquerschnitt zwischen den Bürsten in <i>mm</i> ²	336	336	336	336	336
Widerstand zwischen den Bürsten bei 60° C.	0,00283	0,0041	0,0051	0,0063	0,00752
Spannungsverlust im Anker bei 60° C. Volt	3	4,2	5,2	6,4	7,6
Spannungsverlust unter den Bürsten Volt	2	2	2	2	2
Spannungsverlust in der Kompoundwicklung Volt	1,2	1,4	1,5	1,8	2,2
Elektromotorische Kraft Volt	256,2	258,0	259	260	262
Periodenzahl des Ankers	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Kraftlinien im Anker pro Pol $10^6 \times$	28,5	17,2	12,3	10	8,03
Magnetische Verhältnisse.					
Luftspalt in <i>cm</i>	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Polteilung in <i>mm</i>	427	472	496	524	550
Polbogen ($\beta = 0,7$) in <i>cm</i>	29,9	33	35	36,6	38,5
Achsiale Pollänge in <i>cm</i>	81,0	53,6	38	33	27
Radiale Schenkellänge in <i>cm</i>	39,5	39,5	42	40	42

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Achsiale Schenkelbreite in <i>cm</i>	81	48	35,5	32	29
Schenkeldicke in <i>cm</i>	28,0	29	35,5	32	29
Schenkelquerschnitt in <i>cm</i> ²	2260	1380	985	800	660
Äusserer Jochdurchm. in <i>mm</i>	1850	1910	1982	1985	2044
Jochdicke in <i>cm</i>	15,9	14,4	15,4	14	13,4
Achsiale Jochlänge in <i>cm</i>	90	60	40	36	30
Jochquerschnitt in <i>cm</i> ²	1430	860	620	500	405
Sättigung in Luft	11700	9700	9250	8300	7700
„ im Anker	10500	10500	10500	10500	10500
Scheinbare Sättigung in den Zähnen (Mitte)	21400	21100	21600	21700	21200
Wirkliche Sättigung in den Zähnen (Mitte)	20800	20250	20400	20400	20100
Sättigung im Schenkel	15650	15000	15000	15000	14500
„ im Joch	12000	12000	12000	12000	12000
Erregerwindungen für Luft	5850	5600	5600	5700	5700
„ für Anker	115	115	115	120	125
„ „ Zähne	1720	1600	1790	1760	1660
„ „ Schenkel	900	860	860	860	750
„ „ Joch	715	725	735	760	765
Leerlaufs-Erregung	9300	8900	9100	9200	9000
Anker-Ampèrewindungen pro Pol	3040	5070	7100	8800	10900
Bürstenverschiebung in ‰	4	5	6	8	10
Gegenwindungen	240	507	850	1400	2180
Querwindungen	2800	4570	6250	7400	8720
Erforderliche A.-W. zum Ausgleich der Querwindungen	1200	1600	2150	2600	2900
Gesamt-Erregung	10790	11007	12100	13200	14080
Ampèrewindungen im Nebenschluss	9300	8900	9100	9200	9000
Ampèrewindungen im Hauptstrom	1500	2000	3000	4000	5000
Nebenschlusswicklung.					
Wicklungstiefe in <i>mm</i>	55	60	60	65	70
Spulenlänge in <i>mm</i>	240	220	210	200	190
Mittlere Windungslänge in <i>m</i>	2,19	1,55	1,34	1,24	1,16
Windungszahl	550	800	900	1030	1110
Windungsquerschnitt in <i>mm</i> ²	11,6	8	6,8	6,3	6
Widerstand einer Spule bei 60° C.	2,1	3,06	3,43	3,88	4,3
Spannungsverlust im Regulierwiderstand . . . Volt	42	42	42	42	42

	A	B	C	D	E
Spannung pro Spule . Volt	34,7	34,7	34,7	34,7	34,7
Strom in der Nebenschluss- wicklung . . . Ampère	16,5	11,3	10,1	8,95	8,1
Watt pro Spule	570	390	350	310	280
Abkühlungsfläche in dm^2 . .	57	38	32	29	26
Watt pro dm^2	10	10,3	11	10,7	10,8
Kompondwicklung.					
Strom in der Wicklung . . .	750	700	750	700	850
Strom im Parallelwiderstand .	250	300	250	300	150
Windungszahl	2	3	4	5	6
Parallel geschaltete Leiter . .	7	6	6	5	5
Leiterdimensionen in mm . . .	30·3	30·3	30·3	35·3	50·5
Widerstand pro Spule bei $60^{\circ} C$.	0,000135	0,00016	0,70019	0,00023	0,00018
Watt pro Spule	76	78,5	109	113	133
Abkühlungsfläche in dm^2 . . .	9,1	8,25	10,5	10,5	12,2
Watt pro dm^2	8,4	9,6	10,4	10,8	10,9
Kommutator.					
Durchmesser in mm	600	600	600	600	700
Umfangsgeschwindigkeit in m/sek	7,85	7,85	7,85	7,85	9,15
Anzahl der Segmente	108	180	252	312	390
Breite: Segment + Isolation in mm	17,4	10,4	7,5	6,05	5,65
„ Segment	16,8	9,6	6,7	5,2	4,8
Lauflänge	400	400	400	400	360
Bürstentiftzahl	6	6	6	6	6
Bürsten pro Stift	8	8	8	8	8
Bürstenbogen in mm	22	22	22	22	22
Bürstenbreite in mm	32	32	32	32	32
Stromdichte unter der Bürste Amp./ cm^2	6	6	6	6	6
Stromwärme-Verlust an den Bürsten Watt	2000	2000	2000	2000	2000
Reibungsverlust an den Bürsten Watt	800	800	800	800	800
Gesamtverlust am Kommutator Watt	2800	2800	2800	2800	2800
Abkühlungsfläche in dm^2	75	75	75	75	75
Watt pro dm^2	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Windungen pro Segment	1	1	1	1	1
Gesamteffekt im Anker . Watt	260000	260000	260000	260000	260000
Eisenlänge + $0,15 \tau$	71,4	49,1	36,5	33	28,3
Reaktanzspannung (S. 95) Volt	2,72	3,12	3,15	3,56	3,8

	A	B	C	D	E
Erwärmungen.					
Anker-Stromwärme . Watt	2940	4220	5200	6390	7700
Eisenverluste "	6800	5100	3870	3620	3060
Gesamtverlust "	9740	9320	9070	10010	10760
Abkühlungsfläche in dm^2 . . .	256	243	210	234	230
Watt pro dm^2	38	38,5	43	43	47
Übertemperatur	38	38	43	43	47
Kommutator: Watt pro dm^2	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Übertemperatur	38	38	38	38	38
Magnetspulen: Watt pro dm^2	10	10,3	11	10,7	10,8
Übertemperatur	40	40	44	44	44
Verluste und Wirkungsgrad.					
Eisenverlust im Anker . Watt	6800	5100	4070	3620	3060
Reibungsverlust am Kommutator Watt	800	800	800	800	800
Verlust im Nebenschluss . Watt	3420	2340	2100	1860	1680
Verlust im Regulator . Watt	660	470	430	380	340
Lager und Luftreibung . Watt	2500	2500	2500	2500	2500
Konstante Verluste . . Watt	14180	13210	9900	9160	7380
Stromwärme am Kommutator (prop. J) . . . Watt	2000	2000	2000	2000	2000
Stromwärme im Anker (prop. J^2) . . . Watt	2940	4220	5200	6300	7700
Stromwärme in der Compound- wicklung (prop. J^2) Watt	460	470	654	680	800
Stromwärme im Parallelwider- stand (prop. J^2) . Watt	240	290	330	440	210
Variable Verluste . . . Watt	5640	6980	8180	9420	10710
Gesamtverluste . . . Watt	19820	20190	18100	18580	18090
Nutzbarer Effekt . . . Watt	250000	250000	250000	250000	250000
Zugeführter mechanischer Effekt Watt	269800	270200	268100	268600	268100
Wirkungsgrad bei Voll-Last	0,93	0,925	0,93	0,93	0,93
" lastung " halber Be-	0,88	0,87	0,91	0,91	0,92
Gewichte in kg.					
Ankerbleche	2200	1620	1260	1110	1000
Ankerkupfer	140	202	254	310	380
Kommutatorkupfer	330	330	330	330	350
Feldkupfer	920	650	600	584	696
Schenkel (Stahlguss)	3650	2100	1450	1140	920
Joch (Gusseisen)	5800	3650	2650	2170	1800

	A	B	C	D	E
Materialkosten.					
Ankerkupfer	350	505	635	775	950
Kommutatorkupfer	825	825	825	825	875
Feldkupfer	2300	1620	1500	1480	1740
Ankerbleche	1100	810	630	550	500
Stahlguss und Gusseisen	3300	2010	1430	1160	950
Gesamtkupfer	3475	2950	2960	3080	3565
Gesamteisen	4400	2820	2060	1700	1450
Gesamte Materialkosten	7870	5770	5020	4800	5020

Tabelle XI.

8polige Maschinen für 250 KW, 250 Umdr. p. Min., 250 Volt.

	A	B	C	D
Anker.				
Äusserer Durchmesser in <i>mm</i>	1000	1100	1150	1200
Umfangsgeschwindigkeit in <i>m/sek</i>	13,1	14,4	15	15,7
Innerer Durchmesser der Bleche in <i>mm</i>	475	582	668	717
Eisenlänge in <i>mm</i>	423	270	208	170
Anzahl der Schlitze (je 10 <i>mm</i>)	8	6	5	5
Ankerlänge in <i>mm</i>	550	360	280	240
Nutenzahl	96	104	112	112
Nutendimensionen in <i>mm</i>	10,5 · 40	13 · 45	15,8 · 45	17,5 · 50
Zahnbreite am Kopf in <i>mm</i>	22,2	20	16,5	16,1
„ „ Fuss in <i>mm</i>	19,6	17,5	13,9	13,4
„ „ in der Mitte in <i>cm</i>	2,09	1,87	1,52	1,47
Anzahl der Ankerleiter	384	624	896	1120
Leiter pro Nut	4	6	8	10
Leiterquerschnitt in <i>mm</i> ²	42	42	42	42
Gesamtankerwindungen	192	312	448	560
Windungen zwischen den Bürsten	24	39	56	70
Länge einer Windung in <i>cm</i>	206	180	174	176
Windungslänge zwischen den Bürsten in <i>m</i>	49,50	70	97	123
Gesamtquerschnitt „ „ „ in <i>mm</i> ²	336	336	336	336
Widerstand „ „ „ bei 60° C.	0,00293	0,00481	0,0053	0,00735

	A	B	C	D
Spannungsverlust im Anker . . . Volt	3	4,2	5,3	7,4
„ unter den Bürsten „	2	2	2	2
„ in der Compoundwicklung „	0,8	0,9	1	1,4
Elektromotorische Kraft „	256	257	258	261
Periodenzahl des Ankers	16,7	16,7	16,7	16,7
Kraftlinien im Anker pro Pol $10^6 \times$.	16	9,9	6,9	5,55
Magnetische Verhältnisse.				
Luftspalt in <i>mm</i>	6	7	8	9
Polteilung in <i>mm</i>	392	432	452	472
Polbogen ($\beta = 0,7$) in <i>cm</i>	27,4	30,2	31,6	33,4
Achsiale Pollänge in <i>cm</i>	55	36	28	24
Polquerschnitt in <i>cm</i> ²	1510	1085	900	800
Radiale Schenkellänge in <i>cm</i>	33	33	33	33
Achsiale Schenkelbreite in <i>cm</i>	55	36	26,5	24
Schenkeldicke in <i>cm</i>	26	26,5	26,5	24
Schenkelquerschnitt in <i>cm</i> ²	1280	800	550	452
Jochdurchmesser (aussen) in <i>mm</i>	1970	2030	2090	2110
Jochdicke in <i>cm</i>	13,5	12,5	11,7	10,1
Achsiale Jochlänge in <i>cm</i>	60	40	30	30
Jochquerschnitt in <i>cm</i> ²	810	500	350	300
Sättigung in Luft	10600	9100	7650	6950
Sättigung im Anker	10500	10500	10500	10500
Scheinbare Sättigung in den Zähnen .	20600	21800	22400	22700
Wirkliche „ „ „ „	20000	20800	20800	21000
Sättigung im Schenkel	15000	14900	15000	14700
„ „ Joch	12000	12000	12000	12000
Erregerwindungen für Luft	5400	5300	5600	5900
„ „ Anker	80	80	80	80
„ „ Zähne	1200	1930	1930	2130
„ „ Schenkel	700	700	700	700
„ „ Joch	600	630	660	690
Leerlaufs-Erregung	7980	8640	8970	9500
Ankerampèrewindungen pro Pol	3050	4928	7050	8800
Bürstenverschiebung in %	4	6	8	10
Gegenwindungen	240	520	1120	1750
Querwindungen	2810	4400	5690	7000
Erforderliche A.-W. zum Ausgleich der Querwindungen	1200	1600	2200	2600
Gesamt-Erregung	9420	10760	12300	13850
Ampèrewindungen im Nebenschluss	8500	9000	9500	10200
„ „ Hauptstrom	1000	1650	2800	3600

	A	B	C	D
Nebenschlusswicklung.				
Wicklungstiefe in <i>mm</i>	55	60	60	65
Spulenlänge in <i>mm</i>	220	210	220	220
Mittlere Windungslänge in <i>m</i>	1,63	1,24	1,05	1,00
Windungszahl	570	750	910	1000
Windungsquerschnitt in <i>mm</i> ²	10,5	8,4	7,5	7,9
Widerstand einer Spule bei 60° C.	1,73	2,2	2,5	2,55
Spannung pro Spule Volt	26,3	26,3	26,3	26,3
Strom in der Nebenschlusswicklung Ampère	15,3	12	10,4	10,3
Watt pro Spule	400	315	273	265
Abkühlungsfläche in <i>dm</i> ²	40	30	26,5	26
Watt pro <i>dm</i> ²	10	10,6	10,5	10,2
Kompoundwicklung.				
Strom in der Wicklung	550	550	700	720
Strom im Parallelwiderstand	450	450	300	280
Windungszahl	2	3	4	5
Parallele Leiter	6	6	6	5
Leiterdimensionen in <i>mm</i>	30·3	30·3	35·3	40·3
Widerstand pro Spule bei 60° C.	0,00016	0,00018	0,00017	0,000175
Watt pro Spule	48	54	80	95
Abkühlungsfläche in <i>dm</i> ²	5,9	6,1	7,5	8,1
Watt pro <i>dm</i> ²	8	9	10,7	11
Kommutator.				
Durchmesser in <i>mm</i>	600	700	800	900
Umfangsgeschwindigkeit in <i>m/sek</i>	7,85	9,15	10,5	11,8
Anzahl der Segmente	192	312	448	560
Breite: Segment + Isolation in <i>mm</i>	9,8	7,05	5,6	5,05
„ Segment	9,0	6,7	4,8	4,25
Laufänge	330	330	280	280
Bürstentiftzahl	8	8	8	8
Bürsten pro Stift	6	6	6	6
Bürstenbogen in <i>mm</i>	22	22	22	22
Bürstenbreite in <i>mm</i>	32	32	32	32
Stromdichte unter der Bürste Amp./ <i>cm</i> ²	6	6	6	6
Stromwärmeverlust an den Bürsten Watt	2000	2000	2000	2000
Reibungsverlust „ „ „ „	800	900	1000	1160
Gesamtverlust am Kommutator	2800	2950	3000	3160
Abkühlungsfläche in <i>dm</i> ²	62	72,5	73	79
Watt pro <i>dm</i> ²	46	40	41	40

	A	B	C	D
Windungen pro Segment	1	1	1	1
Gesamt-Effekt im Anker Watt	260000	260000	260000	260000
Eisenlänge + $0,15 \tau$ in <i>cm</i>	48,3	33,5	27,5	24
Reaktanzspannung (Seite 95) . . . Volt	2,46	2,76	3,25	3,55
Erwärmungen.				
Anker: Stromwärme Watt	3050	4300	5500	7000
Eisenverluste "	6800	4850	3780	3400
Gesamtverluste "	9850	9150	9280	11000
Abkühlungsfläche in dm^2	245	225	235	247
Watt pro dm^2	40	40	39,5	41
Übertemperatur	40	40	40	41
Kommutator: Watt pro dm^2	46	40	41	40
Übertemperatur	46	40	41	40
Magnetspulen: Watt pro dm^2	10	10,5	10,5	10,2
Übertemperatur	40	42	42	40
Verluste und Wirkungsgrad.				
Eisenverlust im Anker Watt	6800	4850	3780	3400
Reibungsverlust am Kommutator "	810	810	1010	1160
Verlust im Nebenschluss "	3200	2520	2180	2120
Verlust im Regulator "	610	480	420	410
Lager und Luftreibung "	2500	2500	2500	2500
Konstante Verluste "	14400	11970	9960	9730
Stromwärme am Kommutator (prop. J) "	2000	2000	2000	2000
" im Anker (prop. J^2) "	3050	4300	5500	7600
" in der Kompoundwick- lung (prop. J^2) "	380	430	640	720
" im Parallelwiderstand (prop. J^2) "	310	350	280	280
Variable Verluste	5850	7180	8550	10950
Gesamt-Verluste	20250	19150	18510	20680
Nutzbarer Effekt Watt	250000	250000	250000	250000
Zugeführter mechanischer Effekt "	270300	269200	268500	270700
Wirkungsgrad bei Voll-Last . . . in $\%$	92,5	93	93,2	92,0
" " halber Last . . . in $\%$	88,5	90,5	91	90,8
Gewichte in <i>kg</i>.				
Ankerbleche	2000	1430	1110	1000
Schenkel (Stahlguss)	2560	1500	1040	850
Joch (Stahlguss)	3560	2280	1600	1330
Ankerkupfer	147	210	290	365

	A	B	C	D
Feldkupfer	780	682	700	730
Kommutatorkupfer	275	285	310	350
Gesamt-Eisen	8120	5210	3750	3180
Gesamt-Kupfer	1202	1177	1300	1445
Materialkosten in Mark.				
Ankerbleche	1000	720	555	500
Stahlguss	2150	1330	925	760
Ankerkupfer	368	525	725	910
Feldkupfer	1950	1700	1750	1820
Kommutatorkupfer	690	710	775	875
Gesamt-Eisen	3150	2050	1480	1260
Gesamt-Kupfer	3008	2935	3250	3605
Gesamte Materialkosten	6160	4980	4730	4670

Für die Materialpreise sind Mittelwerte eingesetzt, die natürlich für die Praxis keine massgebliche Bedeutung haben, sondern nur dem Studierenden den erforderlichen Überblick geben sollen.

Kupfer	pro kg M. 2,50,
Ankerbleche	„ „ „ 0,50,
Gusseisen	„ „ „ 0,25,
Stahlguss	„ „ „ 0,35.

Die Isolation ist in den Materialkosten nicht berücksichtigt, da sie sich nicht leicht berechnen lässt; sie muss zusammen mit den übrigen Unkosten, wie: Arbeitslöhne, Betriebskosten, Generalunkosten geschätzt werden.

Diese Unkosten, die bei der Herstellung jeder Maschine unvermeidlich sind, kann man in folgender Weise schätzen:

$$\text{Herstellungskosten} = 0,1 \cdot D_1^2 + 0,14 D_1 \cdot L,$$

worin D_1 der äussere Durchmesser des Gestelles in *cm*, L die ganze Ankerlänge, gemessen zwischen den Enden der Wickelköpfe in *cm*, ist.

Die tatsächlichen Herstellungskosten werden bei verschiedenen Firmen natürlich verschieden sein, es ändern sich also die Konstanten, aber der Unterschied ist nicht erheblich und die Beziehungen bleiben überall dieselben, sodass die Formeln für Vergleichsrechnungen sehr geeignet sind.

Danach sind die Selbstkosten einer Maschine gleich
Materialkosten + Herstellungskosten.

Am meisten interessiert uns ein Vergleich der Selbstkosten, die wir nach dem beschriebenen Verfahren berechnen und in Tabelle XII zusammenstellen.

Z. B. für den ersten 6 poligen Entwurf:

Grösster Durchmesser der Maschine D_1 in <i>cm</i>	·	180,
Gesamt-Ankerlänge L in <i>cm</i>	· · · · ·	81,
$0,1 D_1^2$	· · · · ·	3240,
$0,14 D_1 \cdot L$	· · · · ·	2040,
Herstellungs-Kosten	· · · · ·	M. 5280,
Material-Kosten	· · · · ·	„ 6000,
Selbstkosten	· · · · ·	„ 11280.

Tabelle XII.

Pol- zahl	Anker- ampèrewin- dungen pro Pol	$0,1 D_1^2$	$0,14 D_1 \cdot L$	Her- stellungs- kosten	Material- kosten	Selbst- kosten
6	3000	3420	2100	5500	7900	13400
6	5000	3650	1430	5100	5800	10900
6	7000	3940	1050	5000	5000	10000
6	9000	3950	940	4900	4800	9700
6	11000	4200	780	5000	5000	10000
8	3000	3880	1520	5400	6200	11600
8	5000	4100	1020	5100	5000	10100
8	7000	4380	820	5200	4700	9900
8	9000	4450	710	5200	4600	9800

In Fig. 97 sind die Selbstkosten und Reaktanzspannungen in Abhängigkeit von der Ankerampèrewindungszahl aufgetragen. Wären alle Entwürfe technisch gleichwertig, so würde man sich schnell für das 6 polige Modell (ausgezogene Linien) mit 9000 Ankerampèrewindungen entscheiden. Es zeigt sich aber, dass dieses Modell eine sehr hohe Reaktanzspannung hat, und dass die Maschine um so teurer wird, je geringer die Reaktanzspannung ist. Wir erkennen ferner, dass das 8 polige Modell (gestrichelte Linien) von

etwa 8000 Ampèrewindungen abwärts billiger und bezüglich der Reaktanzspannung günstiger ist als das 6polige.

Wenn die vorzüglichen Kommutationsbedingungen den Preisunterschied rechtfertigen würden, so wäre das 8polige Modell mit 3000 Ankerampèrewindungen zu wählen, aber die Kosten betragen an 15 % mehr als bei dem billigsten 8poligen, an 20 % mehr als bei

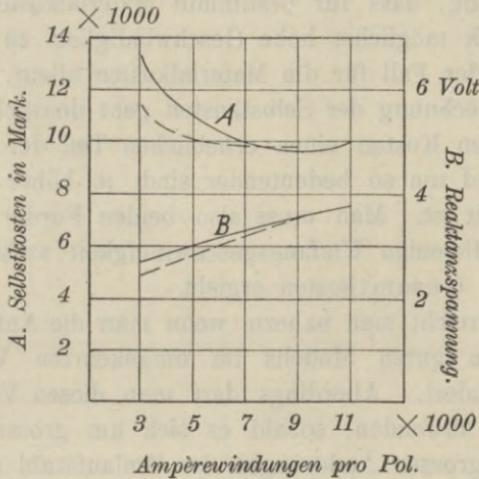


Fig. 97.

dem billigsten 6poligen. Liegen keine besonderen Bedingungen vor, so ist das 8polige Modell mit 5000 Ampèrewindungen (Tabelle XI, Spalte B) jedenfalls das günstigste.

Es vereinigt mit geringer Reaktanzspannung und geringen Gesamtkosten (nur ca. 4 % mehr als das billigste 6polige) günstige Wirkungsgrade. Zu bemerken ist, dass seine Konstante erheblich von den Werten der Müller'schen Kurve (Fig. 81) abweicht.

Es mag sehr umständlich erscheinen, solch eingehende Vergleichsberechnungen durchzuführen, zumal für grössere Maschinen, die doch meist nicht listenmässig geführt werden, aber es kommt ausser dem guten Überblick, den man erhält, noch ein wichtiger Vorteil hinzu.

Wie die Erfahrung zeigt, lässt sich aus einem gegebenen richtigen Entwurf für bestimmte Leistung, Tourenzahl und Spannung mit sehr guter Annäherung ein wirtschaftlicher guter Entwurf für die gleiche Leistung und Spannung, aber verschiedene

Tourenzahl ableiten, indem man lediglich die Ankerbreite umgekehrt proportional der Tourenzahl ändert.

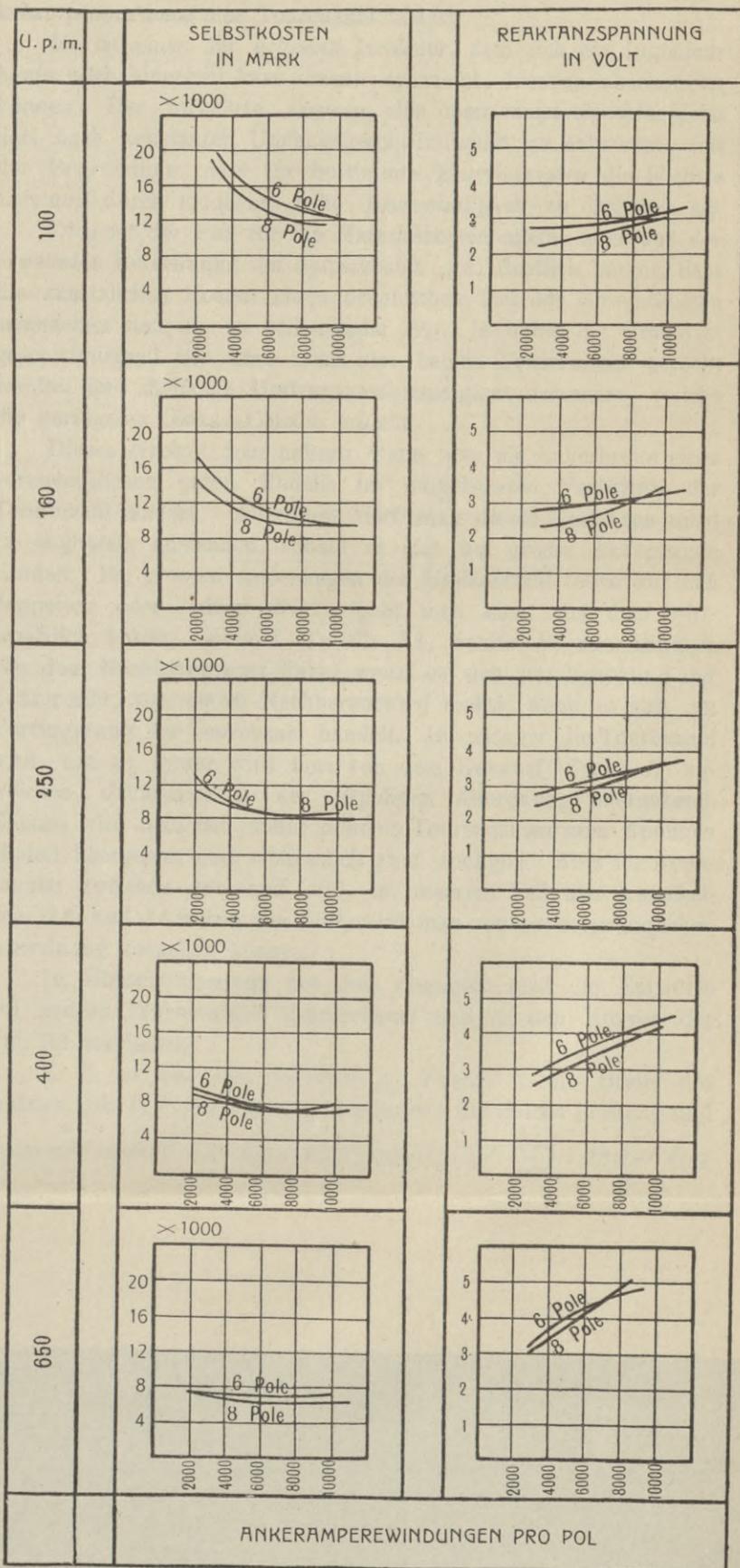
Es ist einer der grössten Irrtümer, dem sich ein Ingenieur heute noch hingeben kann, wenn er meint, hiervon absehen zu können. Der verkehrte Ausweg, den man meist einschlägt, ist der, nach konstanter Umfangsgeschwindigkeit zu entwerfen, mit der Begründung, dass für bestimmte Materialkosten die höchste Leistung durch möglichst hohe Geschwindigkeit zu erreichen sei.

Dies ist der Fall für die Materialkosten allein, aber aus der erwähnten Berechnung der Selbstkosten geht deutlich hervor, dass die zusätzlichen Kosten einen erheblichen Teil der Gesamtkosten ausmachen und um so bedeutender sind, je höher die Umfangsgeschwindigkeit ist. Man muss also beiden Forderungen gerecht werden und diejenige Umfangsgeschwindigkeit aufsuchen, welche die geringsten Gesamtkosten ergibt.

Dieses erreicht man nahezu, wenn man die Ankerbreite eines wirtschaftlichen guten Modells im umgekehrten Verhältnis der Tourenzahl ändert. Allerdings darf man dieses Verfahren nicht zu engherzig anwenden, sobald es sich um grosse Änderungen handelt. Bei grossen Änderungen der Umlaufzahl (etwa auf den doppelten oder halben Wert), geht man nicht von dem wirtschaftlich besten Entwurf (Tabelle XI, Spalte *B*) aus, sondern von dem Nachbarentwurf links, wenn es sich um Erhöhung der Tourenzahl, von einem Nachbarentwurf rechts, wenn es sich um Verringerung der Tourenzahl handelt. Je geringer die Tourenzahl wird, um so weiter wird man von dem Entwurf (Spalte *B*) abweichen, schliesslich zu der 10poligen Anordnung übergehend. Ebenso wird man bei immer höheren Tourenzahlen zum 6poligen Modell übergehen und schliesslich zum 4poligen. Aber für Änderungen zwischen 160 und 400, in unserem Fall also zwischen dem 0,6- und 1,6fachen von 250, wird man von der ursprünglichen Anordnung ausgehen können.

In Übereinstimmung mit dem Gesagten sind die Entwürfe auf andere Tourenzahlen umgerechnet und in den Kurven der Fig. 98 verglichen.

Z. B. ist bei dem Entwurf *A*, Tabelle X die Breite des Ankers von 650 auf 405 mm verringert, für gleiche Leistung und Spannung ändert sich dann die Tourenzahl auf $\frac{650}{405} \cdot 250 = 400$.



Die Ankerampèrewindungen pro Pol behalten den gleichen Wert 3000, die Kosten betragen M. 9000.—, die Reaktanzspannung wird 2,9 Volt, die Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators ist 12,6 *m* pro *sek.*, immer noch verhältnismässig niedrig. Immerhin kann man sich nicht ohne weiteres für diese Ausführung entscheiden, man muss auch für die übrigen 8 Entwürfe die Änderung für Tourenzahl vornehmen. Das ergibt die in der Fig. 98 zusammengestellten Kurven. Man kann sich aus ihnen leicht die günstigsten Anordnungen herausuchen für 400 U. p. m., wenn auch im allgemeinen der Unterschied in den Kosten zwischen den 6- und 8poligen Anordnungen nicht gross ist, und bei den höheren Tourenzahlen oft die geringere Reaktanzspannung des 8poligen Modells durch die höhere Kommutatorumfangsgeschwindigkeit ausgeglichen wird. Bei 400 Umdrehungen würde wieder das 8polige Modell mit 6000 Ankerampèrewindungen, 3 Volt Reaktanzspannung, M. 8000.— Gesamtkosten eine gute Wahl bedeuten.

Interessant ist die sich klar aus den Kurven ergebende Beziehung, dass bei niedrigen Tourenzahlen die Kosten stark abhängig sind von der Ankerampèrewindungszahl (grösster Unterschied 60%), die Reaktanzspannungen dagegen nur wenig (0,5 Volt). Umgekehrt zeigt sich bei hohen Tourenzahlen geringe Abhängigkeit der Kosten (10 — 13%), grosse Abhängigkeit der Reaktanzspannung (2 Volt) von der Ankerampèrewindungszahl.

Für diese Umrechnungen von einer Tourenzahl auf die andere kann die Bestimmung der Selbstkosten durch ein einfacheres Verfahren ersetzt werden.

Man kann nämlich für eine gegebene Type und Spannung die Selbstkosten proportional dem Produkt Ankerdurchmesser \times Ankerlänge einschliesslich Endverbindungen setzen. Diese ganze Ankerlänge wird je nach Ausführung der Endverbindungen verschieden ausfallen, man setzt deshalb diesen Wert $L = l + 0,7\tau$. Danach sind die

$$\begin{aligned} \text{Selbstkosten} \cdot \cdot \cdot \cdot &= C \cdot D \cdot L, \\ &= C \cdot D \cdot (l + 0,7\tau), \end{aligned}$$

C ist eine Funktion der Spannung und Type,

D , l und τ in *cm* ausgedrückt.

Der Wert C ergibt sich für die Entwürfe der Tabellen X, XI und XII durch einfache Umrechnung, wie in den Tabellen XIII und XIV ausgeführt.

Tabelle XIII.

Bestimmung der Kostenkonstante für die 6poligen Maschinen
nach Tabelle X.

	A	B	C	D	E
Selbstkosten	13400	10900	10000	9700	10000
D in cm	80	90	95	100	105
l	81	54	38	33	27
τ	42	47	50	53	55
$l + 0,7\tau$	110	87	73	70	66
$D \cdot (l + 0,7\tau)$	8800	7850	6950	7000	6950
$C = \frac{\text{Selbstkosten}}{D \cdot (l + 0,7\tau)}$	1,52	1,39	1,44	1,39	1,44
Mittelwert für C	—————		1,42	—————	
Abweichung in %	-6	+2	-1,5	+2	-1,5

Tabelle XIV.

Bestimmung der Kostenkonstante für die 8poligen Entwürfe
nach Tabelle XI.

	A	B	C	D	
Selbstkosten	11600	10100	9900	9800	
D in cm	100	110	115	120	
l	55	36	28	24	
τ	40	44	45	47	
$l + 0,7\tau$	83	67	60	57	
$D \cdot (l + 0,7\tau)$	8300	7300	6900	6850	
$C = \frac{\text{Selbstkosten}}{D \cdot (l + 0,7\tau)}$	1,4	1,39	1,43	1,43	
Mittelwert für C	—————		1,41	—————	
Abweichung in %	+0,7	+1,4	-1,4	-1,4	

C ergibt sich mit guter Übereinstimmung zu 1,42, wobei die Abweichung von einem der nach dem anderen Verfahren berechneten Werte im allgemeinen unter 2 % liegt und nur in einem Falle 6 % erreicht.

Der Einfluss der Spannung auf C macht sich dadurch geltend, dass bei höherer Spannung infolge der verkleinerten Kommutatorabmessung die Gesamtkosten etwas sinken, sodass für eine 500 Volt-Maschine gleicher Type und gleicher Ampèrewindungszahl, wie in den behandelten Entwürfen, C zwischen 1,20 und 1,30 liegen würde.

Hieraus soll nicht etwa geschlossen werden, dass sich die Kosten von Maschinen bei gleicher Leistung oder Spannungen von 250 bez. 500 Volt verhalten wie 1,42 zu 1,25, sondern dies Verhältnis gilt nur bei gleicher Leistung und gleichem Produkt $D \cdot L$, aber bei Ausführung mit verschiedenen Wicklungen und verschiedenen Kommutatoren.

Führt man entsprechende Berechnungen aus für 250 Volt-Maschinen von 100, 160, 400, 600 KW, so erhält man einen Vorrat von Entwürfen, aus denen man leicht für dazwischen liegende Leistungen durch sinngemässe Interpolation die günstigsten Abmessungen ableiten kann.

Kapitel X.

Abnormale Maschinen.

Handelte es sich bisher im wesentlichen um Maschinen normaler Ausführung, d. h. mit Nutenankern und ausgebildeten Magnetpolen, wie sie von den meisten Firmen gebaut werden, so sollen im Folgenden zwei Maschinenarten besprochen werden, welche von dieser Ausführungsform abweichend bei günstigem Verhalten durchaus konkurrenzfähig gebaut werden. Auch hierin liegt ein Beweis, wie wenig massgebend für die Praxis Formeln und Konstanten sind, da sich diese doch stets auf bestimmte Typen beziehen.

Die erste dieser beiden Ausführungen ist die der Deutschen Elektrizitäts-Gesellschaft zu Aachen.

Der Anker ist ohne Nuten ausgeführt, die Wicklung besteht aus Kabel und wird durch eine Anzahl von Mitnehmern (Fig. 99)

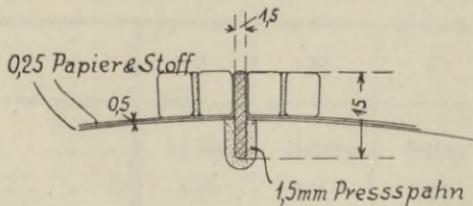


Fig. 99.

gegen Verschiebung gesichert. Im übrigen entspricht ihre Ausführung der Stabmantelwicklung (Fig. 100).

Der Vorteil dieser Anordnung beruht auf der verringerten Ankerrückwirkung und günstigeren Kommutierung, da erstens die Reaktanzspannung der auf der Ankeroberfläche liegenden Leiter erheblich kleiner ist, als die der im Eisen eingebetteten Leiter, und da zweitens die Schwächung des Kommutierungsfeldes infolge der geringeren Ankerrückwirkung nicht so wesentlich ist.

Was die mechanische Zuverlässigkeit der Ausführung anlangt, so haben die mit Maschinen und Motoren der verschiedensten Grössen und für die verschiedensten Zwecke gemachten günstigen Erfahrungen alle Bedenken widerlegt. Nur für Bahnmotoren scheint die Anordnung aus verschiedenen Gründen nicht günstig zu sein.

Ein Vergleich der vorliegenden Maschine von 85 KW bei 600 Umdrehungen pro Minute mit den Maschinen normaler Aus-

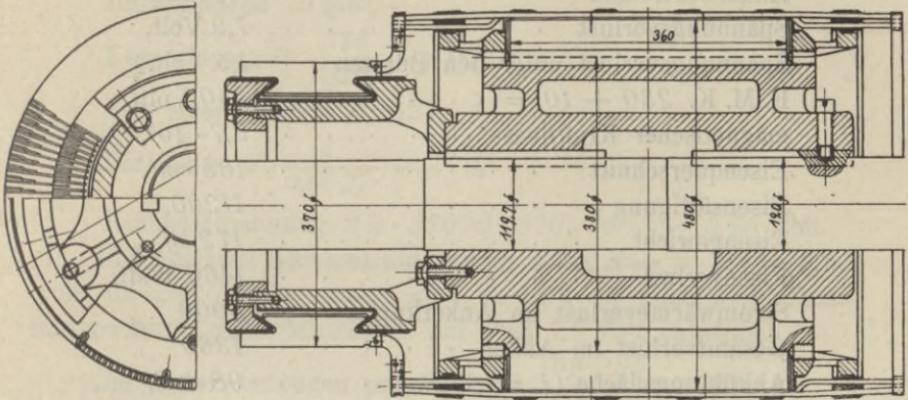


Fig. 100.

führung zeigt, dass sie elektrisch und wirtschaftlich den anderen durchaus gleichwertig ist.

Leistung	85 KW,
Spannung	230 Volt,
Stromstärke	370 Ampère,
Polzahl	6,
Umdrehungen in der Minute	600,
Periodenzahl	30,
Ankerdurchmesser	480 mm,
Ankerumfang	1510 mm,
Ankerumfangsgeschwindigkeit	15,1 m pro sek.,
Polteilung	250 mm,
Ankerlänge	360 mm,
Eisenlänge	330 mm,
Innerer Durchmesser	380 mm,
Eistiefe	50 mm,
Leiterzahl	218,

Windungszahl	109,
Schaltung	Reihenwicklung,
Windungszahl zwischen zwei Bürsten	54,5,
Leiterdimensionen	5,5 · 7 mm Kabel,
mittlere Windungslänge	150 cm,
Länge zwischen zwei Bürsten	82 m,
Querschnitt zwischen zwei Bürsten	77 mm ² ,
Stromdichte	4,9 Amp./mm ² ,
Ankerwiderstand	0,0214 Ω,
Spannungsverlust	7,9 Volt,
Spannungsverlust unter den Bürsten	1,5 Volt,
E. M. K. $230 + 10 =$	240 Volt,
magnetischer Kraftfluss	$3,7 \cdot 10^6$,
Eisenquerschnitt	165 cm ² ,
Eisensättigung	11200,
Eisengewicht	172 kg,
Eisenverlust	1460 Watt,
Stromwärmeverlust im Ankerkupfer	2900 „
Gesamtverlust im Anker	4360 „
Abkühlungsfläche ($L = 65$ cm)	98 dm ² ,
Watt pro dm ²	44,5,

Kommutator.

Durchmesser	370 mm,
Umfang	1110 mm,
Umfangsgeschwindigkeit	11,1 m pro sek,
109 Segmente von 9,4 mm, 0,8 mm Isolation,	
Lauflänge 155 mm,	
6 Bürstenstifte zu je 6 Kohlen von 15 · 18 mm,	
Kontaktfläche pro Stift	16,2 cm ² ,
Strom pro Stift	123 Ampère,
Stromdichte	7,7 Amp./dm ² ,
Stromwärmeverlust	580 Watt,
Reibungsverlust	315 „
Gesamtverlust	895 „
Abkühlungsfläche	17,5 „
Watt pro dm ²	57 „

Kommutation.

Da in diesem Fall die Leiter nicht in Nuten eingebettet sind, so kann die Kraftlinienzahl pro cm Windungslänge nicht mit 4,

wie sonst, eingesetzt werden, sondern nach Seite 92 sind zwei Kraftlinien pro Ampère anzunehmen.

Freie Länge der Windung 84 cm ,
 Kraftlinien pro 1 Amp. $84 \cdot 0,8 = 67$,
 Länge über dem Eisen 66 cm ,
 Kraftlinien pro 1 Amp. $66 \cdot 2 = 132$,
 Gesamtkraftlinien pro 1 Amp. 200 ,
 Gesamtkraftlinien bei $185 \text{ Amp. } 37000$,
 Bürstenbogen 15 mm ,

Kurzschlusszeit $\frac{15}{11100} = 0,00135 \text{ sek}$,

Zeit einer Periode $0,0027$,

Periodenzahl $\frac{1}{0,0027} = 370$,

Reaktanzspannung $2\pi \cdot 37000 \cdot 370 \cdot 10^{-8} = 0,85 \text{ Volt}$.

Sind nur zwei Bürstenstifte besetzt, so ist $R = 3 \cdot 1,2 = 2,55 \text{ Volt}$; da alle 6 Stifte besetzt sind, so wird die tatsächliche Reaktanzspannung einen Mittelwert von etwa $1,8 \text{ Volt}$ annehmen.

Die Ankerwindungen pro Pol sind $\frac{109 \cdot 185}{6} = 3360$,

die Luftsättigung ist 4700 ,

der Luftzwischenraum $1,25$,

$\frac{AW}{B_L \cdot l} = \frac{3360}{4700 \cdot 1,25} = 0,57$.

Magnetische Verhältnisse.

Luftzwischenraum.

Polbogen 20 cm ,

$\beta = 0,8$,

Achsiale Pollänge $36,0 \text{ cm}$,

Querschnitt 72 cm^2 ,

Abstand $1,25 \text{ cm}$,

Nützliche Streuung 10% ,

Luftsättigung 4700 ,

Ampèrewindungen **4700**,

Ankereisen.

Sättigung 11200 ,

Kraftlinienweg 10 cm ,

Ampèrewindungen **60**,

Schenkellänge 27,0 cm,
 „ breite 12,5,
 „ höhe 15 cm,
 „ querschnitt 340 cm²,
 Streuung 30 ‰,
 Sättigung 14200,
 Ampèrewindungen 285,
 Jochlänge 30 cm,
 „ dicke 5,5 cm,
 „ querschnitt 16,5,
 Sättigung 14500,
 Kraftlinienweg 25 cm,
 Ampèrewindungen 500,
 Gesamtampèrewindungen für Leerlauf 5545.

Ankerrückwirkung.

Ankerampèrewindungen pro Pol $\frac{109 \cdot 185}{6} = 3360$,
 Bürstenverschiebung 4 ‰,
 Gegenwindungen 270,
 Querwindungen 3090,
 zum Ausgleich erforderlich 600*),
 Gesamtampèrewindungen bei Voll-Last 6415.

Nebenschlussspulen.

Wickeltiefe 60 mm,
 Spulenhöhe 128 mm,
 äusserer Umfang 118 cm,
 mittlere Windungslänge 98 cm,
 Windungszahl 1130,
 Stromstärke 5,7 Ampère,
 Drahtdurchmesser 2,3 mm blank,
 Querschnitt 4,1 mm²,
 Widerstand pro Spule 5,4 Ω,
 Spannung pro Spule 31 Volt,
 Spannung aller Spulen 186 Volt,
 Regulierwiderstand 44 Volt,

*) Wegen des grossen Luftzwischenraumes sind nur 60 ‰ des Kurvenwertes von Seite 52 angenommen.

Stromwärmeverlust pro Spule 175 Watt,
 Abkühlungsfläche $15,1 \text{ dm}^2$,
 Watt pro dm^2 11,6.

Verluste und Wirkungsgrade.

Konstante Verluste.

Eisenverlust . . .	1460 Watt,
Nebenschlusswicklung	1300 „
Kommutatorreibung	315 „
Lager und Luftreibung	1200 „
	<u>4275 Watt.</u>
Stromwärme im Ankerkupfer	2900 Watt,
„ am Kommutator	580 „
	<u>3480 Watt.</u>

Gesamtverlust 7755 Watt,

Leistung 85000 Watt,

Zugeführter mechanischer Effekt 92755 Watt,

Wirkungsgrad bei Voll-Last $91,5 \%$,

„ „ $\frac{1}{2}$ -Last 89% ,

„ „ $\frac{1}{4}$ -Last 82% .

Materialgewicht.

Ankerkupfer	56 kg,
Nebenschlusskupfer	240 „
Kommutatorkupfer	80 „
Gesamtkupfer	376 „
Ankerbleche	170 „
Magnetpole	240 „
Joch	370 „
Gesamteisen	780 „
Kupfer pro KW	4,4,
Eisen pro KW	9,2,
Anker + Feldkupfer pro KW	3,5.

Kosten in Mark.

Kupfer	752,
Ankerbleche	85,
Stahlguss	440,
pro KW	15,

$0,1 D_1^2 + 0,14 D_1 \cdot l$	1380,
pro KW	16,2,
Selbstkosten	2657,
pro KW	31,2.

Die zweite Ausführungsform ist die der Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vorm. Louis Schwartzkopf.

Es ist eine sogenannte kompensierte Maschine (Fig. 101). Diese Ausführung ist bereits früher angewendet und besteht im wesentlichen darin, dass keine ausgebildeten Magnetschenkel vorhanden sind, sondern dass das Magnetgestell innen rund wie der

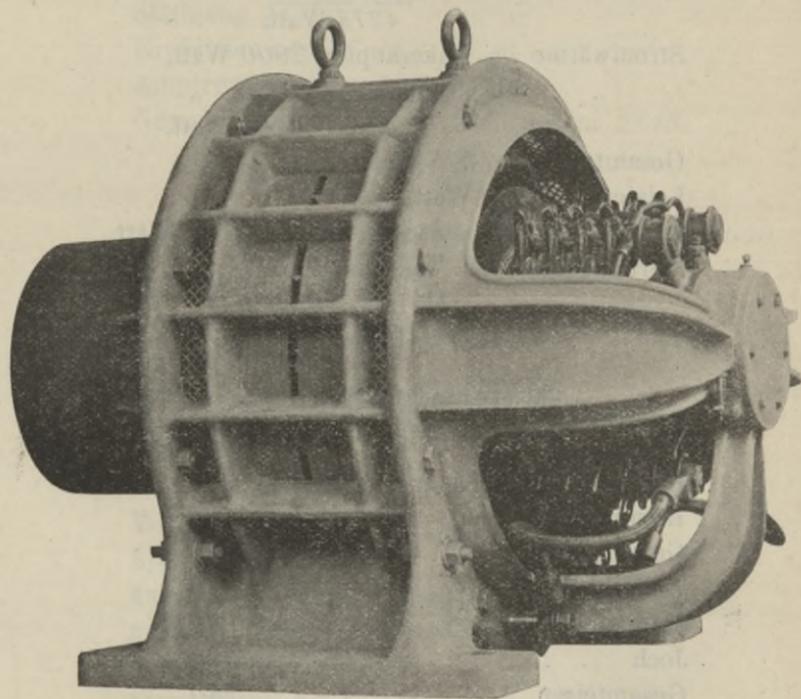


Fig. 101. 110 PS-Motor der Berliner Maschinenbau-A.-G.

Ständer eines Drehstrommotors ausgebohrt und mit einer in Nuten untergebrachten Wicklung versehen ist, welche die Pole hervorruft. Für jeden Pol unserer Maschine (Tafel III) sind zwei Spulen in die grossen Nuten hineingewickelt. Die Ankerrückwirkung wird durch eine sogenannte Kompensationswicklung aufgehoben, welche in die kleinen Nuten des Ständers verteilt ist. Die Ampèrewindungszahl des Ständers ist etwas grösser als die

des Läufers, sodass in der Kommutierungszone ein mit der Belastung wachsendes Feld erzeugt wird (Fig. 102). In dem Raum zwischen den Polen wird das ursprüngliche Feld durch die schwachen, ausgezogenen Linien angegeben. Das Feld der Ankerrückwirkung, welche an dieser Stelle natürlich nicht kompensiert ist, durch die gestrichelte, das Feld des Überschusses der Kompensationswicklung durch die strichpunktierte, diese drei Felder setzen sich zu dem stark ausgezogenen, resultierenden Feld bei Belastung zusammen. In der neutralen Zone ist also ein mit

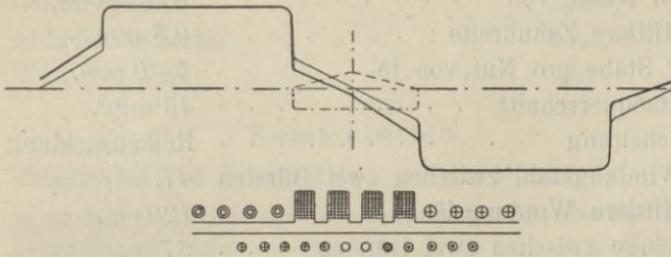


Fig. 102.

der Belastung wachsendes Feld vorhanden. Eine Bürstenverschiebung ist also nicht nötig. Vielfach wird es allerdings vorgezogen, einen besonderen Kommutierzahn mit Hilfspolwicklung anzubringen.

Da die Ankerrückwirkung unschädlich gemacht ist, kann man den Luftzwischenraum so klein wie mechanisch ausführbar machen und erhält eine sehr kleine Erregung, also wenig Feldkupfer.

Diese ganze Bauart entspricht den Wechsel- und Drehstrommotoren, sodass die gleichen Modelle und Bleche für die Maschinen der drei Stromarten verwendet werden können; das wird namentlich für alle mittleren und kleineren Firmen von Bedeutung sein, welche nicht in der Lage sind, sämtliche Typen als Massenfabrikate herzustellen.

Die Maschine hat folgende Verhältnisse:

Leistung	110 PS,
Spannung	220 Volt,
Stromstärke	400 Amp.,
Umdrehungen per Minute	600,
Polzahl	6,
Periodenzahl	30,

Ankerdurchmesser	560 mm,
Ankerumfang	1760 mm,
Umfangsgeschwindigkeit	17,6 m pro sek,
Polteilung	292 mm,
Ankerlänge	200 mm,
1 Lüftungsschlitz von	15 mm,
Eisenlänge	165 mm,
Innerer Durchmesser	290 mm,
Eisentiefe unter den Nuten	110 mm,
95 Nuten von	8 · 25 mm,
Mittlere Zahnbreite	9,5 mm,
2 Stäbe pro Nut von je	5 · 9 mm,
Stabquerschnitt	45 mm ² ,
Schaltung	Reihenwicklung.
Windungszahl zwischen zwei Bürsten	47,
Mittlere Windungslänge	120 cm,
Länge zwischen zwei Bürsten	57 m,
Kupferquerschnitt zwischen zwei Bürsten	90 mm ² ,
Stromdichte	4,5 Amp. pro mm ² ,
Ankerwiderstand	0,0127 Ω,
Spannungsverlust im Anker	5,1 Volt,
Spannungsverlust unter den Bürsten	2,0 Volt,
Spannungsverlust in der Kompensations- wicklung	7 Volt,
E. M. K. 220 — 14 =	206 Volt,
Magnetischer Kraftfluss	3,67 · 10 ⁶ ,
Eisenquerschnitt	182 cm ² ,
Sättigung	10100,
Eisengewicht	234 kg,
Eisenverlust	1750 Watt,
Kupferverlust	2050 „
Gesamtverlust	3800 „
Abkühlungsfläche	84 dm ² ,
Watt pro dm ²	45.

Kommutator.

Durchmesser	330 mm,
Umfang	1030 mm,
Umfangsgeschwindigkeit	10,3 m pro sek,
95 Segmente von	10 mm,

Lauflänge	190 mm,
Bürstenstifte	4,
Bürsten pro Stift	4,
Bürstendimensionen	23 · 36 mm,
Kontaktfläche pro Stift	33 cm ² ,
Strom pro Stift	200 Amp.,
Stromdichte	6 Amp. pro cm ² ,
Stromwärmeverlust	800,
Reibungsverlust	400,
Gesamtverlust	1200,
Abkühlungsfläche	19,5,
Watt pro dm ²	62.

Kommutation.

Windungen pro Segment	2,
$l_e + 0,15 \tau$	21 cm,
Reaktanzspannung	2,15 Volt.

Magnetische Verhältnisse.

Polbogen	19 cm,
β	0,65,
Achsiale Pollänge	19,5 cm,
Querschnitt	370 cm ² ,
Luftspalt	0,1 cm,
Nützliche Streuung	20 ‰,
Luftsättigung	8300,
Kontraktionskoeffizient	1,03,
Ampèrewindungen für Luft	700,
Zahnquerschnitt in der Mitte	165 cm ² ,
Sättigung	18500,
Ampèrewindungen	325.

Ankereisen.

Sättigung	10100,
Kraftlinienweg	12 cm,
Ampèrewindungen	60.

Magnetständer.

Mittlere Zahnbreite	12,8 mm,
Zahnquerschnitt	180 cm ² ,

Streuung	10 ‰,
Sättigung	17000,
Ampèrewindungen	210,
Eisenhöhe	74 mm,
Eisenlänge	180 mm,
Querschnitt	133 cm ² ,
Sättigung	14000,
Kraftlinienweg	20 cm,
Ampèrewindungen	260.

Gesamtampèrewindungen.

Luft	700,
Ankerzähne	325,
Ankereisen	60,
Ständerzähne	210,
Ständereisen	260,
	<hr/>
	1555.

Nebenschlusswicklung.

Pro Pol zwei Spulen zu je	200 Windungen,
Mittlere Windungslänge	142 cm,
Windungslänge pro Spule	284 m,
Drahtdurchmesser	1,3 mm,
Drahtquerschnitt	1,32 mm ² ,
Widerstand pro Spule	4,3 Ω,
„ sämtlicher 12 Spulen	51,6 Ω,
Nebenschlussstrom	4,25 Amp.,
Ampèrewindungen pro Pol	400 · 4,25 = 1700,
Stromwärmeverlust in allen Spulen	935 Watt,
Ankerwindungen	95 · 200 = 19000,
Kompensationswindungen	48 · 400 = 19200,
Mittlere Länge einer Kompensations- Windung	180 cm,
Gesamtlänge	87,0 m,
Querschnitt	100 mm ² ,
Widerstand	0,0174,
Stromwärmeverlust	2780 Watt,
Gesamtverlust im Ständer	3715.

Die Erwärmung kann man bei dieser Maschinenart am einfachsten nach einem von dem Verfasser für Induktionsmotoren

angegebenen Verfahren*) schätzen. Danach bestimmt man den Gesamtverlust im Anker und Ständer und bezieht ihn auf die ideelle Abkühlungsfläche:

Ankerumfang $(D \pi) \times$ ganze Ankerlänge $(l_e + 0,7 \tau)$.

Das Verhältnis zwischen den Watt pro dm^2 und der Erwärmung in Celsiusgraden beträgt nach einer Tabelle von 5 Drehstrommotoren zwischen 8 und 100 PS

$$1,44 - 1,85,$$

oder die Erwärmung

$$0,7 - 0,55^0 \text{ pro } 1 \text{ Watt}/dm^2.$$

Berücksichtigt man, dass bei diesen Motoren durch Lager schilder die Luftzirkulation mehr oder weniger erschwert ist, während bei unserem Gleichstrommotor die Bleche fast überall der freien Luft ausgesetzt sind, die vom Anker ausgeblasene Luft durch den Lüftungsschlitz des Ständers streicht, und durch die Rippenanordnung eine weitere Verbesserung geschaffen ist, so kann man in unserem Fall die Erwärmung mit $0,4$ pro $1 \text{ Watt}/dm^2$ einsetzen.

Die Verluste sind:

Eisenverlust im Anker 1750 Watt,

Stromwärmeverlust im Anker 2050 „

„ in der Nebenschlusswicklung 935 „

„ in der Kompensationswicklung 2780 „

Gesamte Verluste 7315 Watt.

Ideelle Abkühlungsfläche $\frac{560 \cdot \pi \cdot (200 + 210)}{10^4} = 72 dm^2,$

Watt pro dm^2 $\frac{7315}{72} = 102,$

Mittlere Erwärmung $0,4 \cdot 102 = 41^0 C.$

Verluste und Wirkungsgrad.

Konstante Verluste.

Eisenverlust im Anker 1750 Watt,

Stromwärme in der Nebenschlusswicklung 935 „

Kommutatorreibung 400 „

Lager und Luftreibung 1000 „

4085 Watt.

*) H. M. Hobart, Motoren für Gleich- und Drehstrom, S. 355 u. ff.

Variable Verluste.

Stromwärme im Anker	2050 Watt,
„ in der Kompensationswick- lung	2780 „
Stromwärme am Kommutator	800 „
	5630 Watt.
Gesamtverlust bei Voll-Last	9715,
Leistung in Watt ($110 \cdot 736$)	81000,
Zugeführter Effekt	90765,
Wirkungsgrad bei Voll-Last	90 ‰,
„ „ $\frac{1}{2}$ -Last	87,5 ‰,
„ „ $\frac{1}{4}$ - „	81,5 ‰.

Materialgewicht.

Anerkupfer	46 kg,
Kompensationskupfer	77 „
Nebenschlusskupfer	40 „
Kommutatorkupfer	71 „
Ankerbleche	234 kg,
Ständerbleche	360 „
Gesamtkupfer	234 „
Gesamteisen	594 „
Kupfer pro KW	2,9 „
Eisen pro KW	7,3 „

Die Selbstkosten zu berechnen, hat in diesem Fall keinen Wert, da die Herstellungskosten sich natürlich bei dieser Maschine nicht mit denselben Konstanten schätzen lassen, wie bei der normalen Ausführung. Man sieht nur, dass die Materialkosten an und für sich erheblich geringer sind, dagegen die Herstellungskosten wesentlich höher, da die Kompensationswicklung als besondere Stirnwicklung ausgeführt ist.

Hier kann also nur eine genaue Kalkulation unter Berücksichtigung aller einschlägigen Verhältnisse entscheidend sein, in vielen Fällen aber wird das geringe Gewicht einer solchen Maschine von vornherein ausschlaggebend sein.

Kapitel XI.

Wendepolmaschinen.

Bei den normalen Maschinen machen die Kommutierungsverhältnisse meist keine besonderen Schwierigkeiten, und funkenfreier Gang lässt sich bei wirtschaftlicher Ausführung erreichen.

Wird die Tourenzahl geringer als normal, so wird die Kommutierung begünstigt. Wird die Tourenzahl dagegen höher als normal, so ist namentlich bei grossen Maschinenleistungen (Dampfturbinenantrieb) funkenfreier Gang ohne besondere Hilfsmittel kaum zu erwarten. Dasselbe gilt, wenn die Spannung der Maschine bei gleichbleibender Stromstärke und Tourenzahl in weiten Grenzen verändert werden soll, wie dies z. B. bei Zusatzmaschinen für Akkumulatorenladung der Fall ist, oder wenn bei Motoren veränderliche Tourenzahl bei gleichbleibender Leistung und Spannung durch Regulierung des Magnetstromes verlangt wird. (Der normale Nebenschlussmotor lässt hier eine Tourenerhöhung bis höchstens 15 % zu.) In solchen Fällen greift man zur Kompensationswicklung, welche die Ankerrückwirkung unschädlich machen soll, oder zu Wendepolen; letztere geben durchschnittlich die günstigsten Anordnungen.

Der Zweck der Wendepole ist also der, an der Stelle der durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen ein magnetisches Feld hervorzurufen von solcher Grösse und Richtung, dass die bei der Ankerumfangsgeschwindigkeit in der kurzgeschlossenen Spule hervorgerufene E. M. K. gleich und entgegengesetzt der Reaktanzspannung ist.

Wir haben früher gesehen, dass die Ankerrückwirkung eine Schwächung des Feldes an der Stelle, wo die Bürsten aufliegen, verursacht, um so mehr, je grösser der Ankerstrom ist. Denselben Einfluss wird natürlich die Ankerrückwirkung auch auf das Wendefeld ausüben suchen. Die Erregerampèrewindungen für den

Wendepol müssen also entsprechend der Belastung der Maschine zunehmen, um die Gegenwirkung der Ankerwindungen auszugleichen; deshalb lässt man die Windungen des Wendepols vom Hauptstrom durchfliessen. Die Erregung wächst dann mit der Belastung, dadurch ist der Ausgleich für die stärkere Ankerrückwirkung gegeben; gleichzeitig wächst die Intensität des Wendefeldes proportional dem Ankerstrom, wie auch die Reaktanzspannung proportional dem Ankerstrom wächst; damit diese Proportionalität gewahrt bleibt, darf einerseits die Sättigung im Wendepol, andererseits die Streuung nicht zu gross sein.

Die Verhältnisse des Kraftlinienverlaufes in einer Maschine bei vorhandenen Wendepolen sind noch nicht vollständig klar gestellt, eingehende Abhandlungen sind in der Elektrotechnischen Zeitschrift 1905, S. 509, 640 und 1906, S. 261, 717 gegeben.

Was die Anwendung der Wendepole anlangt, so muss zunächst festgestellt werden, dass sie, abgesehen von der Kommutierung, in jeder anderen Beziehung ungünstig wirken. Sie vergrössern die Streuung, welcher Übelstand oft nur durch Verkleinerung der Polzahl oder des Polbogens in mässigen Grenzen gehalten werden kann.

Material- und Arbeitskosten für die Hilfspole und ihre Wicklung, Mehrkosten für die Vergrösserung der Maschinenabmessungen, machen die Wendepolmaschine erheblich teurer als die normale. Zusätzliche Stromwärmeverluste in den Hilfspolwicklungen vergrössern die abzuleitende Wärmemenge und verkleinern den Wirkungsgrad. Dazu wird durch die eingebauten Wendepole, abgesehen davon, dass sie selbst Wärme ausstrahlen, der freie Durchgang der Luft mehr oder weniger behindert. Ferner werden die Hauptpole oft mit länglichem statt mit rundem Querschnitt ausgeführt, um für die Wendepole Platz zu schaffen, dadurch wird die Windungslänge und das Kupfergewicht pro Hauptspule grösser, die Verluste wachsen und die Kühlung wird weiter behindert.

Also in magnetischer, mechanischer und wirtschaftlicher Beziehung wird die Maschine durch Einbau der Wendepole entschieden verschlechtert, man wird daher, wenn eine genügende Kommutation bei normaler Bauart möglich ist, diese entschieden vorziehen. Sobald dagegen die Rücksicht auf die Kommutation beim Entwurf massgebend ist, wird man sich oft durch Wendepole

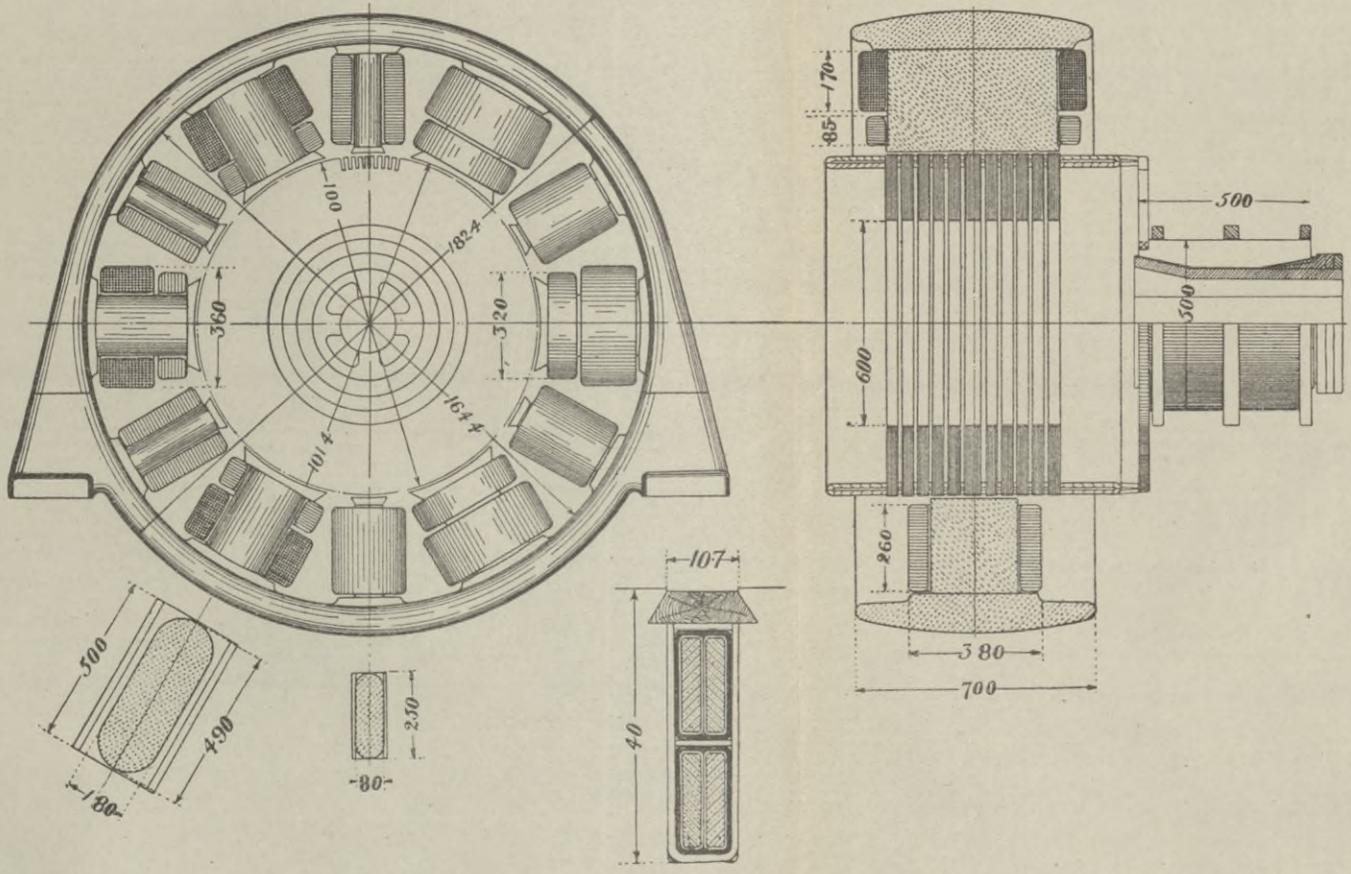


Fig. 103.

helfen können, da sie andererseits grosse Ankerampèrewindungszahl und beliebige Reaktanz zulassen.

Die Verhältnisse sollen wieder an einem bestimmten Fall untersucht werden. Wir wählen eine Maschine mit hoher Leistung, Tourenzahl und Spannung. Bei geringen Spannungen ergeben sich für den Kommutator grosse Schwierigkeiten.

Es handelt sich um einen 1000 KW-Generator für 1000 Volt und 1000 Umdr. p. Min. (Fig. 103). Der Anker ist ein Nutentrommelanker aus 0,5 mm Blechen zusammengebaut. Die Nut ist ausgekleidet mit einer Schicht Öltuch zwischen zwei Lagen inprägniertem Hornfiber. Die Leiter werden durch Hartholzkeile in den Nuten gehalten, die Endverbindungen sind durch je zwei Lagen Stahldraht gesichert, jede Lage besteht aus 55 Drähten von 2 mm Durchmesser. Die Bandagen sind isoliert durch eine Schicht Glimmerleinen.

Kommutator. Die Segmente sind mit Glimmerzwischenlagen zusammengebaut und gepresst. In der Mitte und an beiden Enden liegen Schrumpfringe, wieder durch Glimmerunterlagen isoliert. Nachdem darauf der Kollektor innen bearbeitet ist, wird er auf dem Kollektorkörper durch einen ringförmigen Konus mit Hilfe von Muttern festgezogen.

Bürsten. Zur Stromabnahme dienen Kohlen in geeigneten Haltern, die auch bei grossen Umfangsgeschwindigkeiten keine starken Schwingungen aufkommen lassen. Bürstenstifte und -Brücke müssen sehr standfest gebaut sein.

Magnetgestell. Joch und Schenkel bestehen aus Stahlguss; die Schenkel bilden länglich rechteckigen Querschnitt mit abgerundeten Ecken.

Wendepole. Die Hilfspole sind kürzer als die Ankerlänge, um kleine Streuung und kurze Wicklungslänge zu erreichen.

Zur Bestimmung der Abmessungen muss man die Reaktanzspannung kennen, die in bekannter Weise berechnet wird. Der erforderliche magnetische Fluss pro Wendepol ergibt sich aus folgender Überlegung.

Die Länge der Polschuhe in achsialer Richtung sei l_w , die seitliche nützliche Streuung sei 10% , dann befindet sich in einem Wendefelde eine induzierte Leiterlänge $1,1 \cdot l_w$. Von einer Windung

liegen beide Seiten gleichzeitig je in einem Wendefeld, so dass die induzierte Länge pro Windung $2 \cdot 1,1 \cdot l_w$ ist. Ist die Luft-sättigung unter dem Wendepol B_w , die Ankerumfangsgeschwindigkeit v in m pro sek , so entsteht pro Windung eine E. M. K. = $B_w \cdot 2,2 l_w \cdot v \cdot 10^{-8}$. Sind n_s Windungen pro Segment hintereinandergeschaltet, so wird die durch das Wendefeld pro Segment erzeugte E. M. K. = $n_s \cdot B_w \cdot 2,2 l_w \cdot v \cdot 10^{-8}$. Diese Spannung muss aber gleich der mittleren Reaktanzspannung sein.

Unter Voraussetzung sinusförmigen Verlaufes ist aber die mittlere Reaktanzspannung gleich der berechneten Reaktanzspannung dividiert durch $\frac{\pi}{2}$; war berechnet R , so ist die mittlere Reaktanz-

spannung $\frac{R}{\frac{\pi}{2}} = \frac{R}{1,57}$, mithin

$$\frac{R}{1,57} = n_s \cdot B_w \cdot 2,2 \cdot l_w \cdot v \cdot 10^{-8},$$

oder die Länge des Wendepols

$$l_w = \frac{R \cdot 10^8}{1,57 \cdot 2,2 \cdot n_s \cdot B_w \cdot v},$$

$$l_w = 0,29 \cdot \frac{R}{n_s \cdot B_w \cdot v} \cdot 10^8.$$

Der Polbogen hängt ab von der Zahl der gleichzeitig kurzgeschlossenen Leiter, der Segmentzahl pro Nut und der Nutenteilung. Im allgemeinen rechnet man, dass der Polbogen die doppelte Zahl Leiter bedecken soll, als Leiter gleichzeitig kurzgeschlossen sind. Da ferner meist die Zahl der kurzgeschlossenen Segmente annähernd gleich der Zahl der Segmente pro Nut ist, so kann man den Polbogen gleich der doppelten Nutenteilung machen.

Die Ampèrewindungszahl pro Wendepol hängt ab von der Ankerampèrewindungszahl, die zu überwinden ist, von Luftzwischenraum und Sättigung unter dem Wendepol.

Den Luftzwischenraum führt man so klein als möglich aus, bei grossen Maschinen etwa 5 bis 8 mm .

Da auch hier die Kraftlinien zum grössten Teil nur durch den Zahn eintreten, so ist der auf Seite 39 angegebene Kontraktionskoeffizient bei der Berechnung der Ampèrewindungen für Luft einzusetzen.

Man hat den so berechneten Ampèrewindungen für Anker-rückwirkung und Luft noch einen Zuschlag zu geben, um den Kraftlinienweg im Schenkel selbst, ferner die Streuungsverhältnisse und die durch den Kraftfluss der Wendepole im Gestell hervorgerufenen magnetischen Verschiebungen zu berücksichtigen.

Man kann sich diese Berechnungen sparen, indem man zum Betrag der Ankerampèrewindungen pro Pol 25—35 % zuschlägt, was in den meisten Fällen zutreffend sein wird.

Magnetkerne und Polschuhe der Wendepole bestehen aus Stahlguss und haben eine den Hauptpolen ähnliche Form. Die Wicklung wird in der Regel aus Kupferband oder Flachkupfer (hochkant) hergestellt. Ein Parallelwiderstand zur Wicklung ermöglicht eine feine Einstellung der günstigsten Ampèrewindungs-zahl für alle Belastungen.

Schnellaufender Hochspannungs-Generator

1000 KW, 1000 Volt, 1000 Umdr. p. Min.

Polzahl	6
Normale Leistung in KW	1000
Effektverbrauch in PS	1400
Umdrehungen per Minute	1000
Periodenzahl	50
Klemmenspannung	1000
Stromstärke	1000
Ankerdurchmesser in <i>mm</i>	1000
Ankerumfang in <i>mm</i>	3141
Umfangsgeschwindigkeit in <i>m pro sek</i>	52,5
Eisenlänge in <i>mm</i>	360
Ankerlänge in <i>mm</i>	500
„ zwischen den Wickelköpfen in <i>mm</i>	860
Polteilung in <i>mm</i>	525
Lüftungsschlitze	10
Breite der Lüftungsschlitze in <i>mm</i>	10
Innerer Durchmesser in <i>mm</i>	600
Eisentiefe unterhalb der Nuten in <i>mm</i>	160
Nutenzahl	162
Nuten pro Pol	27
Nutendimensionen in <i>mm</i>	40 · 10,4

Nutauskleidung	0,8
Zahnbreite, oben in <i>mm</i>	8,7
Zahnbreite in der Mitte in <i>mm</i>	8,0
Leiter pro Nut	4
Leiterdimensionen (blank) in <i>mm</i>	14 · 2,8
„ (isoliert) in <i>mm</i>	14,7 · 3,5
Umhüllung jeder Leitergruppe	0,55
Leiterquerschnitt in <i>mm</i> ²	39,2
Schaltung	Parallel
Leiterzahl	648
Windungszahl	324
Windungen zwischen zwei Bürsten	54
Mittlere Windungslänge in <i>cm</i>	230
Länge zwischen zwei Bürsten in <i>m</i>	124
Kupferquerschnitt zwischen zwei Bürsten in <i>mm</i> ²	234
Ankerwiderstand in Ohm	0,0106
Spannungsverlust im Anker in Volt	10,6
„ an den Bürsten in Volt	2,8
„ in den Hauptstromspulen in Volt	1,5
„ in den Hilfspolwicklungen in Volt	2,9
Gesamt-Spannungsverlust in Volt	17,8
Elektromotorische Kraft in Volt	1020
Stromwärmeverlust im Anker	10600
Eisengewicht in <i>kg</i>	1300
Sättigung	8250
Periodenzahl	50
Wattverlust pro <i>kg</i>	10,4
Eisenverlust	14000
Gesamtverlust	24600
Oberfläche in <i>dm</i> ²	270
Watt pro <i>dm</i> ²	91
Umfangsgeschwindigkeit in <i>m</i> pro <i>sek</i>	52,5
Temperaturzunahme pro 1 Watt/ <i>dm</i> ²	0,5° C.
Temperaturzunahme des Ankers	45° C.

Kommutator.

Durchmesser in <i>mm</i>	500
Umfang in <i>mm</i>	1570

Geschwindigkeit in <i>m pro sek</i>	26,2
Zahl der Segmente	324
Segment + Isolation in <i>mm</i>	4,85
Segment	4,15
Isolation	0,7
Segmenthöhe	80
Lauflänge	355
Ganze Länge	500
Bürstenstifte	6
Bürsten pro Stift	14
Dimensionen der Bürsten in <i>mm pro Stift</i>	20 · 20
Kontaktfläche in <i>cm² pro Stift</i>	56
Strom pro Stift in Ampère	333
Stromdichte pro <i>cm²</i>	6
Stromwärmeverlust in Watt	2800
Reibungsverlust	2600
Gesamtverlust	5400
Kühlfläche <i>dm²</i>	78,5
Watt pro <i>dm²</i>	67,5

Kommutation.

Windungen pro Segment	1
$l_e + 0,15 T$ in <i>cm</i>	44
Reaktanzspannung <i>R</i> in Volt	20
Magnetischer Kraftfluss bei Leerlauf	$10^6 \times 9,25$
„ „ „ Voll-Last	$10^6 \times 9,45$

Luftzwischenraum.

Polbogen in <i>mm</i>	290
β	0,55
Achsiale Polschuhlänge in <i>cm²</i>	490
Querschnitt in <i>cm²</i>	1420
Abstand in <i>cm</i>	0,7
Nützliche Streuung in %	10
Sättigung für Leerlauf	5900
„ „ Voll-Last	6050
Kontraktionskoeffizient	1,35
Ampèrewindungen für Leerlauf	4450
„ „ Voll-Last	4560

Zahnquerschnitt in der Mitte in cm^2	430
Scheinbare Sättigung bei Leerlauf	19500
" " " Voll-Last	20000
Tatsächliche Sättigung bei Leerlauf	18900
" " " Voll-Last	19200
Ampèrewindungen bei Leerlauf	720
" " Voll-Last	880
Ankereisen.	
Querschnitt in cm^2	575
Sättigung bei Leerlauf	8000
" " Voll-Last	8200
Kraftlinienweg pro Pol in cm	21
Ampèrewindungen bei Leerlauf	63
" " Voll-Last	74
Magnetschenkel.	
Achsiale Länge in mm	490
Breite " " "	180
Radiale Höhe " " "	270
Querschnitt in cm^2	810
Streuungskoeffizient	1,30
Kraftfluss bei Leerlauf	$10^6 \times 12,0$
" " Voll-Last	$10^6 \times 12,3$
Sättigung " Leerlauf	14800
" " Voll-Last	15200
Ampèrewindungen bei Leerlauf	1250
" " Voll-Last	1400
Joch.	
Äusserer Durchmesser (D_1) in cm	182,4
Dicke in cm	9,0
Achsiale Länge in cm	70,0
Querschnitt in cm^2	500
Sättigung bei Leerlauf	12000
" " Voll-Last	12300
Kraftlinienweg	50
Ampèrewindungen bei Leerlauf	750
" " Voll-Last	800

Ampèrewindungen für Leerlauf.		
Ankereisen	.	63
Zähne	.	720
Luft	.	4450
Schenkel	.	1250
Joch	.	750
Gesamtampèrewindungen für Leerlauf	.	7230
Ampèrewindungen für Voll-Last.		
Ankereisen	.	74
Zähne	.	880
Luft	.	4560
Schenkel	.	1400
Joch	.	800
Summe	.	7710
Ankerwindungen pro Pol	.	54
Strom pro Zweig	.	166
Ankerampèrewindungen pro Pol	.	9000
Bürstenverschiebung	.	0
Gegenwindungen	.	0
Querwindungen	.	9000
Zum Ausgleich erforderlich	.	2700
Gesamtampèrewindungen bei Voll-Last	.	10410
Ampèrewindungen für den Nebenschluss	.	7500
" " " Hauptstrom	.	3000
Nebenschlusspulen.		
Wicklungstiefe	in mm	80
Spulenhöhe	" "	170
Innerer Umfang	" "	1250
Äusserer Umfang	" "	1750
Mittlere Windungslänge	in m	1,5
Spulenquerschnitt	in cm^2	136
Raumfaktor	.	0,45
Kupferquerschnitt	in cm^2	61
Kupfervolumen	in dm^3	9,150
Kupfergewicht	in kg	81,50
Watt per Spule	$\frac{0,000178 \cdot (l_m \cdot n \cdot i)^2}{G}$	276

Abkühlungsfläche in dm^2	29,6
Watt pro dm^2	9,4
Spannungsverlust im Regulierwiderstand in Volt	160
Spannung pro Spule in Volt	140
Strom pro Spule in Ampère	2
Windungen pro Spule in Ampère	3800
Drahtquerschnitt in mm^2	1,6
Drahtdurchmesser, blank in mm	1,43
„ isoliert „ „	1,7

Hauptstromspulen.

Strom im Parallelwiderstand in Ampère	250
Strom in den Spulen „ „	750
Windungen pro Spule	4
Parallele Leiter	2
Leiterdimensionen in mm	$60 \times 4,7$
Gesamtquerschnitt in mm^2	564
Mittlere Windungslänge in m	1,45
Länge pro Leiter „ „	6,6
Widerstand pro Spule in Ohm	0,000234
Spannungsverlust pro Spule in Volt	0,175
„ für alle Spulen in Volt	1,1
Watt pro Spule	131
Äusserer Spulenumfang in m	1,62
Spulenhöhe in mm	60
Spulenoberfläche in dm^2	9,7
Watt pro dm	13,5
Kupfergewicht pro Spule	33,5 kg.

Wende-Pol.

Reaktanzspannung in Volt	20
Mittlere Reaktanzspannung in Volt	$\frac{R}{\pi} \cdot 2$ 12,7
Ankerumfangsgeschwindigkeit in m pro sek v	52,5
Windungen pro Segment n_s	1
Luftsättigung, gewählt B_w	4500

Spulenhöhe in <i>mm</i>	260
Strom in den Spulen in Ampère	700
„ im Parallelwiderstand in Ampère	300
Windungen pro Spule	23
Leiterdimensionen in <i>mm</i>	60 · 4,5
Parallele Leiter	2
Gesamtquerschnitt in <i>mm</i> ²	540
Gesamtlänge + Verbindungen in <i>m</i>	19,0
Widerstand pro Spule	0,0007
Spannungsverlust pro Spule in Volt	0,49
„ für alle Spulen in Volt	3
Stromwärmeverlust pro Spule in Watt	343
Oberfläche in <i>dm</i> ²	26
Watt pro <i>dm</i> ²	13,2

Verluste und Wirkungsgrade.

Konstante Verluste.

Eisenverlust	Watt	14000
Bürstenreibung	„	2600
Lager- und Luftreibung	„	4000
Nebenschlusswicklung	„	1880
Regulierwiderstand	„	360
		12840

Variable Verluste.

Stromwärme im Anker	Watt	10600
„ am Kommutator	„	2800
„ in der Hauptstromwicklung	„	800
„ im Parallelwiderstand	„	300
„ in der Wendepolwicklung	„	2060
„ im Parallelwiderstand	„	880
Abgegebener Effekt	„	1000000
Aufgenommener mechanischer Effekt	„	1041000
Wirkungsgrad bei Voll-Last	„	0,961
„ „ 25 % Überlastung	„	962
„ „ $\frac{3}{4}$ -Last	„	958
„ „ $\frac{1}{2}$ - „	„	947
„ „ $\frac{1}{4}$ - „	„	910

Materialgewichte.		
Ankerbleche	kg	1300
Magnetkerne und Polschuhe	„	1140
Wendepole (Stahlguss)	„	260
Joch (Stahlguss)	„	3900
Ankerkupfer	„	260
Kommutatorkupfer	„	560
Nebenschlusskupfer	„	486
Hauptstromkupfer	„	282
Wendepolkupfer	„	550
Gesamteisen	„	6600
Gesamtkupfer	„	2138
Materialkosten.		
Gesamtkosten	Mark	7840
Kupfer pro KW	„	2,1
Eisen „ „	„	6,6

Eine zweite Wendepolmaschine, ausgeführt von der Firma Oerlikon, ist mit ihren wesentlichsten Teilen auf Tafel III dargestellt.

Kapitel XII.

Aequipotentialverbindungen.

Um einen Ausgleich zwischen mehreren parallel geschalteten Stromzweigen zu ermöglichen, verbindet man eine Anzahl von Leitern gleichen Potentials miteinander. Dieser Ausgleich ist oft wünschenswert bei der reinen Parallelschaltung, bei welcher ungleichmässige magnetische Felder sonst zu starke Belastung einzelner Stromzweige und ihrer Bürsten hervorrufen können; bei der Serienparallelwicklung ist der Ausgleich fast unumgänglich, um die ungleichmässige Strombelastung der Bürsten zu verhindern.

Die Ausführung solcher Aequipotentialverbindungen zeigt Tafel III; die als Verbinder dienenden Drähte haben $2,6\text{ mm}$ Durchmesser isoliert und sind als Mantelwicklung unter der eigentlichen Stabwicklung untergebracht.

Man kann die Aequipotentialverbindungen auch an die Zuführungen zu den Kollektor-Lamellen anschliessen, denn offenbar wird dasselbe erreicht, wenn die Verbinder an die entsprechenden Segmente, anstatt direkt an die Stäbe angeschlossen sind.

Der Querschnitt der Verbinder kann je nach der Stromstärke eines Ankerstromzweiges zu 4 bis 10 mm^2 angenommen werden. Die Zahl der Verbinder richtet sich nach der Gleichmässigkeit, die angestrebt werden muss. Bei einer 8poligen 100 KW -Maschine (Seite 153) kommt auf jeden zwanzigsten Stab ein Anschluss. Bei einer 4poligen 300 KW -Maschine, bei der die sogen. Reaktanzspannung einen sehr hohen Wert erreicht, kommt auf jeden vierten Stab ein Anschluss. Das sind ungefähr die äussersten Grenzwerte nach beiden Seiten. Die Verbinderzahl ist ausserdem bedingt durch die Stabzahl. Dies wird am leichtesten aus den abgekürzten Wicklungstabellen der betreffenden Maschinen zu erkennen sein.

Wicklungstabelle eines 100 KW-Generators.

Stabzahl 560, Polzahl 8, Schaltung: Parallel, Stäbe pro Nut 4,
 Nutenschritt 1 auf 18, Wicklungsschritt $y_1 = 69$, $y_2 = 67$.

→	1	70	3
	3	72	5
	5	74	7
	u. s. w.		
	19	88	21
	21	90	23
	23	92	25
		
	69	138	71
	71	140	73
	73	142	75
		
	139	208	141
→	141	210	143
	143	212	145
		
	209	278	211
	211	280	213
	213	282	215
		
	279	348	281
→	281	350	283
	283	352	285
		
	349	418	351
	351	420	353
	353	422	355
		
	419	488	421
→	421	490	423
	423	492	425
		
	489	558	491
	491	560	493
	493	562	495
		
	559	68	1
→	1	70	3

Liegt Stab 1 in der neutralen Zone, so liegen die Stäbe der fettgedruckten Zahlen ebenfalls entsprechend in neutralen Zonen. Durch die Aequipotentialverbindung müssen an Stab 1 angeschlossen werden die Stäbe gleicher Lage, d. h. vor einem Felde gleicher Polarität, das sind aber 141, 281 und 421. Der Verbinderschnitt ist also **140**.

Die nächsten Verbindungen sind angeschlossen an die Stäbe

21	161	301	441
41	181	321	461
61	201	341	481
81	221	361	501
101	241	381	521
121	261	401	541
(141	281	421	1)

Im ganzen also 7 Verbindungen mit je 4 Anschlüssen.

Wicklungstabelle eines 300 KW-Generators.

Stabzahl 1056, Polzahl 4, Schaltung: Parallel, Stäbe pro Nut 8, Nutenschritt 1 auf 34, Wicklungsschritt $y_1 = 265$, $y_2 = 263$.

→ 1	266	3
	3	5
	5	7
	
	263	265
	265	267
	267	369
	
	527	529
→ 529	794	531
	531	533
	
	791	793
	793	795
	795	797
	
	1055	(1057) 1
→ 1	266	3

Zusammengehörige Stäbe in symmetrischer Lage (z. B. neutrale Zone) sind wieder fettgedruckt. Gleiche Lage haben die Stäbe 1 und 529, sie sind also verbunden. Der Verbinderschritt ist 528. Weitere Verbindungen sind:

5	533
9	537
13	541
17	545
21	549

121	649

221	749

321	849

421	949

521	1049
525	1053
529	(1057) 1.

Anhang.

Um dem Studierenden die Kontrolle seines Entwurfes an ausgeführten Maschinen zu erleichtern, sind in der folgenden Tabelle verschiedene Maschinen zusammengestellt.

- I. 4,5 KW-Generator 500 Volt, 1200 Umdr. p. Min.
(Fig. 32, 61).
- II. 45 KW-Generator 110 Volt, 900 Umdr. p. Min.,
beide Maschinen von den Präzisions-Werkstätten Mittweida, G. m. b. H.
- III. 100 KW-Generator 125—165 Volt, 500 Umdr. p. Min.
(Fig. 4, 28, 62) des Sachsenwerkes.
- IV. 160 KW-Generator 230 Volt, 250 Umdr. p. Min.
(Fig. 5, 10, 34, 35, 63, 70, 104) der Elektromotorenwerke Heidenau.
- V. 400 KW-Generator 550 Volt, 100 Umdr. p. Min.
(Fig. 41).
- VI. 1000 KW-Generator 500 Volt, 90 Umdr. p. Min.
(Tafel V).

Die wesentlichsten Kurven für die Maschinenberechnung sind auf Tafel VI wiedergegeben.

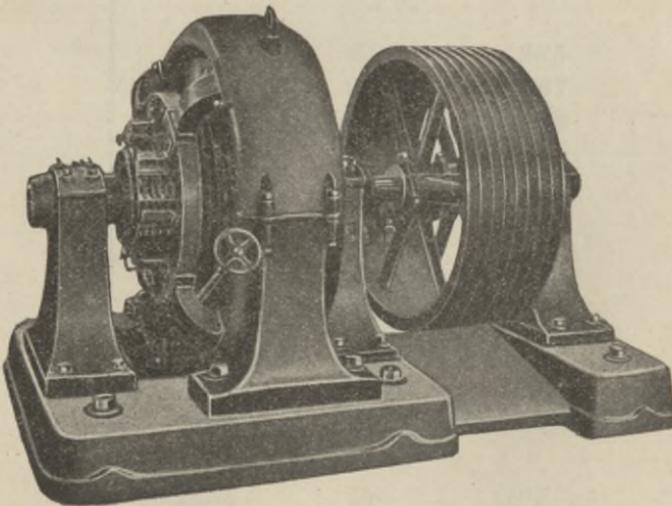


Fig. 104.

Leistung	KW	4,5	45	100	160	400	1000
Spannung	Volt	500	110	125/165	230	550	500
Stromstärke		9	410	800	695	730	2000
Umdrehungen per Minute		1200	900	500	255	100	90
Polzahl		4	4	8	8	8	16
Periodenzahl		40,2	30	33,3	17	6,7	12
Ankerdurchmesser in mm		210	380	800	1000	2300	3600
Ankerumfang in mm		660	1194	2510	3141	7220	11300
Umfangsgeschwindigkeit <i>m</i> pro sek		11	17,9	21	13,3	12	17
Polteilung in mm		165	298	314	393	905	707
Ankerlänge in mm		140	228	185	250	400	350
Zahl der Lüftungsschlitze		1	—	1	3	7	8
Breite „ „ „ mm		5	—	10	10	12	13
Eisenlänge	„	121	206	157	207	284	221
Innerer Durchmesser	„	100	175	520	640	1400	3800
Eisentiefe	„	35	72	112	144	417	368
Nutenzahl		44	43	140	103	264	384
Nutendimensionen	mm	6,8 · 19,5	14 · 30	8,5 · 28	11,2 · 36	12,3 · 33	13,4 · 32
Leiter pro Nut	„	30	6	4	2	6	6
Leiterdimensionen	„	$d = 1,2$	3,5 · 10	2,4 · 10	3,6 · 15	2,6 · 12	3 · 12
Leiterquerschnitt	mm ²	1,12	35	24	54	31,2	35
Windungszahl		655	129	280	206	792	1152
Schaltung		Reihen	Parallel	Parallel	Reihen Parallel	Parallel	Parallel
Parallele Stromkreise		2	4	8	4	8	16
Strom pro Zweig		4,5	102,5	100	174	91	125
Windungen zwischen zwei Bürsten		327	32	35	51	99	72
Mittlere Windungslänge	mm	742	1312	1250	1592	3300	2560
Länge zwischen den Bürsten	<i>m</i>	242	42	44	81	326	184
Kupferquerschnitt zwischen den Bürsten	mm ²	2,24	140	192	216	250	560
Stromdichte in Ampère pro „	„	4	2,9	4,2	3,2	2,9	3,56
Ankerwiderstand in Ohm		2,16	0,0065	0,0046	0,0075	0,026	0,0065
Spannungsverlust im Anker	Volt	19,5	2,67	3,68	5,2	19	13
„ am Kommutator	„	2,5	1,5	1,5	2,5	2,4	2,4
„ in der Hauptstromwicklung	„	—	—	—	1,2	—	—
Elektromotorische Kraft	„	522	114	130	239	571,4	515,4
Magnetischer Kraftfluss bei Leerlauf	$10^6 \times$	0,95	2,85	2,7	6,6	20,7	14,5
Magnetischer Kraftfluss bei Voll-Last	$10^6 \times$	1,0	2,96	2,8	6,9	21,5	14,9
Eisenquerschnitt des Ankers	cm ²	42	148	176	298	1200	815
Sättigung		12000	10000	8000	11600	9000	9150
Eisengewicht	kg	25	144	355	750	5550	6700
Eisenverlust	Watt	300	1080	2300	3750	7800	16700
Stromwärme im Ankerkupfer	„	190	1100	2950	3600	13900	26000
Gesamtverlust im Anker	„	490	2180	5260	7350	21700	42000
Abkühlungsfläche		1,55	50	113	152	745	955
Watt pro dm ²		31,6	43,5	46	48	29	44
Kommutator.							
Durchmesser	mm	130	285	480	520	1650	2700
Umfang	„	410	895	1500	1630	5200	8480
Umfangsgeschwindigkeit <i>m</i> pro sek		8,5	13,5	12,5	7,0	8,65	12,7

Laufänge	mm	27	220	230	260	295	350
Segmentzahl		131	129	280	206	792	1152
Segmentbreite	mm	2,6	6,2	4,6	7	—	—
Isolation	"	0,5	0,75	0,75	0,9	—	—
Bürstentiftzahl		4	4	8	8	8	16
Bürsten pro Stift		1	7	6	7	6	8
Bürstendimensionen	mm	12 · 25	16 · 25	16 · 30	15 · 30	20 · 38	20 · 39,5
Bürstendeckung		3,9	2,3	3	1,9	3	2,7
Kontaktfläche pro Stift	cm ²	3	28	28,8	31,5	45,6	63,2
Strom pro Stift	Amp.	4,5	205	200	174	183	250
Stromdichte in Amp. pro	cm ²	1,5	7,3	7	5,5	4	4
Spannungsabfall	Volt	2,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5
Stromwärmeverlust	Watt	22,5	615	1200	1740	1830	5000
Reibungsverlust	"	24	370	900	520	950	3700
Gesamtverlust	"	46	985	2100	2260	2780	8700
Abkühlungsfläche	dm ²	1,1	19,7	34,5	42,5	159	295
Watt pro dm ²		40	50	60	53	17,5	29,5

Kommutation.

Windungen pro Segment		5	1	1	1	1	1
$l_e + 0,15 \tau$		14,5	25	20,5	26,6	43	33
Reaktanzspannung		1,9/2,8	2,4	2,3	1,9/2,8	2,5	3,5
$\frac{AW_a}{B_L \cdot \delta}$		0,5	0,9	0,54	1,08	1,4	1,2

Magnetische Verhältnisse
und Ampèrewindungen.

Luftzwischenraum.

Polbogen	mm	100	185	220	250	610	500
Polbedeckung		0,61	0,62	0,7	0,64	0,66	0,71
Achsiale Pollänge	mm	140	228	185	260	400	350
Querschnitt	cm ²	140	420	407	650	2440	1750
Abstand	cm	0,25	0,6	0,6	0,45	0,9	1
Nützliche Streuung		1,15	1,15	1,1	1,15	1,15	1,15
Luftsättigung bei Leerlauf		6000	5900	7850	8850	7500	7200
„ „ Voll-Last		6250	6100	8150	9250	7200	7400
Kontraktionskoeffizient		1,25	1,25	1,25	1,15	1,2	1,2
Ampèrewindungen für Luft bei Leerlauf		1500	3540	4700	3660	6500	6900
Ampèrewindungen für Luft bei Voll-Last		1570	3660	4900	3830	6700	7100

Zähne.

Zahnbreite, oben	mm	8,2	13,8	9,5	19,3	15,2	16,1
Zahnbreite		1,2	1	1,1	1,7	1,2	1,2
Nutbreite							
Mittlere Zahnbreite	mm	6,8	11,5	8,8	18	14,2	15,6
Zahlänge	cm	2	3	2,8	3,6	3,3	9,3
Mittlerer Zahnquerschnitt unter dem Pol	cm ²	55	158	168	307	920	580
Scheinbare Sättigung bei Leerlauf		15000	15700	19000	18900	19800	21700
„ „ „ Voll-Last		15800	16300	19700	19600	20300	22400

Wirkliche Sättigung bei Leerlauf	15000	15700	18600	18700	19300	20500
„ „ „ Voll-Last	15800	16300	19100	19300	19800	21000
Ampèrewindungen bei Leerlauf	32	48	480	650	730	1210
„ „ „ Voll-Last	50	90	560	790	790	1500
Ankereisen.						
Querschnitt <i>cm</i> ²	42	148	176	298	1200	815
Sättigung bei Leerlauf	11400	9000	9900	11100	8650	8900
„ „ „ Voll-Last	12000	10000	10300	11600	9000	9150
Kraftlinienweg <i>cm</i>	8	25	20	24	42	33
Ampèrewindungen bei Leerlauf	50	120	95	132	162	128
„ „ „ Voll-Last	60	125	100	156	168	132
Schenkel: Material.			Stahlguss			
Achsiale Länge } (Durchm.) <i>mm</i>	112	180	185	250	370	400
Breite						
Höhe	100	165	200	240	490	540
Querschnitt <i>cm</i> ²	100	255	270	490	1740	1260
Streuung	1,3	1,2	1,2	1,2	1,15	1,15
Sättigung bei Leerlauf	12500	13500	15600	15800	13800	13200
„ „ „ Voll-Last	13000	14000	16200	16200	14200	13600
Ampèrewindungen bei Leerlauf	130	265	540	650	860	810
„ „ „ Voll-Last	150	300	640	770	930	920
Joch: Material.			Stahlguss		Guss- eisen	Stahlguss
Achsiale Länge <i>cm</i>	20	28	32	50	66	26,5
Dicke	2,5	5,5	8	13	21	34
Ausserer Jochdurchmesser	45	85	140	1800	382	546
Querschnitt <i>cm</i> ²	50	155	256	650	1385	900
Sättigung bei Leerlauf	12500	11100	8200	5800	8600	9250
„ „ „ Voll-Last	13100	11500	8500	6100	8900	9500
Kraftlinienweg <i>cm</i>	15	38	30	35	72	51
Ampèrewindungen bei Leerlauf	200	340	145	150	550	460
„ „ „ Voll-Last	225	380	150	1220	580	480
Gesamtampèrewindungen pro Pol bei Leerlauf	1910	—	—	5200	8802	9508
Ankerampèrewindungen pro Pol	730	3300	2620	4500	9050	9000
Bürstenverschiebung in %	4	6	6	8	8	8
Gegenwindungen	60	400	315	720	1440	1440
Querwindungen	670	2900	2300	3800	7600	7560
Zum Ausgleich der Querwindungen erforderlich	200	750	835	1200	2600	2400
Gesamtampèrewindungen bei Voll- Last ausgeführt	2335	5710	7500	8686	13218	14012
Nebenschlusswicklung	2400	5800	7500	6200	14200	14500
Hauptstromwicklung	—	—	—	2400	—	—
Nebenschlusspulen.						
Wickeltiefe <i>mm</i>	50	60	55	35	40	30
Spulenhöhe	60/50	130	177	180	440	475
Ausserer Umfang	700	1000	955	1070	1760	1470
Mittlere Windungslänge <i>m</i>	0,54	0,8	0,78	0,95	1,63	1,37

Windungszahl	3840	1650	630	850	1420	670
Gesamt-Windungslänge . . <i>m</i>	6440	665	490	810	2320	925
Stromstärke	0,37	7	12	7,3	10	21,6
Drahtdurchm. blank/isoliert <i>mm</i>	0,55/0,65	2,6/2,9	3,2/3,6	2,5/2,8	3,63	4,02
Querschnitt <i>mm²</i>	0,235	5,3	8	4,9	7,2	13,0
Widerstand pro Spule . . . <i>Ohm</i>	296	2,5	1,2	3,3	6,45	1,42
Spannung pro Spule <i>Volt</i>	110	17,5	14,5	24	64,5	30,7
„ aller Spulen	440	70	116	192	515	492
„ im Regulierwiderstand „	60	40	49	38	35	8
Stromwärme pro Spule . . . <i>Watt</i>	41	122	174	175	645	660
Abkühlungsfläche <i>dm²</i>	3,5	13	169	—*)	77	70
Watt pro <i>dm²</i>	11,7	9,4	10,3	—*)	8,4	9,4
Hauptstromspulen.						
Windungszahl	—	—	—	3,5	—	—
Mittlere Windungslänge . . <i>m</i>	—	—	—	2,5 · 80	—	—
Gesamtlänge	—	—	—	2	—	—
Leiterquerschnitt <i>mm</i>	—	—	—	1,16	—	—
Leiter (parallel)	—	—	—	4,1	—	—
Widerstand pro Spule . . . <i>Ohm</i>	—	—	—	0,00021	—	—
Spannungsverlust pro Spule <i>Volt</i>	—	—	—	0,146	—	—
„ für alle Spulen „	—	—	—	1,17	—	—
Stromwärme pro Spule . . . <i>Watt</i>	—	—	—	102	—	—
Abkühlungsfläche <i>dm²</i>	—	—	—	22*)	—	—
Watt pro <i>dm²</i>	—	—	—	13*)	—	—
Erwärmungen.						
Anker: Watt pro <i>dm²</i>	31,6	43,5	46	48	29	44
Umfangsgeschwindigkeit <i>m/sek</i>	11	17,9	21	13,3	12	17
Spezifische Erwärmung . . .	1,5	1,2	0,9	1,1	1,2	0,9
Voraussichtl. Übertemperat. °C.	47	53	41	53	35	40
Kommutator: Watt pro <i>dm²</i> .	40	50	6)	53	17,5	29,5
Umfangsgeschwindigkeit . . .	8,5	13,5	12,5	7	8,7	12,7
Spezifische Erwärmung	1	0,8	0,8	1	1	0,8
Übertemperatur	40	40	48	53	18	24
Magnetspulen: Watt pro <i>dm²</i> .	11,7	9,4	10,3	13	8,4	9,4
Spezifische Erwärmung	3	4	4	3	4	4
Übertemperatur	35	37,5	41	39	34	38
Verluste und Wirkungsgrade.						
Konstante Verluste.						
Eisenverlust im Anker	300	1080	2300	3750	7800	16700
Verlust in der Nebenschluss- wicklung	185	770	1500	1680	5500	10800
Kommutatorreibung	24	370	900	520	950	3700
Lager und Luftreibung	200	600	1000	1000	2500	5000
Watt	510	2820	5700	6950	16750	36200

*) Die Hauptstromwicklung liegt ausserhalb der Nebenschlusswicklung, deshalb ist die Stromwärme beider Wicklungen zusammen auf die äussere cylindrische Fläche bezogen.

Veränderliche Verluste.						
Stromwärme im Ankerkupfer	190	1100	2950	3600	13900	26000
„ in der Hauptstrom- wicklung	—	—	—	102	—	—
Stromwärme am Kommutator	22,5	615	1200	1740	1830	5000
Watt	210	1720	4150	5440	15730	31000
Gesamtverlust.						
Leistung Watt	4500	45000	100000	150000	32500	67200
Zugeführter mechan. Effekt „	5420	49540	109850	162400	432500	1067200
Wirkungsgrad bei Voll-Last „ %	83	90,6	91,2	92,4	92,5	93,7
„ „ $\frac{1}{2}$ -Last „ %	75	86,5	87,5	89,5	90	91,8
„ „ $\frac{1}{4}$ -Last „ %	61	79	80	83	85	86,5
Gewichte der aktiven Materialien.						
Ankerkupfer	4,8	52	75	150	730	920
Nebenschlusskupfer	2,9	125	280	280	1190	1720
Hauptstromkupfer	—	—	—	117	—	—
Kommutatorkupfer	2	80	160	230	750	1470
Gesamtkupfer	35,8	257	415	777	2670	4110
Ankerbleche	25	144	355	750	5550	6700
Magnetpole	31	130	335	730	5300	8500
Joch	53	300	830	2740	12500	11500
Gesamteisen	109	578	1520	4220	23350	26700
Kupfer pro KW	8	5,7	4,15	4,85	6,7	4,11
Eisen pro KW	2,4	13	15	26*)	58,5	26,7
Anker- + Feldkupfer pro KW	7,5	3,95	3,55	3,4	4,8	2,64
Kosten in Mark.						
Material:						
Kupfer	72	514	830	1554	5340	8220
Ankerbleche	12	72	177	375	2770	3350
Stahlguss	30	250	410	255	6250	7000
Gusseisen	—	—	—	685	—	—
pro KW	32	16,4	14,7	18	36	18,57
Herstellungskosten:						
$0,1 \cdot D_1^2 + 0,14 \cdot D_1 \cdot l$	293	990	2320	3880	16740	32680
pro KW	65	22	23	24	42	32
Selbstkosten	407	1726	3737	6749	31100	51250
pro KW	95	38,4	37,4	42	77,5	51,3

*) Magnetgestell: Gusseisen.



Schlagwort-Verzeichnis.

- Aequipotentialverbindungen S. 84, 97, 148 u. ff.
- Ampèrewindungen S. 38.
- „ für Ankereisen S. 38.
- „ „ Luftspalt S. 38.
- „ „ Joch S. 43.
- „ „ Pol S. 43.
- „ „ Zähne S. 40.
- Ankerampèrewindungen S. 50, 79 u. ff.
- Ankereisentiefe S. 5.
- „ konstruktion S. 9, Fig. 4, 5, 7, Tafel III, IV.
- „ länge S. 5.
- „ rückwirkung S. 45, 79 u. ff., 86, 90, 129, Fig. 75.
- „ -Gegenwindungen S. 45, 49.
- „ -Querwindungen S. 45, 50, 65, Fig. 49.
- „ sättigung S. 28.
- „ verluste S. 28.
- „ wicklungen S. 9.
- „ widerstand S. 24.
- Ausgleichsleitungen s. Aequipotentialverbindungen.
- Bürsten S. 72.
- „ bogen S. 73.
- „ brücke S. 71, Fig. 68—70.
- „ druck S. 72.
- „ reibung S. 72.
- „ stellung S. 45, 50, 55, 90.
- „ stifte S. 84, 95.
- „ verschiebung s. -stellung.
- Eisengewicht des Ankers S. 27.
- „ verluste S. 25, Fig. 26.
- Endverbindungen S. 10.
- „ einfluss auf Reaktanz S. 92.
- Feldspulen S. 57, Fig. 52—55.
- Formspulen S. 9, 12.
- Funkenbildung S. 88 u. ff., 97.
- Gegenwindungen s. Ankerrückwirkung.
- Gestelle, Magnet- S. 33, Fig. 30—35.
- Gestellsättigung S. 34.
- Hauptstromwicklung S. 51.
- Herstellungskosten S. 103, 115.
- Hilfspol s. Wendepol.
- Hochspannungsgenerator S. 139.
- Hysteresis S. 25, Fig. 26.
- Isolation der Ankerbleche S. 25, 26.
- „ des Kollektors S. 71.
- „ der Nut S. 21.
- Joch s. Gestell.
- Kernverluste s. Eisenverluste.
- Kommutator S. 70 u. ff., Fig. 61—67.
- Kommutierung S. 5, 87, 98, 124.
- Kompensationswicklung S. 128.
- Kompensierte Maschine S. 128.
- Kontraktionskoeffizient S. 39.

- Kraftlinien pro Pol S. 19, 21.
 „ für Leiter in Luft S. 91.
 „ „ „ „ Eisen S. 92.
 Kostenkonstante S. 119 u. ff.
 Kupfergewicht des Ankers S. 25.
 „ der Hauptstromwicklung S. 61.
 „ der Nebenschlusswickl. S. 60.
 Lagerreibung S. 76.
 Lamellen s. Segmente.
 Leerlauferregung S. 50, 53.
 Leiter pro Segment S. 6.
 Luftquerschnitt S. 38, 39.
 Luftreibung S. 76.
 Lüftung S. 9, 28.
 Luftsättigung S. 4, 6.
 Magnetische Verhältnisse S. 32.
 Mantelwicklung S. 10, Tafel I, II a, b, c.
 Maschinenkonstante S. 99 u. ff.
 Materialkosten S. 115.
 „ kurven S. 33, Fig. 29, Tafel VI.
 Mitnehmer S. 122.
 Nebenschlusspule S. 59, 67.
 Nutenform S. 4.
 „ füllfaktor S. 23.
 „ isolation S. 21.
 „ zahl S. 16.
 Parallelwicklung S. 3, 13, 82, Fig. 12, 14, 17, 21.
 Perioden S. 19, 20.
 Polbedeckung S. 4, 5.
 „ bogen S. 19.
 „ fläche S. 19.
 „ formen S. 36, 37, Fig. 36—40.
 „ schuh S. 42.
 „ teilung S. 19.
 „ zahl S. 7, 81.
 Querschnitt des Leiters S. 7.
 Querwindungen s. Ankerrückwirkung.
 Raumbfaktor S. 57, Fig. 56.
 Reaktanzspannung S. 89 u. ff., 96, 117, 124, Fig. 76.
 „ bei grossen Maschinen S. 97.
 „ „ Serienschaltung S. 95.
 Reihenschaltung s. Serienschaltung.
 Ringwicklung S. 20.
 Schablonenwicklung S. 9, 12.
 Schaltung der Ankerleiter S. 7.
 Schleifenwicklung S. 13, Fig. 12, 13, 21.
 Segmentspannung S. 5, 6.
 Selbstinduktion S. 88.
 Selbstkosten S. 116.
 Serienparallelschaltung S. 15 u. ff., 20, 83, 95, Fig. 20, 23.
 Serienschaltung S. 13, 20, 83, 95, Fig. 13, 15, 18, 19, 22, 23.
 Spannungsverlust im Anker S. 25.
 „ an den Bürsten S. 72, 90.
 „ im Regulierwiderstand S. 59.
 Spulenwicklung S. 16.
 Stirnwicklung S. 10, Fig. 9, Tafel II d, e, f.
 Streuung, nützliche S. 39.
 „ im Gestell S. 43.
 Stromdichte in den Ankerleitern S. 7,
 „ am Kommutator S. 72.
 Stromwärme im Anker S. 25.
 Temperatur, Anker S. 8, 28, 133.
 „ Feldspule S. 60, 62.
 „ Kommutator S. 73.
 Trommelwicklung S. 20.
 Uebergangswiderstand an den Bürsten S. 96.
 Umfangsgeschwindigkeit: Anker S. 4, 6, 104.
 „ Kommutator S. 73.
 Verbinder s. Aequipotentialverb.
 Verluste, konstante u. veränderliche S. 77.
 „ im Ankereisen S. 25.
 „ im Ankerkupfer S. 25.
 „ durch Lager und Luftreibung S. 76.

Wellenwicklungen S. 13, Fig. 14, 15, 22, 23.	Wicklungsschritt S. 12.
Wendepol S. 134 u. ff., Tafel IV.	Windungen pro Segment S. 6, 86.
„ -Maschine S. 134 u. ff.	Windungslänge S. 24.
Wicklungen s. Mantel-, Stirn-Wickl.	Wirbelströme S. 25, Fig. 27.
„ s. Parallel-, Serien-, Serien- parallel-Wickl.	Wirkungsgrad S. 76 u. ff.
„ s. Schleifen-, Wellen-Wickl.	Zahnbreite S. 5.
	„ sättigung S. 40, 41.

Berichtigungen.

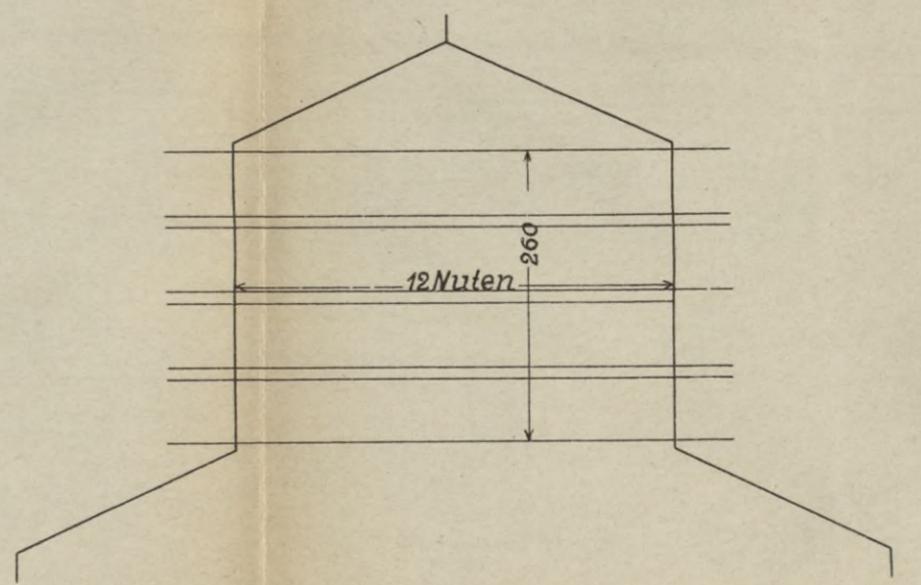
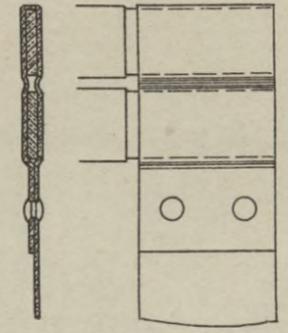
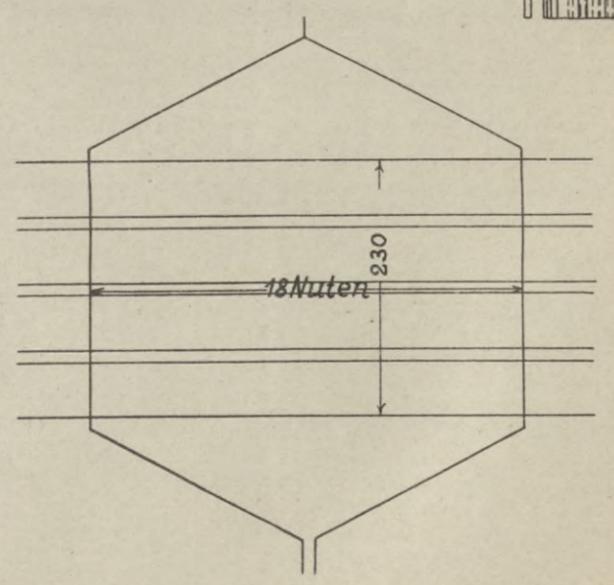
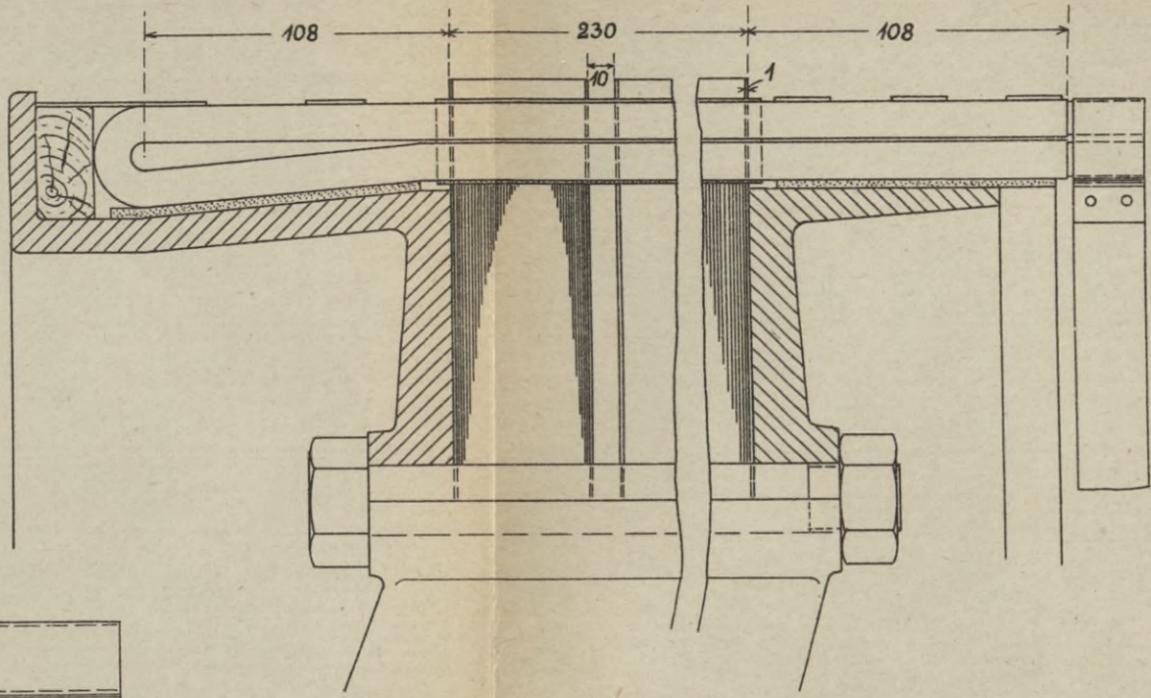
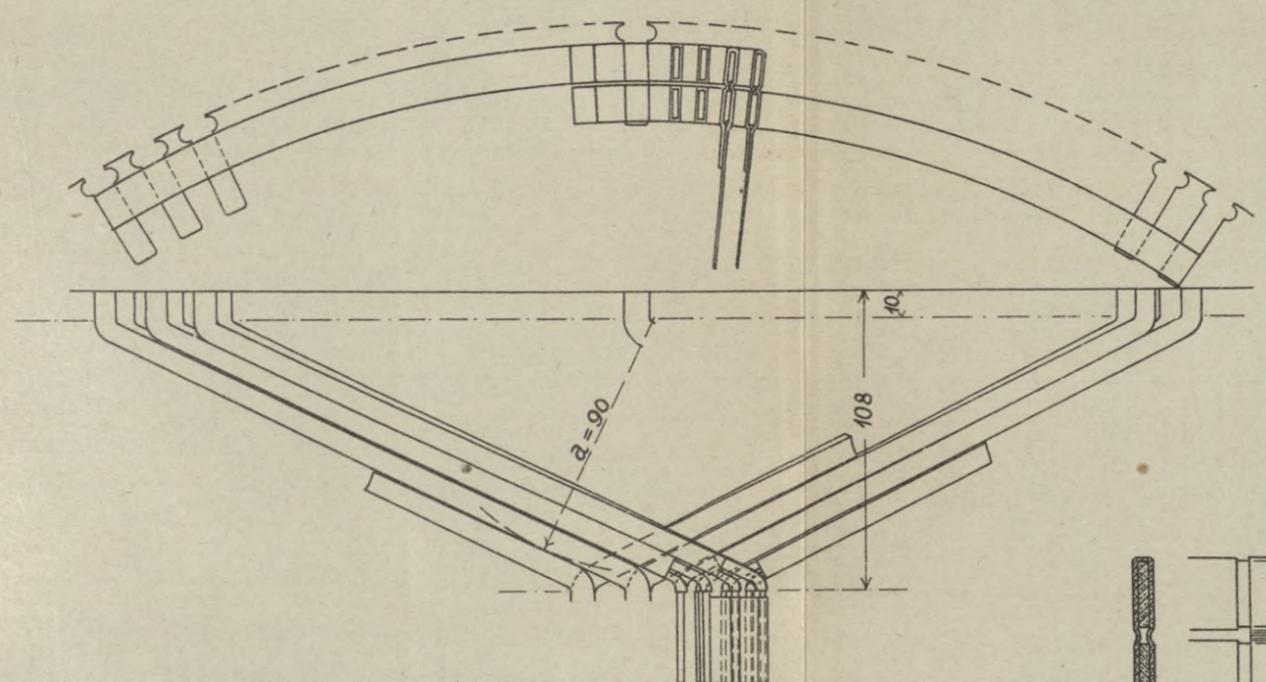
Seite 4, Zeile 12 lies $\frac{28}{39,3}$ statt $\frac{28}{29,3}$.

Seite 8, Zeile 3 von unten lies gezwungen statt gewungen.

Seite 69, Zeile 4 lies 90 Volt statt 900 Volt.

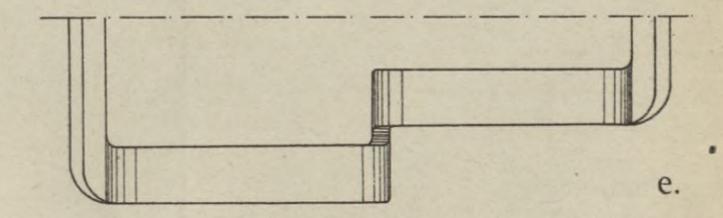
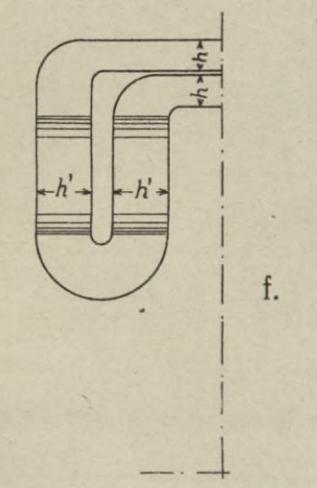
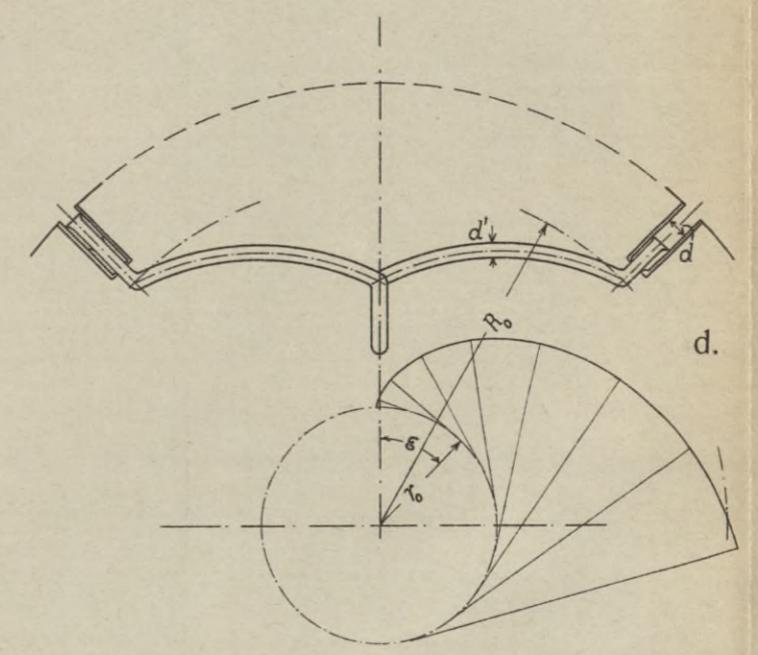
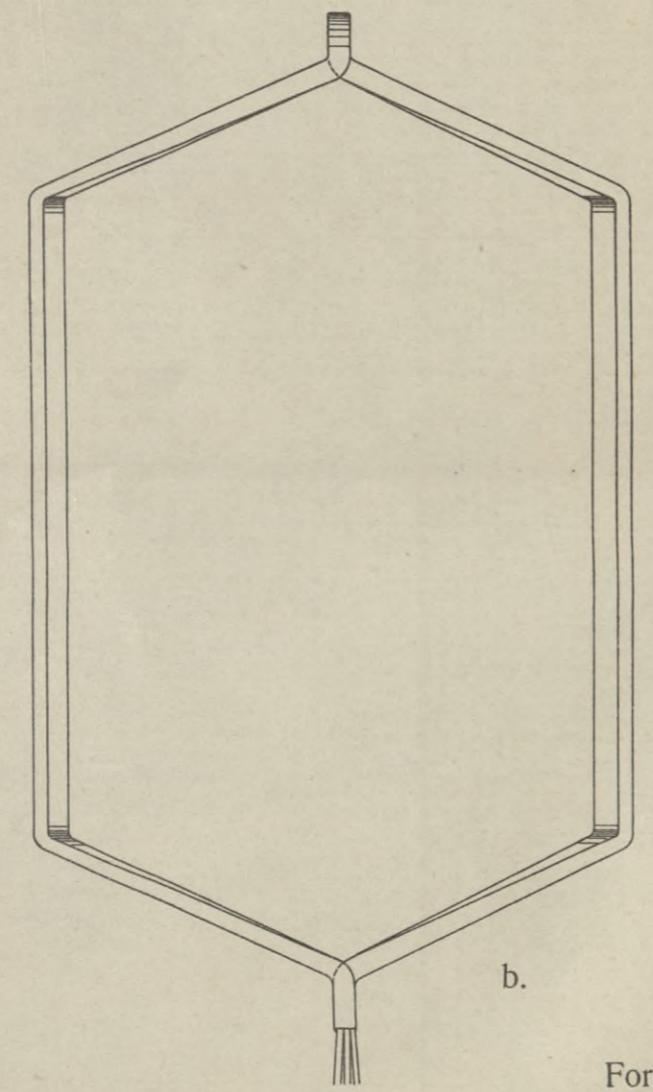
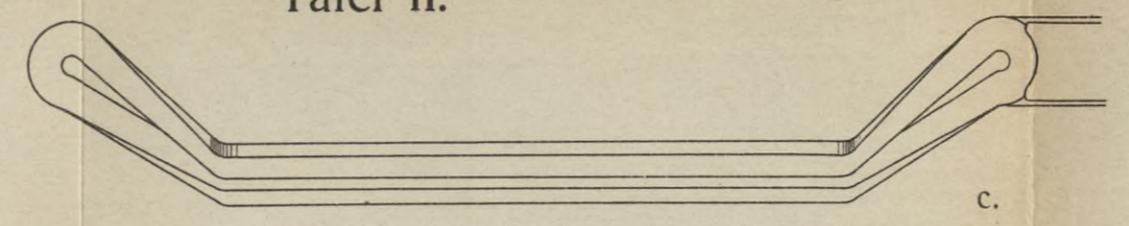
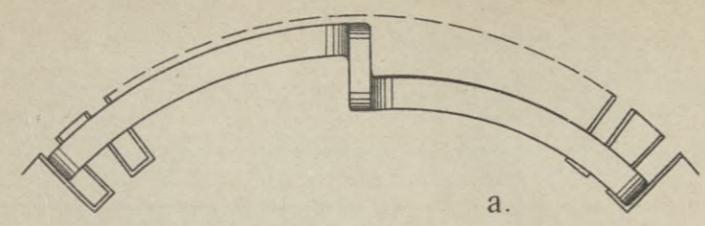
Seite 102 und 103 links oben an den Figuren lies $\times 10^{-4}$ statt $x 10^{-4}$.

Tafel I.



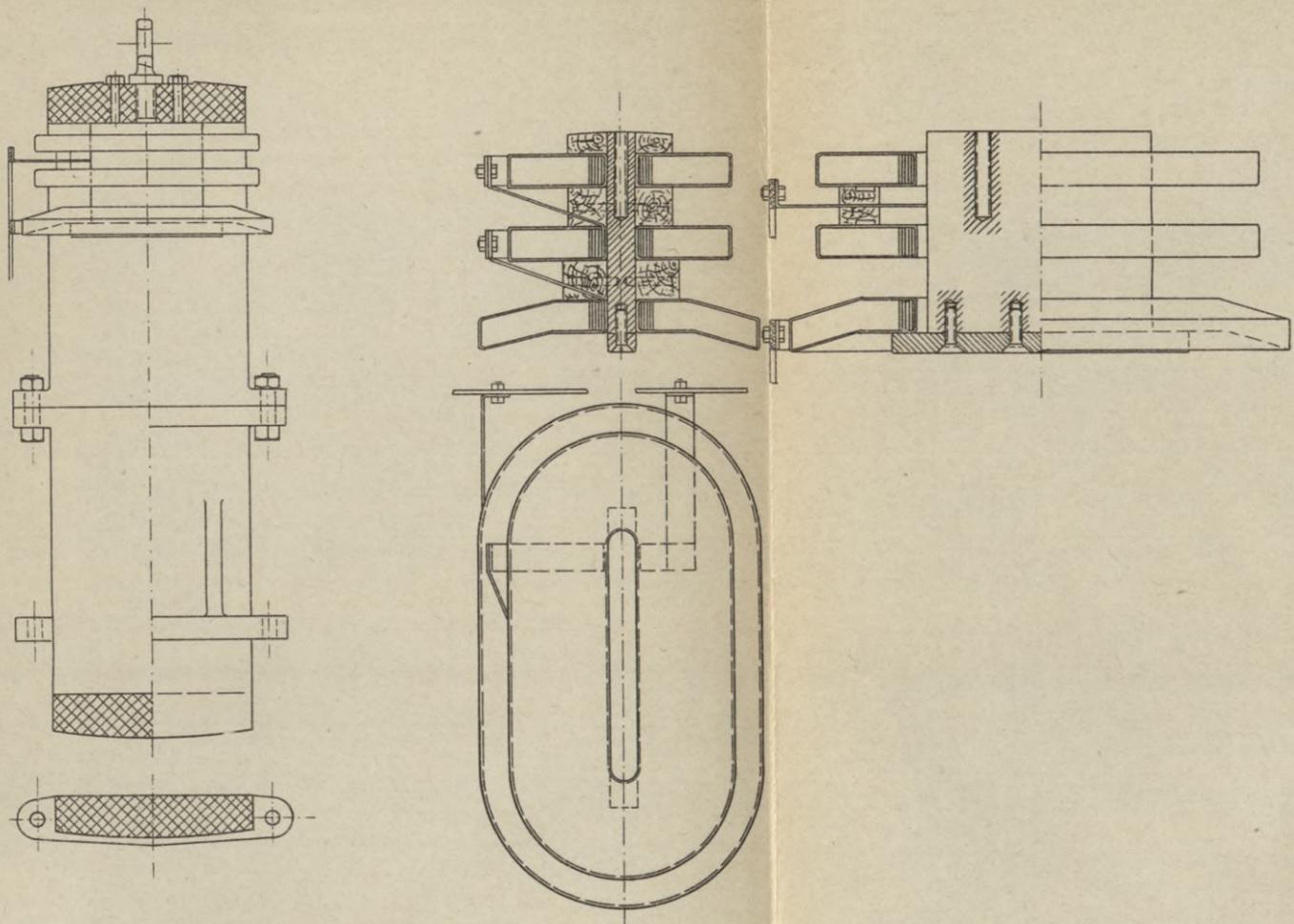
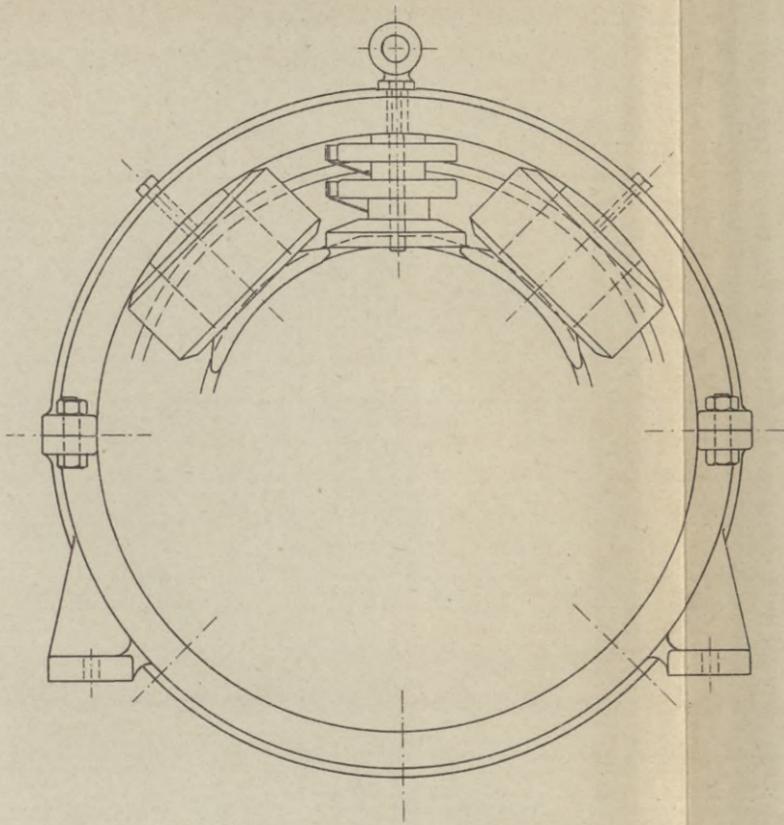
Formstab Mantelwicklung.

Tafel II.

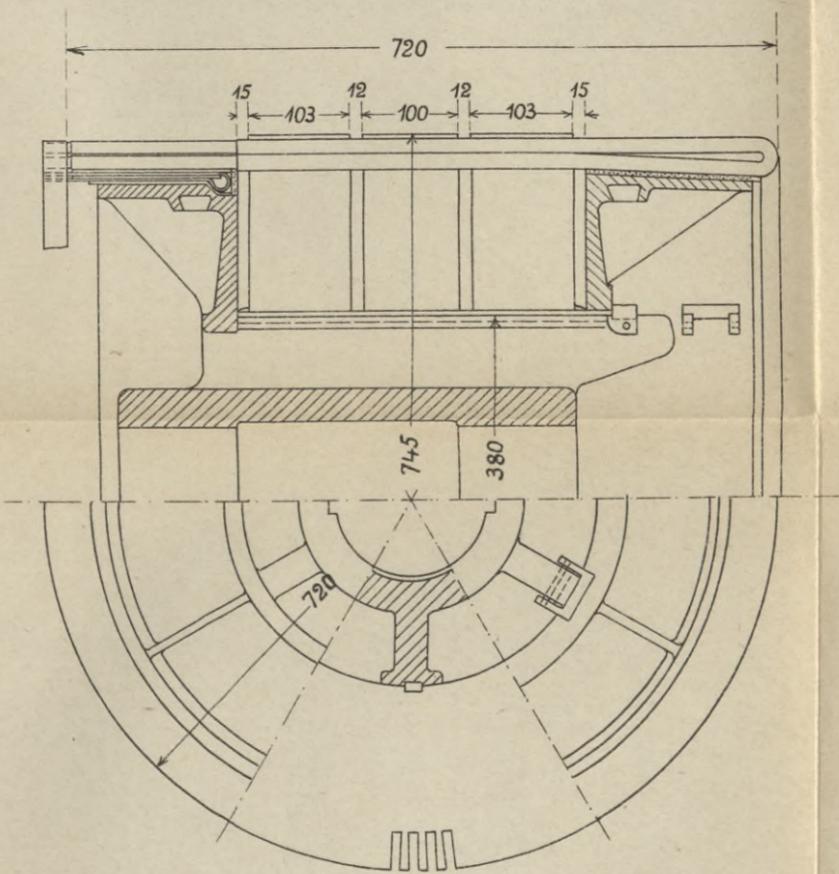


Formspulen: Mantelwicklung (a, b, c), Stirnwicklung (d, e, f).

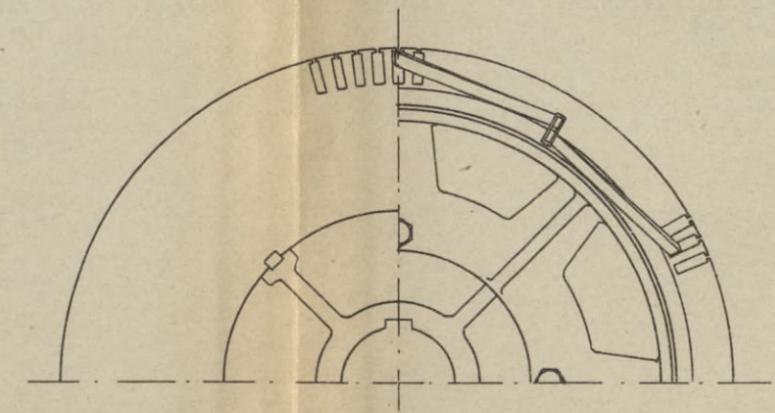
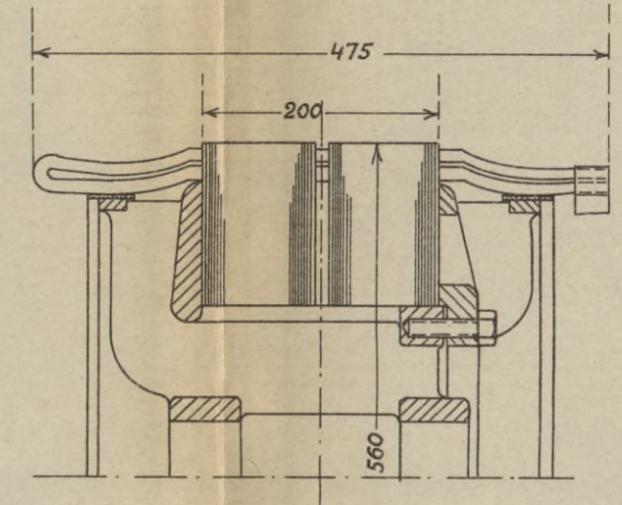
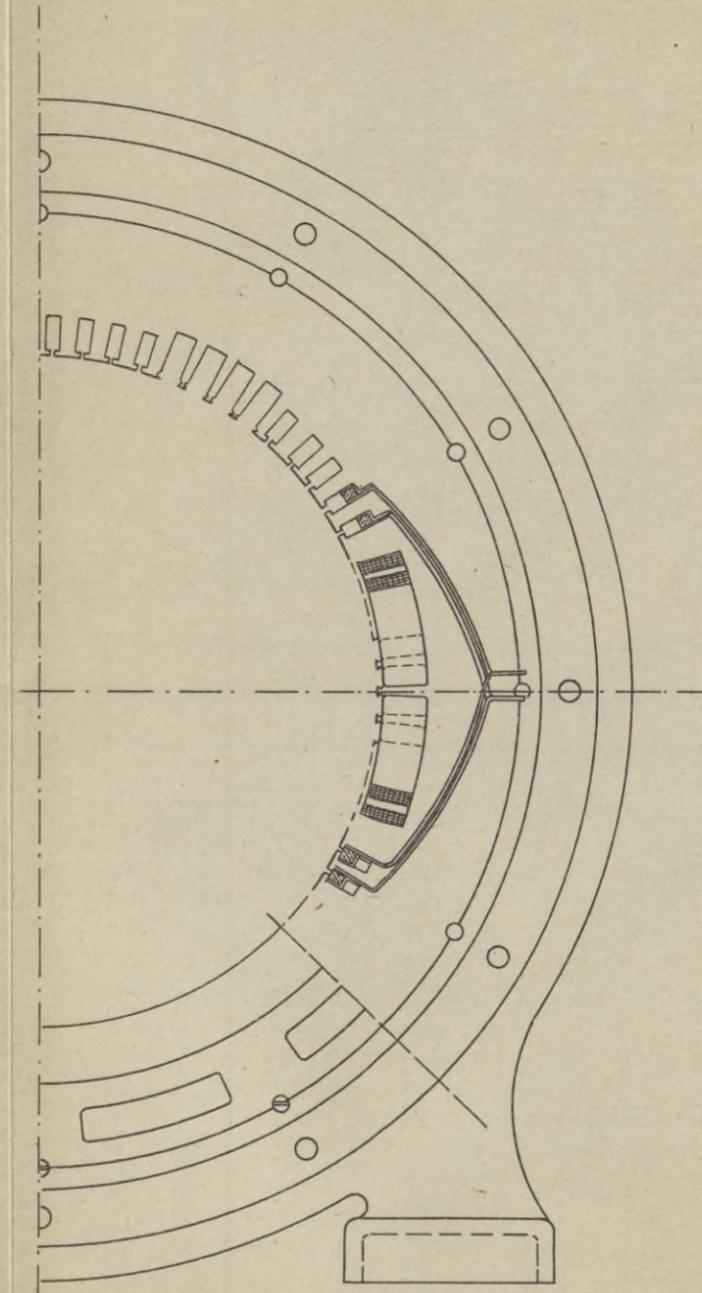
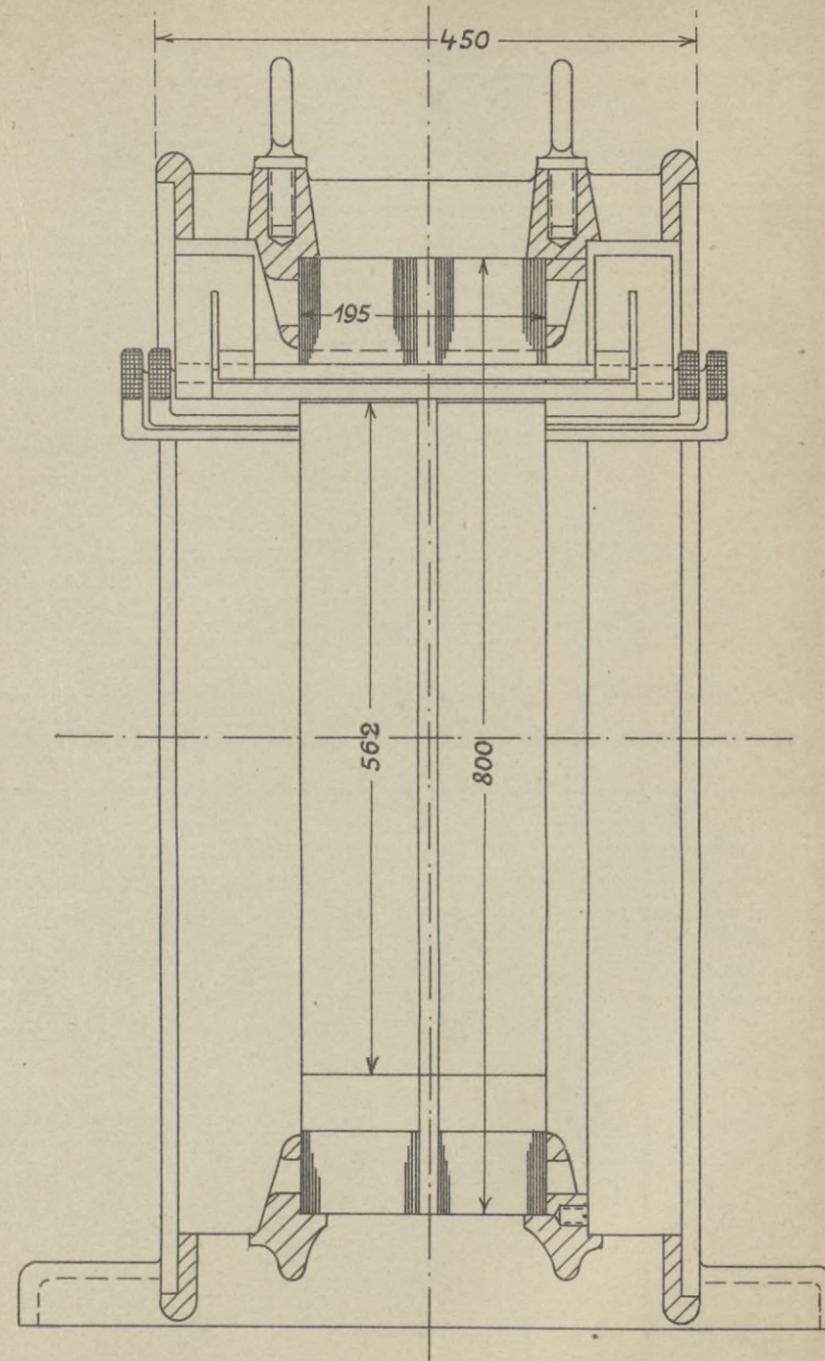
Tafel III.



Gestell, Hilfspol und
Anker eines 300 Kw. Wendepolgenerators.



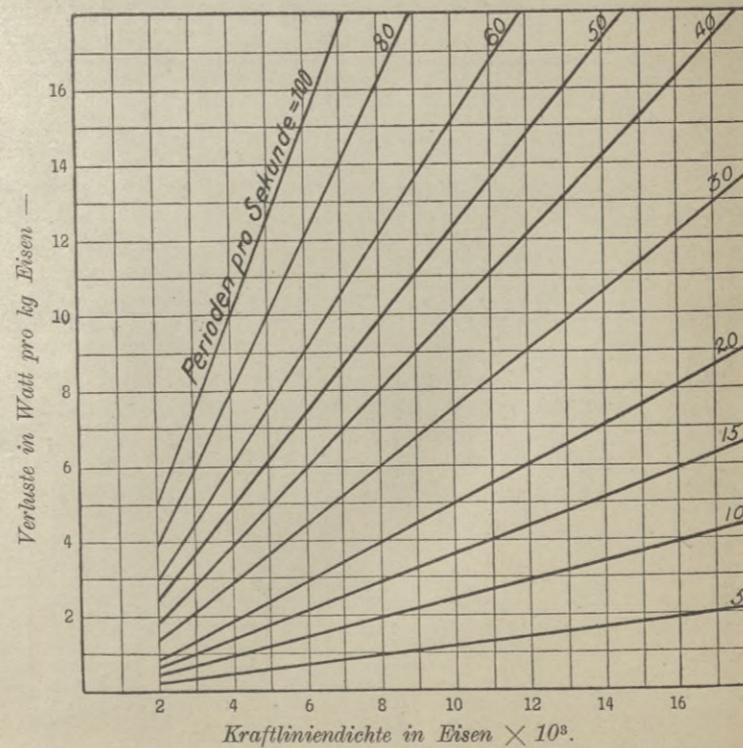
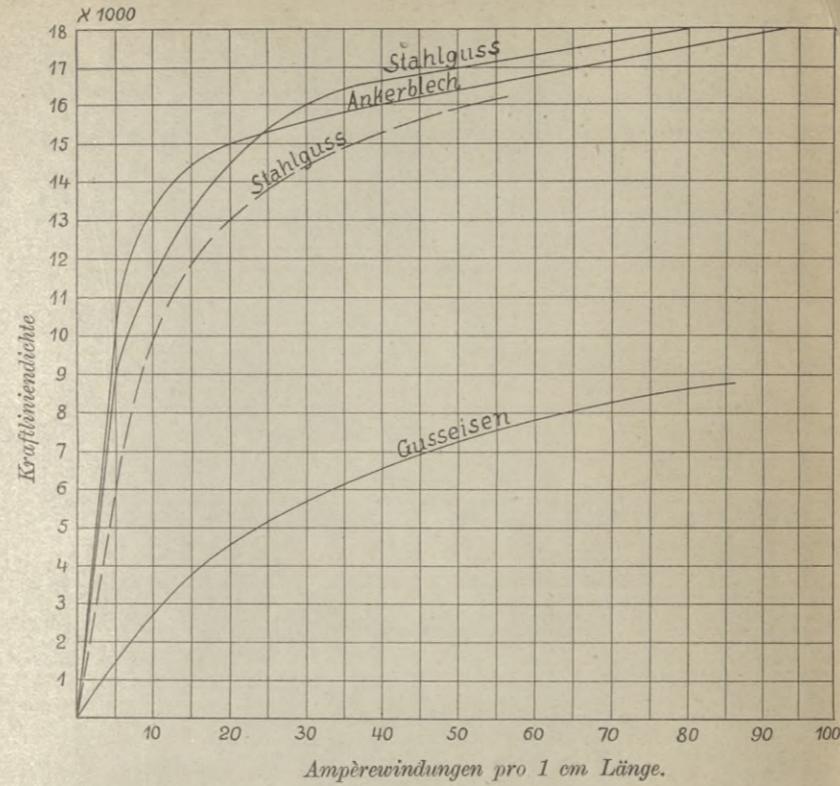
Tafel IV.



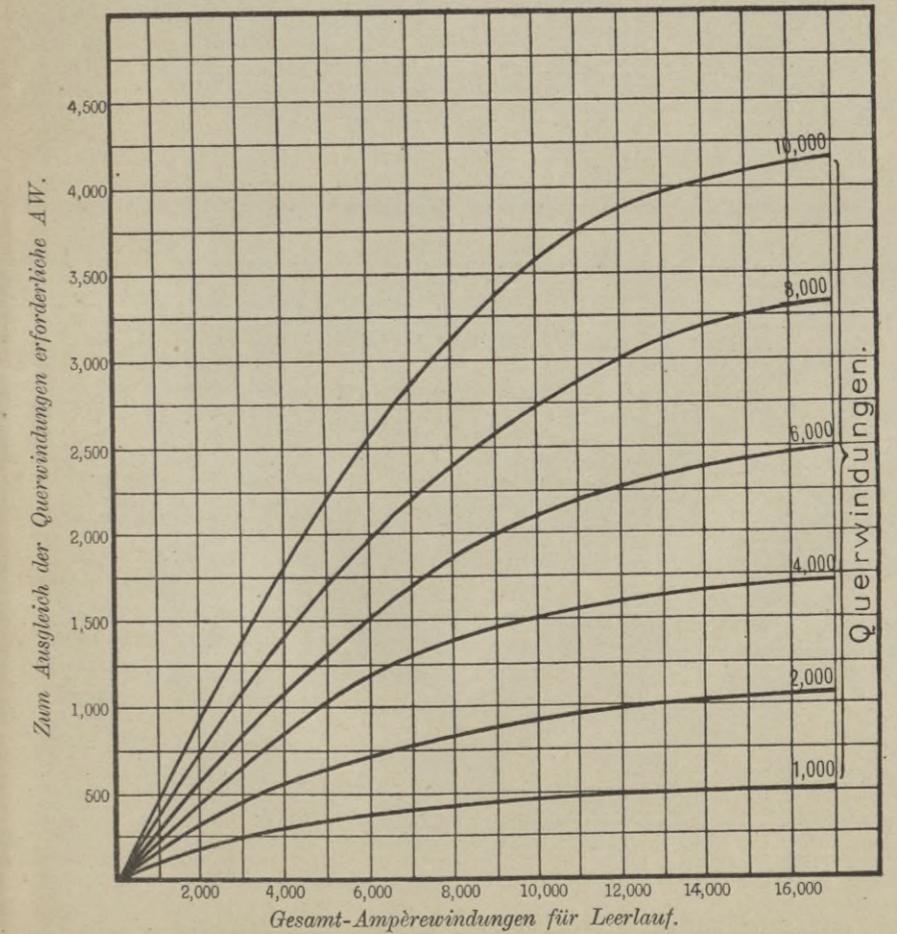
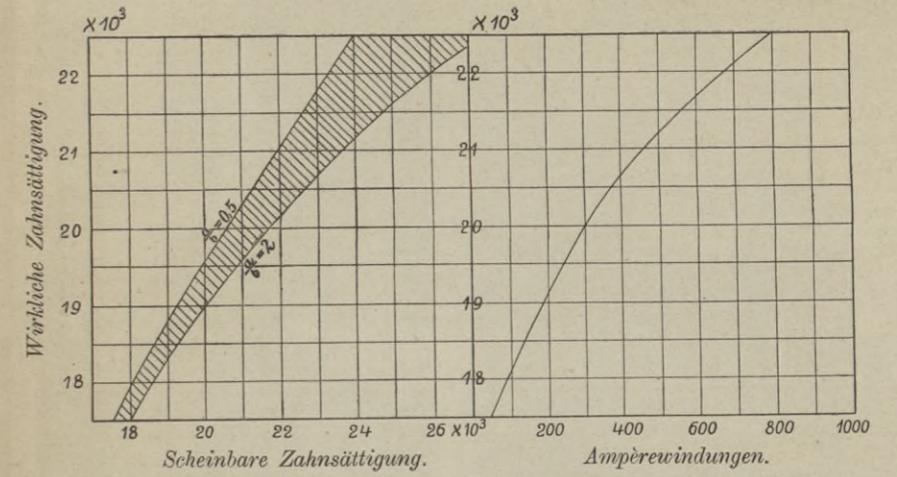
Ständer und Läufer eines kompensierten Gleichstrommotors von 110 PS.

Hobart-von Königslöw, Entwurf der Gleichstrommaschine.

Verlag der Polytechnischen Buchhandlung, R. Schulze, Mittweida.



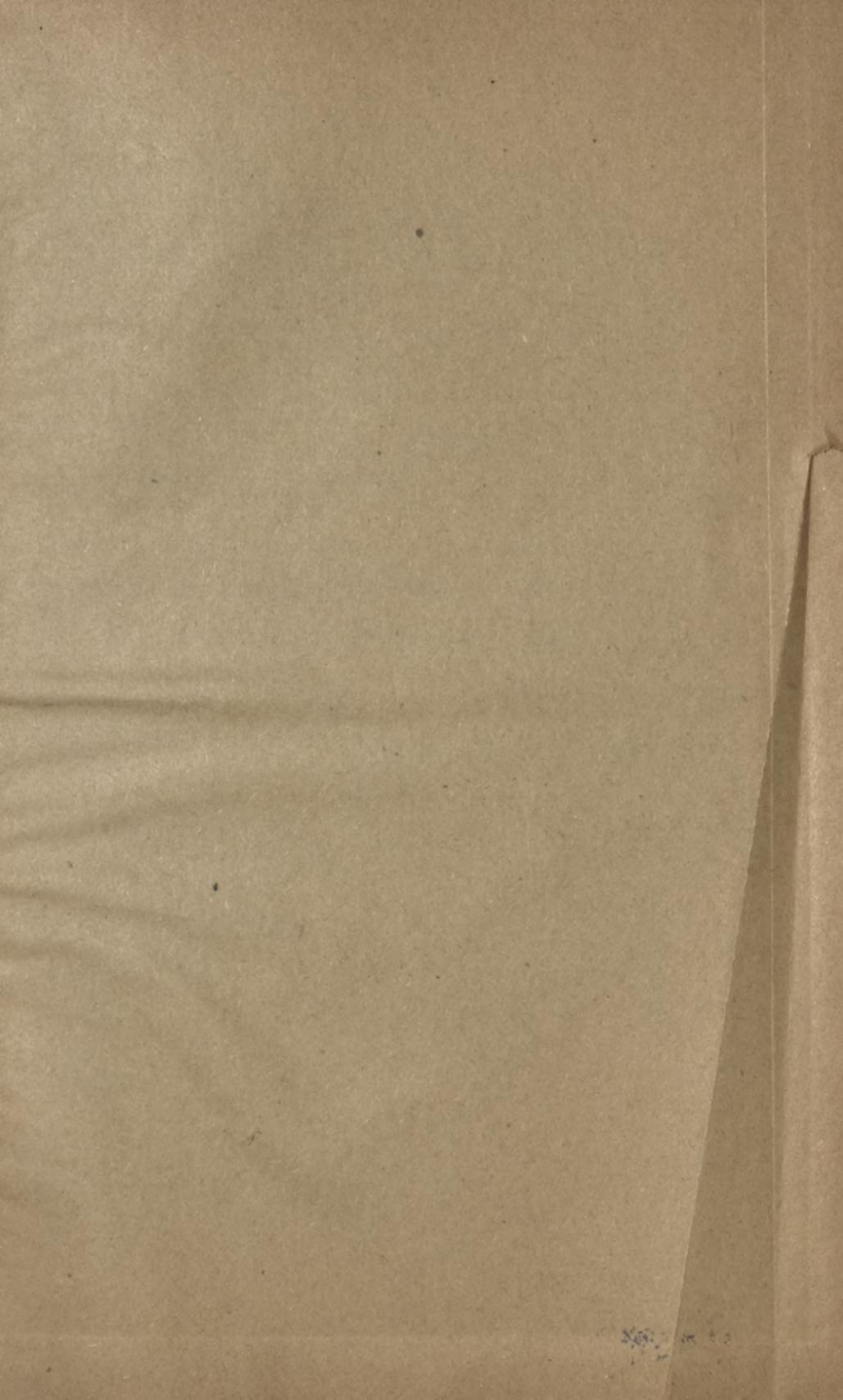
Hobart-von Königlöw, Entwurf der Gleichstrommaschine.



Verlag der Polytechnischen Buchhandlung, R. Schulze, Mittweida.

S. 61

S-96



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

5215

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000294749