

Drehstrommotoren mit Doppelkäfiganker und verwandte Konstruktionen

Von

Franklin Punga und **Otto Raydt**

o. Professor an der Technischen
Hochschule Darmstadt

Oberingenieur
Aachen

Mit 197 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1931

ISBN-13:978-3-642-89422-0 e-ISBN-13:978-3-642-91278-8
DOI: 10.1007/978-3-642-91278-8

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

Copyright 1931 by Julius Springer in Berlin.

Vorwort.

Wohl jeder Ingenieur, der mit der Berechnung und dem Bau von Drehstrommotoren zu tun gehabt hat, wird den Vorteilen des einfachen Käfigankers seine Aufmerksamkeit gewidmet und versucht haben, diese mehr zur Geltung zu bringen und die Nachteile zu mildern. Unter denjenigen, die in dieser Richtung gewirkt haben, nimmt wieder H. M. Hobart eine hervorragende Stelle ein, der durch Wort und Schrift, vor allen Dingen durch sein Buch „Electric Motors“ für die weiteste Verbreitung des Käfigankers eintrat. Da einer der Verfasser das Glück hatte, mehrere Jahre (und zwar gerade im Anfang seiner praktischen Tätigkeit) als Assistent Hobarts tätig zu sein, so mußte notwendigerweise das gleiche Interesse auf ihn übergehen, und als jetzt die Entwicklung des Doppelnutkäfigankers eine große praktische Bedeutung erlangt hatte, so war die Mitarbeit an dieser interessanten Aufgabe und der Wunsch, die Resultate einem weiteren Kreise zugänglich zu machen, erklärlich.

Es erschien erwünscht, neben den besonderen Ausführungen des Käfigankers auch solche Motoren zu behandeln, die den gleichen Zweck auf eine andere Weise erreichen; hierher gehören die Motoren mit Umschaltungen des Rotorstromkreises, ferner die Motoren von Bruncken-Doka und von Richter.

In enger Beziehung zu den Spezialmotoren stehen die Fliehkraft-riemenscheiben, die das gleiche Problem auf rein mechanischem Wege zu lösen suchen. Auch erschien es erforderlich, auf die Anschlußbedingungen einzugehen, die naturgemäß einen großen Einfluß auf die Entwicklung der einzelnen Arten der Motoren ausüben.

Die Verfasser sind Herrn Oberingenieur Réthy, Budapest, zu Dank verpflichtet, der nicht nur die Lesung eines Teils der Korrekturen übernahm, sondern auch Anregungen gab, die zu einer Vertiefung des Problems der günstigsten Anlaufverhältnisse des Drehstrommotors mit Doppelnutläufer geführt haben. Auch stammt die auf Abb. 68 folgende analytische Behandlung von ihm.

Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Ing. H. Th. Berg, den Assistenten der Technischen Hochschule Darmstadt, Herrn Dr. H. Möller und Herrn Dipl.-Ing. E. Manteuffel, für ihre wertvolle Unterstützung im Korrekturlesen, ferner den vielen Firmen, welche die Verfasser durch Überweisung von Material über ausgeführte Motoren und Fliehkraft-riemenscheiben unterstützt haben, und auch der Verlagsbuchhandlung für die sorgfältige Drucklegung und schöne Ausstattung des Buches.

Darmstadt und Aachen, im November 1930.

Die Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Einleitung	1
Der erste Motor mit Doppelnutläufer S. 2. — Verschiedene ältere Anordnungen von Läuferwicklungen S. 2. — Vorschläge von Boucherot S. 6. — Neuere Anordnungen von Läuferwicklungen S. 9. — Motoren mit Fliehkraftanlasser S. 16.	
2. Vergleich zwischen Schleifringanker und Käfiganker . . .	25
Kritischer Vergleich eines Motors mit Schleifringanker mit einem Motor mit normalem Käfiganker S. 25.	
3. Der Drehstrommotor mit Doppelkäfiganker	41
A. Allgemeine Theorie	41
Ersatzschema für den Doppelnutmotor S. 41. — Zusammenarbeit der beiden Wicklungen des Läufers S. 43. — Drehmoment und Strom in Abhängigkeit vom Schlupf S. 45. — Einbuchtungen in der Drehmomentenkurve in Abhängigkeit von den spez. Größen der beiden Läuferwicklungen S. 47. — Sattelbildungen in Abhängigkeit von dem Nutenzahlverhältnis im Ständer und Läufer S. 51. — Das Stromvektordiagramm des Doppelnutmotors S. 54. — Diagramm für analytische Behandlung des Doppelnutmotors S. 57.	
B. Einfluß der Temperatur des äußeren Käfigs	58
Verteilung der Verluste auf die Stäbe und Endringe S. 58.	
C. Berücksichtigung der Reaktanz X''	59
D. Entwurf eines 7,5-kW-4poligen Drehstrommotors	62
Genauere Durchrechnung des Motors S. 62. — Praktische Ausbildung der Läufernute S. 66.	
4. Konstruktionsbeispiele von Doppelnutmotoren	67
Doppelnutläufer von der AEG, von den SSW, von der Maschinenfabrik Eßlingen S. 68. — Durchrechnung eines ausgeführten Motors von 7,5 kW S. 69. — Anordnung von Heemaf S. 70. — Verschiedene Anlaßumschaltungen der Ständerwicklung S. 71. — Berechnetes Stromvektordiagramm eines 15-kW-Heemaf-Motors S. 73. — 4-kW-Motor von Garbe-Lahmeyer S. 77. — Motor von Ganz & Co. S. 78.	
5. Drehstrommotor mit Wirbelstromläufer	80
A. Der Käfiganker mit einem Stabe pro Nute	80
Die Funktionen $\varphi(h')$ und $\psi(h')$ in Abhängigkeit von der reduzierten Leiterhöhe S. 80. — Durchrechnung eines Motors mit Wirbelstromläufer S. 81. — Verschiedene Nutenanordnungen im Läufer S. 84.	
B. Der Käfiganker mit mehreren Leitern pro Nute oder einem verdrehten Stabe	87
Wirkung des verdrehten Stabes bei Turbogeneratoren und bei Läufern von Asynchronmotoren S. 87. — Durchführung einer Berechnung S. 88.	
C. Läufer mit Endringen aus großem Eisenquerschnitt	90
Beschreibung eines 1200-PS-Motors von Ganz & Co. S. 90.	
6. Drehstrommotoren mit Umschaltungen im Rotorstromkreis	91
Gegenschaltung von Görges S. 91. — Gegenschaltung nach Schenfer, Moskau S. 93. — Läufer mit getrennten Anlauf- und Laufwicklungen S. 94. — Erhöhung der Reaktanz der Anlaufwicklung S. 96. — Beschreibung eines 7,5-PS-Punga-Motors S. 97. — Kritische Untersuchung eines 92-kW-Punga-Motors S. 99. — Untersuchungen dieses Motors bei Anwendung eines Tertiärleiters und eines Wirbelstromleiters im Läufer S. 103.	

	Seite
7. Drehstrommotoren mit Umschaltungen im Ständerstromkreis	105
A. Der Bruncken-Doka-Motor	105
Beschreibung des Motors S. 105. — Das Heylanddiagramm des Motors S. 108.	
B. Der Richter-Motor.	112
Beschreibung des Motors S. 112. — Zusammensetzung der Spannungsvektoren S. 116. — Vergleich des Richter-Motors mit dem Doppelnutmotor S. 118.	
8. Fliehkraftriemenscheiben	119
A. Beschreibung von verschiedenen ausgeführten Fliehkraftriemenscheiben	120
Fliehkraftriemenscheibe der AEG und von SSW S. 120. — Albo- kupplung S. 123. — Elvolascheibe S. 126. — DEM-Scheibe von Pöge S. 130. — Scheibe der Metalluk-Gesellschaft S. 133. — Elektroma- scheibe S. 135. — DEM-Eglo-Scheibe S. 137. — Scheibe von Betrenot S. 139.	
B. Einteilung der Fliehkraftriemenscheiben	140
Reine Fliehkraftriemenscheiben S. 141. — Fliehkraftriemenscheiben mit Vorspannung S. 142. — Fliehkraftriemenscheiben mit Zeitver- zögerung S. 143. — Bewertung der Scheiben S. 144.	
9. Anschlußvorschriften	147
Anschlußvorschriften verschiedener Länder S. 147. — Kritik der Vor- schriften S. 151. — Einschaltstrom und Spannungsabfall S. 152. — Schalthäufigkeit S. 152. — Amerikanische Verhältnisse S. 153. — Spannungsabfall in verschiedenen Anlagen mit bekannten Leitungs- verhältnissen S. 154. — Folgerungen S. 157.	
10. Anhang.	159
Die symbolische Methode und ihre Anwendung auf Wechselstromkreise.	

Bezeichnungen.

Lateinische Buchstaben.

A	Gesamtamperewindungen pro Pol.
AW	Amperewindungen.
AW_L	Amperewindungen, die den Fluß durch den Luftspalt treiben.
b_c	Kupferbreite.
b_n	Nutbreite.
D	Durchmesser.
D_e	Endringdurchmesser.
E	induzierte elektromotorische Kraft.
f	Frequenz des Wechselstromes.
f_w	Wickelfaktor.
F_a	maximale Amplitude des Drehfeldes.
g	Güteverhältnis des Anlaufs.
h	Leiterhöhe.
h'	reduzierte Leiterhöhe.
J	Strom.
J_s	Stabstrom.
J_e	Endringstrom.
J_μ	Magnetisierungsstrom.
J_0	Leerlaufstrom.
J_k	Kurzschlußstrom.
J_{ki}	ideeller Kurzschlußstrom.
J_n	Normalstrom.
J_{ni}	ideeller Normalstrom.
J_1	Strom im Stator.
J_2	Strom im Läufer.
i	Anlaufstrom als Vielfaches des Normalstroms.
J_a	Anlaufstrom.
j	$\sqrt{-1}$.
K	Faktor der Stromverdrängung.
l	Eisenlänge der Maschine.
l_s	Länge einer Stirnverbindung.
L_1	Streuinduktivität einer Phase der Statorwicklung.
M	Drehmoment.
M_n	normales Drehmoment.
M_a	Anlaufdrehmoment.
m	Anlaufdrehmoment als Vielfaches des normalen Drehmoments.
m	Zahl der übereinanderliegenden Leiter einer Nut.
m	Masse.
n	Zahl der Umdrehungen pro Minute.
n_0	synchrone Drehzahl.
N	Leistung.
p	Polpaarzahl.
q	Zahl der Nuten pro Pol und Phase.
q_c	Stabquerschnitt.
q_e	Endringquerschnitt.
R	Ohmscher Widerstand.
r_1	Widerstand einer Phase der Statorwicklung.
r'_2	auf die Windungszahl der Statorwicklung bezogener Widerstand einer Phase der Läuferwicklung.
r_s	Stabwiderstand.
r_e	Endringwiderstand.

r'	Widerstand des inneren Käfigs, auf die Statorwindungszahl bezogen.
r''	Widerstand des äußeren Käfigs, auf die Statorwindungszahl bezogen.
R_2	Gesamtwiderstand der Parallelschaltung beider Käfige.
r_2	Gesamtwiderstand der Parallelschaltung beider Käfige im Synchronismus.
r	Radius.
U	Spannung.
U_p	Phasenspannung.
U_v	verkettete Spannung.
V	Verluste.
w	Statorwindungszahl pro Phase.
X	Reaktanz.
x_1	Statorreaktanz.
x_2	auf die Windungszahl des Stators bezogene Rotorreaktanz.
x'	Reaktanz des inneren Käfigs, auf die Statorwindungszahl bezogen.
x''	Reaktanz des äußeren Käfigs, auf die Statorwindungszahl bezogen.
X_2	Gesamtreaktanz der Parallelschaltung beider Käfige.
x_2	Gesamtreaktanz der Parallelschaltung beider Käfige im Synchronismus.
y_a	Erregeradmittanz.
Z	Impedanz.
z	Zahl der Leiter pro Nut.
z_n	Nutzenzahl einer Maschine.

Griechische Buchstaben.

η	Wirkungsgrad.
λ_n	magnetischer Leitwert einer Nute.
λ_s	magnetischer Leitwert pro cm Stirnverbindung.
λ_d	Koeffizient der doppeltverketteten Streuung.
σ	Schlupf.
ϱ_v	Volllastschlupf.
ϱ	Reibungskoeffizient.
τ	Streufaktor.
φ	Winkel zwischen Spannung U und Strom J .
ω	Winkelgeschwindigkeit.
ω	Kreisfrequenz ($2\pi f$) bei Wechselstrom.
Φ	magnetischer Fluß.
ε	relative Streuung $\left(\frac{J_n}{J_{ki}}\right)$.

1. Einleitung.

Wie der Transformator dem Ein- und Mehrphasensystem im Wettbewerb mit dem Gleichstromsystem bei der Übertragung von elektrischer Energie auf große Entfernungen zum Siege verholfen hat, so wurde der Wettbewerb zwischen dem Einphasensystem und Drehstromsystem zugunsten des letzteren durch den Drehstrommotor entschieden. Geringe Herstellungskosten, guter Wirkungsgrad, einfache Wartung und große Betriebssicherheit waren dabei die ausschlaggebenden Faktoren. Die außerordentlich große Verbreitung der elektrischen Energieübertragung hat zu einem großen jährlichen Bedarf an Drehstrommotoren geführt, der für Deutschland allein auf etwa 600 000 Stück geschätzt werden kann. Man erkennt leicht, daß eine jede Verbesserung in der Art der Herstellung oder in den grundlegenden Eigenschaften des Motors von beträchtlicher wirtschaftlicher Bedeutung sein muß.

Zwei Arten des Drehstrommotors sind nun von allem Anfang an in Erscheinung getreten, der Drehstrommotor mit Schleifringläufer und der Drehstrommotor mit Käfiganker. Obgleich der letztere zuerst erfunden und seine günstigen Eigenschaften auch von Anfang an gewürdigt wurden, so waren aber doch seine ungünstigen Anlaufverhältnisse ein schwerer Hemmschuh für seine allgemeine Verwendung. Wir können diese ungünstigen Anlaufverhältnisse dahin kennzeichnen, daß wohl die Erzeugung eines bestimmten, von der Praxis verlangten Anlaufdrehmomentes in einfacher Weise möglich ist, daß aber dabei Ströme vom Netz entnommen werden, die den Normalstrom um ein Vielfaches übersteigen. Diese großen Anlaufströme bedingen in vielen Fällen eine Schwankung der Netzspannung und beeinflussen das Licht der an dem gleichen Stränge liegenden Kunden.

Dieser Nachteil wirkte sich im Anfange der Entwicklung des Drehstromsystems natürlich viel stärker aus, da die elektrischen Zentralen nicht groß waren und die installierten Leitungen zuerst nur für schwache Ströme dimensioniert wurden.

In dem Maße aber, in dem die Größe des Kabelquerschnittes stieg und die Leistungen der elektrischen Zentralen größer wurden, war die Möglichkeit gegeben, Motoren mit Käfiganker für eine allmählich wachsende Leistung zuzulassen. Aber diese Entwicklung ist in den verschiedenen Ländern noch sehr verschieden. Während in den Vereinigten Staaten von Amerika 95 % aller Drehstrommotoren mit Käfiganker ausgerüstet sind, ist in Europa das Verhältnis, wenn man nur Motoren von 1 PS und darüber berücksichtigt, schätzungsweise 50 %. Dabei muß freilich erwähnt werden, daß in Amerika meistens getrennte Lei-

tungen für Licht und Kraft benutzt werden, so daß dann der größere Anlaufstrom keine so schädliche Wirkung ausüben kann wie bei gemeinsamen Leitungen.

Schon kurz nach der Erfindung des normalen Drehstrommotors wurden Vorschläge gemacht, um die schlechten Anlaufverhältnisse des Drehstrommotors mit Käfiganker zu verbessern.

In einer Sitzung des elektrotechnischen Vereins Berlin im Februar 1893 machte Dolivo Dobrowolsky eine Mitteilung¹ über eine Reihe von Drehstrommotoren mit besonderem Käfigläufer, die zu dem Zwecke entworfen waren, ein hohes Anzugsmoment bei niedrigem Einschaltstrom zu erzielen. Diese Mitteilung verdient heute, nach 37 Jahren, noch unsere volle Beachtung. Es wird darin erwähnt, daß die AEG trotz der stark auseinander gehenden Ansichten über die Vorzüge und Nachteile des Drehstromes im Vergleich zum Gleichstrom seit dem Jahre 1889 den Bau des Drehstrommotors unentwegt fortgesetzt und daß hierbei der schleifringlose Drehstrommotor, also der Motor mit Käfigläufer,

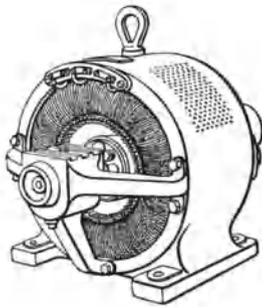


Abb. 1. Doppelnutmotor der AEG aus dem Jahre 1893.

eine besondere Beachtung gefunden habe. Dobrowolsky erklärt das Problem des Drehstrommotors mit Käfigläufer, welcher ein hohes Anzugsmoment bei kleinerem Anfahrstrom besitzt, als gelöst. Aus den der Mitteilung beigefügten Abbildungen der Maschine ersieht man deutlich, daß der Läufer 2 Käfige besitzt (siehe Abb. 1). Dobrowolsky macht des Näheren Angaben über einen 8poligen Drehstrommotor von 50 PS für 110 V und 50 Hz, welcher bei einem Einschaltstrom von 140% des normalen Stromes das der vollen Leistung entsprechende Anlaufmoment entwickelt.

Offenbar fand diese wichtige Mitteilung damals nicht die verdiente Beachtung; die bedeutsame Neuerung war der Entwicklung der Dinge vorausgeeilt. Der Drehstrommotor befand sich fast noch im Anfangsstadium seiner Entwicklung; die Leistung der elektrischen Zentralen war verhältnismäßig klein, so daß größere Drehstrommotoren mit Käfigläufer ungeachtet der von Dobrowolsky erzielten Verbesserung nicht angeschlossen werden konnten. In einer weiteren Mitteilung an die Redaktion der ETZ vom Jahre 1918² greift Dobrowolsky auf die Vereinssitzung aus dem Jahre 1893 mit der ausdrücklichen Angabe zurück, daß er sich bei dem Entwurfe jener Drehstrommotoren mit Doppelkurzschlußläufern von denselben Grundsätzen leiten ließ, welche heute wieder eine erhöhte Bedeutung gefunden haben; er erwähnt weiter, daß der Bau dieser von ihm entworfenen Drehstrommotoren um 1895 herum, jedenfalls wegen mangelnder Nachfrage, aufgegeben wurde. Es ist gewiß sehr interessant, daß Dolivo-Dobrowolsky, der den ersten Drehstrommotor mit Einfach-Käfiganker gebaut hatte,

¹ ETZ 1893, S. 185.

² ETZ 1918, S. 140.

sich sofort an die Verbesserung dieses Motors machte und auch den ersten Motor mit Doppelkäfig entwickelte. Vielleicht ist dieses Zusammenreffen zweier wichtiger Erfindungen in einer Person daran schuld, daß sich der Name Dobrowolsky-Motor nicht eingebürgert hat. Stattdessen hat sich hierfür der Name Boucherot-Motor eingebürgert. Die Elektrotechnik verdankt Boucherot viele interessante Ideen, aber irgendein Anrecht auf die Erfindung des Doppelkäfigankers kann er nicht beanspruchen.

Vom Jahre 1900 ab setzte eine eifrige Erfindertätigkeit ein, die Anlaufverhältnisse des Drehstrommotors mit Käfigläufer zu verbessern und den Anlaufvorgang des Drehstrommotors mit Schleifringläufer zu vereinfachen. Diese Erfindungen haben sich aber in den meisten Fällen in der Praxis nicht bewährt und daher keine verbreitete Anwendung gefunden.

Die Firma Schuckert & Co. baute um 1900 herum einen Drehstrommotor mit Schleifringläufer, auf dessen Welle ein Anlasser befestigt war. Die Widerstände wurden in einzelnen Stufen unter Ausnutzung der Fliehkräfte abgeschaltet.

Schon im Jahre 1891 hatte Arnold¹ das Prinzip der Gegenschaltung in der Läuferwicklung (freilich in komplizierter Form) angegeben, welches darin bestand, daß einzelne Teile dieser Wicklung während des Anlaufes gegeneinander geschaltet wurden, wobei nur die Differenz ihrer EMKe zur Auswirkung kam, während beim Lauf die einzelnen Wicklungsteile hintereinander geschaltet wurden. Dieser Gedanke wurde nach den Angaben von Görges von der Firma Siemens & Halske erweitert und in eine praktische Form gebracht². Jede einzelne der drei Phasen der Läuferwicklung bestand aus 2 Teilen, deren EMKe, je nach ihrer Anordnung in denselben oder in verschiedenen Nuten, in ihrer algebraischen oder geometrischen Differenz während des Anlaufes zur Auswirkung kamen³. Beim Laufe wurden die einzelnen Teile unmittelbar untereinander verbunden, so daß jeder Teil der Wicklung für sich wirken konnte. Die Umschaltung wurde durch einen Fliehkraftschalter erreicht, so daß zum Anlassen lediglich ein gewöhnlicher Hebelschalter benutzt werden konnte. Bei einem Motor von 30 kW bei 1000 Umdrehungen wurde bei einem 2,9fachen Vollaststrom das 1,3fache Nenn Drehmoment erreicht. Während des Anlaufes nimmt das Drehmoment zu und der Strom ab; nach der Umschaltung tritt kurzzeitig etwa der 4fache Normalstrom auf, während das Drehmoment etwa das 1,3fache beträgt. Diese Motoren sind in großer Anzahl gebaut worden, haben jedoch jetzt in ihrer ursprünglichen Ausführung an Bedeutung verloren.

Gute Anlaufverhältnisse kann man durch die Veränderlichkeit der Periodenzahlen erreichen, denn der Kraftfluß des Motors ist der Periodenzahl umgekehrt proportional. Es ergeben sich hierbei ideale Anlaufverhältnisse. Leider ist es aber nur in den seltensten Fällen möglich, die Veränderlichkeit der Periodenzahl des zugeführten Drehstromes auf wirtschaftliche Weise zu erreichen.

¹ Arnold: Wechselstromtechnik V, Bd. 1, S. 263. 1909.

² ETZ 1894, S. 646. ³ Näheres siehe Kap. 6.

Die Firma Helios brachte eine Anordnung auf den Markt, bei welcher der Läufer in axialer Richtung verschiebbar angeordnet war. Während des Anlaufes befand sich der Läufer z. T. außerhalb des Ständers, die EMKe des Läufers sind hierbei entsprechend kleiner, während der Widerstand des Läufers den vollen Wert besitzt. Diese Anordnung würde bei der heutigen Bauart der Motoren mit hoher magnetischer Beanspruchung wegen des großen Magnetisierungsstromes überhaupt nicht mehr anwendbar sein.

Eine andere Anordnung ging dahin, den Läufer, welcher eine normale Käfigwicklung aus Kupfer und eine zweite Käfigwicklung mit hohem Widerstande aus Eisen besaß, derart zu verbreitern, daß der axial verschiebbare Ständer während des Anlaufes lediglich die Eisenwicklung induzierte. Während des Anlaufvorganges wurde der Ständer allmählich verschoben, bis zum Schluß nur noch die Käfigwicklung aus Kupfer wirkte. Hierbei konnten naturgemäß sehr gute Anlaufverhältnisse erzielt werden, freilich auf Kosten einer sehr viel zu teuren und umständlichen konstruktiven Anordnung.

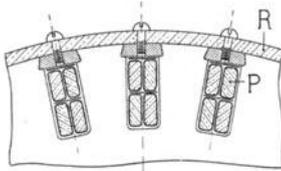


Abb. 2. Läufer mit Phasenwicklung und Widerstandsring.

Einige Anordnungen, bei denen zwei getrennte Wicklungen, eine Anlauf- und eine Laufwicklung, benutzt wurden, haben eine größere Bedeutung gewonnen. In Abb. 2 ist eine solche Anordnung wiedergegeben. Die Arbeitswicklung *P* ist dreiphasig ausgeführt; sie wird durch Keile aus Bronze oder Kupfer festgehalten, welche in Verbindung mit

einem Ring *R* aus Widerstandsmaterial zu einer Käfigwicklung ausgebildet ist. Man kann hierbei ein sehr gutes Anlaufmoment erzielen. Nach erfolgtem Anlauf wird die Arbeitswicklung kurz geschlossen, wobei ein Stromstoß auftritt, der je nach dem Entwurfe des Motors den 2 bis 4fachen Wert annehmen kann.

Nach einer patentierten Anordnung von Hans Sigismund Meyer¹ wird die Anlaufwicklung aus Eisenstäben ausgeführt, welche unterhalb der Nuten der Arbeitswicklung liegt. Die Nuten der Anlaufwicklung sind durch schmale radiale Schlitzte mit den Nuten der Arbeitswicklung verbunden. Der Kraftfluß findet hierdurch nur eine geringe Erhöhung des magnetischen Widerstandes. Die Eisenstäbe liegen ohne Isolierung fest in den Nuten und können hierdurch ungehindert ihre Wärme während des Anlaufes an die Läufermasse mit ihrer verhältnismäßig hohen Wärmekapazität abgeben.

Nach einer Anordnung von Oerlikon aus dem Jahre 1902 werden die beiden Wicklungen zu einer einzigen Wicklung, welche als Phasenwicklung ausgeführt wird und deren einzelne Stäbe mit einem Ringe *r* aus hohem Widerstandsmaterial verbunden sind, vereinigt. Nach Erreichung einer bestimmten Tourenzahl wird die Phasenwicklung kurz geschlossen (Abb. 3).

Nach einem Patent von Geist² werden zu den Stabenden parallel

¹ D. R. P. 177256 von H. S. Meyer.

² D. R. P. 141936 (1902).

geschaltete Widerstandsstreifen (Abb. 4) vorgesehen, welche durch einen Ring gehalten werden. Die Stabenden sind federnd angeordnet und legen sich unter dem Einfluß der Fliehkraft gegen einen Kurzschlußring aus gut leitendem Material. Die Kontaktfrage spielt dabei eine ausschlaggebende Rolle.

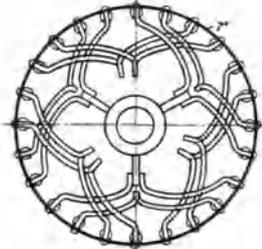


Abb. 3. Läufer mit Widerstandsstreifen von Oerlikon.

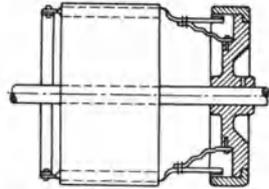


Abb. 4. Läufer mit federnden Stabenden von Geist.

Hier möge auch ein späteres Patent von Geist (D. R. P. 206 535 vom Jahre 1908) erwähnt werden, in welchem der mit zunehmender Tourenzahl steigende Luftwiderstand des Rotors benutzt wurde, um einen in Serie mit der Ankerwicklung geschalteten regelbaren Widerstand zu verstellen.

Die Elektrizitätsgesellschaft Turin verwendet einen Käfigläufer mit einem Ringe mit hohem Widerstande. Während des Anlaufes legen sich unter dem Einfluß der Fliehkraft Metallsegmente von hoher Leitfähigkeit gegen den Ring (Abb. 5 u. 6). Auch hier kann man nicht mit einem dauernd guten Kontakt der Metallsegmente mit dem Ringe rechnen.

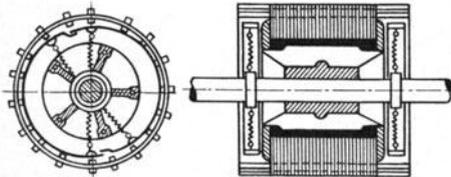


Abb. 5 und 6. Läufer mit Widerstandsring von E. G. Turin.



Abb. 7. Läufer mit pulverigem Widerstandsstoff von Thoresen.

Von Thoresen in Bvdö bei Oslo wurde ein pulverförmiger Körper als Widerstand verwandt. Unter dem Einfluß der Fliehkraft erhöht sich dessen Leitfähigkeit. Der pulverförmige Körper liegt in abgeschlossenen Kammern, in welche Metallplatten geführt sind (Abb. 7).

Die Elsässische Elektrizitätsgesellschaft in Belfort benutzt einen Läufer mit einem Hohlkörper, in welchem sich eine leitende Flüssigkeit befindet. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit werden durch die Flüssigkeit Kontakte überbrückt, wodurch ein bis dahin wirksamer Widerstand kurzgeschlossen wird.

Dovis-Kosmos, London, benutzt den Eisenkörper des Läufers selbst für den Anlauf. Die Phasenwicklung wird bei einer bestimmten Umdrehungszahl kurzgeschlossen.

Im Jahre 1910 brachte die Firma Oerlikon nach Angaben von Fischer-Hinnen einen Motor auf den Markt, wobei hohle Kupferstäbe von hohem Widerstande verwandt wurden. Während des Anlaufvorganges wurden in diese Kupferstäbe federnde Kupferstreifen gedrückt, so daß der Widerstand allmählich verringert wurde (Abb. 8). Es konnte hierdurch eine gleichmäßige Verringerung des Widerstandes und ein stromstoßfreier Anlauf erzielt werden.

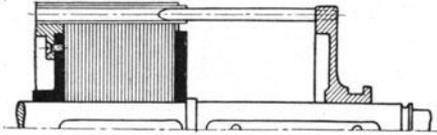


Abb. 8. Läufer mit hohlen Stäben aus dem Jahre 1910 von Oerlikon.

Von großer theoretischer und praktischer Bedeutung sind die Arbeiten von Boucherot. Seine Vorschläge zur Verbesserung des Anlaufes von Drehstrommotoren mit Käfiganker sind unter dem Namen „Boucherot-Motor α , β und γ “ bekannt geworden¹. Der Vorschlag α ist identisch mit der schon früher gemachten und früher veröffentlichten Erfindung von Dobrowolsky und wird in Kap. 3 ausführlich behandelt. Die Änderungen, die durch Boucherot hinzugekommen sind, können nach dem heutigen Stande der Elektrotechnik nicht als wesentlich angesehen werden. Es muß aber zugunsten von Boucherot angegeben werden, daß die Fabrikation der von ihm entwickelten Motoren durch die Firma Bréguet niemals aufgegeben worden ist.

Nach dem Vorschlag α besitzt der Läufer zwei übereinander angeordnete Käfigwicklungen K_1 und K_2 (Abb. 9). Die äußere Wick-

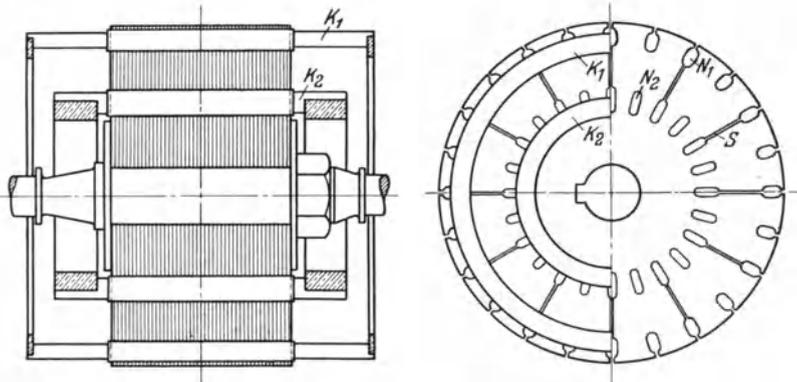


Abb. 9. Läufer mit zwei Käfigwicklungen von Boucherot.

lung K_1 besitzt einen hohen Widerstand und eine kleine Reaktanz, während umgekehrt die innere Wicklung K_2 einen kleinen Widerstand und eine hohe Reaktanz besitzt. Zwischen den oberen und unteren Nuten N_1 und N_2 sind teilweise oder auch überall Schlitzte S angebracht zu dem Zwecke, den magnetischen Widerstand zwischen den Nuten N_1 und N_2 derart zu erhöhen, daß nur ein kleiner Teil des Läuferkraft-

¹ Arnold: Wechselstromtechnik V, Bd. 1, S. 250; Bulletin de la Soc. Int. des El. 1898.

flusses oberhalb der Nuten N_2 verläuft. Jede Wicklung übt während der ganzen Anlaufperiode für sich ein Drehmoment aus, welches in Abhängigkeit von der Tourenzahl eine stetige Änderung erfährt. Die beiden Drehmomente setzen sich zu einem gemeinsamen Drehmomente zusammen. Die Drehmomentenkurve jeder einzelnen Wicklung läßt sich je nach dem Widerstand und der Reaktanz in weiten Grenzen ändern. Diese Verhältnisse werden in einem späteren Abschnitte noch eingehend behandelt werden.

Nach einer anderen Anlaßmethode von Boucherot (Vorschlag β) wurde der Ständer in zwei Teile S_1 und S_2 zerlegt, von denen der eine um eine Polteilung drehbar gelagert war (Abb. 10). Die beiden Läufer R_1 und R_2 haben eine gemeinsame Wicklung mit den beiden äußeren Kurzschlußringen K_1 und K_2 aus Kupfer und einem in der Mitte gelegenen Ring N aus Widerstandsmaterial. Beim Anlauf ist der bewegliche Ständer derart gelagert, daß seine Wicklung gegen diejenige des festen Ständers um eine Polteilung verschoben ist. Infolgedessen sind die Ströme in den Stäben der Läufer R_1 und R_2 entgegengesetzt gerichtet, so daß sie ihren Weg über den Widerstandsring N nehmen müssen. Es wird hierdurch ein hohes Anfahrmoment erreicht. Während des Anlaufvorganges wird der bewegliche Ständer allmählich zurückgedreht, so daß die räumliche Verlagerung der beiden Drehfelder in S_1 und S_2 geringer wird. Die Ströme in R_1 und R_2 erhalten eine geringere gegenseitige Verschiebung, so daß ein Teil der Ströme seinen Weg direkt über die beiden Ringe K_1 und K_2 und ein anderer Teil über den Widerstandsring N findet. Bei Beendigung des Anlaufvorganges befinden sich die beiden Wicklungen von S_1 und S_2 genau in derselben räumlichen Lage. Die EMKe in den Läuferstäben von R_1 und R_2 sind gleichgerichtet, die Ströme schließen sich hauptsächlich über die Ringe K_1 und K_2 , während der Widerstandsring N praktisch stromlos geworden ist. Die Statorwicklungen können parallel und hintereinander geschaltet sein. Boucherot gibt als zweckmäßig an, die Wicklung hintereinander zu schalten, damit man in der Lage sei, vorübergehend ein größeres Drehmoment durch Parallelschaltung der beiden Statorwicklungen zu erhalten; es wird hierbei für einen Motor von 8 PS, 110 V, 38 Amp. 1200 Umdrehungen p. M. angegeben, daß bei Hintereinanderschaltung ein Drehmoment von 9,5 mkg bei 70 Amp. und bei Parallelschaltung ein Drehmoment von 15 mkg bei 120 Amp. erzielt wurde.

Die beiden Drehfelder können, ebenfalls nach einem Vorschlage von Boucherot (Vorschlag γ)¹, mit Hilfe eines Drehtransformators gegeneinander in der gleichen Weise wie durch die Drehung eines der

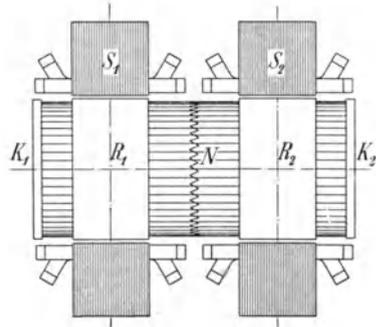


Abb. 10. Motor mit geteiltem Stator von Boucherot.

¹ D. R. P. 100543.

beiden Ständer S_1 oder S_2 verschoben werden, wenn die sekundäre Wicklung des Transformators drehbar gelagert ist (Abb. 11). In der gezeichneten Stellung sind die EMKE entsprechender Phasen um 180° verschoben. Durch allmähliche Drehung des sekundären Teiles wird der Winkel gleichmäßig bis auf Null verringert. Der Anlaufvorgang vollzieht sich also grundsätzlich in derselben Weise wie bei der Anordnung mit einem drehbar gelagerten Ständer. Nach Beendigung des Anlaufvorganges wird der Anlaßtransformator vom Netz abgeschaltet.

Mit Hilfe eines solchen Anlaßtransformators können mehrere Motoren gleichzeitig oder auch nacheinander eingeschaltet werden; auch kann eine Fernschaltung hierdurch erfolgen. Diesen Vorteilen steht als Nachteil eine Verteuerung des Motors gegenüber, was eine allgemeine Anwendung verhindert hat.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat durch polumschaltbare Motoren gute Anlaufverhältnisse erreicht. Diese Motoren wurden meistens mit

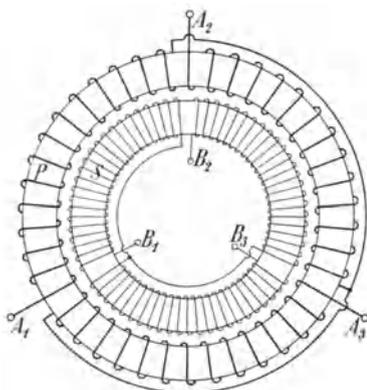


Abb. 11. Boucherot-Anlaßphasentransformator.

2 getrennten Wicklungen für je 2 verschiedene Polzahlen ausgeführt, so daß man 4 Schaltstufen mit 4 verschiedenen synchronen Umdrehungszahlen erhielt: z. B. 500, 750, 1000 und 1500 Umdrehungen pro Minute. Bei den geringen Drehzahlen ist die Streuung groß und der Kurzschlußstrom gering. Diese Motoren werden naturgemäß sehr teuer und dürften nur dort am Platze sein, wo man zugleich von der Regulierfähigkeit der Umdrehungszahlen Gebrauch machen will. Die Motoren haben daher auch, soweit es sich lediglich um die Verbesserung der Anlaufverhältnisse handelte, keine größere Anwendung gefunden.

Günstiger liegen die Verhältnisse, wenn ein und dieselbe Wicklung auf eine zweite, doppelt so große Polzahl umgeschaltet wird, und wenn nach einem Vorschlage von Hunt¹ der Widerstand des Kurzschlußankers für die beiden Polzahlen dadurch wesentlich verschieden gemacht wird, daß auf jeder Seite ein oder mehrere zusätzliche Endringe vorgesehen werden, in denen bei der größeren Polzahl kein Strom fließt, wohl aber bei kleiner Polzahl. Dies wird dadurch erreicht, daß der zusätzliche Endring nur an $2p$ Stellen mit dem normalen Endring verbunden ist. Diese $2p$ Punkte haben bei der Umschaltung auf $4p$ Pole gleiches Potential, weil sie dann um je 2 Polteilungen entfernt sind; bei der normalen Polzahl sind es aber Punkte maximaler Spannungsdifferenz. Die Benutzung von 2 oder 3 zusätzlichen Endringen auf jeder Seite ist erwünscht, weil sonst der Durchgang durch die halbe synchrone Tourenzahl infolge der einachsigen Unsymmetrie erschwert wird.

¹ Unabhängig von Hunt, aber zeitlich später hatte Hobart den gleichen Vorschlag gemacht.

Der Hauptnachteil dieser an und für sich eleganten Methode besteht darin, daß die Umschaltung schon unterhalb der Hälfte der synchronen Tourenzahl vorgenommen werden muß.

An dieser Stelle mag auch der Vorschlag erwähnt werden, die Vergrößerung des Rotorwiderstandes durch Erwärmung während des Anlaufes zu erreichen. Im ersten Augenblicke des Einschaltens ist hierbei der Anlaufstrom gleich dem vollen Kurzschlußstrom, welcher daher durch einen Transformator auf einen zulässigen Wert reduziert werden muß. Die Temperatursteigerung der kleinen Masse des Rotorkupfers geschieht so schnell, daß der Widerstand sich 30 bis 35% erhöht, bevor die Tourenzahl des Motors wesentlich angestiegen ist. Bei geeigneter Kühlung der Rotorstäbe wird die Temperatur bei voller Tourenzahl wieder reduziert. Diese Methode wurde für die Simplon-Lokomotive in Verbindung mit polumschaltbaren Motoren angewandt.

Das Anwendungsgebiet der erwähnten Ideen war sehr beschränkt geblieben, teils weil die Ausführung zu teuer, teils weil die richtige Anwendungsweise noch nicht klar erkannt wurde. Aus diesem Grunde mußte eine Anordnung Beachtung finden, die sich durch große Einfachheit von den übrigen Vorschlägen auszeichnete, nämlich die Benutzung des Wirbelstromprinzips im Bau des Käfigankers. Da die Periodenzahl in den Rotorstäben im Anlauf groß, im normalen Lauf aber klein ist, und da schon vor der Erfindung des Drehstrommotors bekannt war, daß die Verluste durch Skinneffekt in hohem Maße von der Periodenzahl abhängen, so war eigentlich die Benutzung des Wirbelstromprinzips im Bau der Käfiganker als naheliegend zu bezeichnen. Die erste Patentanmeldung stammt von H. M. Hobart¹, der die Verwendung von eisernen Endringen mit großen Querschnitten vorschlug. Auf Anregung Hobarts hatte Hopps schon 1899 Versuche mit eisernen Leitern von verhältnismäßig großem Querschnitt in Serie mit Schleifringmotoren gemacht, aus denen hervorging, daß die Skinwirkung um so größer war, je größer der Querschnitt des Eisenstabes war. Auch die Wirksamkeit von tiefen Nuten zum Zwecke der Erhöhung des Skinneffektes wurde schon frühzeitig² von Hobart erkannt, der übrigens in zahlreichen Veröffentlichungen für die verstärkte Benutzung des Käfigankers gegenüber dem Schleifringanker eingetreten ist.

Bei Motoren für 60 Hz und einer Leiterhöhe von 25 mm fand Hobart auf experimentellem Wege eine Vergrößerung des Widerstandes auf das 3,1fache, welche Zahl sich durch den Einfluß der Endringe (falls in ihnen keine Wirbelstromwirkung vorgesehen wurde) auf etwa 2 bis 2,5 reduzierte. Da dieser Koeffizient der Leiterhöhe nahezu proportional war, so war damit das Prinzip des Wirbelstromläufers klar erkannt.

Eine Verbesserung des reinen Wirbelstromläufers schlug Kierstaedt 1916 vor³, indem er nachwies, daß sich durch Unterteilung des Leiters bei großen Leiterhöhen Vorteile ergeben können, wenn dafür gesorgt wird, daß der Strom in den Teileitern gleich gehalten wird (z. B. durch Benutzung verdrehter Stäbe). Dieser Vorschlag wird in Kap. 5 besonders

¹ Engl. Patent N. 84761 (1900).

² General El. Review 1912, Juni.

³ Am. Patent 1188182.

behandelt. In Deutschland veröffentlichte zwei Jahre später Rüdénberg¹ einen interessanten Artikel über asynchrone Motoren mit Selbstanlauf durch tertiäre Wirbelströme, worin sowohl der reine Wirbelstromläufer als auch die Verbesserung nach Kierstaedt² behandelt und Versuchsergebnisse von Motoren, die nach seinen Ideen bei SSW gebaut worden waren, wiedergegeben wurden. Rüdénberg erkannte, daß sich der Wirbelstromläufer ganz vorzüglich für reversierbare Motoren eignete.

Auf der Essener Ausstellung im Jahre 1921 begegnen wir mehreren Ausführungsarten von Motoren mit verbessertem Anlauf, die in der Praxis zur Bedeutung gelangt sind und einen merkbaren Anstoß für andere Firmen gebildet haben, sich auch auf diesem Gebiete zu betätigen. Wir sehen von da ab ununterbrochen neue Lösungen auf dem Markte erscheinen.

Von einem der Verfasser wurde 1919 ein Motor entwickelt, der als Verbesserung der Anordnung nach H. S. Meyer angesehen werden kann. Der Rotor besitzt für den Anlauf einen Käfig aus Eisenstäben, die in einer besonderen Vertiefung der Nuten ohne jede Isolierung fest eingepreßt sind. Die eisernen Endplatten dienen als Kurzschlußbringe. Der Skineneffekt ist hoch gehalten, um einen hohen Widerstand während des Anlaufes zu erzielen. Die Anzahl der Eisenstäbe betrug die Hälfte, resp. ein Drittel der Rotornutenzahl, um die doppelt verkettete Streuung während des Anlaufens zu vergrößern. In dem übrigen Teil der Nuten ist eine gewöhnliche Phasenwicklung untergebracht, die erst nach erfolgtem Anlauf kurzgeschlossen wird. Bei Einschaltung des Motors arbeitet also nur die eiserne Käfigwicklung, wobei bei einem 1,4 bis 1,7fachen Anlaßstrom das volle Drehmoment entwickelt wird.

Der Motor wird sich bei halbem Gegendrehmoment sehr rasch beschleunigen, aber mit Rücksicht auf den hohen Ohmschen Widerstand der Käfigwicklung je nach dem Gegendrehmoment 80 bis 90% der normalen Umdrehungszahl nicht übersteigen. Beim Kurzschließen der Phasenwicklung tritt daher ein zweiter Stromstoß auf, der etwa den 1,8fachen Normalwert besitzt, jedoch sehr schnell abklingt, da der Motor hierbei weit mehr als das Normaldrehmoment entwickelt. Dieser Stromstoß kann daher als zulässig angesehen werden. Der Motor ist in Kap. 6 ausführlich behandelt.

Die von Boucherot angegebene Anlaßmethode, bei welcher der eine der beiden Teile des Ständers drehbar gelagert war, wurde von Bruncken in höchst interessanter Weise ausgebaut und dabei wesentlich vereinfacht.

Die Neuerung erstreckte sich darauf, daß statt der Drehung des Stators eine neue Schaltung der beiden Statorwicklungen vorgenommen wird, die praktisch die gleichen Anlaufverhältnisse ergeben wie bei einem Drehstrommotor mit Schleifringläufer. Dabei werden normale Wicklungen ohne Anzapfung für die beiden Statoren benutzt. In Kap. 7 ist der Motor ausführlich beschrieben.

¹ ETZ 1918, H. 50 u. 51.

² Das amerikanische Patent Kierstaedts war ihm noch nicht bekannt geworden.

Eine konstruktiv höchst einfache Anordnung zur Verbesserung der Anlaufverhältnisse eines sonst ganz normalen Motors mit Käfigläufer führt die Firma Ziehl-Abegg nach den Angaben des Erfinders Arutünoff aus¹. Der Läuferring wird in Abhängigkeit von der Polzahl und Stabzahl an ganz bestimmten Stellen aufgeschlitzt, derart, daß ein Teil des Ringes noch vom Strom durchflossen wird. In der Abb. 12 wird gezeigt, wie bei einem 4poligen Motor das Aufschneiden der Ringe grundsätzlich erfolgt. Hierbei ist pro Pol ein Stab angenommen. Bei einer größeren Anzahl von Stäben erhöht sich die Anzahl der Unterbrechungsstellen in den Ringen, wie aus der Abb. 13 hervorgeht.

Die Aufschneidung ist keilförmig ausgeführt. Während des Anlaufes legen sich unter dem Einfluß der Fliehkraft genau eingepaßte keilförmige, durch Hartbleistücke beschwerte kupferne Kontaktklötze, welche durch

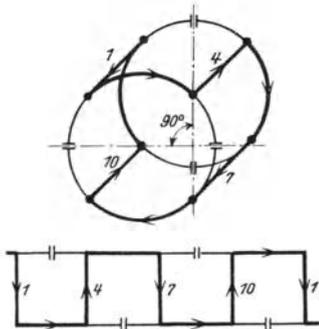


Abb. 12. Aufschneidung der Läuferringe nach Arutünoff.

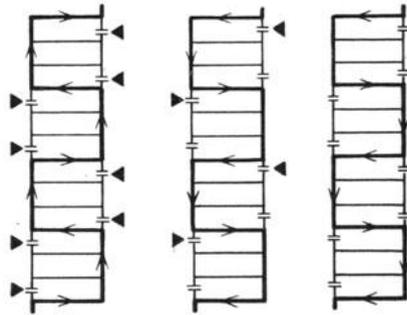


Abb. 13. Schaltung der Läuferstäbe nach Arutünoff.

kleine Gegenfedern im Ruhezustande und im ersten Teile des Anlaufes von den Ringen entfernt gehalten werden, in die Aussparungen derselben. Die Federn können auch in verschiedener Stärke ausgeführt werden. Der Anpressungsdruck der Kontaktklötze und damit die Kontaktgebung steigt nach Überwindung der Gegenfederkraft im quadratischen Verhältnisse der Umdrehungszahl.

Um jeder Verschmutzung, welche die Kontaktgebung ernstlich gefährden würde, vorzubeugen, werden die Ringe mit den Kontaktklötzen vollständig gekapselt.

Durch die Aufschneidung der Ringe wird bewirkt, daß im Augenblicke des Einschaltens nur ein Teil der Stäbe und der Ringe wirksam ist. Der Läuferwiderstand und mithin auch das Anzugsmoment werden größer, während der Anlaufstrom sinkt. Da durch die verschieden starke Gegenfederung die Kontaktklötze bei verschiedenen Umdrehungszahlen die Unterbrechungsstelle überbrücken und der Druck der Klötze und damit die Verminderung des Übergangswiderstandes etwa im quadratischen Verhältnisse des Anstiegs der Umdrehungszahl steigt, so tritt während des Anlaufes eine allmähliche Verminderung des Läuferwiderstandes ein, so daß der Motor fast stromstoßfrei auf die normale Umdrehungszahl gelangt.

¹ ETZ 1922, S. 723.

Der Motor wird direkt mit voller Spannung eingeschaltet, es wird mithin nur ein einfacher Hebelschalter benutzt. Der Anlaßvorgang ist demgemäß schalttechnisch denkbar einfach. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß z. B. bei einem Motor für 3,0 PS das 1,0 bis 1,2fache Normaldrehmoment bei einem 2,0 bis 2,2fachen Anlaufstrom erreicht wurde, und daß bei diesem Drehmoment der Motor die volle Tourenzahl erreichte.

Die Kontaktgebung spielt naturgemäß eine große Rolle, da es sich um verhältnismäßig sehr hohe Ströme in den Läuferstäben handelt. Die hier auftretenden Schwierigkeiten können noch nicht als überwunden gelten.

Einen von anderen Firmen gänzlich abweichenden Weg haben die Bayerischen Elektrizitätswerke Landshut i. B. beschritten. Der Läufer

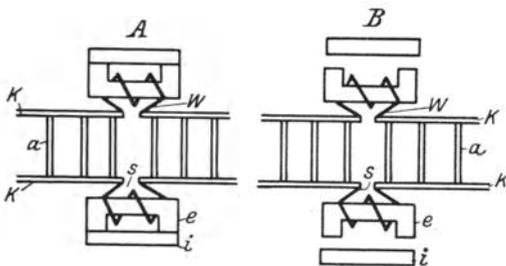


Abb. 14. Läuferschaltung nach BEW.

besitzt grundsätzlich eine einfache Käfigwicklung, in deren Stromkreis jedoch während des Anlaufes zwecks Erhöhung der Impedanz Drosselspulen eingeschaltet sind. Diese sind an der Trennstelle *s* eines oder beider Kurzschlußringe *K* des Arbeitskäfigs angeordnet und können dadurch eingeschaltet werden, daß abhebbare Eisenschlußteile *i*, im Verein mit den Teilen *e* geschlossene, magnetische Kreise der zusätzlichen Läuferimpedanz bilden, wie dies Stellung *A* (Abb. 14) zeigt.

Bei Lauf werden die Teile *i*, wie Stellung *B* zeigt, von den Teilen *e* abgehoben, wodurch Läuferstreuung und $\cos \varphi$ auf die bei normalen Schleifringanker-Motoren üblichen Werte gebracht werden.

Abb. 15 stellt den auseinandergebauten Rotor dar. Wie ersichtlich, besteht hier ein Kurzschlußring aus einzelnen Teilen, so daß die in Abb. 14 angedeuteten Schlitze *s* gebildet werden, die von zusätzlichen Impedanzen *W* überbrückt werden. Letztere setzen sich aus einem Hilfseisenkern, den abhebbaren Eisenschlußteilen und aus den elektrischen Strombahnen der zusätzlichen Impedanz zusammen. Diese wird von den in den Hilfskern eingebauten Stäben und einem Kurzschlußring gebildet, der sich an der Außenfläche des Hilfskernes befindet.

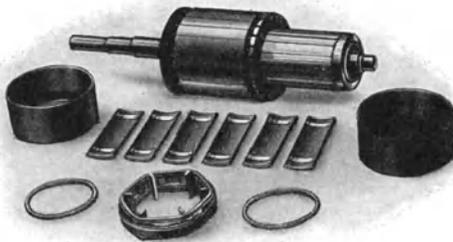


Abb. 15. Läufer eines BEW-Motors, auseinandergenommen.

tere setzen sich aus einem Hilfseisenkern, den abhebbaren Eisenschlußteilen und aus den elektrischen Strombahnen der zusätzlichen Impedanz zusammen. Diese wird von den in den Hilfskern eingebauten Stäben und einem Kurzschlußring gebildet, der sich an der Außenfläche des Hilfskernes befindet.

Die Eisenschlußteile, die bei Stillstand durch zwei Ringfedern auf den Hilfskern aufgedrückt werden, legen sich beim Lauf gegen die Innenfläche des Bronzesternes, der über den Hilfskern der zusätzlichen Impedanz geschoben und dort in seiner Lage festgehalten wird. Auf Stegen des Bronzesternes sind zwei weitere Ringfedern mit Vorspannung aufgebracht. Sie dienen der elastischen Abfederung der Stöße, welche beim Nachaußenschleudern der Eisenschlußteile durch Fliehkraft auftreten. Die zwei Schutzkappen befinden sich an den Außenseiten der Abbildung.

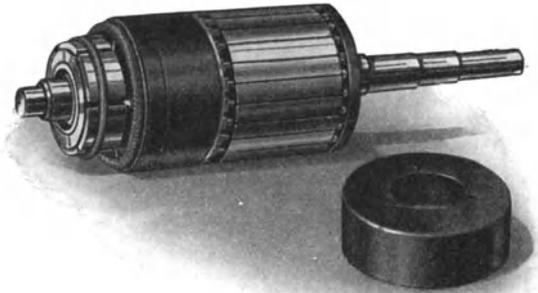


Abb. 16. Läufer eines BEW-Motors, zusammengebaut.

Abb. 16 zeigt den Läufer in zusammengebautem Zustand. Die vordere Schutzkappe ist abgenommen, um den Aufbau erkennen zu können.

Abb. 17 zeigt den fertigen Motor mit den zum Schutz gegen Berührung der bewegten und spannungsführenden Teile ausgebildeten Lagerschildern, wie er für Industrie, Landwirtschaft und Gewerbe hergestellt wird. Da der Motor in normaler Ausführung Rollen- und Kugellager besitzt, so beansprucht er praktisch keinerlei Wartung.

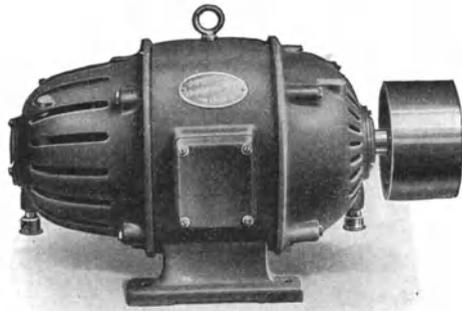


Abb. 17. Motor der BEW.

Der Anlaufstrom bei direkter Einschaltung hält sich in zulässigen Grenzen und die Dauer desselben gewährleistet eine normale Absicherung. Der Motor kann damit in wirksamer Weise und ohne besondere Hilfsmittel gegen Überlastung und Motorschäden geschützt werden.

Abb. 18 zeigt ein Oszillogramm eines solchen 4poligen Selbstanlaufmotors von 4 PS-Leistung. Bei einem Anlaufspitzenstrom gleich dem 2,4fachen Nennstrom wird ein kräftiges Drehmoment erzeugt, das während der Anlaufdauer nahezu gleichmäßig verläuft und im Mittel dem 1,2fachen Nenndrehmoment entspricht.

Die Abb. 19 zeigt die oszillographische Aufnahme des Anlaufstromes eines normalen 4poligen Schleifringankermotors, welcher unzulässige Stromspitzen enthält, die naturgemäß aber nur durch eine ungeeignete Betätigung des Anlagers auftreten konnten. Das Bild ist insofern lehr-

reich, als es zeigt, daß der Bedienende bei fehlerhafter Handhabung des Anlassers Stromspitzen hervorruft, die weit über das zulässige Maß hinausgehen und empfindliche Lichtstörungen hervorrufen können.

Die Abb. 20 gibt die von der Firma veröffentlichten Belastungskurven eines 4 PS-Motors für 220 V wieder. Die Wirkungsgrad- und Leistungsfaktorkurve sind günstiger als die eines gleich großen Schleifringmotors.

Der Motor besitzt keinerlei Kontakte, keine Schleifringe und dieselbe Betriebssicherheit wie ein normaler Käfigläufermotor. Die Installation

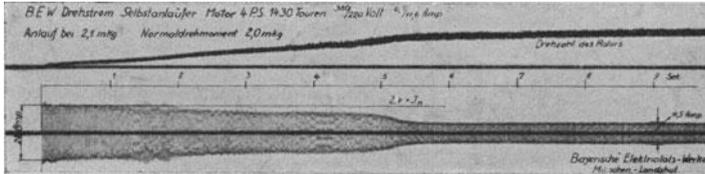


Abb. 18. Anlaufstrom und Drehzahl des Motors der BEW.

erstreckt sich nur auf den Anschluß dreier Zuleitungen über einen gewöhnlichen Hebelschalter.

Die eben beschriebene Idee hat einen Vorläufer in dem Patente Zani Nr. 105986 vom Jahre 1899. Zani benutzte keinen Käfiganker, sondern einen gewickelten Rotor mit in Serie geschalteter Impedanz, bestehend aus einem rein Ohmschen Widerstand und parallel geschalteter Drosselspule, deren magnetischer Widerstand im Anlauf klein war, bei Erreichung einer gewissen Tourenzahl aber stark vergrößert wurde.

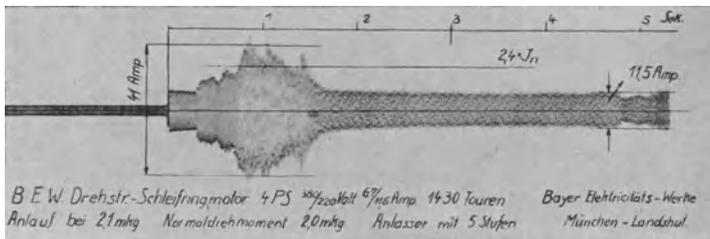


Abb. 19. Anlaufstrom eines normalen Schleifringmotors mit Handanlasser.

Abb. 21 bis 23 zeigen die Idee schematisch. In Abb. 21 stellt W die Läuferwicklung, R den Ohmschen Widerstand und D die Drosselspule dar. Letztere ist in Abb. 22 mit geringem magnetischen Widerstand dargestellt, die Segmente ϱ entfernen sich bei einer bestimmten Tourenzahl unter dem Einfluß der Zentrifugalkräfte und werden unterhalb dieser Tourenzahl durch Federkräfte an den Kern K angedrückt. D hat einen verhältnismäßig kleinen Ohmschen Widerstand. Die hohe Periodenzahl beim Anlauf in Verbindung mit dem geringen magnetischen Widerstand bewirken, daß durch D verhältnismäßig wenig, durch R aber viel Strom fließt, so daß also beim Anlauf ein großer Widerstand vorhanden ist,

beim Laufe ein kleiner. Ausführliche Angaben über diesen Motor findet man in Hobart: *Electric Motors, Polyphase Currents*, S. 61 bis 67.

Eine wichtige Stellung nehmen die Fliehkraftanlasser ein, die heute zu einer großen Vollkommenheit ausgebildet worden sind. Die Fliehkraftanlasser arbeiten entweder derart, daß der ganze Anlaßvorgang ausschließlich durch den Anlasser allein, wie bei einem normalen Schleifringmotor bewirkt wird, oder zusammen mit einem anderen Anlaufdrehmoment, welches durch irgendein besonderes Hilfsmittel, z. B. durch eine außer der Phasenwicklung noch vorhandene Käfigwicklung von besonderen Eigenschaften, hervorgerufen wird.

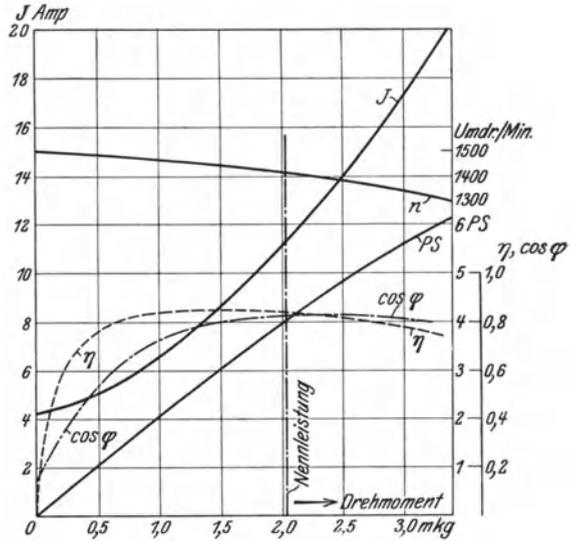


Abb. 20. Betriebskurven des Motors der BEW.

Die Methode des Anlassens von Drehstrommotoren mit phasengewickeltem Läufer und eingebauten Fliehkraftanlassern wurde zuerst

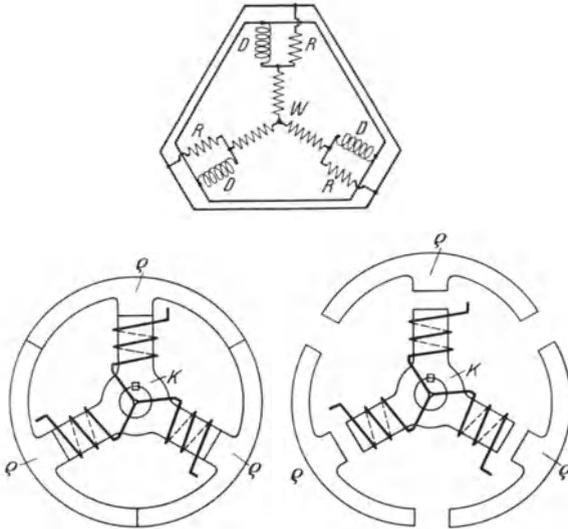


Abb. 21 bis 23. Anordnung von Zani.

von Dunker im Jahre 1901¹ angegeben. Ein solcher Motor, von den Bismarckwerken in Bergerhof nach Angabe von Dunker gebaut, wurde

¹ D. R. P. 141007.

im Jahre 1902 auf der Düsseldorfer Ausstellung zum ersten Male durchgeführt.

Die Abb. 24 zeigt einen nach Dunker gebauten Drehstrommotor mit phasengewickeltem Läufer und eingebautem Fliehkraftanlasser.

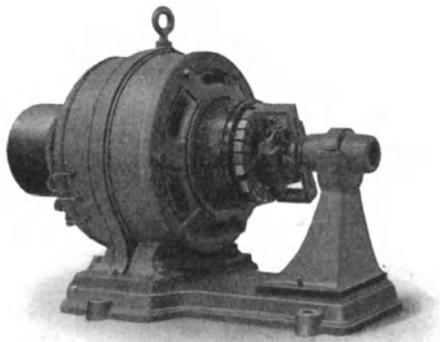


Abb. 24. Motor mit Phasenläufer und mit Dunkeranlasser.

Der bewegliche Teil des Anlasses ist mit dem um die Welle drehbaren rechteckigen Rahmen eines Fliehkraftreglers fest verbunden, während die Schwunggewichte derart an der Welle befestigt sind, daß bei Bewegung der Gewichte nach außen zugleich eine Verdrehung des Reglers auf der Welle stattfindet.

Der Bau dieser Motoren wurde von der Firma T. F. Dunker & Co. weiter entwickelt und zu hoher Blüte gebracht.

Dunker wollte die Vorteile des Kurzschlußmotors mit denjenigen der Schleifringmotoren verbinden und Schleifringssysteme vermeiden. Es wurden zwei Konstruktionen herausgebracht, einmal in Anlehnung an Vorbilder ein Läufer, der außer einer isolierten Anlaufkurzschlußwicklung eine Phasenwicklung besaß, die stufenweise zugeschaltet wurde; ferner die oben erwähnte Ausführung mit ganz normalem Phasenläufer und einem an Stelle der Schleifringe montierten, rotierenden Anlasser, dessen einzelne Stufen durch einen Fliehkraftregler geschaltet werden. Bei entsprechender Anpassung der Schaltvorgänge an die für die Abschaltung der Widerstände nötigen Tourenzahlen ließ sich ein einwandfreies Arbeiten erzielen.

Abb. 25 zeigt die mittels eines Oszillographen an einem 40-PS-Dunker-Motor aufgenommenen Anlaufströme.

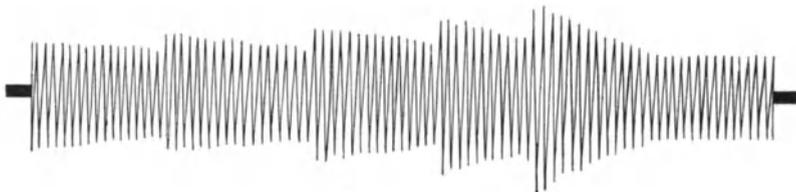


Abb. 25. Anlaufstrom eines 40-PS-Motors mit Dunkeranlasser.

Mit der zunehmenden Entwicklung der Läufer als Stabläufer für hohe Ströme erfuhr auch der Dunker-Selbstanlasser viele Änderungen, indem er sich von der Ausführung mit Schleifkontakten über Rastenschaltungen zur Momentschaltung entwickelte. Erst hierdurch war es möglich, größere Leistungen (bis über 500 PS) gut arbeitend zu liefern. Derartige Ausführungen von 5 kW bis 400 kW arbeiten für

alle Betriebszwecke, wo keine Tourenregulierung in Frage kommt, auch für Aufzüge, Kompressoren, Transmissionen, Pumpen, Bergwerksanlagen, Werkzeugmaschinen, Umformer und für landwirtschaftliche

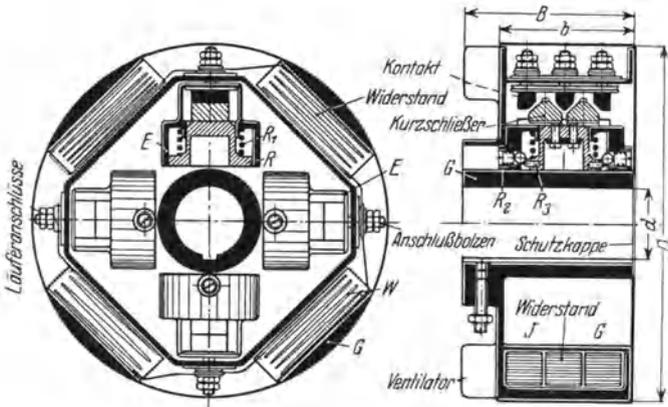


Abb. 26. Konstruktion des Dunkeranlassers.

Motoren. Das Elektrizitätswerk Bremen schaltet einen 200-kW-Umformer für Ladestationen automatisch mit Druckknopfschalter von der Hauptverteilung ein und aus.

Die Anlasser werden vollkommen gekapselt ausgeführt. Aus den folgenden 4 Bildern geht die Anordnung und die Einzelkonstruktion der Dunkerschen Fliehkraftanlasser hervor. In einem Gehäuse *G*, Abb. 26, befinden sich Schaltelemente *E*, welche mit Widerstandstufen *W* verbunden sind. Bei der letzten Schaltstufe sind die Kopfschrauben für die Läuferanschlüsse sichtbar. In dem Schaltelement jeder Schaltstufe wird ein Reglerpendel *R* durch eine Hauptfeder *R*₁ in Ruhelage gehalten. Zurückgehalten wird das Reglerpendel außerdem durch die Stahlrastenstifte *R*₃, die durch Federn *R*₂ und Kugeln oder Spitzen gebremst werden. Die Kontakte der 3 Phasen werden durch auf das Reglerpendel aufgesetzte „Kurzschließer“ nach Überwindung der Federsperrungen momentan geschlossen. Die Momentwirkung entsteht

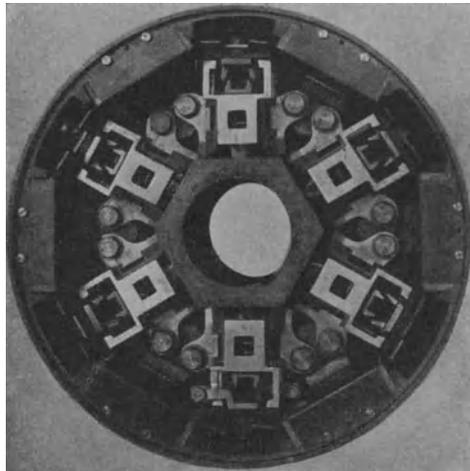


Abb. 27. Schaltmechanismus des Dunkeranlassers.

dadurch, daß die Hauptfeder durch die Rastenanordnung außer Wirkung gesetzt wird und im wesentlichen nur zur Zurückbringung des Reglerpendels bei Stillsetzung des Motors dient. Der Anlasser kann sich erst selbst ausschalten, wenn der Motor über die Kippgrenze hinaus belastet wird. Die Konstantanbandwiderstände liegen in Steatitvierkantrohren und sind auswechselbar.

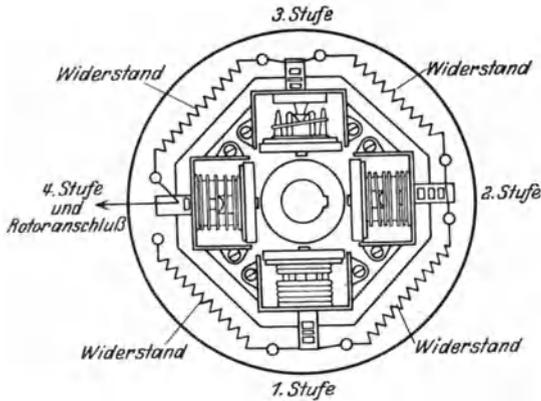


Abb. 28. Darstellung der Stufenfolge beim Dunkeranlasser.

Abb. 27 zeigt eine Photographie des Schaltmechanismus, Abb. 28 in schematischer Darstellung die Stufenfolge und Abb. 29 einen Stabläufer mit Dunker-Anlasser, bei dem die Anschlüsse offen gelassen wurden.

Der Bau von Drehstrommotoren mit Fliehkraftanlassern ist von vielen Firmen in den letzten

Jahren mit Erfolg aufgenommen worden. Von größter Wichtigkeit ist hierbei die Ausbildung des Fliehkraftanlassers, der insbesondere 2 Bedingungen genügen muß. Es dürfen keine Hemmungen während der Einschaltperiode auftreten, wie sie bei unvollkommener Anordnung leicht durch Schmelzperlen entstehen können, welche in weiterer Folge die Kontaktgebung gefährden würden. Außerdem muß dafür gesorgt



Abb. 29. Abbildung eines Läufers mit Dunker-Anlasser.

werden, daß bei starker Belastung und entsprechend großem Schlupfe eine Sperrung verhindert, daß ein vorzeitiges Abschalten eintritt, wodurch die Anlaßwiderstände durch zu große Stromwärme leiden und unter Umständen unbrauchbar werden würden.

Eine sehr gute Konstruktion hat die Firma BBC auf den Markt gebracht. Aus den beiden Abbildungen (Abb. 30 und 31) erkennt man die Anordnung des Fliehkraftschalters für einen Motor von 4 PS. Es sind im ganzen $3 \times 3 = 9$ Kontaktstellen vorhanden, welche durch Kontaktsteller bei bestimmten Umdrehungszahlen plötzlich kurzgeschlossen

werden. Es liegt demnach auch hier, wie bei dem Dunker-Anlasser, Momentschaltung vor, womit die Gefahr des Hängenbleibens der Kontakte während des Anlaufes vermieden ist. Die beiden von BBC selbst aufgenommenen Oszillogramme zeigen in den Abbildungen (Abb. 32 und 33) den Stromverlauf beim Anlaßvorgang mit einem in ungeeigneter Weise bespannten Handanlasser und mit einem Fliehkraftanlasser. Das erstere Bild ist deshalb von Bedeutung, weil man erkennt, daß selbst bei den vorgesehenen 5 Stufen unzulässige Stromspitzen, welche den 4fachen Wert des normalen Stromes betragen, auftreten können. Diese Stromspitzen können natürlich auch bei einem richtig bespannten Anlasser auftreten, wenn der Bediende den Anlasser in ungeeigneter Weise betätigt.

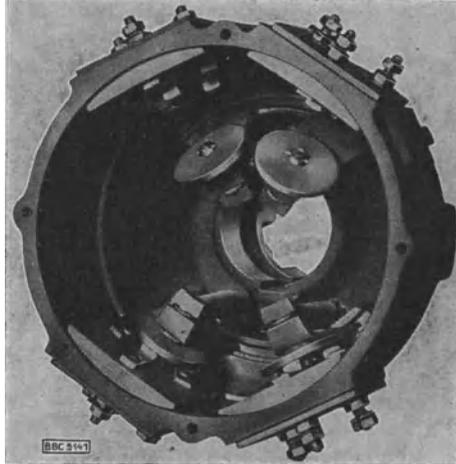


Abb. 30. Fliehkraftschalter von BBC.

Das zweite Bild zeigt allerdings auch noch eine Stromspitze vom 2,75fachen Werte des Normalstromes, während im allgemeinen nur der 1,75fache Wert zulässig ist. Hierbei ist allerdings zu bedenken, daß es sich um eine oszillographische Aufnahme handelt, und daß man mit einem gewöhnlichen Stromzeiger günstigere Werte erhalten würde, ohne daß in Wirklichkeit der Sachverhalt eine Besserung erfährt.

Die Lloyd - Dynamowerke Bremen verwenden ebenfalls Paketwiderstände, welche aus uhrfederartig aufgewickelten, durch Reinglimmer voneinander isolierten Widerstandsbändern bestehen. Der ganze Anlaßapparat ist gekapselt. Die in den Widerständen entwik-

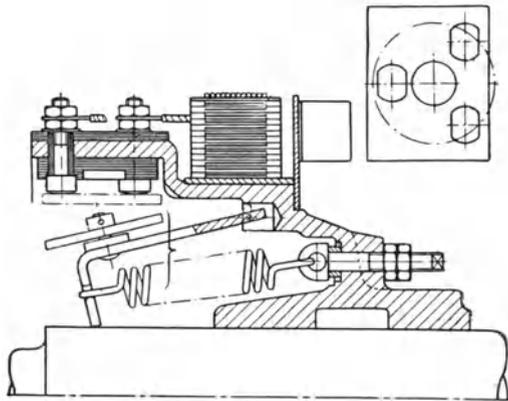


Abb. 31. Fliehkraftschalter von BBC.

kelte Wärme wird an die Außenseite der Trommelwandung abgegeben. Die Kontaktgebung auf den einzelnen Widerstandsstufen erfolgt plötzlich. Die Kontaktbügel sind als Wälzkontakte ausgebildet, wie aus

der Abb. 34 zu ersehen ist. Bei jeder Schaltung erfolgt der erste Kontakt und die Funkenbildung an dem abgebogenen Ende des Kontaktbügels, welcher sich hierauf sofort auf der Kontaktplatte bis zum Dauerkontakt

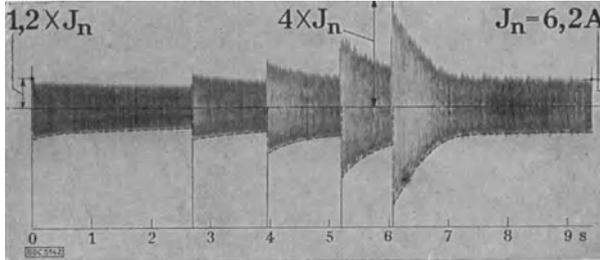


Abb. 32. Anlaufstrom eines normalen Schleifringmotors mit Handanlasser.

abwält. Das abgebogene Ende ist hiernach von der Kontaktplatte zurückgetreten, so daß etwa an diesem Ende aufgetretene Schmorstellen keinen Einfluß auf den Dauerkontakt ausüben können. Diese

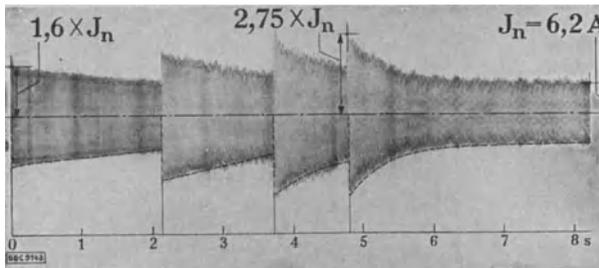


Abb. 33. Anlaufstrom eines Schleifringmotors mit Fliehkraftanlasser.

Anordnung soll sich nach den Lloyd-Werken auf Grund zahlreicher Versuche als äußerst betriebssicher bewährt haben.

Die Abb. 35 zeigt das Innere eines Anlassergehäuses nebst Kontakthebeln für 4 Schaltstufen, während die Abb. 36 das herausgenommene Widerstandspaket erkennen läßt.

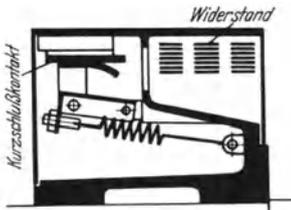


Abb. 34. Konstruktion des Fliehkraftschalters der Lloyd-Dynamowerke.

Die Abb. 37 gibt die Anlaufverhältnisse eines Motors mit Fliehkraftanlasser mit 3 Schaltstufen wieder; das Bild ist den Veröffentlichungen der Lloyd-Dynamowerke entnommen. Die Anlaufmomente schwanken zwischen den Werten von 110 bis 200% des normalen Drehmomentes; dementsprechend liegen auch die Stromwerte, die einen Spitzenwert von etwa 210% des normalen Wertes erlangen.

Beachtenswert ist ein neuer Motor der Köhl-Elektromotorenwerke A. G., Saarbrücken, welcher von Professor Ott im Prüffeld des Bad.

Staatstechnikums Karlsruhe eingehend untersucht wurde¹. Der Läufer trägt eine gewöhnliche Drahtwicklung, die nach dem Prinzip der Görge-schen Gegenschaltung (Abb. 38) während des Anlaufes zuerst in 2 Gruppen gegengeschaltet ist.

Bei den Motoren bis 7,5 kW wird diese Gegenschaltung mit Hilfe zweier einpoliger Hebelschalter, welche durch Fliehkräfte betätigt werden, aufgehoben. Auf die Ausbildung dieser Fliehkraftappara-tur, die ganz gekapselt ausgeführt wird, ist großer Wert gelegt worden. Die Abb. 39 zeigt einen Läufer mit ganz gekapselter Ausführung der An-laufapparat.

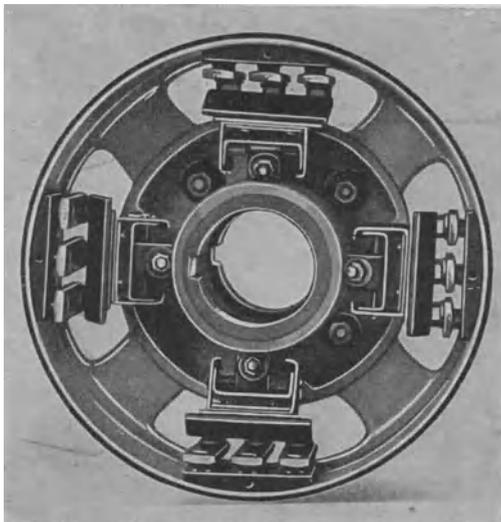


Abb. 35. Anlassergehäuse der Lloyd-Dynamowerke.

Unterhalb der Drahtwicklung ist in bestimmtem Abstände eine Kurz-schlußanlaufwicklung ange-ordnet, die als „Überschalt-wicklung“ arbeitet. Diese Wicklung gibt dem Motor zusammen mit der Görge-schen Gegenschaltung seine charakteristischen Merkmale. In der Abb. 40 gibt Professor Ott die an einem solchen Motor ermittelten Drehmo-mentkurven wieder, und zwar

Kurve 1 für die Über-schaltwicklung allein,

Kurve 2 für die gegen-geschaltete Drahtwicklung in Anlaufschaltung allein,

Kurve 3 für die Überla-gerung dieser beiden Dreh-momentkurven in der Anlauf-schaltung.

Kurven 4 und 5 zeigen Drehmoment und Strom in der Betriebsschaltung.

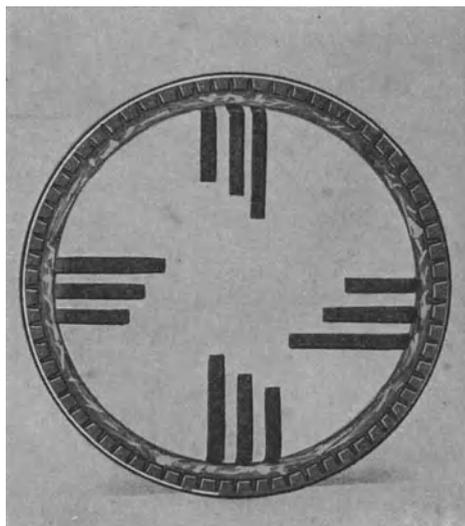


Abb. 36. Widerstandspaket des Fliehkraftschalters der Lloyd-Dynamowerke.

¹ Elektro-Journal 1928, H. 1.

Aus den Kurven ergibt sich, daß ohne die Überschaltwicklung bei verlangtem vollen Drehmoment die Umschaltung der Arbeitswicklung bei etwa 510 Umdrehungen vorgenommen werden müßte, wobei sich ein Stromstoß von etwa 335% des normalen Stromes ergeben würde. Die Überschaltwicklung verlegt den Zeitpunkt der Umschaltung auf etwa 1200

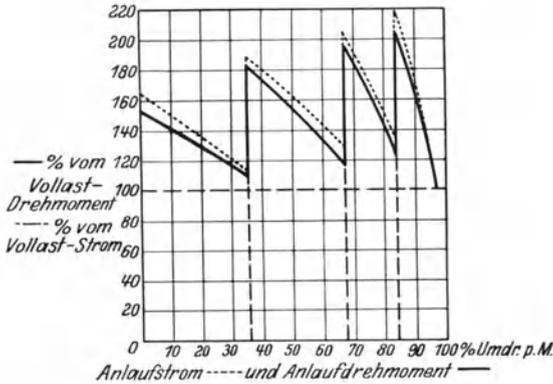


Abb. 37. Anlaufstrom und Drehmoment eines Motors mit Fliehkraftschalter der Lloyd-Dynamowerke.

Umdrehungen, wobei ein Stromstoß von nur 220% des normalen Stromes auftritt. Der Anlaufstrom in der Anlaufschaltung wurde nach Prof. Ott aus dem Kreisdiagramm und durch Versuche ermittelt, und zwar mit dem 1,75fachen Werte des normalen Stromes, wobei ein mittleres Drehmoment von etwa 100% des normalen Drehmoments erreicht wurde. Bei etwa 1450 Umdrehungen, der

Vollastdrehzahl, entwickelt die Überschaltwicklung praktisch kein Drehmoment; ihr Einfluß auf den Leistungsfaktor ist daher auch ohne Bedeutung, so daß der Motor in dieser Hinsicht einem einfachen Schleifringmotor gleichkommt. Im Falle die Fliehkraftschaltung einmal versagen sollte, arbeitet der Motor in der Görgesschen Gegenschaltung weiter, wobei die Überschaltwicklung als Arbeitswicklung einen solchen Anteil an der Arbeitsübertragung nimmt, daß die Drahtwicklung durch zu große Wärmeent-

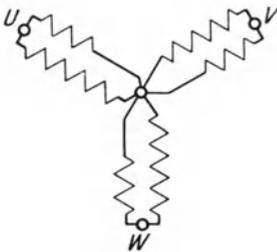


Abb. 38. Läufer des Motors von Köhl mit Görgesscher Gegenschaltung.

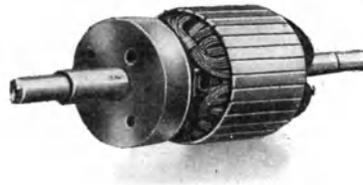


Abb. 39. Abbildung eines Läufers von Köhl.

wicklung nicht unmittelbar gefährdet ist. Der Motor zeichnet sich somit dadurch aus, daß die Anlaßapparatur vereinfacht ist. Bei den Motoren mit angebauten Fliehkraftanlassern hat man mindestens 3 Schaltstufen, also $3 \times 3 = 9$ Schaltstellen nötig, während hier nur 2 Schaltstellen vorhanden sind, wodurch die Betriebssicherheit erhöht ist. Professor Ott bezeichnet daher den Motor, welcher unter dem Namen „Autax-Motor“ von der Erbauerin auf den Markt gebracht wird, als den Motor der Zukunft, was wohl nur sehr bedingt zutreffen wird, wenn man die

bisherige, noch nicht abgeschlossene Entwicklung der hier in Betracht kommenden Gesamtverhältnisse und schließlich diejenige der Anschlußbedingungen der Elektrizitätswerke, worauf später noch besonders zurückkommen sein wird, überblickt.

Die Volta - Elektrizitäts - Akt. - Ges. hat vor mehreren Jahren einen von Weissberg erfundenen Motor hergestellt, der unter dem Namen Weissberg-Simplex-Motor auf den Markt gebracht wird. Der Motor trägt im Läufer unter der Phasenwicklung eine Kurzschlußwicklung, die derart berechnet ist, daß beim Anlauf durch diese Wicklung allein unter Einhaltung der Verbandsnormalien mehr als das volle Drehmoment entwickelt wird. Die eigentliche Phasenwicklung ist an einer oder, bei größeren Motoren, an mehreren Stellen angezapft. Die Teilwicklungen werden durch einen Fliehkraftschalter bei Erreichung von genau vorher festgelegten Umdrehungszahlen nacheinander kurzgeschlossen. Es wird durch diese Anordnung erreicht, daß während des ganzen Anlaufes das normale Drehmoment nicht unterschritten wird, während der Anlaufstrom sich innerhalb der Verbandsnormalien hält.

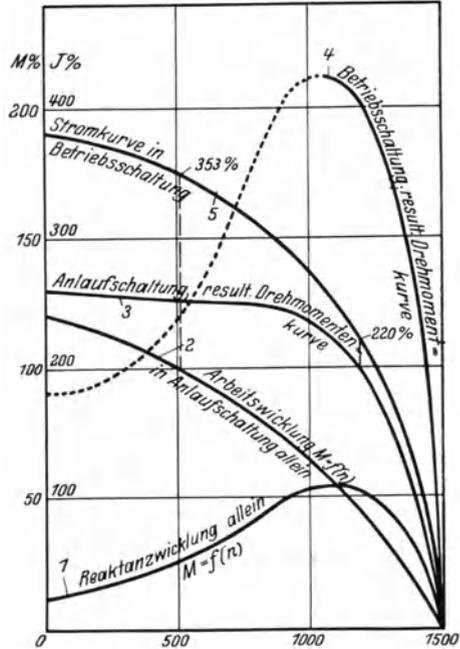


Abb. 40. Drehmomente und Anlaufströme eines Köhl-Motors.

Aus der Abb. 41 ist die grundsätzliche Schaltungsanordnung zu ersehen. Die Abb. 42 läßt erkennen, daß bei dem 1,7fachen Anlaufstrom etwa das 1,4fache Drehmoment erreicht wird. Im Verlaufe des weiteren Anlaufvorganges wird das normale Drehmoment nicht unterschritten, während der Strom sich innerhalb der zulässigen Grenzen hält.

Auf die Ausbildung des Fliehkraftschalters ist besonderer Wert gelegt worden. Dieser befindet sich in einem vollständig staubdicht geschlossenen Gehäuse, welches die mit der Arbeitswicklung verbundenen Kontakte trägt. Die Gegenkontakte befinden sich auf Schwunggewichten, die rechtwinklig zur Motorachse drehbar gelagert sind und durch passende Federn geöffnet gehalten werden. Bei bestimmten Umdrehungszahlen überwindet die Fliehkraft die Federkraft, die Gegenkontakte

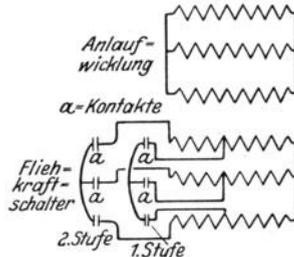


Abb. 41. Schaltungsanordnung des Weissberg-Simplex-Motors.

klappen schlagartig gegen die dazugehörigen Kontaktsegmente, wodurch der betreffende Abschnitt der Arbeitswicklung kurzgeschlossen wird. Es liegt der Fall eines Tastschalters vor, welcher Vorkontakt besitzt, so

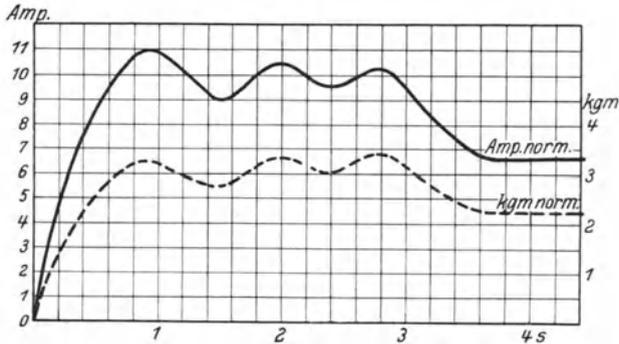


Abb. 42. Anlaufstrom und Drehmoment eines Weissberg-Simplexmotors.

daß eine Verbrennung der Hauptkontakte verhindert wird. Die Abb. 43 zeigt einen Schnitt des Motors.

Um eine vorzeitige Öffnung der Kontakte bei starker Überlastung des Motors zu verhindern, sind auf dem Gehäuse regelbare Bremsfedern

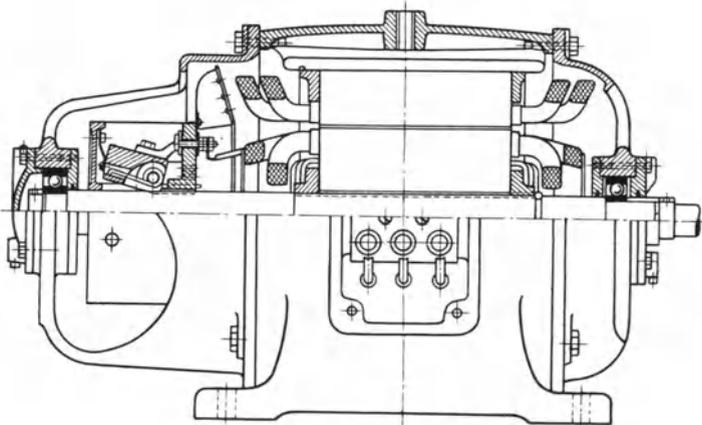


Abb. 43. Schnitt durch einen Weissberg-Simplex-Motor mit gekapseltem Flichkraftschalter.

angebracht, die in Aussparungen der Schwunggewichte eingreifen und diese in ihrer Lage bis zu einem bestimmten Drehzahlabfall festhalten. Bei großen Motoren werden die Schwunggewichte durch eine Verriegelung festgehalten, welche dieselben erst bei einer bestimmten Umdrehungszahl freigibt.

Die Motoren nach dieser durch D. R. P. geschützten Anordnung wurden von den Voltawerken bis zu einer Leistung von 75 PS bei 720 Umdrehungen p. M. ausgeführt, wobei in besonderen Fällen das 2fache des normalen Drehmomentes erreicht wurde.

Claudius Schenfer, Moskau, hat in Anlehnung an die bekannte Gegenschaltung von Görges und die Schaltungen nach dem schweizerischen Patent Nr. 71121 und dem deutschen Patent Nr. 296104, nach welchen Teile der Läuferwicklung, die verschiedenen Phasen angehören, hintereinander geschaltet werden, eine neue, beachtenswerte Schaltung angegeben, die ohne Benutzung äußerer Anlaßwiderstände eine beträchtliche Erhöhung des Anlaufmomentes ergibt¹.

Er benutzt einen Läufer mit zweischichtiger Wicklung, bei der bekanntlich eine jede Phase in zwei gleiche Teile zerfällt. Diese Teile werden beim Anlauf gegeneinander geschaltet und an einen Teil einer anderen Phase angeschlossen, so daß die letztere Phase die sekundäre Spannung erzeugt und die erstere nur zur Erzeugung des erforderlichen Ohmschen Widerstandes benutzt wird. In Kap. 6 ist eine ausführliche Beschreibung dieses Motors enthalten.

In Kapitel 7 wird der Motor von Richter beschrieben, der theoretisch und praktisch von großem Interesse ist. Der Stator enthält 2 Wicklungen für verschiedene Polzahlen, die in Serie geschaltet sind; eine Laufwicklung und eine Anlaufwicklung. Letztere wird nach dem Anlassen abgeschaltet. Die Polzahl der Anlaufwicklung ist kleiner wie die Polzahl der Laufwicklung. Der Rotor enthält 2 Kurzschlußwicklungen entsprechend den beiden Polzahlen; die Kurzschlußwicklung, die zu der Laufwicklung gehört, hat kleinen, die andere großen Ohmschen Widerstand.

Beim Anlauf erzeugt die Wicklung der kleinen Polzahl wegen des großen sekundären Widerstandes ein beträchtliches Anlaufdrehmoment, das den Motor bis in die Nähe der Betriebstourenzahl beschleunigt. Jetzt steigt aber der Anteil des von der Laufwicklung gelieferten Drehmomentes, weil die Impedanz der Laufwicklung in der Nähe vom Synchronismus stark anwächst. Gegenüber den bisher erwähnten Motoren mit Umschaltung der Stator- oder Rotorwicklung besitzt dieser Motor den großen Vorteil, daß die Umschaltung in unmittelbarer Nähe vom Synchronismus vorgenommen wird.

2. Vergleich zwischen Schleifringanker und Käfiganker.

In der Einleitung ist schon darauf hingewiesen worden, daß der Drehstrommotor mit Käfiganker eine Reihe vorzüglicher Eigenschaften besitzt, die ihn zu dem idealen Motor erhoben hätten, wenn nicht seine ungünstigen Anlaufverhältnisse seine Anwendung, wenigstens in Europa, stark gehemmt hätten. Einige dieser Vorteile, wie die größere Betriebssicherheit, weniger Wartung, geringe Herstellungskosten, sind sofort zu erkennen. Andere Vorteile, wie der bessere $\cos \varphi$, können nur an Hand eines Rechnungsbeispielles klar erkannt werden.

¹ El. u. Maschinenb. 1926, S. 95.

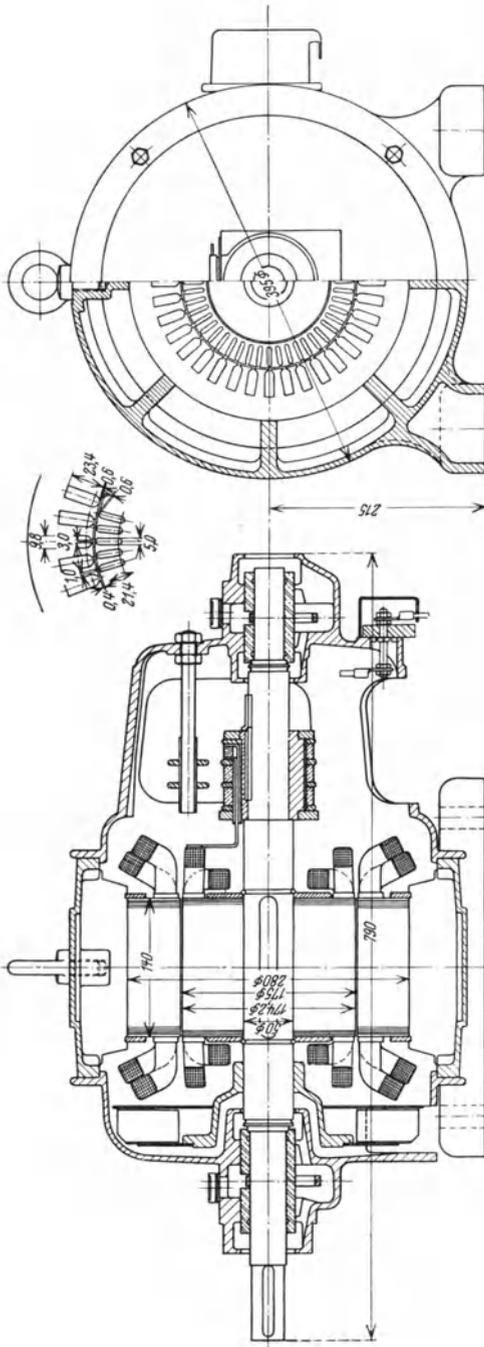


Abb. 44 und 45. 7,5-kW-Drehstrommotor mit Schleifringläufer.

Wir werden an einem ausgeführten Motor mit Schleifringanker, und zwar an einem 7,5-kW-Motor, für eine Spannung 220/380 V, und eine synchrone Tourenzahl von 1500 Umdr. pro Minute den Übergang vom Schleifringanker zum Käfiganker und die dabei erfolgten Änderungen der charakteristischen Daten zeigen.

Der Motor mit Schleifringanker ist in Abb. 44 und 45 dargestellt. Die Tabelle 1 gibt die Abmessungen des Blechpaketes, die Tabelle 2 die Daten der Wicklung.

Aus der Phasenspannung ($E_p = 220$ V) und der effektiven Windungszahl pro Phase ($w = 126$) kann der Kraftlinienfluß pro Pol unter Benutzung der bekannten Spannungsformel:

$$E_p = 4,2 \cdot f \cdot w \cdot \Phi \cdot 10^{-8}$$

zu

$$\Phi = \frac{E_p \cdot 10^8}{4,2 \cdot f \cdot w} = \frac{220 \cdot 10^8}{4,2 \cdot 50 \cdot 126} = 830\,000 \text{ Maxwell}$$

berechnet werden.

In Tabelle 3 sind die Querschnitte des magnetischen Pfades, die entsprechenden Induktionen unter der Annahme einer sinusförmigen Kraftlinienverteilung und schließlich die für jeden Teil des magnetischen Pfades erforderlichen Amperewindungen enthalten, wobei der Einfluß der Nutenöffnung auf den effektiven Quer-

schnitt des Luftspaltes und die Verringerung des durch den Luftspalt gehenden Kraftlinienflusses unter dem Einfluß der Statorstreuung berücksichtigt ist.

Tabelle 1. Abmessungen des Blechpakets in mm:

	Stator	Rotor
Außendurchmesser	280	174,2
Innendurchmesser.	175	50
Zahl der Nuten.	36	48
Nutenhöhe	24	22
Nutenbreite	9,8	5,0
Nutenöffnung.	3	1
Zahnbreite an der engsten Stelle. .	6	3,85
Zahnbreite an der breitesten Stelle. .	9,7	5,95
Länge des Blechpakets	140	140

Luftspalt (einseitig) 0,4

Tabelle 2. Wicklungsdaten.

	Stator	Rotor
Zahl der Leiter pro Nute	21	5
Zahl der effektiven Windungen pro Phase. .	126	40
Schaltung der Phasen.	入	入
Leiterdurchmesser, blank	2,2 mm	3,4 mm
Leiterdurchmesser, isoliert	2,5 mm	3,7 mm
Mittlere Windungslänge	89 cm	66 cm
Kupfergewicht (ohne Isolation).	11,5 kg	6,4 kg

Tabelle 3. Berechnung des Leerlaufstromes.

	Kraftlinien- fluß in Megalinien	Querschnitt in cm ²	Induktionen in Gauß	<i>AW</i>
Statorrücken	0,83	72	11500	27
Statorzahn, engste Stelle . .	0,83	68	19200	40
Statorzahn, breiteste Stelle .		110	11800	
Luftspalt.	0,8	165,5	7600	242
Rotorzahn, engste Stelle . .	0,8	58,2	21500	88
Rotorzahn, breiteste Stelle. .		89	14100	
Rotorrücken	0,8	101	7900	14
			Zusammen	411

Man wird zunächst die Induktion an der engsten Stelle des Rotorzahnes als unzulässig hoch ansehen, doch ist zu berücksichtigen, daß ja in obiger Tabelle die Annahme einer sinusförmigen Kraftlinienverteilung gemacht worden ist, während in Wirklichkeit unter dem Einfluß der Zahnsättigung eine abgeflachte Kraftlinienverteilung auftritt. Die 88 *AW*, die in der letzten Spalte für die Rotorzähne angegeben sind, berücksichtigen schon diese Abflachung.

Immerhin sind wir an der äußersten Grenze der zulässigen Induktion angekommen, denn eine Berechnung zeigt, daß eine Erhöhung der Spannung um 10% die *AW* für die Rotorzähne von 88 auf 215 treiben würde.

Der Leerlaufstrom berechnet sich zu 33,7% des Vollaststromes, wobei auf den Luftspalt 20%, auf den gesamten Eisenpfad 13,7% fallen¹. Auch diese Verhältniszahlen deuten darauf hin, daß die Grenze der im Eisen zulässigen Induktionen erreicht ist.

Wenn nun eine Verstärkung des Kraftlinienflusses bei den angenommenen Nutendimensionen nicht möglich erscheint, so wäre zu untersuchen, ob

1. eine Erhöhung der Stromdichte oder
2. eine bessere Ausnutzung der Rotornuten möglich ist.

Die erste Frage hängt eng damit zusammen, welche Rotorkupferverluste als zulässig erachtet werden.

Bei Vollast beträgt der sekundäre Strom, wie man aus dem Heylanddiagramm entnehmen kann, 41,7 Amp. und mithin die Stromdichte in der Rotorwicklung 4,6 Amp./mm² und die gesamten Rotorkupferverluste sind gleich 305 Watt.

Durch Verstärkung der Ventilation könnte man wohl die Erwärmungsgrenze hinauschieben, aber die Verschlechterung des Wirkungsgrades und die Vergrößerung des Schlupfes wären nicht zu vermeiden.

Der Vergleich mit dem Käfiganker soll nun unter Beibehaltung der gleichen Rotorkupferverluste geführt werden, so daß der nach obigen Betrachtungen zu schließende Kompromiß für den beabsichtigten Vergleich zwischen Schleifringanker und Käfiganker belanglos ist.

In ganz enger Beziehung zu diesem Vergleiche steht aber die zweite Frage, nämlich die Ausnutzung der Nute. Letztere hat einen Querschnitt von 99,6 mm², die 5 Kupferleiter zusammen nur 45,5 mm². Der Füllfaktor beträgt also $\frac{45,5}{99,6} = 0,46$.

Es liegt der Gedanke nahe, an Stelle der 5 runden Drähte pro Nute 2 rechteckige oder in anderer Weise geformte Leiter zu benutzen, die eine bessere Ausnutzung der Nute ermöglichen. In Abb. 46 ist ein solcher Vorschlag dargestellt; der Kupferquerschnitt der Nute ist um 21% gestiegen, also der Füllfaktor von 0,46 auf 0,55. Dieser Vorschlag führt aber zu Nachteilen, die die Vorteile mehr als aufwiegen.

Dadurch, daß die Leiterzahl im Verhältnis 5:2 gefallen ist, hat sich der Rotorstrom bei gleicher Leistung auf das 2,5fache vergrößert. Dieser vergrößerte Rotorstrom bedingt aber verstärkte Zuführungsleitungen zum Anlasser, größere Schleifringe mit stärkeren Bürsten, und vor allen Dingen verstärkte Kontakte des Anlassers. Außerdem ist im allgemeinen die Wicklung des Rotors mit 2 Leitern pro Nute teurer als die mit 5 Leitern pro Nute, weil im ersten Falle die Anzahl der Lötstellen sehr groß wird.

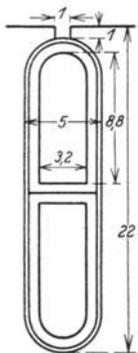


Abb. 46. Rotornut mit 2 Stäben.

¹ Bezeichnen wir die algebraisch zusammengezählten Stator-*AW* pro Pol mit *A*, so ist die Amplitude des Drehfeldes gleich $0,86 \cdot A$ (im vorliegenden Falle gleich $0,86 \cdot 1400 = 1210$) und $\frac{\text{Leerlaufstrom}}{\text{Vollaststrom}} = \frac{411}{1210} = 0,337$. Unter Drehfeld verstehen wir die rotierenden, sinusförmig verteilten Amperewindungen, während der rotierende, sinusförmig verteilte Kraftlinienfluß mit Drehfluß bezeichnet wird.

gleich übersichtlicher wird, obgleich man im allgemeinen eine andere Zahl wählen würde. Die Vorteile, die man sofort erkennt, sind:

1. Dadurch, daß nur ein Leiter pro Nute benutzt wird, erhält man eine wesentlich bessere Ausnutzung der Nute. Da der Leiterstrom nicht an Schleifringe geführt wird, stehen diesem Vorteil nicht die Nachteile gegenüber, die man beim Schleifringmotor bei Benutzung von 1 oder 2 Leitern pro Nute erhalten würde.

Im allgemeinen wird man sich beim Käfiganker mit einem Lackanstrich anstatt Isolationsmaterial begnügen; man erhält hierdurch ein Minimum der Herstellungskosten und ein Maximum der Betriebssicherheit.

Statt der 5 Drähtedurchmesser 3,4 in Abb. 45 erhalten wir also, wenn wir vorläufig die Stromdichte die gleiche lassen wie im Schleifringläufer, einen Querschnitt von 45 mm^2 , mit den Dimensionen $14 \times 3,5$ bei gut abgerundeten Ecken und eine Rotornut $17 \times 4 \text{ mm}$. Die maximale Induktion im Rotorzahn ist von 21300 auf 15000 gesunken, weil der Zahn an der engsten Stelle 5,5 mm anstatt 3,85 mm breit geworden ist.

2. Es muß als ein Vorteil des Käfigankers angesehen werden, daß seine Stirnverbindung auf jeder Seite durch einen einzigen Ring dargestellt wird, denn die äquivalente mittlere Windungslänge ist hierdurch wesentlich verkleinert worden. Wenn die Stromdichte in den Endringen ebenso groß genommen wird wie im Stab, so können die Endringe durch eine Verlängerung der Stäbe um $\frac{D_e}{p}$ berücksichtigt werden, wobei D_e den Durchmesser der Endringe darstellt¹. Für obigen Motor würde diese Verlängerung der Stäbe $\frac{16,5}{2} = 8,25 \text{ cm}$ betragen, während bei dem Schleifringanker die zu einer halben Windung gehörige Länge 19 cm, also mehr als doppelt so viel beträgt.

¹ Die Ableitung dieser einfachen Formel ergibt sich wie folgt:

Besitzt der Rotor z_n Stäbe und fließt in jedem Stabe der effektive Strom J_s , so ergibt eine einfache Betrachtung, daß der effektive Strom im Endring mit genügender Genauigkeit gleich

$$J_e = \frac{z_n}{2\pi p} \cdot J_s$$

gesetzt werden kann. Wird nun im Endringe die gleiche Stromdichte angenommen wie im Stabe, so muß der Querschnitt (q_e) der Endringe $\frac{z_n}{2\pi p}$ mal größer sein als derjenige des Stabes (q_s). Das gesamte im Endringe vorhandene Kupfervolumen ist also:

$$2 D_e \cdot \pi \cdot q_e = \frac{D_e}{p} \cdot z_n \cdot q_s.$$

Das gleiche Volumen würden wir auch erhalten, wenn ein jeder Stab um $l' = \frac{D_e}{p}$ cm verlängert wird.

Wird die Stromdichte im Endring k mal größer gemacht als im Stab, so muß bei der Berechnung der Verluste $k \cdot l'$ und bei Berechnung des Kupfergewichtes $\frac{l'}{k}$ eingesetzt werden.

3. Wir müssen an dieser Stelle einen kleinen elektrischen Vorteil des Käfigankers erwähnen, der nicht offensichtlich ist. Die in den einzelnen Windungen einer Phase des Schleifringläufers induzierten EMK addieren sich nicht algebraisch, sondern geometrisch. Die Abweichung zwischen der algebraischen und geometrischen Summe beträgt 4 bis 4,5% und um ebensoviel wird der Strom größer werden.

Beim Käfiganker besteht diese Abweichung nicht, weil ein jeder Stab als eine eigene Phase angesehen werden kann. Die Gesamt-Ampere-Leiter des Käfigankers sind also bei gleicher Leistung und gleichem Kraftlinienfluß ca. 4,5% kleiner als im Schleifringläufer.

Aus den obigen Grundsätzen soll nun ein neuer Käfig abgeleitet werden, der gleichviel Cu-Verluste wie der Schleifringläufer besitzt. Wegen der Verschiedenheit des Wickelfaktors kann der Querschnitt der Stäbe und Endringe um ca. 9% und wegen der Verringerung der freien Länge im Verhältnis der Leiterlänge also im Verhältnis $(14 + 19) : (15 + 8,25)$ verkleinert werden.

Das ergibt einen Stabquerschnitt von

$$45 \cdot 0,91 \cdot \frac{23,25}{33} = 29 \text{ mm}^2$$

und einen Querschnitt der Endringe von $29 \cdot \frac{48}{4\pi} = 112 \text{ mm}^2$. Man würde in einem solchen Falle runde Stäbe von etwa 6 mm \varnothing und eine runde Nute von etwa 6,5 mm wählen (Abb. 49). Die Zahnbreite an der engsten Stelle ist 4,5 mm, die Induktion 18200 Gauß. Da aber diese Induktion nur an einer sehr geringen Länge auftritt, so werden hier weniger AW erforderlich als durch die Anwendung viel kleinerer Induktionen bei geraden Nutenwänden.

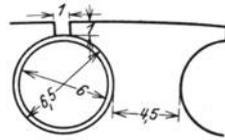


Abb. 49. Runde Rotornut.

Man ersieht nun aus dem Vorhergehenden, daß die magnetischen Verhältnisse im Rotor so günstig geworden sind, daß man sehr wohl eine Vergrößerung des Kraftlinienflusses vornehmen kann, ohne befürchten zu müssen, daß der Leerlaufstrom zu groß werde.

Wir wollen den Kraftlinienfluß um 10% vergrößern und die Stator-amperewindungen um 10% verringern, so daß die Leistung konstant bleibt. Wir verstärken die Breite der Statorzähne etwas, um die Zahninduktion trotz des größeren Kraftlinienflusses nicht anwachsen zu lassen, die Statornut wird etwas niedriger, weil weniger Leiter (19 statt 21) in die Nut kommen¹. Um nun den Leerlaufstrom trotz des vergrößerten Kraftlinienflusses so klein wie möglich zu halten, werden wir für diese Entwürfe im Rotor statt runder Stäbe einen rechteckigen Querschnitt von 30 mm^2 mit einer Breite von 3,2 mm und einer Höhe von 10 mm bei gut abgerundeten Ecken wählen. Die Rotornute müßte eine Breite von 3,5 mm und eine Höhe von 12 mm haben. Der Querschnitt der Endringesoll 115 mm^2 sein, so daß also wegen des verkleinerten sekundären

¹ Nutendimension: $22 \cdot 9,3 \cdot 3$.

Stromes die Verluste im Rotorkupfer jetzt etwas kleiner werden als die des Schleifringläufers. Die Induktionen betragen jetzt in Gauß:

Tabelle 4.

	Spalte I Käfiganker	Spalte II Schleifringanker
Statorrücken	12600	11500
Statorzähne (bei sinusförmiger Verteilung) an der engsten Stelle	19300	19200
Statorzähne (bei sinusförmiger Verteilung) an der breitesten Stelle	12400	11800
Luftspalt	8400	7600
Rotorzähne an der engsten Stelle	14400	21500
Rotorzähne an der breitesten Stelle	11900	14100
Rotorrücken	8700	7900

In Spalte II sind die entsprechenden Werte für den Schleifringläufer nochmals angegeben.

Der Leerlaufstrom ist von 33,7% auf 32,7% heruntergegangen, obgleich der Kraftlinienfluß gestiegen ist.

Der Vergleich zwischen Schleifringanker und Käfiganker muß sich auch auf die Größe der Streukoeffizienten erstrecken.

In der folgenden Tabelle sind die Streukraftlinien (bezogen auf den Normalstrom in der Statorwicklung) nach Gruppen geordnet, sowohl für den Entwurf I (Schleifringläufer) als für Entwurf II (Käfiganker bei einem um 10% vergrößerten Kraftlinienfluß) angegeben:

Tabelle 5. Streukraftlinien in Maxwell, wenn die Statorwicklung vom Normalstrom durchflossen wird.

	I. Schleifring- motor	II. Motor mit Käfiganker
Statornutenstreuung $\left\{ \begin{array}{l} 21 \cdot 15 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,95 \cdot 2 \cdot 14 = \\ 19 \cdot 15 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,95 \cdot 2 \cdot 14 = \end{array} \right.$	24300	22000
Statorstirnstreuung $\left\{ \begin{array}{l} 3 \cdot 21 \cdot 15 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,36 \cdot 2 \cdot 30,5 = \\ 3 \cdot 19 \cdot 15 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,36 \cdot 2 \cdot 30,5 = \end{array} \right.$	29400	26600
Rotornutenstreuung $\left\{ \begin{array}{l} 5 \cdot 45,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,61 \cdot 2 \cdot 14 = \\ 185 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,52 \cdot 2 \cdot 14 = \end{array} \right.$	32300	18500
Rotorstirnstreuung $\left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot 5 \cdot 45,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,31 \cdot 2 \cdot 19 = \\ 710 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 0,5 \cdot 26 = \end{array} \right.$	15100	8350
Doppeltverkettete Streuung $\left\{ \begin{array}{l} \frac{830\,000 \cdot 1210 \cdot 0,0227}{242} = \\ \frac{913\,000 \cdot 1090 \cdot 0,016}{267} = \end{array} \right.$	95000	60000
Gesamtstreuung	196100	135450
Normaler Kraftlinienfluß	830000	913000
$\frac{\text{Gesamtstreuung}}{\text{Kraftlinienfluß}} . . . =$	0,236	0,148

Tabelle 6. Der Koeffizient λ_a der doppelt verketteten Streuung.

Nuten pro Pol im Stator/Rotor	Schleifringmotor	Käfiganker	
		Statornutenzahl kleiner als Rotor- nutenzahl	Statornutenzahl größer als Rotor- nutenzahl
6/9	0,0416	0,031	0,035
9/12	0,0227	0,016	0,0167
6/15	0,034	0,0193	0,028
9/15	0,020	0,0135	0,0153
12/15	0,0152	0,0096	0,0100
12/18	0,0138	0,008	0,0093
15/18	0,0115	0,006	0,0063

Die Stator- und Rotornutenstreuung ist nach der einfachen Formel $zJ\sqrt{2} \cdot \lambda_n \cdot 2l$ berechnet worden, wo z die Anzahl der Leiter pro Nute, J der effektive Strom eines Leiters, l die Länge des Eisenpaketes in cm und λ_n die magnetische Leitfähigkeit einer Nute pro cm Länge ist. Die Stator- und Rotorstirnstreuung ist nach der Formel $qzJ \cdot \sqrt{2} \cdot \lambda_s \cdot 2l_s$ bestimmt worden, wo q die Zahl der Nuten pro Pol und Phase, $2l_s$ die freie (nicht im Eisen liegende) Länge einer Windung ist. Die magnetische Leitfähigkeit λ_s pro cm Stirnverbindung kann unter der Annahme normaler Spulenwicklung mit einiger Annäherung zu $\lambda_s = 0,46 \left(\log \frac{l_s}{u_s} + 0,3 \right)$ gesetzt werden, wo u_s der kleinste Umfang des Querschnittes der q zusammengehörigen Spulen ist. Für den Endring ist $\lambda_s = 0,5$ gesetzt worden. Die doppeltverkettete Streuung ist $\frac{F_a \cdot \Phi \cdot \lambda_a}{AW_L}$, wo F_a die Größe des Drehfeldes (in AW !) bei Vollast, Φ der Normalfluß, AW_L die Amperewindungen, die den Normalfluß durch den Luftspalt treiben und λ_a ein aus Tabelle 6 zu entnehmender Koeffizient ist, der von der Nutenzahl pro Pol im Stator und im Rotor abhängt. Während für den Schleifringmotor eine Vertauschung der Nutenzahl zwischen Stator und Rotor keinen Einfluß auf λ_a hat, sind für den Käfiganker zwei Spalten vorgesehen; die erste Spalte gilt für den Fall, daß der Rotor die größere Nutenzahl besitzt, die zweite für den entgegengesetzten Fall.

Der Unterschied in den beiden Spalten für Gruppe 3 und 4 erklärt sich zwanglos aus den geänderten Abmessungen der Rotornut und der Art der Stirnverbindung. Eine besondere Besprechung verdient aber die doppeltverkettete Streuung. Wir sehen, daß diese Streuung für den Käfiganker wesentlich kleiner ist als für den Schleifringanker. Der Grund liegt darin, daß ein Teil der doppeltverketteten Streuung, nämlich die Differentialstreuung, beim Käfiganker praktisch verschwindet.

Messen wir den Kurzschlußstrom eines Drehstrommotors mit Schleifringanker, so erkennen wir eine Abhängigkeit dieses Stromes von der relativen Lage des Rotors. Jedesmal, wenn eine zu einer Phase gehörende Wicklungsgruppe einer Gruppe der Statorwicklung gerade gegenübersteht, ist der Kurzschlußstrom ein Maximum; so sind bei einem 4poligen

Motor 12 Maxima bei einer langsamen Umdrehung des Rotors zu konstatieren.

Für diese 12 Stellungen ist auch beim Schleifringläufer die Differentialstreuung gleich Null.

Wir können auch den Kurzschlußstrom konstant halten und die Variationen der Spannung zwischen den Werten E_{\max} und E_{\min} an den Klemmen der Statorwicklung beobachten, dann stellt

$$E_d = E_{\max} - E_{\min}$$

direkt den maximalen Einfluß der Differentialstreuung in der relativen Streuung dar.

Für den Käfiganker verschwindet aber E_d vollständig und somit erklärt sich die geringere doppelt-verkettete Streuung des Käfigankers.

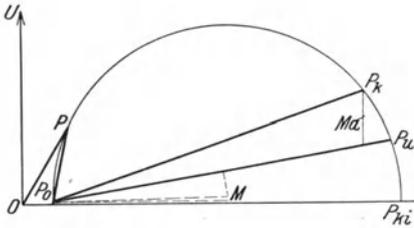


Abb. 50. Heyland-Diagramm des 7,5-kW-Drehstrommotors mit Schleifringanker.

Aus Tabelle 5 ergibt sich, daß der ideelle Kurzschlußstrom des Motors mit Käfiganker 101 Amp., während derjenige des Motors mit Schleifringanker nur 63,5 Amp. ist.

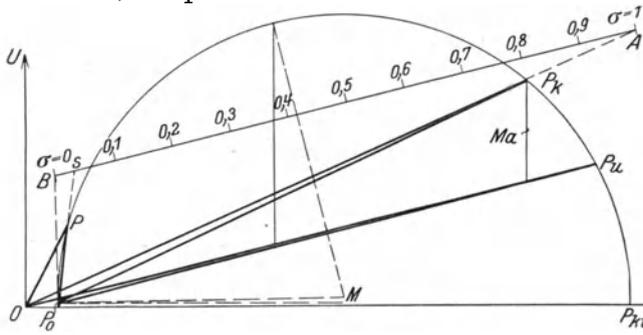


Abb. 51. Heyland-Diagramm des 7,5-kW-Drehstrommotors mit Käfiganker.

In Abb. 50 und 51 sind die Kreisdiagramme für beide Motoren aufgezichnet, und wir erkennen sofort nicht nur die größere Überlastungsfähigkeit des Motors mit Käfiganker (M_{\max} 3,04fach gegen 2,08fach), sondern auch den besseren Leistungsfaktor, der in Tabelle 7 zusammengestellt ist.

Tabelle 7. Leistungsfaktor.

	Motor mit Schleifringanker	Motor mit Käfiganker
$3/4$ Last	0,868	0,915
$2/4$ Last	0,86	0,903
$1/4$ Last	0,83	0,87
$3/4$ Last	0,725	0,78
$1/4$ Last	0,533	0,585

In den meisten Veröffentlichungen wird dem Käfiganker außer dem besseren Leistungsfaktor auch noch ein wesentlich besserer Wirkungsgrad zugeschrieben. Dies ist nur

bedingt richtig, nämlich nur dann, wenn man den Käfiganker auf minimale Verluste dimensioniert. Wir hatten bei dem ersten Vergleiche die

Verluste im Käfiganker ebenso groß wie die im Schleifringanker angenommen, und zwar deshalb, um später, wenn das Anlaufdrehmoment behandelt wird, keine allzu ungünstigen Verhältnisse zu haben. Bei dem abgeänderten Käfiganker mit vergrößertem Kraftlinienfluß und mit vergrößertem ideellen Kurzschlußstrom sind die Verluste im Rotor etwas kleiner gehalten worden, und der Wirkungsgrad hat sich, wie Tabelle 8 zeigt, aus obigem Grunde etwas gebessert.

Tabelle 8.

	Verluste	
	im Motor mit Schleifringanker	im Motor mit Käfiganker
$J^2 R$ in der Statorwicklung	398	360
Eisenverluste	347	380
$J^2 R$ im Rotor	305	245
Reibungsverluste.	150	150
Gesamtwerte	1200	1135
Leistung	7500	7500
Wirkungsgrad	0,86	0,869

Bei Benutzung von Kugellagern erhöht sich der Wirkungsgrad noch um ca. 1%.

Zusammenfassend können wir die Vorzüge des Käfigankers, soweit die Dimensionierung beeinflusst wird, wie folgt, angeben:

1. Besserer Füllfaktor der Rotornute.
2. Kleinere freie Länge der Endringe.
3. Verringerte Streuung und damit besserer $\cos \varphi$ und größere Überlastungsfähigkeit.
4. Verbesselter Wirkungsgrad in solchen Fällen, wo die Anlaufverhältnisse eine Dimensionierung des Ankers auf minimale Verluste zulassen.

Hierzu kommen noch einige Vorteile, die den Materialaufwand betreffen:

5. Der Käfiganker hat nur etwa halb so viel Kupfer wie der Schleifringanker (soweit dem obigen Beispiele folgend der Kraftlinienfluß vergrößert wird).

6. Beim Käfiganker fallen weg: Schleifringe, Bürsten, Bürstenabhebevorrichtungen und Vorrichtung zum Kurzschließen der Bürsten, Klemmbrett für die Herausführung des Rotorstromes, Anlaßwiderstand und Verbindungsleitung zwischen Anlaßwiderstand und Rotorklemmbrett. Dafür wird freilich in den meisten Fällen ein Sterndreieckschalter beim Käfiganker vorzusehen sein.

Die folgende Tabelle gibt an Hand eines Beispiels die Übersicht über die gesamten Herstellungskosten, wobei sowohl das direkte elektrische Einschalten, das Anlassen mittels Δ -Schalter und schließlich auch mit Anlaßtransformator berücksichtigt ist.

Setzen wir den Verkaufspreis eines 6poligen 15-kW-Motors mit Schleifringläufer zu 100%, so ergeben sich etwa folgende Vergleichswerte:

Drehstrommotor mit Schleifringläufer und Anlasser	100
Drehstrommotor mit Käfiganker, direktes Einschalten	75
Drehstrommotor mit Käfiganker und Δ -Schalter	82
Drehstrommotor mit Anlaßtransformator	105

Unabhängig von den verminderten Preisen beachte man auch die große Einfachheit des Motors mit Käfiganker und den Wegfall so vieler der Abnutzung unterworfenen Teile; man wird deshalb den Unterschied noch höher einschätzen, als er durch die obige Tabelle angegeben wird. Ja, in vielen Betrieben, in denen die Betriebssicherheit von ausschlaggebender Bedeutung ist, wird schon dieser Punkt allein zur Wahl des Motors mit Käfiganker führen.

Wir wollen nun die ungünstige Seite des Drehstrommotors mit Käfiganker, nämlich seine Anlaufverhältnisse näher betrachten. Um die Kurve des Drehmomentes und Stromes in Abhängigkeit von der Tourenzahl zu bestimmen, benutzen wir das bekannte Heylanddiagramm. In Abb. 51 stellt OU die Phasenspannung, OP_o den Leerlaufstrom (ohne Reibungsverluste), OP_k den Kurzschlußstrom, OP_u den Strom bei unendlich

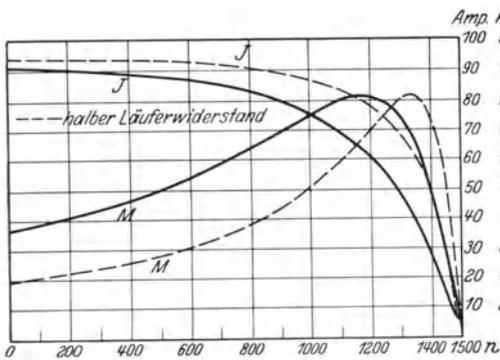


Abb. 52. Drehmoment und Strom des 7,5 kW-Drehstrommotors mit Käfiganker in Abhängigkeit von der Tourenzahl.

großem Schlupfe dar. P_o, P_k und P_u liegen auf einem Kreise, dessen Mittelpunkt M sei. Die senkrecht zu P_oM gemessene Entfernung eines Punktes der Peripherie von der Linie P_oP_k ist der Leistung und von der Linie P_oP_u dem Drehmoment proportional. Die zu jedem Punkte P des Kreises gehörende Tourenzahl wird durch den Schnittpunkt S von P_oP mit

der zu P_oP_u parallelen Linie AB bestimmt, wo A auf P_oP_k , B auf der Tangente an den Kreis in P_o liegt und AB in 100 Teile geteilt ist.

BS stellt den Schlupf in % dar. Das Diagramm gibt uns also ein einfaches Mittel an Hand, um für jede Tourenzahl die im Motor fließenden Ströme und das entwickelte Drehmoment ablesen zu können.

Auf diese Weise ist die Kurve der Abb. 52 bestimmt worden. Um den Einfluß des Läuferwiderstandes auf das Drehmoment zu zeigen, sind auch die Kurven für den Fall des halben Läuferwiderstandes eingezeichnet worden.

In manchen Fällen ist es erwünscht, neben der graphischen Behandlung des Problems auch eine analytische anzuwenden; besonders dann, wenn der Einfluß bestimmter Faktoren untersucht werden soll. Im Archiv für Elektrotechnik¹ hat Kloß eine übersichtliche Formel für das Drehmoment des asynchronen Drehstrommotors entwickelt, die nach einigen Umstellungen durch die Verfasser folgende Form annimmt:

$$d = \frac{M}{N} = \frac{1}{3,5 y_1 + (1 + \tau) \left(\frac{y_2}{\sigma} + \frac{\sigma}{y_3} \right)}, \quad (1)^2$$

¹ Arch. Elektrot. Bd. 6, S. 59. 1916.

² Die genaue Übertragung der Kloßschen Formel würde im Nenner zu $2 y_1$ statt $3,5 y_1$ führen. Durch Vergleich mit dem Diagramm findet man aber, daß r_1

wo

$$M = \text{Drehmoment in synchronen Watt,}$$

$$N = \text{abgegebene Leistung in Watt,}$$

$$y_1 = \frac{3 J_{n,i}^2 r_1}{N},$$

$$y_2 = \frac{3 J_{n,i}^2 r'_2}{N},$$

$$y_3 = \frac{3 J_{k,i}^2 r'_2}{N},$$

$$J_{n,i} = \frac{N}{3 U_p},$$

$$U_p = \text{Phasenspannung,}$$

$$r_1 = \text{Widerstand einer Phase der Statorwicklung,}$$

$$r'_2 = \text{auf die Windungszahl der Statorwicklung bezogener}$$

$$\text{Widerstand einer Phase der Läuferwicklung.}$$

$$J_{k,i} = \text{ideeller Kurzschlußstrom.}$$

Man beachte, daß hier nicht der Normalstrom J_n des Motors, sondern der ideale Normalstrom, d. h. derjenige Normalstrom, der bei $\eta = 1$ und $\cos \varphi = 1$ auftreten würde, eingeführt ist. Sobald die Leistung N und die Spannung U_p gegeben ist, ist auch $J_{n,i}$ gegeben, während J_n erst durch schwierige Rechnungen oder durch Experimente gefunden werden muß¹.

Setzt man $\sigma = 1$, so ist d das Verhältnis des Anlaufdrehmomentes zum normalen Drehmoment.

Wir erkennen drei Einflüsse in d :

1. den Einfluß des primären Widerstandes,
2. den Einfluß des sekundären Widerstandes,
3. den Einfluß des ideellen Kurzschlußstromes, also der Reaktanzen und wollen zunächst die Anlaufverhältnisse des in Abb. 47 und 48 und Tabelle 4 bis 7 gezeigten Motors an Hand dieser Formel betrachten. Da im Rotor keine Phasenwicklung, sondern ein Käfig vorhanden ist, so muß r'_2 als Widerstand einer äquivalenten Läuferwicklung berechnet werden, d. h. einer Drehstromwicklung, die gleich viel Windungen besitzt wie die Statorwicklung und bei der gleichen effektiven Ampere-windungszahl genau so viel Verluste besitzt wie der Käfiganker.

Wird der Widerstand eines Stabes mit r_s , der Widerstand eines (aufgeschnittenen) Endringes mit r_e , die Zahl der Stäbe im Rotor mit $z_{n,2}$, der Wickelfaktor der Statorwicklung mit f_{w_1} (meistens gleich 0,96) be-

einen größeren Einfluß ausübt. Auch der Faktor 3,5 wird zu klein, wenn der Winkel zwischen $P_o P_u$ und der Horizontalen abnormal groß wird. Der Faktor hängt von dem Verhältnis $\frac{r_1}{x_1 + x_2}$ ab.

¹ Es wäre wünschenswert, daß $J_{n,i}$ auch für andere Zwecke benutzt würde. Wenn z. B. von dem Elektrizitätswerk der zulässige Stromstoß beim Anlassen im Vergleich zu J_n angegeben wird, so kommt ein Motor mit schlechtem $\cos \varphi$ und η besser weg als einer mit guten Werten.

zeichnet, so ergibt sich auf Grund einer einfachen Betrachtung¹ der Wert

$$r'_2 = 12 (w \cdot f_w)^2 \left(\frac{r_s}{z_{n,2}} + \frac{r_e}{2 p^2 \pi^2} \right). \quad (2)$$

Für den betrachteten Motor ist:

$$r_1 = 0,535, \quad r_s = 0,0001, \quad r_e = 0,000088,$$

$$z_{n,2} = 48, \quad s = 114$$

und mithin

$$r'_2 = 0,46.$$

Für die Berechnung von d brauchen wir ferner:

$$J_{n,i} = 11,35, \quad J_{k,i} = 101, \quad \tau = 0,051,$$

$$y_1 = \frac{3 \cdot 11,35^2 \cdot 0,535}{7500} = 0,0276,$$

$$y_2 = \frac{3 \cdot 11,35^2 \cdot 0,46}{7500} = 0,0238,$$

$$y_3 = \frac{3 \cdot 101^2 \cdot 0,46}{7500} = 1,88,$$

also

$$d = \frac{1}{3,5 \cdot 0,0276 + 1,05 \cdot \left(\frac{0,0238}{\sigma} + \frac{\sigma}{1,88} \right)}.$$

Für $\sigma = 1$ (Beginn des Anlaufes) ist

$$d = 1,47.$$

Man ersieht aus diesem Beispiele, daß y_3 der ausschlaggebende Faktor für den Fall $\sigma = 1$ ist, während y_1 und y_2 das Resultat nur wenig beeinflussen. Für überschlägige Rechnung kann man bei $\sigma = 1$ direkt $d = c \cdot y_3$ setzen. In dem betrachteten Beispiel ist $c = 0,78$. c nähert sich der Einheit noch mehr, je größer die Leistung ist.

¹ Wenn J_s den Strom in einem Stab bezeichnet, so ist der Strom im Endring $\frac{z_{n,2}}{2 p \pi} J_s$ und die Verluste im Käfiganker

$$V_k = z_{n,2} \cdot J_s^2 \cdot r_s + 2 \cdot \left(\frac{z_{n,2} J_s}{2 p \pi} \right)^2 r_e.$$

Der äquivalente Schleifringanker muß $\frac{z_{n,2} \cdot J_s}{f_{w_1}}$ Ampereleiter und pro Phase ebensoviel Windungen wie die Statorwicklung (also w) besitzen. Der Ankerstrom muß also $\frac{z_{n,2} J_s}{6 f_{w_1} \cdot w}$ betragen, und da seine Verluste genau so groß sein sollen wie diejenigen des Käfigankers, so erhalten wir die Gleichung:

$$3 \cdot \left(\frac{z_{n,2} J_s}{6 w f_{w_1}} \right)^2 r'_2 = z_{n,2} J_s^2 r_s + 2 \left(\frac{z_{n,2} J_s}{2 p \pi} \right)^2 r_e$$

und hieraus

$$r'_2 = 12 (w \cdot f_{w_1})^2 \left(\frac{r_s}{z_{n,2}} + \frac{r_e}{2 p^2 \pi^2} \right).$$

Wir erhalten das gleiche Resultat auf einem anderen Wege. Die gesamte vom Stator auf den Rotor übertragene Leistung sei N' . Sie ist bei $\sigma = 1$ gleichbedeutend mit den Verlusten im Käfiganker, ist aber auch dem Drehmoment in synchronen Watt gleich, also für $\sigma = 1$.

$$M_a = 3 J_{k,2}^2 r'_2 = y_3 \cdot \left(\frac{J_{k,2}}{J_{k,i}} \right)^2.$$

c ist also gleich dem Quadrate des Verhältnisses des sekundären Kurzschlußstromes (auf die Statorwindungszahl bezogen) zum primären ideellen Kurzschlußstrom.

Die Frage lautet nun: „Welche Mittel besitzen wir, um die schlechten Eigenschaften des Käfigankers in bezug auf Anlaufdrehmoment und Anlaufstrom zu beseitigen resp. zu mildern?“

Das erste Mittel besteht darin, den sekundären Ohmschen Widerstand und das zweite Mittel, den ideellen Kurzschlußstrom so groß wie möglich zu machen.

Das erste Mittel vergrößert offenbar das Anlaufdrehmoment auf Kosten des Wirkungsgrades.

Tabelle 9 gibt Aufschluß, in welcher Weise Wirkungsgrad und Anlaufdrehmoment miteinander verflochten sind.

Das zweite Mittel, die Verwendung eines relativ großen ideellen Kurzschlußstromes, scheint zunächst im Gegensatz zu stehen mit den Bestrebungen,

den Anlaufstrom zu beschränken — aber nur scheinbar. Wenn wir z. B. bei konstantem r'_2 den Kurzschlußstrom um 50% erhöhen, so steigt M_a , weil vom Quadrate von $J_{k,i}$ abhängig, auf das 2,25fache und der Wert g , der die Güte des Anlaufs darstellt, hat sich um ein Drittel gebessert. Es fragt sich nun, durch welche Mittel die Erhöhung des ideellen Kurzschlußstromes erreicht wird. Da ein großer ideeller Kurzschlußstrom identisch ist mit kleiner Streuung, so sollte man vermuten, daß damit gleichzeitig auch der $\cos \varphi$ verbessert wird. Im allgemeinen dürfte aber gerade das Gegenteil der Fall sein, denn das Verhältnis von Magnetisierungsstrom zu Kurzschlußstrom ist bei den normalen Motoren abhängig von der Leistung und Tourenzahl und kann durch die Kunst des Berechners nur dann merkbar verändert werden, wenn gleichzeitig merkbare Veränderungen in den Herstellungskosten zugelassen werden, z. B. kann es verbessert werden durch vergrößerte Nutenzahl, durch Vermeidung hoher Sättigung, durch kleinen Luftspalt usw. Meistens beschränken aber wirtschaftliche Gründe die Freiheit des Berechners, soweit eine Vergrößerung der Herstellungskosten zu erwarten ist, und deshalb wird meistens die Vergrößerung des ideellen Kurzschlußstromes Hand in Hand mit einer Vergrößerung des Magnetisierungsstromes gehen. Dies führt zu einer Verschlechterung des $\cos \varphi$, besonders bei Teilbelastung. Wenn also das erste

Tabelle 9.

Schlupf	Anlaufdrehmoment	η
2%	98%	87,9
3%	139%	87
4%	177%	86,2
5%	208%	85,4

Mittel die Anlaufverhältnisse auf Kosten des Wirkungsgrades verbessert, so ist in den meisten Fällen das zweite Mittel mit einer Verschlechterung des $\cos \varphi$ verknüpft. Ein zufällig auf dem Markte gekaufter Motor (von einer Großfirma geliefert) zeigte, welche günstigen Werte des Anlaufdrehmomentes auf diese Weise erreicht werden können, zeigte aber auch, wie sehr die $\cos \varphi$ -Kurve dabei verschlechtert wurde.

Der Motor war ein Drehstrommotor mit Käfiganker für 2,2 kW, 50 Hz, 4polig, 220 V, also $J_{n,i} = \frac{2200}{220 \cdot \sqrt{3}} = 5,8$ Amp.

$$r_1 = 0,62 \text{ Ohm}, \quad r'_2 = 0,76 \text{ Ohm},$$

$$J_{k,i} = 75 \text{ Amp.}, \quad J_m = 5 \text{ Amp.},$$

also

$$y_1 = \frac{3 \cdot 5,8^2 \cdot 0,62}{2200} = 0,028,$$

$$y_2 = \frac{3 \cdot 5,8^2 \cdot 0,76}{2200} = 0,034,$$

$$y_3 = \frac{3 \cdot 75^2 \cdot 0,76}{2200} = 5,7,$$

$$\tau = \frac{5}{75 - 5} = 0,071,$$

$$d_a = \frac{1}{3,5 \cdot 0,028 + 1,071 \left(0,034 + \frac{1}{5,7} \right)} = 3,2.$$

In λ -Schaltung war also das $\frac{3,2}{3} = 1,07$ -fache¹ Anlaufdrehmoment

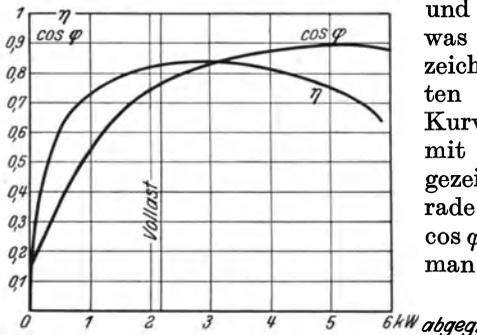


Abb. 53. $\cos \varphi$ und Wirkungsgrad eines 2,2-kW-Drehstrommotors mit Käfiganker.

und der 2,1fache Strom vorhanden, was sicherlich als sehr günstig bezeichnet werden muß. Aber betrachten wir die aufgenommene $\cos \varphi$ -Kurve, die in Abb. 53 gleichzeitig mit der Wirkungsgradkurve aufgezeichnet ist. Man ersieht, daß gerade bei den Teilbelastungen der $\cos \varphi$ schwer gelitten hat und daß man also die besprochene Methode nur mit Vorsicht verwenden darf. Will man bei größeren Motoren ähnliche Anlaufverhältnisse erzielen wie für den obigen 2,2-kW-Motor, so muß

man zu den Methoden greifen, die in den nächsten Kapiteln behandelt werden.

¹ Gemessen 1,15fach.

3. Der Drehstrommotor mit Doppelkäfiganker¹.

A. Allgemeine Theorie.

Im vorhergehenden Kapitel ist gezeigt worden, welche Werte des Anlaufdrehmomentes bei einem Motor mit Käfiganker im günstigsten Falle erzielt werden können. Bei kleinen Motoren bis zu etwa 5 PS dürften die Resultate der Praxis genügen, aber oberhalb dieser Leistung wird in vielen Fällen ein Veto von den Elektrizitätswerken gegen die Installation des Motors erhoben. Ob dieses Veto immer berechtigt ist, darüber soll im Kap. 9 dieses Buches gesprochen werden.

Im folgenden soll nun die wichtigste Verbesserung, nämlich der von Dolivo-Dobrowolski und später von Boucherot vorgeschlagene Doppelkäfiganker behandelt werden.

Der Rotor eines normalen Drehstrommotors möge mit zwei Käfigen ausgerüstet sein, einem äußeren und einem inneren, deren Stabzahl gleich oder verschieden sein kann.

In der folgenden Betrachtung nehmen wir an, daß die Stabzahl für beide Käfige gleich sei und daß die entsprechenden Stäbe in radial übereinander gelegenen Nuten liegen, die durch einen kleinen Spalt miteinander verbunden sind (siehe Abb. 54).

Gegenüber einem normalen Käfiganker, in welchem der Rotorstrom eindeutig festgelegt ist, haben wir hier 2 parallele Pfade, die im all-

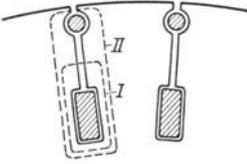


Abb. 54. Anordnung der beiden Käfige eines Doppelnutmotors.

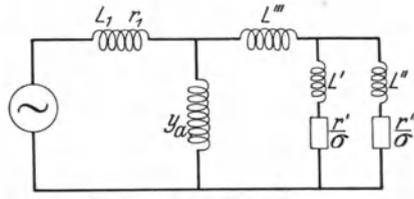


Abb. 55. Ersatzdiagramm für den Doppelnutmotor.

gemeinen verschiedene Widerstände und verschiedene Reaktanzen haben werden.

Wir können das Verhalten dieses Motors durch den in Abb. 55 dargestellten Ersatzstromkreis darstellen, in welchem L_1 und r_1 die Streuinduktivität und den Widerstand der Statorwicklung und y_a die Erregeradmittanz darstellt. Während wir beim normalen Drehstrommotor nur eine einzige Streuinduktivität des Rotors zu berücksichtigen brauchen, müssen wir jetzt deren 3 unterscheiden, nämlich L' , L'' und L''' . Diese entsprechen denjenigen Streukraftlinien, die vom inneren Käfig, äußeren Käfig, resp. von beiden Käfigen gemeinsam erzeugt werden.

¹ Dieses Kapitel schließt sich an die Abhandlung eines der Verfasser: Die günstigste Dimensionierung des Boucherot-Motors von F. Punga, Arch. Elektrot. Bd. 21, H. 1. Über den gleichen Gegenstand siehe auch die Arbeiten Lund (Arch. Elektrot. 1925/26, S. 121 und 1928, S. 472) und Böttcher (AEG-Mitteilungen, Dez. 1928); ferner den Auszug aus einer Arbeit von Wennerberg, ETZ 1925, S. 1084 und Dr. Baffrey, El. u. Maschinenb. 1928, S. 749.

Betrachten wir die in Abb. 54 eingezeichneten Pfade, so erkennen wir, daß im Eisenpaket nur Streukraftlinien auftreten, die vom inneren Käfig (Pfad I) oder von beiden Käfigen zugleich erzeugt werden (Pfad II), daß also, soweit der Eisenteil des Käfigs in Betracht kommt, $L'' = 0$ ist.

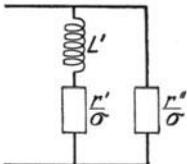


Abb. 56. Ersatzdiagramm für die beiden Käfige des Doppelnutmotors.

Bei den Endringen liegen die Verhältnisse etwas anders; hier wird auch der äußere Endring Streukraftlinien erzeugen, die nur mit ihm allein verschlungen sind. Auf jeden Fall ist L'' relativ klein und soll zunächst vernachlässigt werden.

Gegenüber einem normalen Drehstrommotor muß also der äquivalente Widerstand und die äquivalente Streuinduktion aus der Parallelschaltung der beiden in Abb. 56 dargestellten Stromkreise berechnet werden.

Die Impedanz dieser Parallelschaltung kann nach der symbolischen Rechnungsart¹ zu

$$Z = \frac{R_2}{\sigma} + j X_2 = \frac{1}{\frac{1}{\frac{r'}{\sigma} + j x'} + \frac{1}{\frac{r''}{\sigma}}}} = \frac{1}{\frac{r'}{\sigma} + j x' + \frac{1}{\frac{r''}{\sigma}}}} = \frac{1}{\frac{r'}{\sigma} + j x' + \frac{\sigma}{r''}}} = \frac{1}{\frac{r' r'' + r'' (\sigma x') + \sigma r'}{\sigma r''}}} = \frac{r''}{\sigma} \frac{r' + j \sigma x'}{r' + r'' + j \sigma x'} \quad (3)$$

gefunden werden.

Die Trennung dieses Ausdrucks in einen skalaren und einen imaginären Teil ergibt:

$$R_2 = \frac{r'' [r' (r' + r'') + (\sigma x')^2]}{(r' + r'')^2 + (\sigma x')^2} \quad (4)$$

und

$$j X_2 = \frac{j r''^2 x'}{(r' + r'')^2 + (\sigma x')^2}. \quad (5)$$

Im Synchronismus wird

$$R_{2, \sigma=0} = \frac{r' r''}{r' + r''} \quad \text{und} \quad X_{2, \sigma=0} = \frac{r''^2 x'}{(r' + r'')^2},$$

und da sich diese Werte nicht merklich ändern, wenn sich die Tourenzahl einige Prozent vom Synchronismus entfernt, so werden sie auch bei Vollast gültig sein. Sie stellen also die im normalen Betriebe auftretenden Werte des Widerstandes und der Reaktanz des Rotorstromkreises (von L''' in Abb. 55 abgesehen) dar und mögen mit r_2 und x_2 bezeichnet werden. Also

$$r_2 = \frac{r' \cdot r''}{r' + r''} \quad \text{und} \quad x_2 = \left(\frac{r''}{r' + r''} \right)^2 x'. \quad (6)$$

Wenn wir also die Frage untersuchen, welches Verhältnis $\frac{r''}{r'}$ die günstigsten Anlaufverhältnisse liefert, so muß offenbar sowohl r_2 als auch x_2 konstant gehalten werden.

Wir können nun die Abhängigkeit der Werte R_2 und X_2 von σ an Hand eines einfachen Diagramms darstellen.

In Abb. 57 sei $AB = r''$, $BC = r'$, $CD = x'$, $CE = \sigma x'$, $\sphericalangle ACD = 90^\circ$, $\sphericalangle CAE = \beta$, $\sphericalangle CAD = \beta_1$.

¹ Über symbolische Rechnungsart siehe Anhang.

Wir können schreiben:

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{r'' [(r' + r'')^2 + (\sigma x')^2 - r'' (r' + r'')] }{(r' + r'')^2 + (\sigma x')^2} = r'' \left(1 - \frac{r'' (r' + r'')}{(r' + r'')^2 + (\sigma x')^2} \right) \\ &= r'' \left(1 - \frac{AB \cdot AC}{AE^2} \right) = r'' \left(1 - \frac{AB \cdot \cos \beta}{AE} \right). \end{aligned}$$

Fällt man von B das Lot BF auf AE , so ist

$$AF = AB \cdot \cos \beta$$

und mithin:

$$R_2 = r'' \left(1 - \frac{AF}{AE} \right) = r'' \frac{FE}{AE} = r'' \frac{F'C}{AC}$$

(wenn $F'F \parallel CD$). Führt man schließlich noch $r_2 = \frac{r' r''}{r' + r''}$ ein, so ergibt sich:

$$R_2 = r_2 \cdot \frac{CF'}{CB}. \quad (7)$$

Bei Synchronismus fällt F' mit B zusammen, und in dem Maße, wie sich σ vergrößert, wird E von C nach D wandern und F' von B in der Richtung nach A .

Wenn wir uns einen neuen Maßstab anfertigen, derart, daß CB dem Werte r_2 (anstatt r') entspricht (ohne die Verhältnisse des Dreiecks ACD zu ändern), so wird CF' bei jeder Tourenzahl den richtigen effektiven Rotorwiderstand abzulesen gestatten.

Beim Anlauf ist $\sigma = 1$ und der effektive Rotorwiderstand CF'_1 , (wobei $BF_1 \perp AD$ und $F_1F'_1 \parallel CD$).

Ebenso einfach läßt sich X_2 im gleichen Diagramm ablesen. Wir können X_2 durch x_2 ausdrücken, nämlich

$$X_2 = \frac{(r' + r'')^2}{(r' + r'')^2 + (x')^2} x_2 = x_2 \cos^2 \beta. \quad (8)$$

Führen wir also einen besonderen Maßstab ein, derart, daß AB in Abb. 57 sofort x_2 darstellt, so wird $AF' = AB \cos^2 \beta$ den Wert X_2 abzulesen gestatten.

Die Bewegung des Punktes F' zwischen den Punkten A und B gibt uns also Aufschluß über die Vergrößerung des Rotorwiderstandes und die Verkleinerung der Rotorstreinduktivität während des Anlaufes.

Das gleiche Diagramm gibt uns auch Aufschluß über andere Fragen.

Die Ströme in den beiden Käfigen verhalten sich umgekehrt wie ihre Impedanzen, also

$$\begin{aligned} J' : J'' &= r'' : r' + j \sigma x' \\ &= AB : BE. \end{aligned}$$

Wenn also der sekundäre Strom J_2 bekannt ist, so können für jeden Wert

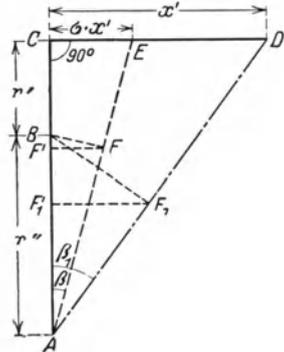


Abb. 57. Graphische Darstellung des Zusammenarbeitens der beiden Käfige eines Doppelnutmotors.

des Schlupfes die Teilströme und ihre Phasenlage zueinander aus der Beziehung

$$J_2 : J' : J'' = AE : AB : BE$$

abgelesen werden.

Wir führen nun die Bezeichnung $\lambda = \frac{r''}{r_2}$ (also $r'' = \lambda r_2$, $r' = \frac{\lambda}{\lambda - 1} r_2$) und $x' = \left(\frac{r' + r''}{r''}\right)^2 x_2$, $\mu = \frac{x_2}{r_2}$ ein und wollen untersuchen, welcher Wert von λ bei gegebenen Werten von r_2 und μ zu dem größten Rotorwiderstande bei $\sigma = 1$ führt.

In dieser Bezeichnung erhält Z den einfachen Ausdruck

$$Z = \frac{r_2}{\sigma} \frac{(\lambda - 1) r_2 + j \sigma \lambda x_2}{(\lambda - 1) r_2 + j \sigma x_2} \quad (9)$$

und

$$R_{\sigma=1} = r_2 \frac{(\lambda - 1)^2 + \lambda \mu^2}{(\lambda - 1)^2 + \mu^2} = r_2 \left(1 + \frac{(\lambda - 1) \mu^2}{(\lambda - 1)^2 + \mu^2}\right). \quad (10)$$

$R_{\sigma=1}$ wird ein Maximum, wenn

$$\lambda - 1 = \mu. \quad (11)$$

Wir wollen dieses Resultat auf Abb. 57 anwenden. Offenbar ist:

$$CD = x' = \left(\frac{r' + r''}{r''}\right)^2 x_2 = \left(\frac{\lambda}{\lambda - 1}\right)^2 x_2$$

und

$$AC = r' + r'' = \frac{\lambda^2}{\lambda - 1} \cdot r_2,$$

also:

$$\frac{CD}{AC} = \frac{x_2}{(\lambda - 1) r_2} = \frac{\mu}{\lambda - 1}.$$

Bei Benutzung des günstigsten Wertes $\lambda - 1 = \mu$ wird also $AC = CD$, d. h. das Dreieck ACD wird ein gleichschenkliges, nimmt also von allen möglichen Dreiecken eine charakteristische Stellung ein.

Der Winkel β_1 wird 45° und der Punkt F_1' liegt jetzt in der Mitte von AB , so daß:

$$\begin{aligned} R_{2, \sigma=1} &= r_2 \frac{CF'}{CB} = r_2 \frac{r' + 0,5 r''}{r'} = r_2 + \frac{1}{2} \frac{r''}{r'} r_2 \\ &= r_2 + \frac{1}{2} (\lambda - 1) r_2 = r_2 + \frac{1}{2} x_2 \end{aligned}$$

wird. Wenn wir die in Abb. 57 eingetragenen Werte mit $\frac{r_2}{r'}$ multiplizieren und außerdem $\lambda = \mu + 1$ wählen, erhalten wir das gleichschenklige, rechtwinklige Dreieck ACD der Abb. 58, worin jetzt $AB = x_2$ und $BC = r_2$ wird.

Wir brauchen jetzt keine besonderen Maßstäbe für r_2 und x_2 und können durch die Bewegung von F' sowohl die Vergrößerung von R_2 als auch die Verkleinerung von X_2 erfassen.

Der sekundäre Widerstand beim Schlupf σ ist jetzt durch CF' und die sekundäre Reaktanz durch AF' dargestellt. Die Summe des sekundären Widerstandes und der

$r_2 \frac{\varepsilon_2}{x_2}$ kann nun annähernd gleich ϱ_v und mithin $R_2 \frac{\varepsilon_2}{x_2}$ gleich einem ideellen Schlupf ϱ gesetzt werden, den ein normaler Drehstrommotor bei Vollast haben würde, der für die betrachtete Tourenzahl gleich viel Verluste im Rotor wie der Doppelnutmotor hat.

Die Gleichungen lauten also:

$$\varrho = \varrho_v + \varepsilon_2 \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^2} \quad \text{und} \quad \varepsilon_\sigma = \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2}{1 + \sigma^2} \quad (13)$$

und für $\sigma = 1$

$$\varrho_{\sigma=1} = \varrho_v + \frac{\varepsilon_2}{2} \quad \text{und} \quad \varepsilon_{\sigma=1} = \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2}{2}. \quad (14)$$

Wählen wir beispielsweise für einen 4poligen 11-kW-Motor:

$$\varepsilon_1 = 0,15, \quad \varepsilon_2 = 0,12, \quad \varrho_v = 0,035,$$

so wird

$$\varrho_{\sigma=1} = 0,035 + \frac{1}{2} 0,12 = 0,095$$

und die gesamte relative Streuung bei $\sigma = 1$

$$\varepsilon_1 + \frac{1}{2} \varepsilon_2 = 0,21,$$

d. h. der Motor wird im ersten Augenblick das gleiche Drehmoment entwickeln wie ein normaler Drehstrommotor, der bei Vollast 9,5% Schlupf besitzt und dessen ideeller Kurzschlußstrom gleich dem 4,77fachen des Normalstromes ist.

Für jeden beliebigen Wert von σ lassen sich aus Gl. (13) u. (14) die dazu gehörigen Werte des ideellen Kurzschlußstromes und des Vollast-schlupfes angeben. Das entsprechende Drehmoment kann dann in einfacher Weise unter Benutzung der Kloßschen Formel berechnet werden.

Der obige 11-kW-Motor möge bei Vollast 405 Watt Verluste im sekundären Kupfer, 450 Watt im primären Kupfer, 450 Watt Eisenverluste und 195 Watt Reibungsverluste haben, so daß sich $y_1 = 0,025$ und $y_2 = 0,029$ ergeben. In der 1. Spalte der Tabelle 10 ist σ , in der 2. Spalte $\varrho = \varrho_v + \varepsilon_2 \cdot \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^2}$, in der 3. Spalte $\varepsilon_{2,\sigma} = \frac{\varepsilon_2}{1 + \sigma^2}$ eingetragen. Obgleich τ nur wenig Einfluß hat, ist es doch in einfacher Weise berück-

Tabelle 10.

σ	ϱ	$\varepsilon_{2,\sigma}$	y_1	y_2	y_3	d	$J_{ki \text{ Amp}}$
1	0,095	0,06	0,025	0,08	3,1	1,98	105
0,9	0,089	0,066	0,025	0,075	2,72	1,91	102
0,8	0,082	0,073	0,025	0,069	2,36	1,86	99
0,7	0,075	0,080	0,025	0,063	2,02	1,82	96
0,6	0,067	0,088	0,025	0,056	1,69	1,78	92,7
0,5	0,059	0,096	0,025	0,05	1,4	1,74	90
0,4	0,052	0,103	0,025	0,043	1,15	1,75	87,2
0,3	0,045	0,110	0,025	0,038	0,95	1,78	85
0,2	0,040	0,115	0,025	0,0334	0,81	1,88	83,2
0,15	0,038	0,117	0,025	0,0316	0,76	1,91	82,7
0,1	0,036	0,119	0,025	0,0305	0,72	1,78	82,3
0,05	0,035	0,1197	0,025	0,0293	0,7	1,25	82
0	0,035	0,12	0,025	0,029	0,69	0	82

sichtigt. Die 3 nächsten Spalten geben uns y_1 , y_2 und y_3 , und die vorletzte Spalte

$$d = \frac{1}{3,5 y_1 + (1 + \tau) \left(\frac{y_2}{\sigma} + \frac{\sigma}{y_3} \right)}.$$

In Abb. 59 ist das Drehmoment in Abhängigkeit vom Schlupf aufgetragen.

Wir sehen, daß das Drehmoment sinkt, sobald die Tourenzahl ansteigt. Das ist eine Eigentümlichkeit des betrachteten Motors, die auf den ersten Augenblick überrascht. In manchen Fällen artet diese Einbuchtung derart aus, daß der mit dem Motor angestrebte Zweck vereitelt werden kann.

Wir wollen also untersuchen, ob diese Einbuchtung ganz oder teilweise vermieden werden kann, und welche Faktoren einen Einfluß ausüben.

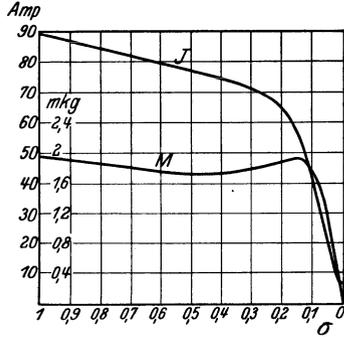


Abb. 59. Drehmoment und Strom eines 11-kW-Doppelkäfigmotors in Abhängigkeit vom Schlupf.

In der Formel $d = \frac{1}{3,5 y_1 + (1 + \tau) \left(\frac{y_2}{\sigma} + \frac{\sigma}{y_3} \right)}$ ist y_1 konstant, wäh-

rend y_2 mit steigender Tourenzahl kleiner wird. Diese beiden Summanden können also nicht die Einbuchtung hervorrufen, ganz abgesehen davon, daß sie bei niedriger Tourenzahl quantitativ klein gegenüber dem dritten Gliede $\frac{\sigma}{y_3}$ sind. Wir müssen also in der Größe von y_3 , resp. in seiner Abhängigkeit von σ , die Ursache für die Einbuchtung suchen. $y_3 = \frac{3 J_{ki}^2 r_2}{N}$ würde für einen normalen Käfiganker konstant bleiben, muß aber bei dem Doppelkäfiganker mit zunehmender Tourenzahl abnehmen, weil sowohl r_2 als auch J_{ki} abnehmen.

Wir setzen wieder voraus, daß der Doppelkäfiganker nach der Regel $\lambda = \mu + 1$ berechnet worden sei.

Dann ist

$$y_3 = \frac{3 J_n^2 \left(r_2 + x_2 \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^2} \right)}{N \left(\varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2}{1 + \sigma^2} \right)^2} = \frac{3 J_n^2 [r_2 + (2r_2 + x_2) \sigma^2 + (r_2 + x_2) \sigma^4]}{N \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \sigma^2)^2} \quad (15)$$

Führen wir wiederum den bei Vollast auftretenden Schlupf ϱ_v ein, so ergibt sich

$$y_3 = \frac{c_0 [\varrho_v + (2\varrho_v + \varepsilon_2) \sigma^2 + (\varrho_v + \varepsilon_2) \sigma^4]}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \sigma^2)^2},$$

wo

$$c_0 = \left(\frac{J_{n,1}}{J_{n,2}} \right)^2 (1 + \varrho_v) \approx \frac{1}{\cos^2 \varphi}.$$

In Abb. 60 ist y_3 unter der Annahme $\rho_v = 0,035$, $\varepsilon_1 = 0,15$, $c_0 = 1,34$ berechnet worden, und zwar:

für $\lambda = 2$, $\mu = 1$,

für $\lambda = 4$, $\mu = 3$,

für $\lambda = 6$, $\mu = 5$.

Wir sehen, daß y_3 für $\lambda = 2$ weniger steil abfällt als eine durch den Anfangspunkt B der Kurve und den Punkt D der Abszissenachse gezogene Gerade, und daß deshalb durch $\frac{\sigma}{y_3}$ keine Einbuchtung erzeugt werden kann. Im Gegensatz hierzu führt die Kurve $\lambda = 6$ zu einer starken

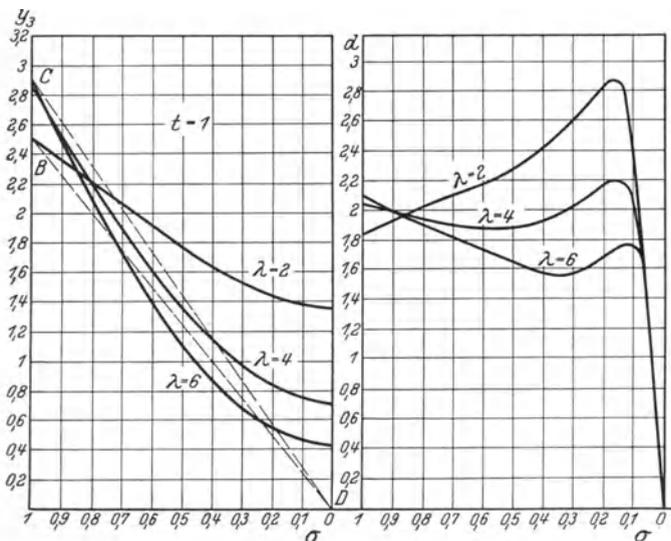


Abb. 60. y_3 in Abhängigkeit vom Schlupf für verschiedene Werte von λ ($t = 1$).

Abb. 61. Das Verhältnis $d = \frac{M}{N}$ in Abhängigkeit vom Schlupf bei verschiedenen Werten von λ ($t = 1$).

Einbuchtung, denn sie liegt wesentlich unter der Geraden CD . Die Kurve $\lambda = 4$ führt nur zu einer verhältnismäßig kleinen Ausbuchtung. In Abb. 61 sind die entsprechenden Drehmomentkurven für die obigen 3 Fälle aufgezeichnet, die obige Behauptung bestätigen.

Um auch die Einbuchtung in der Drehmomentkurve von solchen Motoren zu untersuchen, die nicht nach dem Gesetze $\lambda = \mu + 1$ berechnet worden sind, soll jetzt der allgemeine Ausdruck für das Drehmoment des Doppelkäfigankers entwickelt werden.

Wir führen den Wert $t = \frac{\mu}{\lambda - 1}$ ein. Die Seite CD im Dreieck ACD der Abb. 57 ist jetzt t mal größer als die Seite AC . Die Vergrößerung des sekundären Widerstandes beträgt $R_2 - r_2 = r_2 \left(\frac{CF'}{CB} - 1 \right)$

$= r_2 \cdot \frac{BF'}{CB} = (\lambda - 1) r_2 \sin^2 \beta$ und die Verkleinerung der Reaktanz $x_2 \sin^2 \beta$, wobei $\operatorname{tg} \beta = \sigma t$.

Wir erhalten jetzt:

$$y_3 = \frac{3 J_n^2 \left(1 + (\lambda - 1) \frac{(\sigma t)^2}{1 + (\sigma t)^2} \right) r_2}{N \left(\varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2}{1 + (\sigma t)^2} \right)^2} = \frac{3 J_n^2 r_2}{N} \frac{1 + (\lambda + 1) (\sigma t)^2 + \lambda (\sigma t)^4}{[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 (\sigma t)^2]^2}. \quad (16)$$

Für $t = 2$, $\rho_v = 0,035$, $\varepsilon_1 = 0,15$ mögen wiederum 3 Fälle behandelt werden, nämlich

$$\begin{aligned} \lambda &= 2, & \mu &= 2, \\ \lambda &= 2,5, & \mu &= 3, \\ \lambda &= 4, & \mu &= 6. \end{aligned}$$

Sie sind in Abb. 62 aufgezeichnet. Die entsprechenden Drehmomentenlinien sind in Abb. 63 wiedergegeben. Daß für $\lambda = 4$ eine geringe Ein-

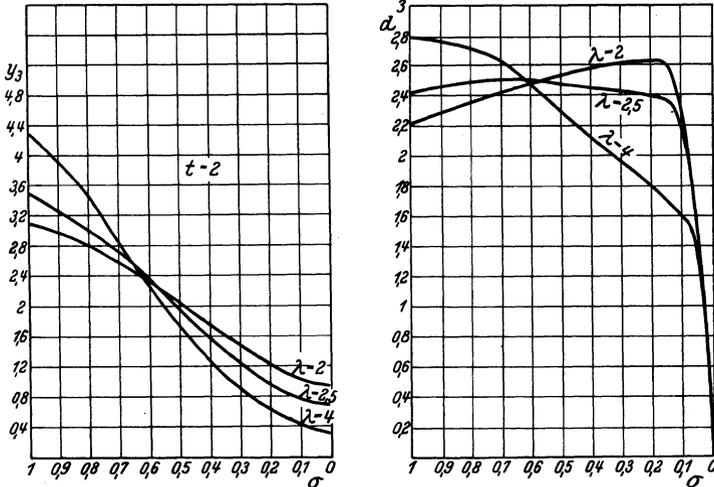


Abb. 62 und 63. Das Verhältnis $d = \frac{M}{N}$ in Abhängigkeit vom Schlupf bei verschiedenen Werten von λ ($t = 2$).

buchtung, für $\lambda = 2$ aber keine Einbuchtung auftritt, ist aus dem Vorhergehenden erklärlich.

Wollen wir die Kurven der Abb. 63 mit denjenigen der Abb. 61 vergleichen, so muß auf Gleichheit von μ geachtet werden. Die Kurve $\lambda = 4$ in Abb. 61 und diejenige für $\lambda = 2,5$ in Abb. 63 können direkt miteinander verglichen werden, weil in beiden $\mu = 3$ ist. Die letztere ist günstiger als die erstere, weil eine Einbuchtung vollständig fehlt, und weil außerdem das Anlaufdrehmoment für $\sigma = 1$ größer ist. Die Stromaufnahme ist zwar annähernd im gleichen Verhältnis gestiegen, aber sehr oft kommt es darauf an, mit der Stern-Dreieck-Anlaßmethode ein

bestimmtes Anlaufdrehmoment zu erreichen, wobei ein um 10 bis 15% größerer Stromverbrauch noch zulässig wäre. Soweit das Drehmoment bei $\sigma = 1$ in Betracht kommt, wird der Fall $t > 1$ noch ausführlich behandelt werden. Die Verringerung der Einbuchtung bei einer Vergrößerung von t ist aber leicht zu erklären:

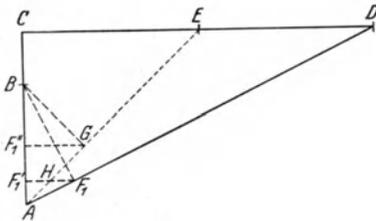


Abb. 64. Darstellung von sekundärem Schlupf und sekundärer Reaktanz eines Doppelnutmotors ($t = 2$).

Eine starke Einbuchtung tritt dann auf, wenn y_3 mit der Tourenzahl rasch abfällt, wenn also der ideale Kurzschlußstrom und der sekundäre Widerstand zu schnell abfallen. Dies kann, wie wir gesehen haben, bei $t = 1$ ($\lambda = \mu + 1$) auftreten, wenn μ sehr groß gewählt wird. Die Verhältnisse werden bei $t > 1$ günstiger, wie

man aus Abb. 64 ersehen kann, die eine Wiederholung von Abb. 57 aber für den Fall $t = \frac{CD}{AC} = 2$ ist.

Wie wir früher abgeleitet hatten, war der sekundäre Widerstand

$$R_2 = r_2 \frac{CF'_1}{CB}$$

und die sekundäre Reaktanz

$$X_2 = x_2 \cdot \frac{AF'_1}{AB}.$$

Der Punkt F'_1 liegt jetzt in unmittelbarer Nähe von A und verschiebt sich im Anfang der Bewegung wesentlich langsamer, als wenn seine Bewegung in der Mitte von AB beginnt.

In der Praxis treten gelegentlich noch Störungsquellen hinzu, die sich in einer Verschärfung dieser Ausbuchtung auswirken können¹.

Es ist bekannt, daß bei dem normalen Käfiganker Sattelbildungen in der Drehmomentenkurve auftreten können, die von der Zahl der Statornuten (z_1) und der Rotornuten (z_2) abhängen. Die Statornutenzahl z_1 gibt eine Schleichtourenzahl von

$$\frac{n_0}{\frac{z_1}{p} \pm 1},$$

wobei n_0 die synchrone Tourenzahl darstellt. Die Amplitude dieser Schleichtourenzahl hängt sehr stark von dem Verhältnis $\frac{z_2}{z_1}$ ab, ist nahezu gleich 0, wenn $z_2 \approx z_1$ ist und wächst stark an, wenn sich z_2 dem

¹ Wir verweisen auf die Arbeiten: 1. Punga: El. u. Maschinenb. S. 1017 bis 1023. 1912. 2. Stiel: Forschungsarbeiten des VDI Nr. 212. 3. Wandenberg: Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern Bd. 1, H. 3, S. 81. 1922. 4. Dreyfus: Ingeniörs Vetenskaps Akademien 1924. 5. Möller: Arch. f. El. Bd. 24, H. 3. 6. Dreese: A. I. E. E. 1930.

Werte $2z_1$ nähert. Das $+$ -Zeichen in dem obigen Ausdruck ist zu benutzen bei dem normalen Drehsinn und das $-$ -Zeichen beim entgegengesetzten Drehsinn.

Im allgemeinen treten auch im Drehfeld des Drehstrommotors die durch 3 nicht teilbaren ungeraden Harmonischen auf, und zwar die 7., 13., 19. usw. im positiven Drehsinn und die 5., 11., 17. usw. im negativen Drehsinn. Die Amplitude dieser Harmonischen wird aber ebenfalls von der Zahl der Rotor-Harmonischen beeinflusst.

Eine sehr stark ausgebildete Sattelbildung entsteht durch das Zusammenwirken einer von der Rotornutenzahl herrührenden Harmonischen mit einer Harmonischen gleicher Ordnung im Stator. In diesem Falle tritt eine synchrone Wirkung auf im Gegensatz zu den oben erwähnten Schleichtourenzahlen, die asynchroner Natur waren. Sie sind zuerst von Dreyfus als synchrone Schleichtourenzahlen erkannt worden. Die Amplituden dieser synchronen Sattelbildungen können außerordentlich große Werte annehmen. So beobachtete Möller bei einem Drehstrommotor mit $z_1 = 24$ und bei $z_2 = 20$ eine Sattelbildung bei 300 Umdrehungen pro Minute und entgegengesetztem Drehsinn, deren Amplitude etwa 3mal größer war als das Kippdrehmoment.

Die stärksten Sattelbildungen treten auf, wenn $z_2 - z_1 = \pm 2p$ ist. Die entsprechende Tourenzahl ist $\frac{2n_0 p}{z_2}$ und liegt im positiven Drehbereich, wenn $z_2 > z_1$ und im negativen Drehbereich, wenn $z_2 < z_1$. Zum Beispiel $z_1 = 24$, $z_2 = 28$ ergeben beim 4poligen Motor sehr starke Sattelbildungen bei $+214$ Umdrehungen pro Minute; $z_1 = 36$ und $z_2 = 32$ oder 40 ergeben ebenfalls sehr starke Sattelbildungen, und zwar im ersten Falle im negativen Drehbereich, im zweiten Falle im positiven Drehbereich.

Ist die Differenz $z_2 - z_1 = \pm 4p$, so treten Sattelbildungen auf, die immerhin noch größer als das Kippmoment sein können.

Einbuchtungen ganz anderer Art entstehen bei den von Fritze¹ zuerst behandelten Geräuschtourenzahlen. Diese treten nur bei ungeraden Rotornutenzahlen auf, und zwar besonders dann, wenn $z_2 - z_1 = \pm 1$, ± 3 oder ± 5 bei 4poligem Motor ist.

Bei dem Doppelkäfiganker ist wegen des stark vergrößerten sekundären Widerstandes die Sattelbildung im allgemeinen abgeflacht und nicht sofort als eine Wirkung einer Schleichtourenzahl zu erkennen. Man wird also bei gewissen Rotornutenzahlen ein kleineres Drehmoment beobachten als die vorausgehenden Berechnungen ergeben, doch lassen sich diese ungünstigen Nutenzahlen leicht vermeiden.

Von den störenden Einflüssen abgesehen, läßt sich auch das für die Doppelkäfigmotoren geltende Drehmoment in einer Formel darstellen, und zwar nicht nur für den Fall, daß der größte sekundäre Widerstand benutzt wird, sondern ganz allgemein für jeden beliebigen Widerstand. Wir benutzen dabei die gleichen Bezeichnungen wie für y_3

¹ Fritze: Arch. f. El. Bd. 10, S. 73. 1921.

und erhalten:

$$d = \frac{1}{3,5 y_1 + (1 + \tau) \left(\frac{y_2}{\sigma} + \frac{\sigma}{y_3} \right)},$$

wo

$$y_1 = \frac{3 J_{n,i}^2 r_1}{N},$$

$$y_2 = \frac{3 J_{n,i}^2 r_2}{N} \cdot \left(\frac{1 + \left(\frac{\mu}{t} + 1 \right) (\sigma t)^2}{1 + (\sigma t)^2} \right),$$

$$y_3 = \frac{3 J_{n,i}^2 r_2}{N} \cdot \frac{1 + \left(\frac{\mu}{t} + 2 \right) (\sigma t)^2 + \left(\frac{\mu}{t} + 1 \right) (\sigma t)^4}{[\varepsilon_2 + \varepsilon_1 (1 + \sigma^2 t^2)]^2}.$$
(17)

Die Aufzeichnung des Stromvektordiagramms geschieht punktweise, indem unter Benutzung der vorausgehenden Betrachtungen für jeden Schlupf der entsprechende sekundäre Widerstand und die entsprechende sekundäre Reaktanz berechnet wird. Wir wollen gleich den allgemeinen Fall

$$\lambda - 1 = \frac{\mu}{t}$$

betrachten, wo t das Verhältnis der Seiten CD und AC in Abb. 64 ist.

Bei dem Schlupf σ ist

$$R_2 = r_2 + (\lambda - 1) r_2 \sin^2 \beta$$

und

$$X_2 = x_2 \cos^2 \beta.$$

Führen wir wieder $\operatorname{tg} \beta = \sigma t$ ein, so wird

$$R_2 = r_2 \frac{1 + \left(\frac{\mu}{t} + 1 \right) (\sigma t)^2}{1 + (\sigma t)^2} = g_1 r_2$$

und

$$X_2 = \frac{x_2}{1 + (\sigma t)^2} = g_2 x_2,$$

g_1 und g_2 sind in Abb. 65 in Abhängigkeit von σt aufgetragen. Ein beliebiger Punkt des Stromvektordiagramms wird also dadurch erhalten, daß aus Abb. 65 die relative Streuung zu $\varepsilon_1 + g_2 \varepsilon_2$ und der sekundäre Ohmsche Widerstand $\frac{R_2}{\sigma} = \frac{g_1 r_2}{\sigma}$ entnommen wird.

Dieses Verfahren setzt voraus, daß über den Wert t schon irgendwelche Abmachungen getroffen sind. Der maximale sekundäre Widerstand bei $\sigma = 1$ entspricht dem Werte $t = 1$, also dem gleichschenkligen, rechtwinkligen Dreieck ACD der Abb. 58. Wenn t kleiner oder größer als 1 wird, so wird wohl der sekundäre Widerstand abnehmen, im Anfang aber nur wenig, weil die Kurve im Maximum einen flachen Verlauf nimmt. Da nun der ideelle Kurzschlußstrom ebenfalls von t beeinflußt wird, so können wir das Auftreten von 3 verschiedenen Optima erwarten.

I. Optimum, das den größten sekundären Widerstand bei $\sigma = 1$ liefert (also $t = 1$).

II. Optimum, das das größte Anlaufdrehmoment bei $\sigma = 1$ liefert.

III. Optimum, das das größte Anlaufdrehmoment pro Ampere Netzstrom liefert.

Diese drei Optima lassen sich am besten erkennen, wenn der Stromvektor für konstanten Schlupf und variables λ (oder t) aufgezeichnet wird.

Wird in der Gl. (9)

$$Z = \frac{r_2 (\lambda - 1) r_2 + j\sigma\lambda x_2}{\sigma (\lambda - 1) r_2 + j\sigma x_2}$$

σ , r_2 und x_2 konstant gehalten und λ als die einzige Variable angesehen, so muß Z einen Kreis darstellen. Da nun in den übrigen Daten des Ersatzstromkreises (Abb. 55) λ nicht enthalten ist, so können wir

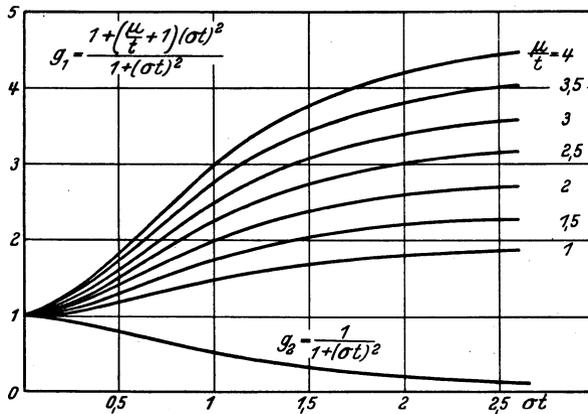


Abb. 65. Abhängigkeit der Faktoren g_1 und g_2 von dem Produkte σt .

folgern, daß auch der Endpunkt des Stromvektors des Doppelnutmotors bei gegebenem Schlupf und variablem Widerstandsverhältnis λ einen Kreis darstellt¹. Der obige Ausdruck für Z läßt auch die Lage des Kreises klar erkennen:

1. Für $\lambda = \infty$ wird $Z = \frac{r_2}{\sigma} + jx_2$. Dies ergibt den Punkt $P'_{(\sigma)}$ eines normalen Drehstrommotors (Kreis K' mit dem Mittelpunkte M'), der die gleichen Eigenschaften (r_1 , r_2 , i'_0 , x_1 und x_2) wie der Doppelnutmotor im normalen Laufe besitzt.

2. Für $\lambda = 1$ wird $Z = \frac{r_2}{\sigma}$. Dies ergibt den Punkt P''_{σ} eines Drehstrommotors (K'' mit dem Mittelpunkte M''), der gegenüber dem vorhergehenden den einzigen Unterschied $x_2 = 0$ aufweist.

3. Für $\lambda = 0$ ist $Z = \frac{r_2}{\sigma} \frac{r_2}{r_2 - j\sigma x_2} = \frac{1}{1 + (\sigma\mu)^2} \left(\frac{r_2}{\sigma} + j\sigma x_2 \right)$. Dies ist der Punkt $P'''_{(\sigma)}$ eines Drehstrommotors, dessen sekundärer Widerstand

¹ Dies ist schon von Böttcher: AEG-Mitteilungen, Dez. 1928, in Fortsetzung einer Arbeit von Dr. Lund nachgewiesen worden.

und sekundäre Streuung im Verhaltnis $1 + (\sigma\mu)^2$ kleiner sind als die Werte des Motors K^1 .

4. Betrachten wir den imaginären Teil von Z , nämlich $j \frac{(\lambda - 1)^2 r_2^2 x_2}{((\lambda - 1) r_2)^2 + (\sigma x_2)^2}$, so erkennen wir, daß dieser Wert für $\lambda = \infty$ ein Maximum und für $(\lambda - 1) = 0$ ein Minimum ist, daß also kein Punkt des Kreises für $\sigma = \text{konst}$ und λ variabel außerhalb des Kreises K'' und innerhalb des Kreises K' liegen kann; mit anderen Worten, der gesuchte Kreis berührt K' im Punkte P' und K'' im Punkte P'' . Damit sind also 5 Konstruktionselemente des gesuchten Kreises gefunden, von denen schon 3 beliebige zur Konstruktion genugen².

In Abb. 66 seien P'_u und P'_k die Punkte für unendlich großen Schlupf und für Stillstand eines Motors, der den Widerstand r_1 und r_2

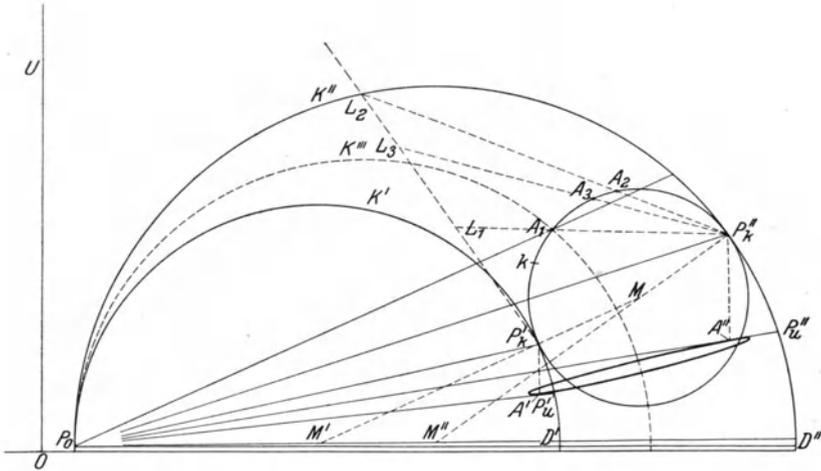


Abb. 66. Das Stromvektordiagramm eines Doppelnutmotors.

und die Reaktanz x_1 und x_2 besitzen möge, P''_u und P'_k seien die entsprechenden Punkte eines Motors, der den gleichen Widerstand und die gleiche primäre Reaktanz besitzt, dessen sekundäre Reaktanz aber gleich Null ist. k berühre K' in P'_k und K'' in P''_k , sein Mittelpunkt M ist offenbar der Schnittpunkt der Geraden $M'P'_k$ und $M''P''_k$.

Wir erhalten den Punkt des größten sekundären Widerstandes (bei $\sigma = 1$) als Schnittpunkt A_1 mit einem Kreis K''' , dem die primäre Reaktanz x_1 und die sekundäre Reaktanz $\frac{x_2}{2}$ zugeordnet sind, denn nach den vorausgegangenen Betrachtungen tritt für den Schlupf $\sigma = 1$ bei Einhaltung der Bedingung $\lambda - 1 = \mu$ eine Verringerung der sekundären Streuung auf die Hälfte ein.

¹ Das Widerstandsverhaltnis $\lambda = 0$ ist praktisch nicht realisierbar.

² Daß diese 5 Bestimmungsstücke in einfachster Weise aus der Gl. (9) abgelesen werden können, zeigt den großen Wert der symbolischen Methode.

Den Punkt A_2 des maximalen Drehmomentes bei $\sigma = 1$ erhalten wir, indem wir von den Ordinaten der Punkte des Kreises k die Eisenverluste und die primären Kupferverluste abziehen und den größten Restwert graphisch ermitteln. Die Kurve der primären Kupferverluste ist für den normalen Drehstrommotor eine Gerade ($P_o P_u$), für den Kreis k dagegen eine flache Ellipse, auf der die sofort zu bestimmenden Punkte A' und A'' liegen (A' Schnittpunkt der Vertikalen durch P'_k mit $P_o P_u$ und A'' Schnittpunkt der Vertikalen durch P''_k mit $P_o P_u$). Praktisch wird man für A_1 und einen beliebigen in der Nähe von A_3 gelegenen Punkt die primären Kupferverluste und hieraus den allein in Betracht kommenden Teil der Ellipse bestimmen. A_2 ist dann derjenige Punkt, für welchen die Tangente an den Kreis k und die Tangente an dem zugehörigen Punkte der Ellipse parallel sind.

Den Punkt A_3 des größten spezifischen Drehmomentes erhalten wir, indem wir für einige in der Nähe von A_2 gelegene Kreispunkte das Verhältnis $\frac{\text{Drehmoment}}{\text{Netzstrom}}$ auftragen und das Maximum graphisch bestimmen. Mit genügender Genauigkeit können wir aber A_3 als Berührungspunkt einer von O oder auch von P_o an k gelegten Tangente annehmen.

Um den zu A_2 und A_3 gehörigen Wert von t zu finden, brauchen wir nur zu berücksichtigen, daß $t = 0$ für den Punkt P'_k , $t = 1$ für den Punkt A_1 und $t = \infty$ für den Punkt P''_k gilt. Unter Benutzung einer beim normalen Kreisdiagramm entwickelten Methode ziehen wir von P''_k aus Strahlen durch A_1 , A_2 und A_3 und bringen sie zum Schnitt mit einer in P'_k zur Tangente in P'_k parallelen Gerade. Die von P'_k gemessenen Abschnitte sind t proportional, also für A_2 : $t = \frac{P'_k L_2}{P'_k L_1}$ und für A_3 : $t = \frac{P'_k L_3}{P'_k L_1}$.

Für einen praktischen Fall ergab sich, daß das zu A_2 gehörige maximale Drehmoment ca. 10% größer war als das zu A_1 gehörige, wobei freilich der Strom um 11% gestiegen war, so daß also der Anstieg des Stromes größer war als der Anstieg des Drehmomentes. Das zu A_3 gehörige Drehmoment war 9% größer als das zu A_1 gehörige, der Stromanstieg betrug aber nur 7,5%, so daß sich ein entschiedener Vorteil zugunsten des Punktes A_3 ergab. Die zu A_2 und A_3 gehörigen Werte von λ betragen nur 66% resp. 73% desjenigen von A_1 (für letzteren $\lambda = \mu + 1$). Das Überraschende ist also die kleine Änderung des spezifischen Drehmomentes bei einer beträchtlichen Änderung von λ .

Der Hauptvorteil für die Wahl des Punktes A_3 liegt andererseits in der Vermeidung der Einsattelung in der Drehmomentkurve, wie das schon früher begründet worden ist¹.

Noch schneller kommen wir zum Ziel, wenn wir K' und K'' in bezug auf P_o invertieren. Bekanntlich geht ein Kreis, wenn einer seiner Punkte zum Inversionszentrum genommen wird, in eine Gerade über, die parallel zu der Tangente im Inversionspunkte liegt.

¹ Auf einen Nachteil bei Benutzung des Punktes A_3 wird bei der praktischen Durchrechnung eines Motors hingewiesen werden.

Diese Geraden verlaufen vertikal, wenn wir die vereinfachende Annahme machen, daß M' und M'' auf der durch P_0 gehenden Horizontalen liegen (Abb. 67). Die Potenz der Inversion kann beliebig gewählt werden, beispielsweise so, daß die Inversion von K'' eine durch D' gehende Vertikale (g'') und entsprechend die Inversion von K' eine durch D'' gehende Vertikale (g') ist. Sämtliche möglichen Kreise k haben im invertierten Bilde gleiche Größe, da sie ja g' und g'' berühren müssen.

Die Strahlen $P_0P'_u$ und $P_0P'_k$ mögen auf g' die Strecke $EF = a$ herauschneiden. Durch F ziehe man eine Horizontale, die g'' in G schneide, und um den Mittelpunkt H der Strecke FG ziehe man einen Kreis k , der g' und g'' berühre. Der Berührungspunkt L einer von P_0 an k gelegten Tangente werde als der zu $\sigma = 1$ gehörige Punkt im invertierten Diagramm gewählt. Er entspreche dem Punkte A_3 in Abb. 66. Aus seiner Lage läßt sich das günstigste Widerstandsverhältnis bestimmen.

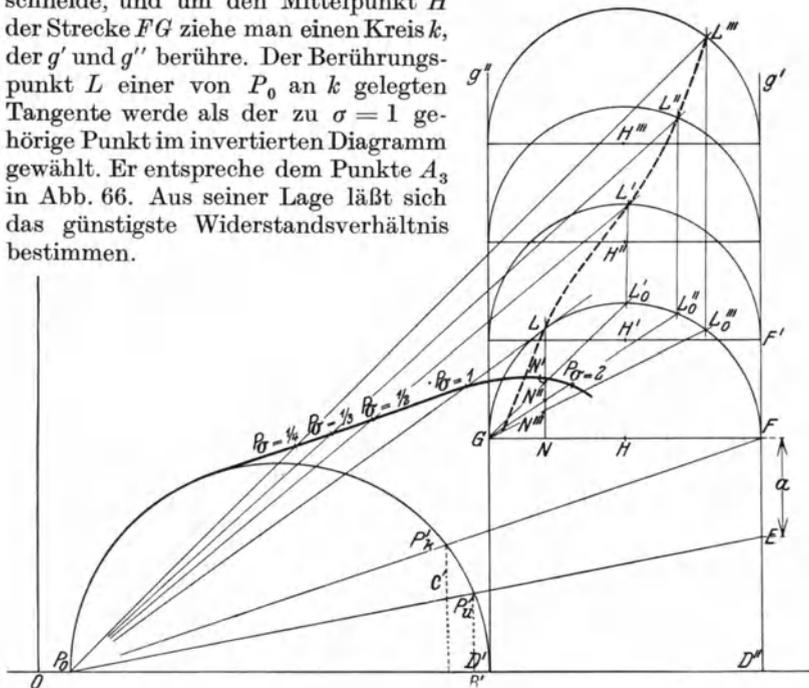


Abb. 67. Das Stromvektordiagramm eines Doppelnutmotors und seine Inversion.

Den zu $\sigma = \frac{1}{2}$ gehörenden Punkt L' findet man auf folgende Weise: Er liegt zunächst auf einem Kreise k' , dessen Mittelpunkt H' um die Strecke a höher liegt als H . N sei der Lotpunkt von L auf FG und N' die Mitte von LN . Die Gerade GN' schneide k in L'_0 , dann ist L' der Schnittpunkt einer durch L'_0 gehenden Vertikalen mit k' . In gleicher Weise erhält man den Punkt L'' für $\sigma = \frac{1}{3}$ und L''' für $\sigma = \frac{1}{4}$. Die Punkte L , L' , L'' und L''' werden invertiert und ergeben die Punkte $P_{\sigma=1}$, $P_{\sigma=\frac{1}{2}}$, $P_{\sigma=\frac{1}{3}}$ und $P_{\sigma=\frac{1}{4}}$. Von $P_{\sigma=\frac{1}{4}}$ aus kann man die Kurve bis zum Kreise K' mit der Hand ziehen, denn die Annäherung an K' wird schon bei $\sigma = 0,1$ sehr groß¹.

¹ Eine einfache Berechnung zeigt, daß ein von P_0 nach $P_{\sigma=0,1}$ gezogener Strahl nur 1 bis 2% über den Kreis K' hinausläuft.

Daß k der invertierte Kreis des Kreises k in Abb. 66 sein muß, ergibt sich aus den vorausgegangenen Betrachtungen, desgl. die Übereinstimmung zwischen L in Abb. 67 mit A_3 in Abb. 66. Durch die Inversion werden ja die Winkel der durch P_0 gehenden Strahlen nicht verändert. Wir müssen aber noch den Beweis für die Konstruktion von L' , L'' usw. führen.

Auf K' liegt der zu $\sigma = \frac{1}{2}$ gehörige Punkt so, daß ein durch ihn und durch P_0 gezogener Strahl g' in F' trifft, wo $FF' = a$, denn die Strahlen $P_0P'_u$, P_0P' schneiden auf einer Vertikalen eine Strecke heraus, die $\frac{1}{\sigma}$ mal so groß ist wie die von den Strahlen $P_0P'_u$ und $P_0P'_k$ herausgeschnittene Strecke. Daraus ergeben sich in einfacher Weise die Kreise k' , k'' usw. Die Richtigkeit der Strahlenkonstruktion $GN'L_0$ und $L'L_0 \perp P_0D'$ ergibt sich durch Betrachtung der Abb. 64. Dort konnte

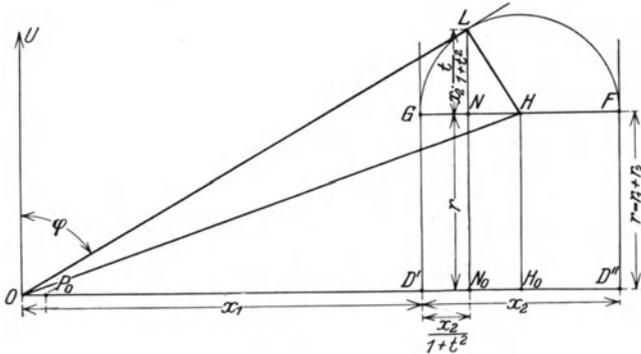


Abb. 68. Einfaches Diagramm für die analytische Behandlung des Doppelnutmotors.

durch das Wandern des Punktes F'_1 die Vergrößerung der sekundären Reaktanz dargestellt werden. Für $\sigma = 1$ war letztere prop. AF'_1 und für $\sigma = 0$ prop. AB . Das Dreieck AF'_1B der Abb. 64 entspricht nun dem Dreieck GLF der Abb. 67. Da für $\sigma = 0,5$ E die Mitte von CD darstellt und mithin auch AHE die Strecke F'_1F_1 halbiert, so erkennen wir, daß die Veränderung der sekundären Streuung richtig wiedergegeben ist¹.

Die durch Abb. 67 zur Erlangung des größten spezifischen Anlaufdrehmomentes festgelegten Beziehungen können auch in eine einfache analytische Form gebracht werden. Abb. 68 ist eine Wiederholung eines Teiles der Abb. 67. Es ist $OD' = x_1$, $D'D'' = x_2$, $D'F = r_1 + r_2 = r$,

$$FN = x_2 \frac{t^2}{1 + t^2}, \quad NG = \frac{x_2}{1 + t^2}, \quad LN = \sqrt{FN \cdot NG} = x_2 \frac{t}{1 + t^2}.$$

¹ Dies setzt noch voraus, daß GF der sekundären Streuung proportional ist, was theoretisch nicht genau ist, weil die Reaktanzen von O aus aufgetragen sind, das Inversionszentrum aber in P_0 liegt. G stimmt mit dem Falle $X_2 = 0$ und F mit dem Falle $X_2 = x_2$ überein, zwischen F und G tritt eine kleine Verschiebung der Punkte L ein, deren Einfluß aber praktisch vernachlässigbar ist.

Aus den beiden rechtwinkligen Dreiecken OHL und OH_0H folgt: $OL^2 = r^2 + x_1(x_1 + x_2)$, ebenso folgt aus dem rechtwinkligen Dreieck ON_0L :

$$\left(x_1 + \frac{x_2}{1+t^2}\right)^2 + \left(r + x_2 \frac{t}{1+t^2}\right)^2 = r^2 + x_1(x_1 + x_2)$$

$$t = \frac{r + \sqrt{r^2 + x_1(x_1 + x_2)}}{x_1}. \quad (18)$$

Für $\sigma = 1$ ist dann:

$$J_1 = \frac{U_p}{\sqrt{r^2 + x_1(x_1 + x_2)}} \quad \text{und} \quad \cos \varphi = \frac{r + x_2 \frac{t}{1+t^2}}{\sqrt{r^2 + x_1(x_1 + x_2)}}. \quad (19)$$

B. Einfluß der Temperaturerhöhung des äußeren Käfigs.

Wenn wir in einem 11-kW-Motor ein Anlaufdrehmoment von 80% des normalen erzeugen wollen, so müssen etwa 9 kW in der Rotorwicklung vernichtet werden, und zwar zum weitaus überwiegenden Teile in dem äußeren Käfiganker. Nur allmählich, wie sich die Tourenzahl des Motors vergrößert, wird die Beanspruchung des äußeren Käfigs kleiner. Wir müssen also mit einer beträchtlichen Temperaturerhöhung des äußeren Käfigs während des Anlaufes rechnen und ihren Einfluß auf die Anlaufverhältnisse und auf die Dimensionierung des Käfigs berücksichtigen.

Zunächst muß man sich darüber klar werden, wie wir diese Verluste auf Stäbe und Endringe verteilen. Es erscheint richtig, den überwiegend größeren Teil in die Stäbe zu verlegen, weil hier die Wärme schnell an das Rotoreisen abgegeben und damit einer schädlichen Folge der Temperaturvergrößerung mit Sicherheit vorgebeugt werden kann. Offenbar wird diejenige Verteilung die günstigste sein, die zu annähernd gleichen Temperaturerhöhungen in Stab und Endring unter besonders schwierigen Anlaufverhältnissen führt.

Die im Stab und Endring wirklich auftretende Temperatur hängt natürlich von den äußeren Bedingungen des Anlaufs ab, kann also jeden möglichen Wert annehmen. Es ist aber interessant, einige Fälle ins Auge zu fassen:

Das Gegendrehmoment des Motors sei so groß, daß das entwickelte Drehmoment nicht genüge, um die Maschinen in Bewegung zu bringen. Der äußere Käfiganker habe sich in der kurzen Zeit des Wartens um 200° erwärmt. In welcher Weise wirkt sich dies auf das Anzugsmoment aus?

In einem der Beispiele war $\mu = \frac{12}{3,5} = 3,4$ und mithin der zum maximalen sekundären Widerstand führende Wert von λ gleich 4,4.

Durch die Erwärmung werde der Widerstand des äußeren Käfigs beispielsweise um 60% größer. Damit wird λ zu groß und die Benutzung der Gl. (11) ergibt eine Verschlechterung des Anlaufdrehmomentes um ca. 25%.

Berechnen wir aber einen Motor von Anfang an mit dem durch den stark erwärmten Außenkäfig sich ergebenden Widerstand, so treten wesentliche Vorteile im normalen Lauf ein, nachdem der äußere Käfig sich wieder auf die normale Betriebstemperatur abgekühlt hat.

Der Widerstand des äußeren Käfigs hat sich jetzt um $100 \left(1 - \frac{1}{1,6}\right) = 37,5\%$ verringert und damit verbessert sich sowohl der Wirkungsgrad wie der $\cos \varphi$. Der Vollast Schlupf sinkt von 3,5% auf 3%, η verbessert sich also um ca. $\frac{1}{2}\%$. Noch beträchtlicher ist die Verbesserung des $\cos \varphi$. Während vorher $x_2 = \left(\frac{r''}{r' + r''}\right)^2 x' = 0,6 x'$ war, sinkt es jetzt auf $0,465 x'$.

Wir erzielen also durch die Erwärmung des äußeren Käfigs mit $\varepsilon_2 = 0,093$ das gleiche Drehmoment wie früher mit $\varepsilon_2 = 0,12$. Das entspricht einer Verbesserung des $\cos \varphi$ um 1%.

Wir schließen daraus, daß mit Rücksicht auf die Erwärmung des äußeren Käfigs λ um 20 bis 30% unterhalb des Wertes einzusetzen ist, den wir im vorigen Abschnitt als den günstigsten gefunden hatten.

Bekanntlich ist die starke Erwärmung schon zur Verbesserung der Anlaufverhältnisse an normalen Käfigankern mit gutem Erfolg angewandt worden. In den Motoren der Drehstromlokomotiven der Simphonbahn hat BBC bewußt eine starke Erwärmung des Käfigs während des Anlaufs angewandt, die im normalen Laufe durch die bei höherer Tourenzahl einsetzende bessere Ventilation wieder reduziert wurde. Beim Doppelkäfiganker liegen die Verhältnisse insofern günstiger, als bei größerer Tourenzahl der im äußeren Käfig fließende Strom stark abnimmt (viel stärker als beim gewöhnlichen Käfiganker) und somit die Temperatur des äußeren Käfigs im Betriebe automatisch auf den normalen Wert heruntergeht.

Es erscheint durchaus möglich, daß in besonderen Fällen, nämlich dann, wenn die Anlaufverhältnisse im voraus genau bekannt sind (wie z. B. Anlassen von Motorgeneratoren, selbstanlaufende Synchronmotoren) die Benutzung einer verhältnismäßig hohen Temperatur des äußeren Käfigs während des Anlaufens in Zukunft mehr ausgebaut wird.

C. Berücksichtigung der Reaktanz x'' .

Bisher haben wir $x'' = 0$ gesetzt, haben also angenommen, daß Streukraftlinien entweder mit dem inneren oder mit beiden Käfigen verschlungen sind. Obgleich in allen praktischen Motoren das Verhältnis $\frac{x''}{x'}$ klein sein wird, so soll doch der Einfluß von x'' untersucht werden. Dies führt zu der Parallelschaltung der beiden Impedanzen $\frac{r'}{\sigma} + jx'$ und $\frac{r''}{\sigma} + jx''$. Die Impedanz dieser Parallelschaltung ist:

$$Z = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{\frac{r'}{\sigma} + jx'} + \frac{1}{\frac{r''}{\sigma} + jx''} = \frac{1}{\sigma} \frac{(r' + j\sigma x')(r'' + j\sigma x'')}{r' + r'' + j\sigma(x' + x'')},$$

deren skalarer Teil

$$\frac{R_2}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} \frac{r''(r'^2 + (\sigma x')^2) + r'(r''^2 + (\sigma x'')^2)}{(r' + r'')^2 + \sigma^2(x' + x'')^2}$$

und deren imaginärer Teil

$$j\sigma X_2 = j \frac{\sigma [x'' r'^2 + x' \cdot r''^2 + \sigma^2 x' x'' (x' + x'')]}{(r' + r'')^2 + \sigma^2 (x' + x'')^2}$$

ist. In Synchronismus ist

$$R_{2, \sigma=0} = r_2 = \frac{r' + r''}{r' r''}$$

und

$$X_{2, \sigma=0} = x_2 = x' \left(\frac{r''}{r' + r''} \right)^2 + x'' \left(\frac{r'}{r' + r''} \right)^2 = x' \left(\frac{r_2}{r'} \right)^2 + x'' \left(\frac{r_2}{r''} \right)^2.$$

Wir setzen, wie früher, $\lambda = \frac{r''}{r_2}$, und versuchen denjenigen Wert von λ

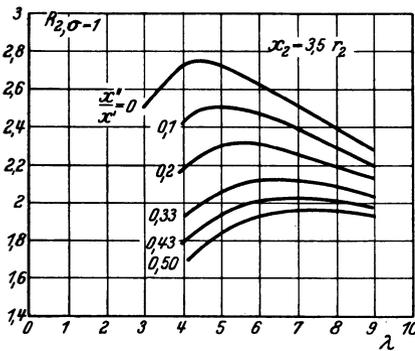


Abb. 69a. Der sekundäre Widerstand eines Doppelnutmotors im Momente des Anlassens in Abhängigkeit von λ und dem Verhältnis $\frac{x''}{x'}$.

zu berechnen, der bei gegebenen Werten von r_2 , x_2 und $\frac{x''}{x'}$ den größten sekundären Widerstand ergibt.

In Abb. 69a ist als Abszisse λ und als Ordinate $R_{2, \sigma=1}$ aufgetragen, und zwar unter der Annahme $x_2 = 3,5 \cdot r_2$. Die 6 Kurven entsprechen den Verhältnissen

$$\frac{x''}{x'} = 0; 0,1; 0,2; 0,33; 0,43; 0,5.$$

Je kleiner $\frac{x''}{x'}$, um so höher liegt

die Kurve. Während für $\frac{x''}{x'} = 0$ das

Maximum gleich $2,75 r_2$ wird [in Übereinstimmung mit dem Gesetz $r_2 + \frac{1}{2} x_2 = r_2 (1 + \frac{1}{2} \cdot 3,5) = 2,75 \cdot r_2$],

sinkt dieses Maximum auf:

$$2,5 r_2 \text{ für } \frac{x''}{x'} = 0,1,$$

$$2,3 r_2 \text{ ,, } \frac{x''}{x'} = 0,2,$$

$$2,12 r_2 \text{ ,, } \frac{x''}{x'} = 0,33,$$

$$2,02 r_2 \text{ ,, } \frac{x''}{x'} = 0,43,$$

$$1,96 r_2 \text{ ,, } \frac{x''}{x'} = 0,5.$$

Wir können also die angenäherte Formel einführen:

$$R_{2, \sigma=1} = r_2 + \frac{1}{2} h \cdot x_2,$$

wo h von dem Verhältnis $\frac{x''}{x'}$ nach Spalte 2 folgender Tabelle 11 abhängt:

In Abb. 69b sind ähnliche Kurven aufgezeichnet für den Fall $x_2 = 6 \cdot r_2$. Die 4 Kurven entsprechen den Verhältnissen $\frac{x''}{x'} = 0; 0,1; 0,2; 0,5$.

In der 3. Spalte der nebenstehenden Tabellen sind die Werte von h eingetragen, die aus den Kurven der Abb. 69b resultieren würden.

Berücksichtigt man nun, daß solche extreme Werte wie $x_2 = 6 r_2$ in der Praxis wohl kaum vorkommen dürften, und daß das Verhältnis $\frac{x''}{x'}$ nur selten den Wert 0,10¹ überschreiten dürfte, so wird man der obigen einfachen Formel eine für die Praxis genügende Genauigkeit zuschreiben können.

Interessant ist ferner der Einfluß von $\frac{x''}{x'}$ auf den Wert von λ' , der zum maximalen sekundären Widerstand gehört. λ' ist um so größer, je größer $\frac{x''}{x'}$ ist. Während wir nach Gl. (11) zu $x'' = 0$ den Wert $\lambda' = 4,4$ finden und dies auch in der obersten Kurve der Abb. 69a bestätigt finden, wird

$$\lambda' = 5 \quad \text{für} \quad \frac{x''}{x'} = 0,1,$$

$$\lambda' = 5,5 \quad \text{,,} \quad \frac{x''}{x'} = 0,2,$$

$$\lambda' = 6,3 \quad \text{,,} \quad \frac{x''}{x'} = 0,33,$$

$$\lambda' = 7 \quad \text{,,} \quad \frac{x''}{x'} = 0,43,$$

$$\lambda' = 7,7 \quad \text{,,} \quad \frac{x''}{x'} = 0,5.$$

Wir sehen also, daß durch die Berücksichtigung des Einflusses von x'' der günstigste Wert λ sich nach oben verschiebt. Es würde also berechtigt sein, anzunehmen, daß der Einfluß der Temperaturerhöhung des äußeren Käfigs und der Reaktanz x'' sich annähernd kompensieren.

Tabelle 11.

$\frac{x''}{x'}$	h für $x_2 = 3,5 r_2$	h für $x_2 = 6 r_2$
0	1	1
0,1	0,86	0,88
0,2	0,74	0,78
0,3	0,66	0,71 (interpoliert)
0,5	0,55	0,6

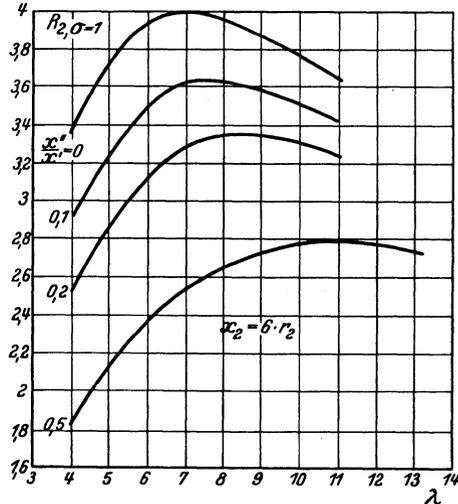


Abb. 69b. Der sekundäre Widerstand eines Doppelnutmotors im Momente des Anlassens in Abhängigkeit von λ und dem Verhältnis $\frac{x''}{x'}$.

¹ In den meisten Fällen dürfte $\frac{x''}{x'} \approx 0,05$ und $h = 0,93$ sein.

D. Entwurf eines 7,5 kW, 4poligen Doppelnutmotors.

Wir wollen versuchen, den im 2. Kapitel beschriebenen Motor mit Käfiganker in einen Doppelnutmotor umzuwandeln. Die Dimensionen des Stator Eisens und der Statorwicklung behalten wir unverändert bei, also:

Durchmesser des Ständereisens	{ außen: 280 mm
	{ innen: 175 „
Länge des Blechpakets	140 „
36 Nuten: 22 · 9,3 · 3	
Zahnbreite an der engsten Stelle . . .	6,5 „
„ „ „ breitesten „ . . .	10,1 „

Bei 19 Leitern pro Nute besitzt die Statorwicklung 114 Windungen pro Phase. Leiterdurchmesser: 2,2 mm blank, 2,5 mm isoliert. Bei einer mittleren Windungslänge von 89 cm ergibt sich ein Kupfergewicht von 10,5 kg.

Der Leerlaufstrom des Motors mit normalem Käfiganker betrug 4,9 Amp.; da aber der Rotorzahn länger und der Rotorrücken schmaler wird, so müssen wir mit einer kleinen Vergrößerung des Magnetisierungsstromes rechnen, den wir vorläufig zu 5,5 Amp. einschätzen wollen. In Tabelle 5 waren die Streulinien gruppenweise angegeben, wenn der Normalstrom, nämlich 15 Amp., durch die Statorwicklung fließt. Der Anteil für die Rotornuten und die Rotorendringe betrug dabei 26850. Ein kleiner Teil dieser Kraftlinien wird auch im Doppelnutmotor als Anteil L''' verbleiben, nämlich derjenige Teil der Rotornutenstreuung, der durch die Streuung des Nutensteigs und derjenige Teil der Rotorstirnstreuung, der sowohl mit dem äußeren wie mit dem inneren Endring verknüpft ist. Für diese beiden Anteile wollen wir 7000 Streukraftlinien vorsehen und erhalten also, als zu L_1 gehörig, die Zahl der Streukraftlinien zu $115600 = 12,6\%$ des nützlichen Kraftlinienflusses. Damit ist der ideelle Kurzschlußstrom des äußeren Kreises K'' gegeben. Er beträgt $\frac{15}{0,126} = 119$ Amp. In Abb. 67 ist nur D'' , der Schnittpunkt dieses Kreises mit der durch P_0 gehenden Horizontalen eingezeichnet.

Über die Größe des inneren Kreises K'' können wir frei verfügen. Je kleiner wir ihn wählen, um so schlechter wird der $\cos \varphi$ des Motors bei Vollast. Wir wollen ihn zu 75 Amp. annehmen, nämlich etwas größer als den des entsprechenden Schleifringmotors, dessen ideeller Kurzschlußstrom nach Tabelle 5 das 4,2fache des Normalstroms betrug.

Die Ohmschen Widerstände des Motors mit normalem Käfiganker betragen:

$$r_1 = 0,535 \text{ Ohm,}$$

$$r_2' = 0,46 \text{ „}$$

Der Wert r_1 ist ohne weiteres für den Doppelnutmotor zu benutzen, es steht uns aber noch frei, den Wert r_2' zu übernehmen oder zu ändern. Wenn wir r_2' übernehmen, so bedeutet dies annähernd Gleichheit des Wirkungsgrades des Doppelnutmotors mit dem normalen Käfigankermotor. In letzterem war der sekundäre Widerstand mit Rücksicht auf

das Anlaßdrehmoment nicht so niedrig gewählt worden, wie es sonst möglich gewesen wäre. Da wir nun im Doppelnutmotor diese Vergrößerung des Anlaufdrehmoments auf andere Weise erreichen, so wäre es durchaus möglich, den sekundären Widerstand auf denjenigen Wert zu verkleinern, den man beim normalen Käfiganker anwenden würde, wenn gar keine Rücksicht auf das Anlassen genommen zu werden braucht. Von einigen Firmen wird dieser Weg beschritten. Meistens wird aber der Doppelnutmotor da gebraucht, wo das Anlaufmoment die ausschlaggebende Rolle spielt. Durch Vergrößerung des sekundären Widerstandes wird aber auch im Doppelnutmotor noch ein zusätzliches Anlaufdrehmoment erreicht, und es erscheint uns deshalb richtig, den früher berechneten Wirkungsgrad von 86,9% beizubehalten. Da der Motor die gleichen Eisenverluste hat, und nur wegen des schlechteren $\cos \varphi$ einen ca. 3% größeren Normalstrom und auch ca. 6% mehr Statorkupferverlust besitzt, als in Tabelle 8 für den Motor mit Käfiganker angegeben, so wollen wir den sekundären Widerstand von 0,46 auf 0,42 reduzieren, um diese Mehrverluste wieder zu kompensieren.

In Abb. 67 ist jetzt $P_0D' = 75 - 5,5 = 69,5$ und $P_0D'' = 119 - 5,5 = 113,5$ Amp. gegeben. Damit ist die Lage des Kreises K' und unter Benutzung der Werte r_1 und r_2' (das nun wieder einfach r_2 geschrieben werden soll) nach irgendeinem der bekannten Verfahren auch die Lage der Punkte P_u und P_k gegeben. Die Ordinate von P_u , multipliziert mit der Phasenspannung, muß die Kupferverluste in einer Phase der Statorwicklung darstellen, also:

$$U_p \cdot P_u B' = O P_u'^2 \cdot r_1;$$

ebenso muß die Ordinate von P_k den Kupferverlusten in der Stator- und in der Rotorwicklung proportional sein, resp. der durch $P_o P_u'$ abgeschnittene Teil dieser Ordinate den Verlusten in der Rotorwicklung allein, also:

$$U_p \cdot P_k C' = \left[P_o P_k' \cdot \left(1 + \frac{\tau}{2} \right) \right]^2 \cdot r_2.$$

Damit ist die Lage der Punkte E, F, H und G und mithin auch die Lage der Kreise k, k', k'' usw., der Punkte $N', N'', L'_0, L''_0, L', L'', P_{\sigma=1}, P_{\sigma=\frac{1}{2}}$ usw. gegeben. Auch für Werte von $\sigma > 1$ läßt sich die gleiche Methode anwenden. Der Punkt $P_{\sigma=2}$ ist auf diese Weise gefunden worden.

Die Potenz der Inversion ist gleich

$$P_0 D' \cdot P_0 D'' = 69,5 \cdot 113,5 = 7,87 \cdot 10^3,$$

also

$$P_0 P_{\sigma=1} \cdot P_0 L = P_0 P_{\sigma=\frac{1}{2}} \cdot P_0 L' = 7,87 \cdot 10^3.$$

Den Wert von t können wir graphisch nach der in Abb. 66 gezeigten Methode bestimmen, oder auch analytisch, indem wir aus der Lage von L die Verkleinerung der sekundären Reaktanz bestimmen.

Wir hatten gefunden, daß die sekundäre Reaktanz im allgemeinen Falle gleich $X_2 \cos^2 \beta$ war, wo $\operatorname{tg} \beta = \sigma t$. Für $\sigma = 1$ ergibt sich also $X_2 \cos^2 \beta = X_2 \frac{1}{1+t^2}$ und daraus $t = \sqrt{\frac{FN}{NG}} = \sqrt{\frac{11,5}{3}} = 1,96$. Um λ

zu bestimmen, muß zunächst aus den Werten des ideellen Kurzschlußstroms x_2 und damit μ bestimmt werden.

Es ist:

$$x_1 + x_2 = \frac{220}{75} = 2,935,$$

$$x_1 = \frac{220}{119} = 1,85,$$

also

$$x_2 = 2,935 - 1,85 = 1,085,$$

$$\mu = \frac{x_2}{r_2} = \frac{1,085}{0,42} = 2,59$$

und

$$\lambda = 1 + \frac{\mu}{t} = 1 + \frac{2,59}{1,96} = 2,32.$$

Damit sind die Widerstände des inneren und äußeren Käfigs festgelegt, nämlich

$$r' = \frac{\lambda}{\lambda - 1} r_2 = 0,739,$$

$$r'' = \lambda \cdot r_2 = 0,975.$$

Bevor wir die Querschnitte der beiden Käfige bestimmen, muß noch überlegt werden, ob wir die Stromdichte im Stab und im Endring gleich oder verschieden groß annehmen wollen. Es ist wünschenswert, in die Endringe verhältnismäßig wenig Verluste zu verlegen, denn wir wollen die Stäbe unisoliert in die Nuten verlegen und hierbei fließt durch die Endbleche ein Strom, der wie eine Verringerung des Widerstandes in den Endringen wirkt. Das wäre an sich kein Nachteil, wenn nur diese Parallelschaltung immer in demselben Maße aufträte. Dies ist aber nicht der Fall, und dies in Verbindung mit einer anderen Ursache, auf die wir später stoßen werden, ist verantwortlich für die beobachtete Tatsache, daß sich Motoren ein und derselben Serie gelegentlich verschieden verhalten. Übrigens hatten wir schon erwähnt, daß die in den Stäben des äußeren Käfigs beim Anlassen sich bildende Wärmemenge schneller an das Rotoreisen weitergeleitet werden kann als diejenige der Endringe.

Aus diesen Gründen wollen wir in die Endringe des äußeren Käfigs nur 20% des sekundären Widerstandes verlegen, während für den inneren Käfig dieser Wert auf 30% erhöht werde. Damit ist sowohl r_s wie r_e in der Formel:

$$r'_2 = 12 (f_w w)^2 \left(\frac{r_s}{z_{n,2}} + \frac{r_e}{2 p^2 \pi^2} \right)$$

festgelegt; nämlich für den äußeren Käfig:

$$r_s = \frac{0,8 \cdot 0,975}{12 \cdot (f_w \cdot w)^2} \cdot z_{n,2}.$$

Wir wählen $z_{n,2} = 46$, eine Zahl, die sich besser für die Unterdrückung schädlicher Sattelbildungen in der Drehmomentenkurve eignet als 48 und erhalten also:

$$r_s = \frac{0,8 \cdot 0,975 \cdot 46}{12 \cdot (0,96 \cdot 114)^2} = 2,5 \cdot 10^{-4}.$$

Ebenso:

$$r_e = \frac{0,2 \cdot 0,975 \cdot 2 \cdot 2^2 \cdot \pi^2}{12 \cdot (0,96 \cdot 114)^2} = 1,07 \cdot 10^{-4},$$

und für den inneren Käfig:

$$r_s = \frac{0,7 \cdot 0,739 \cdot 46}{12 \cdot (0,96 \cdot 114)^2} = 1,66 \cdot 10^{-4},$$

$$r_e = \frac{0,3 \cdot 0,739 \cdot 2 \cdot 2^2 \cdot \pi^2}{12 \cdot (0,96 \cdot 114)^2} = 1,22 \cdot 10^{-4}.$$

Die Länge der Stäbe sei 15 cm (eine Verschränkung der Nuten um eine Statornutenteilung, und ein Abstand zwischen Endring und Blechpaket von ca. 4 mm ist dabei berücksichtigt), der Durchmesser des äußeren Endringes 16,5 cm und der des inneren Endringes 13,5 cm; dann ergeben sich aus den Widerständen und Längen die folgenden Querschnitte:

Stabquerschnitt des äußeren Käfigs	= 11,6 mm ²
Endringquerschnitt des äußeren Käfigs.	= 94,2 „
Stabquerschnitt des inneren Käfigs	= 18,4 „
Endringquerschnitt des inneren Käfigs	= 70 „

Bevor wir die Rotornut dimensionieren, müssen wir noch den magnetischen Widerstand des Schlitzes bestimmen.

Es ist

$$x' = \left(\frac{\lambda}{\lambda - 1} \right)^2 x_2 = \left(\frac{2,32}{1,32} \right)^2 \cdot 1,085 = 3,35.$$

Wie wir in Kap. 2, S. 38 eine einfache Formel für r_2 abgeleitet haben, so läßt sich eine ganz ähnliche Formel für x_2 aufstellen, nämlich:

$$x_2 = 12 (w \cdot f_{w1})^2 \cdot 2\pi f \cdot 10^{-8} \left(\frac{l \cdot \lambda_n}{z_n \cdot 2} + \frac{l_e \cdot \lambda_s}{2\pi^2 p^2} \right)^2, \quad (20)$$

die sinngemäß auch auf x' angewandt werden kann. Für λ_s setzen wir einen mittleren Wert, etwa 0,5, ein und erhalten:

$$3,35 = 12 \cdot (0,96 \cdot 114)^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-8} \left(\frac{14 \cdot \lambda_n}{46} + \frac{42,2 \cdot 0,5}{2\pi^2 \cdot 4} \right)$$

$$\lambda_n = 22,2.$$

Die Dimensionierung der Rotornut hat zur Aufnahme der berechneten Stabquerschnitte, für einen reichlichen Zahnquerschnitt und für die durch $\lambda_n = 22,2$ bedingten Schlitzdimensionen Sorge zu tragen. Wenn wir an der engsten Stelle des Zahnes eine Induktion von max. 19000 annehmen, so wird eine Zahnbreite von $\frac{0,963 \cdot 0,912 \cdot 10^6 \cdot 1,57}{46} = 0,5$ cm erforderlich.

Damit ergeben sich die Nutendimensionen der Abb. 70a, wobei vorläufig eine Schlitzhöhe von 1,2 cm angenommen worden ist. Der innere

¹ Diese Formel findet sich in etwas abweichender Form schon in Arnold, La Cour: V, 1, S. 57. Durch ein Versehen, das sich auch auf die Durchrechnung der Beispiele erstreckt, finden Arnold und La Cour aber nur die Hälfte des obigen Wertes.

Stab hat den Querschnitt $3,4 \times 5,8$ mit gut abgerundeten Ecken, die Nute $3,7 \times 6,2$. Der obere Stab ist rund, sein Durchmesser abgerundet $3,8$ mm und der Nutdurchmesser $4,2$ mm. Indem wir zunächst von $22,2$ die Leitfähigkeit der unteren Nute, also $1,25 \frac{6,2}{3 \cdot 3,7} = 0,7$ abziehen, erhalten wir die Breite des Schlitzes aus

$$22,2 - 0,7 = 1,25 \cdot \frac{h}{b},$$

$$b = \frac{1,25 \cdot 1,2}{21,5} = 0,07 \text{ cm}.$$

Das Stanzen dieses kleinen Schlitzes bietet Schwierigkeiten, und selbst wenn er zu stanzen wäre, so würden beim Packen der Bleche Unregelmäßigkeiten auftreten, die unter Umständen eine große Abweichung des Drehmomentes für die Motoren einer im übrigen gleichen Serie zur Folge haben könnten.

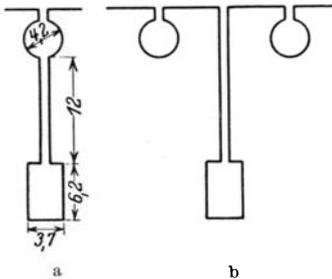


Abb. 70a und b. Anordnung der Rotornuten beim 7,5 kW-Doppelnutmotor.

Diese geringe Spaltbreite ist eine direkte Folge des für den Anlauf gewählten Punktes A_3 (Abb. 66). Hätten wir A_1 gewählt, so würde λ größer und x' kleiner geworden sein, was die Schwierigkeiten beim Stanzen gemildert hätte. Wir wollen nun untersuchen, welche Möglichkeiten wir haben, diese mechanischen Schwierigkeiten zu überwinden.

Wir könnten zunächst die Schlitzhöhe vergrößern. Bei einer Verdoppelung der Schlitzhöhe kann auch die Schlitzbreite verdoppelt werden. Dabei würde sich aber die Nutenteilung an der engsten Stelle um $1,6$ mm verkleinern und dann würde es praktisch nicht mehr möglich sein, den nützlichen Kraftlinienfluß durch die Zähne und den Rücken zu treiben, ohne den Leerlaufstrom wesentlich zu erhöhen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Schlitz breiter zu stanzen und dann teilweise durch Bleche auszufüllen; z. B. könnte man im vorliegenden Falle den Schlitz $1,2$ mm breit stanzen und dann durch ein $0,5$ mm dickes Blech wieder teilweise ausfüllen.

Am besten erscheint eine Anordnung der Nuten nach Abb. 70b. Die Nuten für die inneren und äußeren Stäbe sind jetzt getrennt, wodurch die Schlitzhöhe bei gleicher Gesamtnutenhöhe vergrößert werden kann. Da bei dieser Sonderführung des Schlitzes die doppelt verkettete Streuung abnehmen muß, so können wir die Nutenzahl gegenüber Abb. 70a etwas verkleinern, was ebenfalls zu einer Vergrößerung der Schlitzhöhe Veranlassung gibt. Bei je 38 äußeren und 38 inneren Nuten und bei einer Schlitzhöhe von $1,7$ cm ergibt sich dann eine Schlitzbreite von $0,12$ cm. Dies läßt sich stanzen. Sollte aber von der Werkstatt ein noch größerer Schlitz verlangt werden, so müßte der Punkt des größten spezifischen Drehmomentes zugunsten eines zwischen A_1 und A_3 (Abb. 66) gelegenen Punktes verlassen werden; denn dann würde λ größer und $x' = \left(\frac{\lambda}{\lambda - 1}\right)^2 \cdot x_2$ kleiner. Für $t = 1$ (Punkt A_1) ist z. B.

$\lambda = 1 + \mu = 3,59$ und $x' = \left(\frac{3,59}{2,59}\right)^2 x_2 = 2,1$, also nur 63% des Wertes bei Benutzung von A_3 . Es würde also durchaus möglich sein, einen zwischen A_1 und A_3 gelegenen Punkt zu wählen, etwa so, daß die Schlitzbreite von 1,2 auf 1,5 mm ansteigt. Dann würde das Drehmoment um etwa 5% verkleinert.

Abb. 71 zeigt das Drehmoment des berechneten Motors in Abhängigkeit von der Tourenzahl.

Wir hätten natürlich auch so vorgehen können, daß wir den ideellen Kurzschlußstrom des Kreises K' von vornherein größer gewählt hätten, wodurch ein besserer $\cos \varphi$ erhalten wird. Eine solche Berechnung

wurde ausgeführt, und zwar unter der Annahme, daß sowohl x_2 wie r_2 gegenüber dem vorhergehenden Beispiel um 20% verkleinert wurden, während die Schlitzbreite von 1,2 auf 1,5 mm vergrößert wurde. Die Resultate sind in der letzten Spalte der Tabelle 12 enthalten, die einen Vergleich zwischen Schleifringmotor, normalem Käfiganker und Doppelkäfiganker bringt.

Tabelle 12. Vergleich zwischen Schleifringanker, Käfiganker und Doppelkäfiganker in bezug auf Wirkungsgrad, $\cos \varphi$ und Anlaufdrehmoment (Leistung 7,5 kW, 220 V, 50 Hz, 4 polig). Beim Käfiganker und Doppelkäfiganker ist das Anlaufen mittels der Δ -Methode angenommen.

	Schleifringanker	Käfiganker	Doppelkäfiganker	
			Beispiel I	Beispiel II
η	87	88	88	88,4
$\cos \varphi$	0,86	0,903	0,85	0,855
Anlaufstrom als Vielfaches des Normalstromes (i)	1,6	2,0	2,1	2,1
Anlaufdrehmoment als Vielfaches des normalen Drehmomentes (m)	1,6	0,49	0,89	0,76
Güteverhältnis des Anlaufs $g = \left(\frac{m}{i}\right)$	1	0,24	0,43	0,37

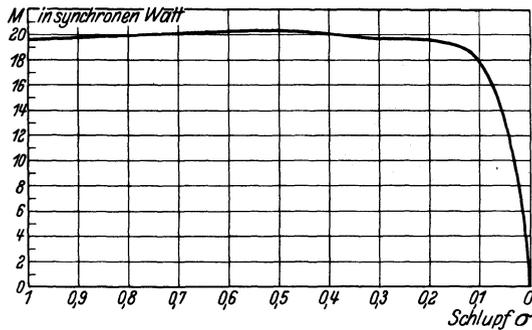


Abb. 71. Berechnung des Drehmomentes des 7,5 kW-Doppelnutmotors in Abhängigkeit vom Schlupf.

4. Konstruktionsbeispiele von Doppelnutmotoren.

Abb. 72a zeigt die Konstruktion des AEG-Doppelkäfigankers. Anstatt Kupfer wird Aluminium verwendet, das nach einem zuerst von der General Electric Co. ausgebildeten Verfahren direkt mit dem Rotor vergossen wird.

Die Herstellungskosten eines Doppelkäfigankers werden demnach nicht größer sein wie die eines Einfach-Käfigankers, ein großer Vorzug dieser Konstruktion. Die AEG bietet diesen Motor in der Hauptsache

für leichte Antriebe an. Für schwere Antriebe kommt dann die AEG-Kupplung hinzu, die später beschrieben wird.

Abb. 72 b zeigt die Läuferrote eines SSW-Doppelnutmotors¹. In einer Nute mit geraden, parallelen Nutenwänden liegen oben die Stäbe des äußeren Käfigs, unten die Stäbe des inneren Käfigs. Dazwischen liegen quergeschichtete Eisenbleche, die durch die vorgeschriebene Reaktanz des inneren Käfigs in Größe und Zahl bedingt sind.

Abb. 73 zeigt die Anordnung des Doppelnutläufers der Maschinenfabrik Eßlingen. Der obere Käfig ist aus runden Messingstäben hergestellt, der untere aus dünnen Kupferscheiben, die in schmalen Nuten

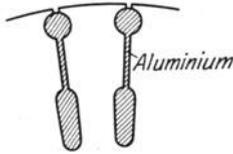


Abb. 72a. Rotorkonstruktion des Doppelnutmotors der AEG.

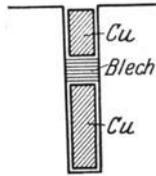


Abb. 72b. Rotornut des Doppelnutmotors der Firma SSW.

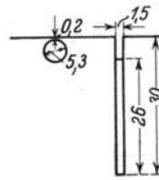


Abb. 73. Nutenanordnung des Doppelnutmotors der Maschinenfabrik Eßlingen.

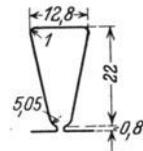


Abb. 74. Statornut des 7,5-kW-Doppelnutmotors der Firma Maschinenfabrik Eßlingen.

liegen. Man kann diesen Anker als Kombination eines Doppelnutläufers mit einem Wirbelstromläufer ansehen. Die Eigenschaften eines Wirbelstromläufers unterscheiden sich nicht wesentlich von denjenigen eines Doppelnutmotors, sie werden im nächsten Kapitel ausführlicher behandelt werden.

Die Abmessungen eines 7,5 kW, 4-poligen Doppelnutmotors sind in folgender Tabelle 13 enthalten.

Tabelle 13.

Außendurchmesser der Statorbleche . . .	. 285 mm
Innendurchmesser „ „ . . .	. 184 „
Eisenlänge . . . . .	. 155 „
Zahl der Nuten . . . . .	. 36 „
Nutbild (siehe Abb. 74)	
Leiterzahl pro Nute 19/20/19	
Durchmesser des Leiters bl. . . . .	. 2,3 mm
„ „ „ „ isol. . . . .	. 2,56 „
Schaltung Δ für 220 V	
Effektive Windungszahl pro Phase	116
Kupfergewicht	11 kg
Phasenwiderstand kalt	0,4 Ohm
Außendurchmesser der Rotorbleche . . .	. 183,2 mm
Innendurchmesser „ „ . . .	. 50 „
Eisenlänge . . . . .	. 155 „
Zahl der Nuten 2×43	
Nutbild (siehe Abb. 73)	
Runddraht-Durchmesser	5,0 mm aus Messing.
Querschnitt des äußeren Endringes . . .	. 110 mm ² aus Messing
Querschnitt des rechteckigen Drahtes . .	. $1,2 \times 26$ mm ² aus Kupfer
Querschnitt des inneren Endringes . . .	. 60 mm ² aus Kupfer

¹ Siehe die Arbeiten von Liwshitz im Arch. Elektrot. 1924/25, S. 531 und in der Siemens-Zeitschr. 1925, S. 57.

Die Widerstände der beiden Käfige sind (auf die Statorwindungszahl, nämlich 116 pro Phase, bezogen):

$$r' = 0,6, \quad r'' = 3,15.$$

also

$$r_2 = \frac{3,15 \cdot 0,6}{3,15 + 0,6} = 0,5.$$

Daraus

$$\lambda = \frac{3,15}{0,5} = 6,3.$$

Die Nutenleitfähigkeit der schmalen Nute ist:

$$= 1,25 \frac{\frac{1}{3} \cdot 26 + 5}{1,5} = 11,4$$

und die dazu gehörige Reaktanz

$$x' = 12 \cdot (0,96 \cdot 116)^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot 10^{-8} \left(\frac{15,5 \cdot 11,4}{43} + \frac{46 \cdot 0,5}{2 \cdot 4 \cdot \pi^2} \right) = 2.$$

Aus λ und x' folgt

$$x_2 = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right)^2 x' = 1,4, \quad \mu = \frac{1,4}{0,5} = 2,8.$$

t berechnet sich nun aus der Gleichung

$$\lambda = 1 + \frac{\mu}{t} \text{ zu } 0,53.$$

Der Wert von t ist verhältnismäßig klein und muß zur Bildung einer Einsattelung führen. Wir können auch erwarten, daß die Erwärmung des äußeren Käfigs einen ungünstigen Einfluß auf die Anlaßverhältnisse ausüben wird. Der Motor wurde von der Technischen Hochschule Stuttgart untersucht. Abb. 75 zeigt Leistungsfaktor und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Belastung.

Das Kippmoment ergab sich zu 12 mkg = $2,4 \times$ Nennmoment. Bei 232 V (Δ -Spannung) in λ -Schaltung beträgt der Anlaufstrom 40,5 Amp. = $1,6 \times$ Nennstrom, das Anzugsmoment 3,4 mkg = 68% des Nennmomentes. Der Motor besitzt also einen guten Wirkungsgrad und $\cos \varphi$ und eignet sich für mittlere Anlaufdrehmomente. Die elegante Konstruktion des Läufers, wie sie aus der Photographie Abb. 76 ersichtlich ist, bewirkt eine vorzügliche Kühlung. Die höchste Übertemperatur im Beharrungszustande betrug nur 38,5°.

Das Anlaufdrehmoment kann bekanntlich auf Kosten des Wirkungsgrades verbessert werden. In einem zweiten Motor mit vergrößertem sekundären Widerstand wurde in λ -Schaltung ein Anzugsmoment von 94% des Nennmomentes entwickelt beim 1,6fachen des Nennstromes.

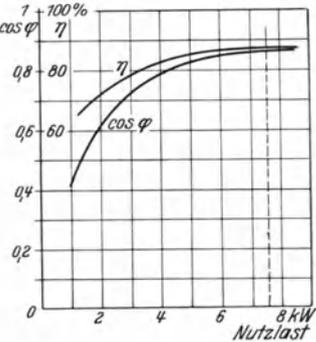


Abb. 75. Wirkungsgrad und $\cos \varphi$ des 7,5 kW-Doppelnutmotors der Maschinenfabrik Ellingen.

Dieses Drehmoment wurde freilich nur im kalten Zustande gemessen, mit der Temperaturerhöhung war eine Erniedrigung des Anlaufdreh-

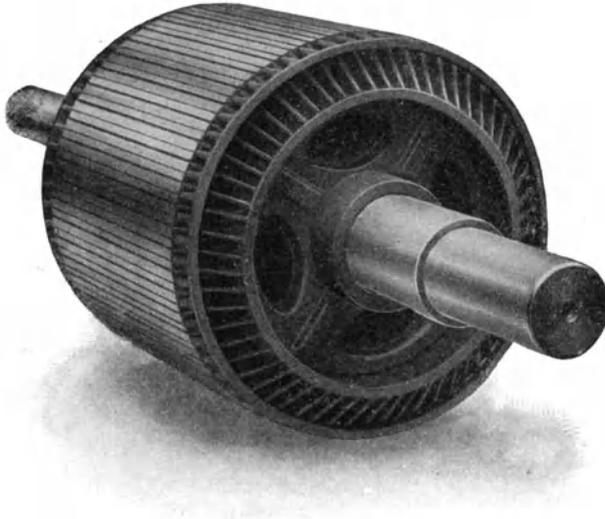


Abb. 76. Photographie des Läufers des Doppelnutmotors der Maschinenfabrik Eßlingen.

momentes zu beobachten. Der Wirkungsgrad bei Vollast war durch die Erhöhung des sekundären Widerstandes um 2,5% von 0,86 auf 0,835 gesunken. Der $\cos \varphi$ war wiederum 0,86. Abb. 77 zeigt die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Tourenzahl. Die Temperaturzunahme betrug jetzt 51°C .

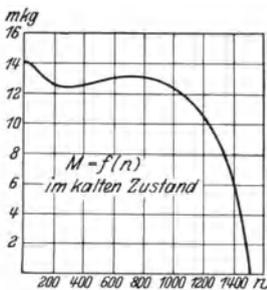


Abb. 77. Drehmoment des Doppelnutmotors der Maschinenfabrik Eßlingen in Abhängigkeit von der Tourenzahl.

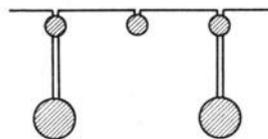


Abb. 78. Anordnung der Rotornuten bei den Doppelnutmotoren der Firma Heemaf.

Abb. 78 zeigt die bekannte Konstruktion der Firma Heemaf¹, charakterisiert durch die Benutzung runder Nuten im äußeren und inneren

¹ Der Firma Heemaf (Holland) und im besonderen ihrem Obergeringieur Herrn Klinkhammer gebührt das Verdienst, den Anstoß zu der in den letzten Jahren in Europa eingetretenen Veredelung des Doppelnutmotors gegeben zu haben. Obgleich das Prinzip der Verbesserung der Anlaufverhältnisse durch die Veröffentlichungen von Dolivo-Dobrowolsky und Boucherot' längst bekannt war und nicht angezweifelt wurde, so bestand allgemein die Ansicht, daß dabei der $\cos \varphi$ unterhalb der für die Elektrizitätswerke annehmbaren Grenze sinken würde.

Käfig und durch Verdoppelung der Zahl der äußeren Nuten im Läufer gegenüber der Zahl der inneren.

Abb. 79 zeigt die von der Phys.-Techn. Reichsanstalt aufgenommene Drehmomentkurve eines 15 kW, 6poligen Motors der gleichen Firma. Die 5 verschiedenen Kurven entsprechen verschiedenen Schaltungen der Statorwicklung. Kurve I entspricht der λ -Schaltung und Kurve V der Δ -Schaltung.

Im allgemeinen werden ja bei der Stern dreieckschaltung nur diese beiden Möglichkeiten benutzt. Wenn es aber darauf ankommt, ein bestimmtes Drehmoment über den ganzen Verlauf der Tourenzahl äußerst hoch zu halten, wie es in den Fällen, die man als Vollst- anlauf bezeichnet, vorkommt, so müssen neue Schaltungsmöglichkeiten hinzuge- nommen werden. Im vorliegenden Falle verhalten sich die effektiven Windungs- zahlen wie 1,73:1,54:1,29:1,14:1, wie man aus dem Verhältnis der Drehmo- mente bei einer gegebenen Tourenzahl entnehmen kann.

Es würde nicht angängig sein, eine normale Drehstromwicklung einfach mit Anzapfung zu versehen, denn es wäre dann die Peripherie des Stators nicht gleichmäßig mit Ampere windungen belegt.

Die Verfasser haben von der Firma Heemaf keine Mitteilung über die angewandte Methode erhal- ten, doch sollen hier einige nahe- liegende Zwischenschaltungen beschrieben werden.

1. Bei Anwendung einer Zweischichtenwicklung besteht die Möglichkeit, eine jede Phase in zwei gleiche Teile zu teilen. Wenn man die äquivalente Win- dungsanzahl bei der Δ -Schaltung mit w bezeichnet, so erhält man bei einfacher Serienschaltung der Hälften und bei Sternschaltung der Phasen die Windungsanzahl $1,73 w$.

Werden aber zwei zu verschiedenen Phasen gehörende Hälften mit einem Phasenunterschied von 60° el. zusammengesetzt (Abb. 80), so ist die eff. Windungsanzahl $\frac{\sqrt{3}}{2}$ mal kleiner geworden, also gleich $1,5 w$.

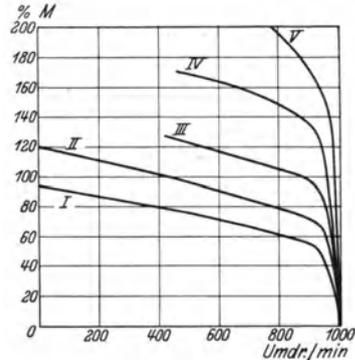


Abb. 79. Drehmoment des 15-kW-Dop- pelnutmotors der Firma Heemaf in Abhängigkeit von der Tourenzahl bei verschiedenen Schaltungen.

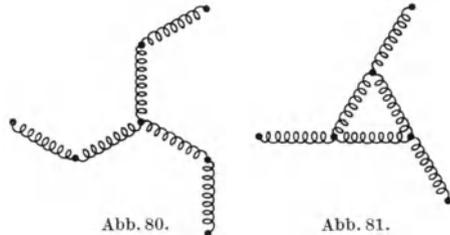


Abb. 80 und 81. Verschiedene Schaltungsmög- lichkeiten der Statorwicklung bei Teilung einer Phase in 2 gleiche Teile.

Aus diesem Grunde wurde er nur von wenigen Firmen und auch da nur für Spezial- zwecke gebaut. Alexanderson veröffentlichte aber schon 1919 in der Gen. El. Rev. einen Artikel, worin die Anwendung des Doppelnutmotors in großen Ein- heiten zum Antrieb von Schiffen gezeigt wird.

2. Drei halbe Phasen können in Δ geschaltet werden, und die übrigen Teile in Stern¹ (Abb. 81).

Eine einfache Rechnung ergibt, daß die effektive Windungszahl jetzt $1,32 w$ ist. Durch Kombination von 1 mit 2 können also die Windungszahlen w ; $1,32 w$; $1,5 w$ und $1,73 w$ erhalten werden.

3. Bei Anwendung der Zweischichtwicklung ist es gebräuchlich, zunächst die zu einer Gruppe gehörenden Spulen in Serie zu schalten und dann die einzelnen Gruppen miteinander zu verbinden. Bei 3 Nuten pro Pol und Phase und 4 Polen können wir diese Verbindung durch $a - b + c - d$ symbolisch darstellen, wo a für $a_1 + a_2 + a_3$ steht. Die b -Gruppe ist mit dem $-$ -Zeichen versehen worden, um anzudeuten, daß sie in entgegengesetztem Sinne wie a eingeschaltet wird.

Verbinden wir nun die 1. und 2. Nuten in der obigen Weise und fügen die Spulen der 3. Nute an das Ende an, also $a_1 + a_2 - b_1 - b_2 + c_1 + c_2 - d_1 - d_2 + a_3 + c_3 - b_3 - d_3$, so können wir sowohl nach d_2 als nach c_3 Anzapfungen machen, also die Windungszahl um $\frac{1}{3}$ oder $\frac{1}{6}$ vermindern, ohne die gleichmäßige Verteilung der AW auf die einzelnen Pole zu stören.

Durch Kombination von 3 mit 1 und 2 ergeben sich eine Reihe wichtiger Zwischenstufen.

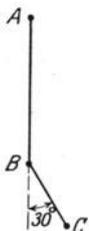


Abb. 82. Spannungsvektoren bei Dreiteilung einer Phase.

Eine Phase mit 3 Nuten pro Pol und Phase werde nach der unter 3. beschriebenen Weise gewickelt und erhalte vor Beginn des letzten Drittels eine Anzapfung. Die in den Teilen der Phase erzeugten EMK lassen sich durch die Vektoren AB und BC wiedergeben, die einen Winkel von 30° miteinander einschließen (Abb. 82). Die Seitenlängen AB und BC verhalten sich praktisch wie 2:1. Die \wedge -Schaltung und Δ -Schaltung der 3 Phasen bilden den Anfang und das Ende der Anlaufschaltungen. Sie bedingen keinerlei Änderung gegenüber der normalen Schaltung, wir können ihnen

also die Windungszahlen $1,73 w$ und w zuschreiben. In der 1. Zwischenschaltung werden die kleinen Seiten (BC) in Δ geschaltet; in der 2. Zwischenschaltung die größeren Seiten und in der 3. Zwischen-

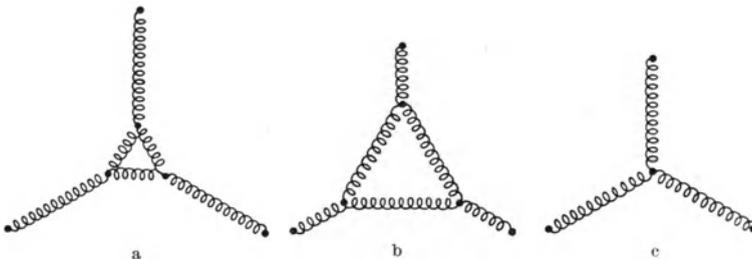


Abb. 83a bis c. Verschiedene Schaltungsmöglichkeiten bei Dreiteilung einer Phase.

schaltung werden die größeren Seiten für sich in \wedge geschaltet. Abb. 83a, b, c zeigt diese drei Zwischenschaltungen, denen die effek-

¹ Siehe Sachsenwerk-Mitteilungen 1928, H. 2.

tiven Windungszahlen $1,53 w$; $1,28 w$ und $1,17 w$ zuzuschreiben sind, wie eine graphische Aufzeichnung der Vektoren ergibt.

Da die 3 Anzapfungen gegenüber der einfachen λ - Δ -Schaltung nur 3 zusätzliche Verbindungsdrähte erforderlich machen, so kann wohl kaum von einer nennenswerten Komplikation gesprochen werden.

Die Kurven der Abb. 79 zeigen keine Einbuchtung. Dies ist bei einem Anlauf gegen volles Gegendrehmoment eine wesentliche Bedingung.

Abb. 84 zeigt die zu Abb. 79 gehörigen Stromstärken. Abb. 85 zeigt das aufgenommene Stromvektordiagramm bei einer Spannung von 380 V (λ -Schaltung), wobei nur der Tourenbereich von 1410 Umdr./min bis Synchronismus berücksichtigt wurde. Kurve I in Abb. 86 zeigt das über den ganzen Tourenbereich aufgenommene Stromvektordiagramm bei der Spannung von 220 V (ebenfalls λ -Schaltung).

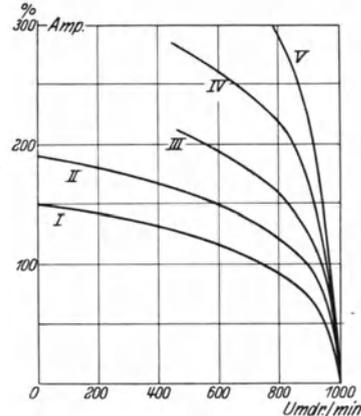


Abb. 84. Stromkurven des 15-kW-Doppelnutmotors der Firma Heemaf.

Da die Daten der Maschine von der Firma nicht mitgeteilt wurden, so soll an Hand der in Abb. 67 gezeigten Konstruktion versucht werden, von den Kurven einen Rückschluß auf die wichtigsten Maschinendaten zu ziehen.

Der in Abb. 85 eingezeichnete punktierte Kreis ist offenbar der Schmiegunskreis, sein ideeller Kurzschlußstrom ist 116 Amp., also 3,84 mal so groß wie der durch Versuch ermittelte Volllaststrom $J_n = 30,2$ Amp., also ist

$$x_1 + x_2 = \frac{220}{116} = 1,89.$$

Der bei $\sigma = 1$ beobachtete Punkt A muß nun auf dem k -Kreise der Abb. 66 liegen, der den Schmiegunskreis in P'_k berührt. Nun läßt sich r_1 in der Versuchsstation messen und r_2 aus dem bei Volllast beobachteten Schlupf berechnen; damit ist aber der Punkt P'_k des Schmiegunskreises gegeben und k bestimmt. Da der äußere Kreis k berühren muß, so läßt er sich leicht einzeichnen, indem wir (wie schon früher) die praktisch erlaubte Annahme machen, daß sich sein Mittelpunkt auf der durch P_0 gehenden Horizontalen befindet. Mit dem ideellen Kurzschlußstrom des äußeren Kreises (im vorliegenden Falle 263 Amp.) ist aber

$$x_1 = \frac{220}{263} = 0,84 \text{ Ohm und } x_2 = 1,89 - 0,84 = 1,05 \text{ gegeben. An den}$$

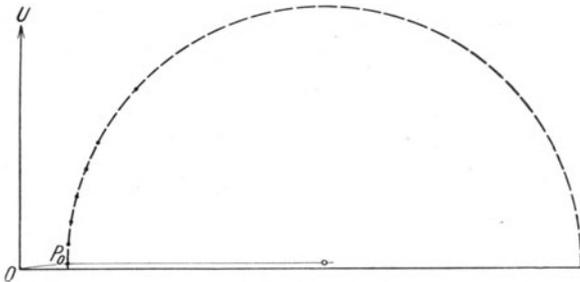


Abb. 85. Stromvektordiagramm des Doppelnutmotors der Firma Heemaf.

Enden der beiden ideellen Kurzschlußströme OD'' und OD' können wir jetzt die Geraden g' und g'' ziehen. Erstere wird von $P_oP'_u$ und $P_oP'_k$ in E und F geschnitten und damit ist der Hilfskreis k im invertierten Diagramm mit dem Mittelpunkte H , den Berührungspunkten F und G und auch die Lage des Punktes L als Schnittpunkt des Kreises mit P_oA gegeben.

Zur Sicherheit kontrollieren wir noch $P_oL = \frac{P_oD' \cdot P_oD''}{P_oA}$.

In vorliegendem Falle war der Schlupf des Motors bei Vollast 3,5%, woraus sich $r_2 = 0,25$ Ohm ergibt. r_1 ist im Versuchsprotokoll nicht an-

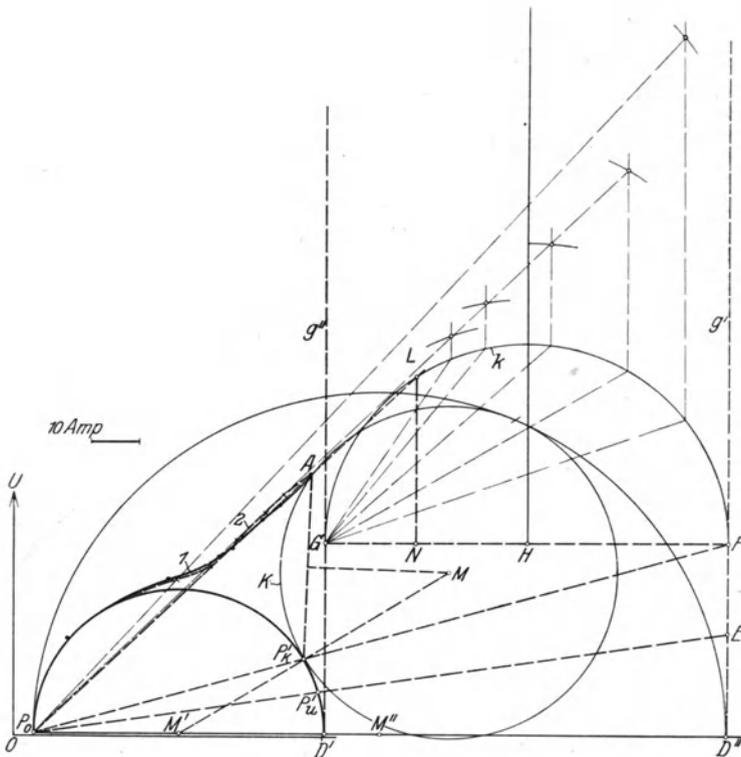


Abb. 86. Berechnetes Stromvektordiagramm des 15-kW-Heemaf-Motors.

gegeben. Wir können es aber aus Wirkleistung und dem Drehmoment bei $\sigma = 1$ ableiten. In der Wirkleistung sind enthalten außer den Eisenverlusten die primären und sekundären Kupferverluste. Letztere können aber aus dem Drehmoment berechnet werden, so daß die primären Kupferverluste bekannt sind.

Bei 216 V, 83,3 Amp., $\sigma = 1$ wurde eine Wirkleistung von 20,43 kW, ein Drehmoment von 9,5 mkg beobachtet. Es müssen also $20,43 - 9,5 \cdot 1500 \cdot 1,025 \cdot 10^{-3} = 5,8$ kW für primäre Kupferverluste und Eisenverluste übrigbleiben. Letztere können bei 380 V (aus den

Leerlaufverlusten) zu ca. 550 Watt und bei 216 V zu ca. 180 Watt geschätzt werden, so daß sich die primären Kupferverluste bei 83,3 Amp. zu 5,6 kW und der primäre Widerstand zu 0,27 Ohm ergibt.

Sobald der Hilfskreis k im invertierten Diagramm bekannt ist, läßt sich das Stromvektordiagramm für den ganzen Tourenbereich konstruieren. Es ist dies die punktierte Kurve 2 der Abb. 86. Sie weicht nur wenig von der beobachteten ab und auch für diese geringe Abweichung findet sich eine plausible Erklärung. Die Messung bei

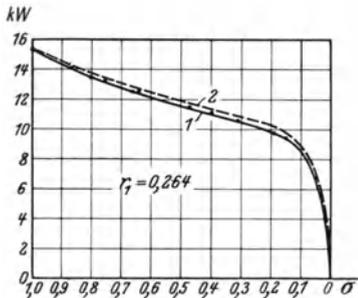


Abb. 87. Berechnete und beobachtete Drehmomentkurve des 15 kW-Heemaf-Motors in synchronen kW in Abhängigkeit vom Schlupf.

$\sigma = 1$ bedingt einen größeren Strom und außerdem einen verstärkten Anteil dieses Stromes auf den äußeren Käfig, der während der Messung sehr warm werden muß. Unser Diagramm hat aber zur Voraussetzung, daß die Erwärmung der beiden Käfige für alle Messungen konstant sei. Die gleiche Abweichung zeigt sich auch in der beobachteten und berechneten Drehmomentkurve in Abhängigkeit von der Tourenzahl (Abb. 87)¹.

Der sekundäre Widerstand bei $\sigma = 1$ berechnet sich aus dem beobachteten Drehmoment zu 0,73 Ohm pro Phase. Gegenüber Vollast

¹ Bei allen Punkten mit Ausnahme von $\sigma = 1$ ist das Reibungsmoment schon abgezogen.

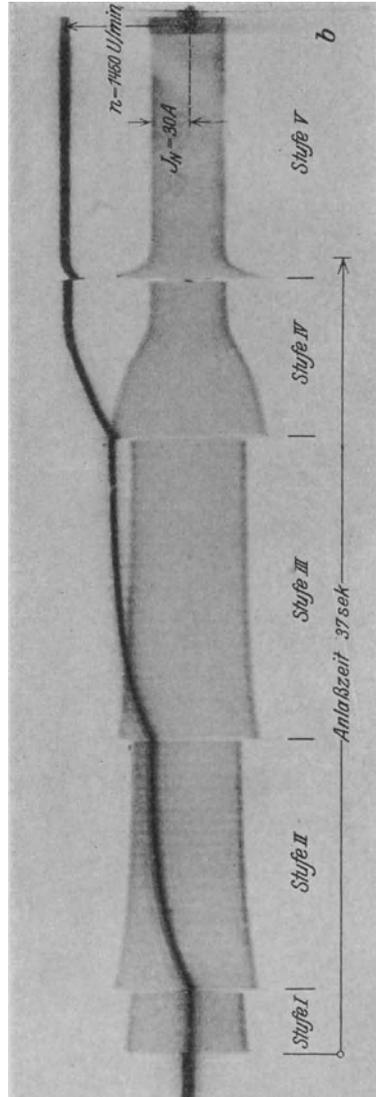


Abb. 88. Oszillographische Aufnahme des Anlaufes des 15 kW-Heemaf-Motors.

ist also eine Vergrößerung auf das $\frac{0,73}{0,25} = 2,9$ -fache eingetreten. Aus der

Lage von L findet man $t = \sqrt{\frac{FN}{NG}} = 1,86$ und aus der Gleichung

$$R_{2, \sigma = 1} = r_2 + (\lambda - 1) r_2 \frac{t^2}{1 + t^2},$$

$$\lambda = 3,46.$$

Mit Rücksicht darauf, daß bei der Meßaufnahme sicherlich eine starke Erwärmung des äußeren Käfigs stattgefunden hat, dürfte λ für den Fall gleicher Temperatur beider Käfige etwas unter 3 zu liegen kommen.

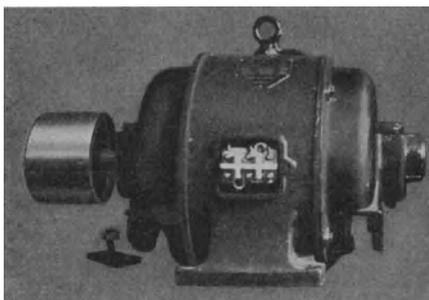


Abb. 89. Doppelnutmotor der Firma Heemaf für 5,5 kW, bei 960 Umdr. p. M.

Das Interessante an diesem Motor ist der relativ kleine Wert von x_1 resp. ϵ_1 . Als normaler Käfigankermotor würde dieser Motor einen ideellen Kurzschlußstrom etwa gleich dem 8fachen des Normalstromes haben, was nur bei reichlicher Dimensionierung möglich ist. Abb. 88 zeigt das Oszillogramm des Stromes während des Anlaufs.

Bei 6 und mehr als 6poligen Motoren ist es im allgemeinen nicht möglich, den ideellen Kurzschlußstrom des äußeren Kreises sehr hoch zu treiben, und deshalb ist es auch nicht möglich, ähnliche Resultate wie beim 4poligen Motor zu erhalten.

Ein kleiner, im Handel gekaufter Motor der Firma Heemaf für eine Leistung von 5,5 kW bei 960 Umdr./min wurde in der Technischen Hochschule Darmstadt eingehend geprüft.

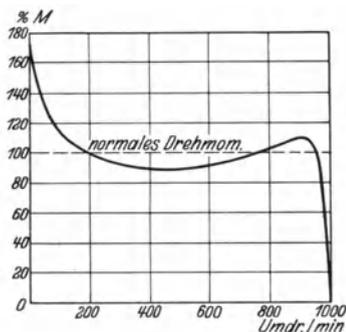


Abb. 90. Aufgenommene Drehmomentkurve des 6poligen, 5,5-kW-Heemaf-Motors.

Soweit seine Abmessungen nach dem Herausnehmen des Rotors erhältlich waren, sind sie in der folgenden Tabelle aufgenommen worden.

Stator-Innendurchmesser 200 mm
 Länge des Eisenpakets 125 „
 Statornutenzahl 36 „

	äußerer Käfig	innerer Käfig
Nutenzahl des Rotors	88	44
Stabdurchmesser . . .	3,5	7
Endring	9 × 13	9 × 13

Abb. 89 zeigt eine Photographie des Motors und Abb. 90 die aufgenommene Drehmomentenkurve. Im Gegensatz zu den Kurven an den 4poligen Motoren erkennen wir hier eine starke Einbuchtung, die in

diesem Ausmaße freilich nur für die kleinen Leistungen auftritt. Wie uns die Firma Heemaf mitteilt, ist in der neuesten Serie der kleinen 6poligen Modelle die Drehmomentenkurve wesentlich günstiger.

In der ETZ 1930, H. 9, S. 317 veröffentlicht die Firma Heemaf Versuche über das direkte Einschalten großer Motoren, die in einer Fabrikanlage von insgesamt 10000 kW Leistung installiert und sämtlich mit Käfiganker und Druckknopfsteuerung ausgerüstet waren. Darunter befinden sich Motoren von 1200 PS bei 125 Umdr./min, die mit dem 5,5fachen Nennstrom anliefen, andere von 400 PS Leistung, die mit dem 3,3fachen Nennstrom anliefen. Das Anlassen von 18 nacheinander eingeschalteten Motoren erforderte nur 2 Minuten und

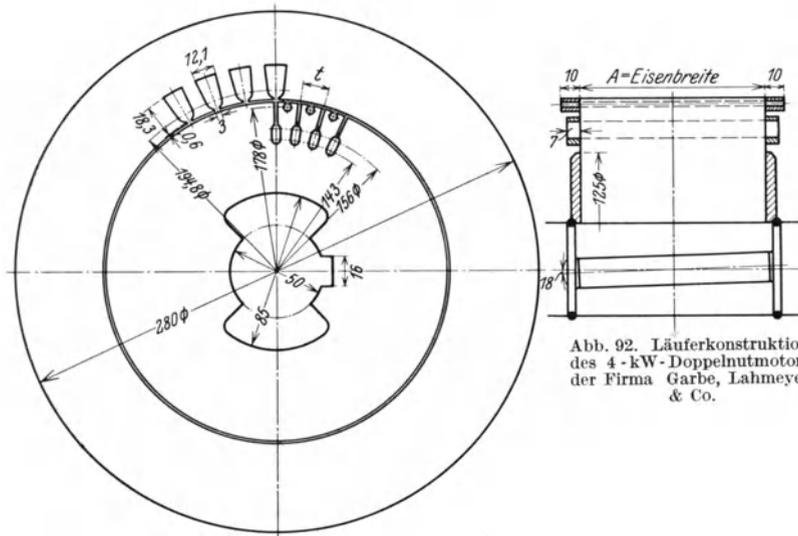


Abb. 91. Nutenschnitt des 4-kW-Doppelnutmotors der Firma Garbe, Lahmeyer & Co.

Abb. 92. Läuferkonstruktion des 4-kW-Doppelnutmotors der Firma Garbe, Lahmeyer & Co.

dieser Vorteil wurde wesentlich höher eingeschätzt als der geringere Anlaßstrom, der bei Benutzung von Schleifringläufern möglich gewesen wäre.

Abb. 91 zeigt den Nutenschnitt eines Doppelnutmotors der Firma Garbe, Lahmeyer & Co. für eine Leistung von 4 kW, 1420 Umdr./min $50 H_z$. Die Hauptabmessungen dieses Motors sind:

Ständerdurchmesser	außen	280 mm
„	innen	185 „
Läuferdurchmesser	außen	184 „
„	innen	85 „
Eisenpaketbreite		96 „

Außenkäfig: $\varnothing 3$ mm Stab in einer 4 mm Nute bei 70 mm^2 Endringquerschnitt.
Innenkäfig: $2,5 \times 9 \text{ mm}^2$ Stab in $3 \times 9 \text{ mm}^2$ Nute bei 100 mm^2 Endringquerschnitt.

Die Läuferkonstruktion ist in Abb. 92 dargestellt. Abb. 93 zeigt die von der Prüfstelle des RWE in Reisholz aufgenommene oszillographische

Aufnahme von Strom und Drehzahl. Der Strom beim Einschalten und beim Umschalten beträgt $1,64 J_n$; in der 1. Periode erhöht sich dieser Wert durch den Ausgleichstrom zu $2 J_n$. Das Gegendrehmoment be-

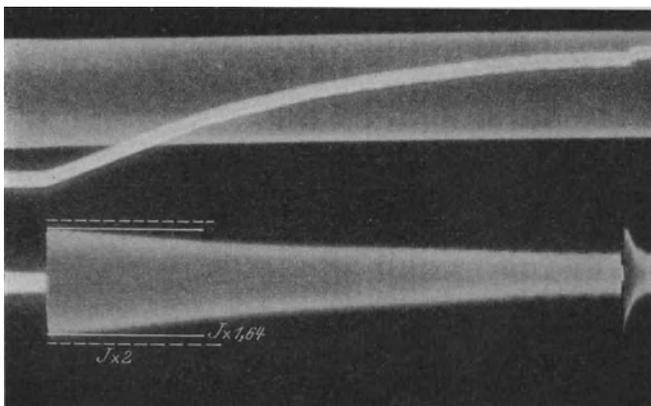


Abb. 93. Oszillographische Aufnahme des Anlaufstromes und der Drehzahl des 4-kW-Doppelnutmotors der Firma Garbe, Lahmeyer & Co.

trug $0,5 M_n$. Die Firma baut die Motoren je nach Bestellung für ein Anlaufdrehmoment von $0,6 M_n$ und $0,8 M_n$.

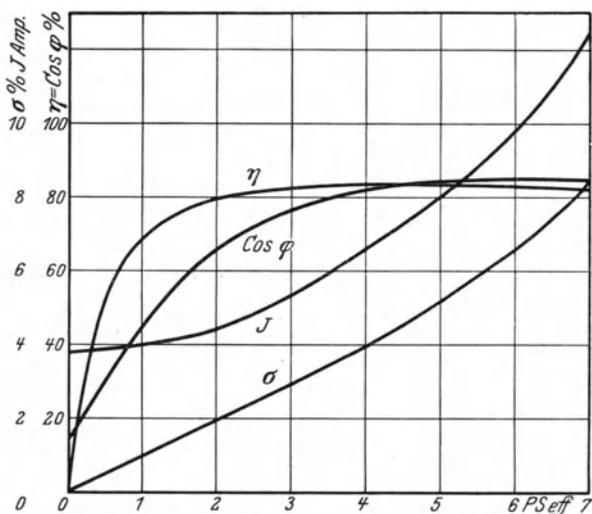


Abb. 94. Charakteristische Kurven des 5,5-PS, 4poligen Doppelnutmotors der Firma Ganz & Co., A.-G. in Abhängigkeit von der Belastung.

Abb. 94 und Abb. 95 enthält die Versuchswerte eines Doppelkäfigmotors von 5,5 PS, 380 V, 1420 Umdrehungen der Firma Ganz & Co. A.-G. in Budapest.

Der Motor ist eine Type einer für geringen Anlaufstromstoß ausgeführten Spezialreihe.

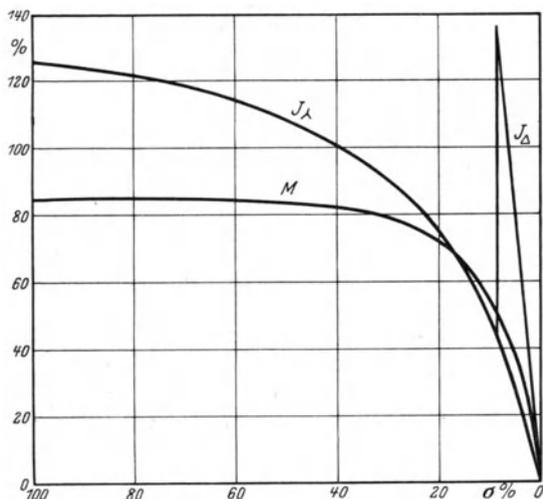


Abb. 95. Drehmoment und Strom des 5,5-PS., 4 poligen Doppelnutmotors der Firma Ganz & Co., A.-G. in Abhängigkeit vom Schlupf.

Abb. 94 zeigt die aufgenommenen charakteristischen Kurven bei der Δ -Betriebschaltung. J ist die Kurve des Primärstromes, σ die des Schlupfes, außerdem sind noch die Wirkungsgrad- und $\cos \varphi$ -Kurven aufgetragen.

Abb. 95 enthält die aufgenommenen Kurven für das Drehmoment (M) und den Primärstrom (J) beim Anlauf in λ -Schaltung. Der Motor entwickelt beim Einschalten 84,5% des normalen Drehmomentes und nimmt 126% des Normalstromes auf. Beim Umschalten auf Δ bei Halblast tritt ein Umschaltstrom von 135% des Normalstromes auf. Der Umschaltstrom ist in Abb. 93 mit dünnerem Linienzug eingezeichnet.

Abb. 96 zeigt die Anordnung der beiden Endringe an Hand einer Photographie.

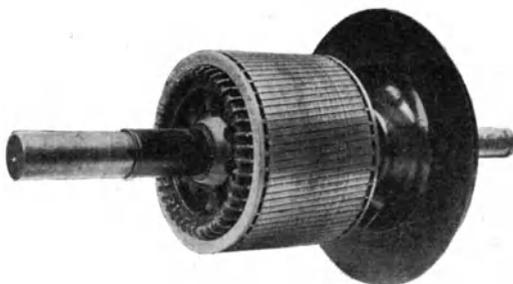


Abb. 96. Photographie des Läufers eines Doppelnutmotors der Firma Ganz & Co., A.-G.

5. Drehstrommotor mit Wirbelstromläufer.

A. Der Käfiganker mit einem Leiter pro Nute.

Neben dem Doppelkäfiganker, der in den vorhergehenden Kapiteln behandelt worden ist, hat sich in der Praxis auch der Einfachkäfiganker mit tiefen Nuten einen Platz erkämpft. Wird ein massiver Leiter von Wechselstrom durchflossen, so verteilt sich der Strom ungleichmäßig über den Querschnitt, so daß der Wechselstrom mehr Verluste erzeugt als der gleich große Gleichstrom. Diese zusätzlichen Verluste, auch Verluste durch Stromverdrängung genannt, für den Fall eines oder mehrerer in Nuten gebetteter Leiter zuerst berechnet zu haben, ist das Verdienst von Field¹, der die Endresultate schon in einer für den Praktiker äußerst bequemen Art durch Kurven darstellte. Weitere wichtige Arbeiten im gleichen Gebiete verdanken wir Emde² und Rogowski³.

In der Bezeichnung, die Emde eingeführt hat, läßt sich das Verhältnis des Wechselstromwiderstandes zum Gleichstromwiderstand darstellen durch

$$K = \varphi(h') + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(h'), \quad (21)$$

wo

$$\varphi(h') = \frac{h'(\Im \sin 2h' + \sin 2h')}{\Im \circ \sin 2h' - \cos 2h'} \quad (22)$$

und

$$\psi(h') = \frac{2h'(\Im \sin h' - \sin h')}{\Im \circ \sin h' + \cos h'} \quad (23)$$

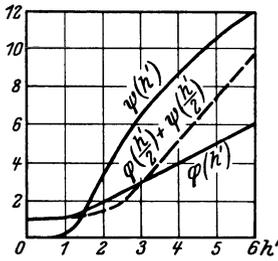


Abb. 97. Die Funktionen $\varphi(h')$ und $\psi(h')$ in Abhängigkeit von der reduzierten Leiterhöhe h' .

am besten an Hand der Kurven in Abb. 97 abgelesen werden. m stellt die Anzahl der übereinander lagernden Leiter dar; für $m = 1$, den Fall, den wir zunächst behandeln werden, ist $K = \varphi(h')$. Die reduzierte Leiterhöhe h' kann für Kupferleiter aus $h' = h \sqrt{\frac{f}{50} \cdot \frac{b_c}{b_n}}$ gefunden werden, wo b_c die Kupferbreite, b_n die Nutenbreite und h die Höhe eines Leiters darstellt. (Wenn mehrere Leiter nebeneinander liegen, stellt b_c die gesamte Breite der nebeneinander liegenden Drähte dar).

K bezieht sich auf denjenigen Teil des Kupfers, der im Eisenkörper liegt; d. h. sowohl der aus dem Eisen herausragende Teil der Stäbe als auch die Endringe werden von der durch K ausgedrückten Widerstandsvergrößerung nicht betroffen.

Neben der Vergrößerung des Widerstandes tritt — wie beim Doppelstrommotor — eine Verkleinerung der Nutenstreuung ein. Diese Verkleinerung beträgt

$$\frac{1}{m^2} \lambda_0(h') + \frac{m^2 - 1}{m^2} \mu_0(h'). \quad (24)$$

¹ Field: Am. Inst. E. E. 1905.

² Emde: El. u. Maschinenb. 1908, S. 703/26.

³ Rogowski: Arch. Elektrot. Bd. 2, S. 81 u. 262.

Die Kurven

$$\lambda_0(h') = \frac{3(\sin 2h' - \cos 2h')}{2h'(\cos 2h' - \cos h')} \quad (25)$$

und

$$\mu_0(h') = \frac{\sin h' + \sin h'}{h'(\cos h' + \cos h')} \quad (26)$$

sind in Abb. 98 aufgetragen.

Man erkennt aus letzteren Kurven deutlich, daß diese Verkleinerung der Streuung für kleine Werte von h' gering ist und daß erst von etwa $h' = 1,5$ an mit einer beträchtlichen Verkleinerung zu rechnen ist. Von $h' = 2$ an kann man mit großer Annäherung $\lambda_0(h') = \frac{1,5}{h'}$ setzen.

In Generatoren müssen wir zusätzliche Verluste mit allen erdenklichen Mitteln zu vermeiden suchen, und die obigen Formeln müssen dort untersucht werden mit dem Bestreben, K so klein wie möglich zu machen.

Genau das entgegengesetzte Problem besteht beim Bau des Käfigankers mit tiefen Nuten, der gelegentlich auch Wirbelstromläufer genannt wird. Wir sehen ja, daß h' von \sqrt{f} abhängt, beim Anlauf also einen relativ hohen Wert besitzt, denn im ersten Augenblick des Einschaltens ist ja die Frequenz des Rotorstromes gleich der Netzfrequenz, während nach Beendigung des Anlaufes die Schlupffrequenz verbleibt. K kann also im Anfang des Anlaufes groß gemacht werden und wird trotzdem im normalen Lauf auf den Wert 1 gesunken sein. Um h' möglichst groß zu machen, muß eine tiefe Nute benutzt werden.

Bei kleinen Motoren tritt eine Beschränkung aus mechanischen Gründen ein, denn wenn der Außendurchmesser des Rotors gegeben ist, so muß nach innen zu außer den Nuten noch Platz für den Rücken des Rotorbleches, für die Welle und öfters für axiale Luftkanäle vorgesehen werden. Diese Beschränkung trifft nicht nur kleinere, sondern auch noch mittlere Leistungen. Ein zweiter Faktor muß bei Benutzung der tiefen Nuten berücksichtigt werden, nämlich der Einfluß der Rotornutenstreuung bei Vollast auf den Leistungsfaktor. Genau wie für den Doppelnutmotor muß bei einem Vergleiche der Wirkungsgrad und der $\cos \varphi$ bei Vollast unverändert bleiben, denn man kann auch beim Wirbelstromläufer die Anlaufverhältnisse auf Kosten des Wirkungsgrades oder des $\cos \varphi$ verbessern. Wir werden die Verhältnisse am besten überblicken, wenn wir den im 3. Kapitel berechneten 4poligen 7,5 kW-Drehstrommotor mit Wirbelstromläufer vorsehen und dabei vor allem darauf achten, daß η und $\cos \varphi$ unverändert bleiben.

Das Statoreisenpaket und die Statorwicklung übernehmen wir ungeändert, ebenso den sekundären Widerstand und die sekundäre Streuung bei Vollast, also:

$$w = 114; \quad r_1 = 0,535; \quad r_2 = 0,42; \quad x_1 = 1,85 \quad \text{und} \quad x_2 = 1,085.$$

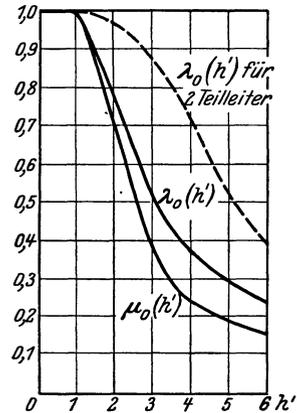


Abb. 98. $\lambda_0(h')$ und $\mu_0(h')$ in Abhängigkeit von der reduzierten Leiterhöhe h' .

Da nur der im Eisenpaket liegende Anteil des sekundären Widerstandes vergrößert wird, so liegt der Gedanke nahe, möglichst viel von diesem Widerstande in die Stäbe und möglichst wenig in die Endringe zu verlegen. Wir werden später sehen, daß diese Überlegung nicht richtig ist, wollen aber trotzdem auf dieser Basis weiter rechnen, indem wir auf die Endringe nur 20% des sekundären Widerstandes legen, also auf die Stäbe $0,8 \cdot 0,42 = 0,336$ Ohm. Unter Benutzung von Gl. (2) ergibt sich

$$0,8 \cdot 0,42 = 12 \cdot (114 \cdot 0,96)^2 \cdot \frac{0,02 \cdot 0,15}{46 \cdot q_s},$$

$$q_s = 28 \text{ mm}^2.$$

Der Querschnitt der Endringe ergibt sich aus:

$$0,2 \cdot 0,42 = 12 (0,96 \cdot 114)^2 \frac{0,02 \cdot 0,52}{2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot q_e}$$

$$\text{zu } q_e = 227 \text{ mm}^2.$$

Aus Gl. (20) folgt, unter Einsetzung des Wertes $x_n = 1,085$,

$$1,085 = 12 (0,96 \cdot 114)^2 2 \pi \cdot 50 \cdot 10^{-8} \left(\frac{14 \cdot \lambda_n}{46} + \frac{52 \cdot 0,5}{2 \pi^2 \cdot 4} \right),$$

$$\lambda_n = 6,8.$$

Die Rotornut muß also so dimensioniert werden, daß der Kupferquerschnitt von 28 mm^2 Platz findet und gleichzeitig eine Nutenleitfähigkeit von $\lambda_n = 6,8$ erzielt wird.

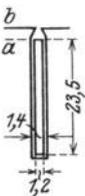


Abb. 99. Nute des berechneten Wirbelstromläufers.

Die in Abb. 99 gezeichnete Nute erfüllt diese Bedingung mit dem Stabquerschnitt $23,5 \times 1,2 \text{ mm}^2$ und der Nutenbreite von $1,4 \text{ mm}$. Die Nutenlänge muß je nach der angewandten Befestigungsart der Stäbe noch 1 bis 3 mm größer als die Stabhöhe sein. Der berechnete Wert von $\lambda_n = 6,8$ soll aber den oberhalb der Stabhöhe liegenden Anteil nicht mit einschließen, denn auch beim Doppelnutmotor haben wir diesen Anteil zu x_1 hinzugerechnet.

Bei $\sigma = 1$ ist $h' = 2,35 \sqrt{\frac{1,2}{1,4}} = 2,18$ und aus Abb. 96 und 97 folgt $\varphi(h') = 2,1$ und $\lambda_0(h') = 0,75$. Von dem sekundären Widerstand entfiel $0,336$ Ohm auf die Stäbe, und da diese nur mit 14 cm im Eisenpaket liegen, so sind nur $\frac{14}{15} \cdot 0,336 = 0,314$ Ohm der Vergrößerung durch den Einfluß der Wirbelströme unterworfen; d. h. bei $\sigma = 1$ ist $R_2 = 0,314 \cdot 2,1 + 0,106 = 0,766$. Ebenso entfiel von der Reaktanz $x_2 = 1,085$ nur $0,86 \cdot 1,085 = 0,93$ auf die Nutenstreuung, so daß bei $\sigma = 1$ $X_2 = 0,75 \cdot 0,93 + 0,15 = 0,85$ wird. Der ideelle Kurzschlußstrom ist also $\frac{220}{1,85 + 0,85} = 82$ Amp. Das Drehmoment bei $\sigma = 1$ beträgt $11,7$ synchrone kW, der Anlaufstrom $74,8$ Amp.

Dieses Drehmoment ist wesentlich geringer als das entsprechende beim Doppelnutmotor.

Wir wollen nun eine andere Verteilung des sekundären Widerstandes auf Stab und Endringe vornehmen, indem wir den Querschnitt der ersteren verdoppeln und den Querschnitt der letzteren so verkleinern,

daß der Gesamtwert von 0,42 Ohm bei Vollast nicht verändert wird. Auch die Nutenleitfähigkeit von 6,8 soll beibehalten werden. Ein Stabquerschnitt von $33 \times 1,75 \text{ mm}^2$ in einer Nute von $36 \times 2,0$ erfüllt diese Bedingung. Wir erhalten $h' = 3,3 \sqrt{\frac{1,75}{2,0}} = 3,1$, $\varphi(h') = 3,1$ und $\lambda_0(h') = 0,49$.

Zu $\sigma = 1$ gehört ein sekundärer Ohmscher Widerstand

$$R_2 = 0,157 \cdot 3,1 + 0,264 = 0,74$$

und eine Reaktanz $X_2 = 0,49 \cdot 0,93 + 0,15 = 0,61$. Der ideelle Kurzschlußstrom ist $J_{k1} = \frac{220}{1,85 + 0,61} = 89,5 \text{ Amp.}$

Das Drehmoment erhält man graphisch zu 13 synchronen kW und den Anlaufstrom zu 79,5 Amp. Wir erkennen gegenüber dem ersten Entwurf sowohl eine Verbesserung des absoluten wie des spezifischen Drehmomentes, obgleich wir auch jetzt noch nicht die Werte des Doppelnutmotors erreichen.

Für andere Werte von σ ergibt sich $h' = 3,1 \sqrt{\sigma}$, damit R_2 und X_2 , der zu σ gehörige Wert des ideellen Kurzschlußstromes und graphisch oder analytisch das Drehmoment.

Die Tabelle 14 und die Abb. 100 zeigen die Berechnung und die Kurven des Drehmomentes und des Stromes in Abhängigkeit von der Tourenzahl.

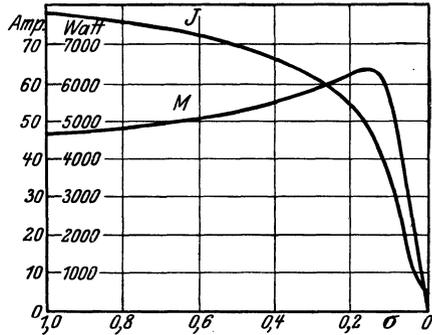


Abb. 100. Drehmoment und Strom des berechneten Wirbelstromläufers in Abhängigkeit vom Schlupf.

Tabelle 14.

σ	$h' = 3,1\sqrt{\sigma}$	$\varphi(h')$	$R_2 = 0,156 \cdot \varphi(h') + 0,264$	$\lambda_0(h')$	J_{k1}	$\frac{R_2}{\sigma}$	J	M
					$\frac{220}{1,85 + \lambda_0(h') \cdot 0,93 + 0,15}$			
1	3,1	3,1	0,748	0,48	89,8	0,748	74	4300
0,6	2,4	2,4	0,639	0,63	85	1,06	72	5100
0,4	1,97	1,8	0,545	0,77	81	1,37	66,4	5520
0,2	1,385	1,25	0,459	0,92	77	2,29	55	6300
0,1	0,98	1,08	0,433	0,975	75,5	4,33	39	5600

Wir ersehen nun aus den obigen Berechnungen, daß es richtig ist, von dem gesamten sekundären Widerstand möglichst wenig Widerstand in die Stäbe zu verlegen, damit unter dem Einfluß der Stromverdrängung eine starke Verkleinerung der Nutenstreuung bei $\sigma = 1$ stattfinden kann. Diesem Bestreben, h' so groß wie möglich zu machen, und x_2 bei $\sigma = 1$ möglichst zu verkleinern, wird freilich, wie schon erwähnt, durch die zulässige Nutenhöhe eine Grenze gesetzt. Es ist praktisch unmöglich, die Verkleinerung von x_2 bei $\sigma = 1$ so weit zu treiben wie beim Doppelnutmotor, bei dem die sekundäre Nutenstreuung in einem der Beispiele auf 20,5% derjenigen bei Vollast reduziert worden war;

denn ein Blick auf die Kurve λ_0 in Abb. 98 zeigt, daß hierfür eine Nutenhöhe von ca. 8 cm erforderlich wäre, was offenbar nur für sehr große Motoren praktisch möglich ist.

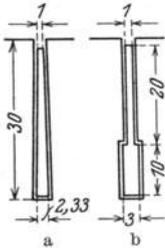


Abb. 100a und b. Trapezförmige und abgesetzte Nuten, angewandt bei der Konstruktion des Wirbelstromläufers.

Trotzdem der Wirbelstromläufer dem Doppelnutenmotor in bezug auf die Anlaufverhältnisse unterlegen ist, hat ihm die einfachere und billigere Herstellung ein Anwendungsgebiet verschafft, besonders da, wo nur mittlere Anlaufdrehmomente erforderlich sind oder wo ein direktes Einschalten vom Netz aus gestattet ist.

Man könnte auch den Unterschied in den Herstellungskosten des Rotors dazu verwenden, die Reaktanz x_1 zu verkleinern, indem etwa die Zahl der Nuten vergrößert und dadurch die doppeltverkettete Streuung verkleinert wird. Wenn z. B. der 4polige 7,5-kW-Motor mit 48 Nuten im Stator und 62 Nuten im Rotor ausgeführt würde, könnte x_1 erniedrigt und damit der Anlauf verbessert werden.

Eine zweite Möglichkeit, den Wirbelstromläufer zu verbessern, besteht darin, den rechteckigen Querschnitt zugunsten des trapezförmigen

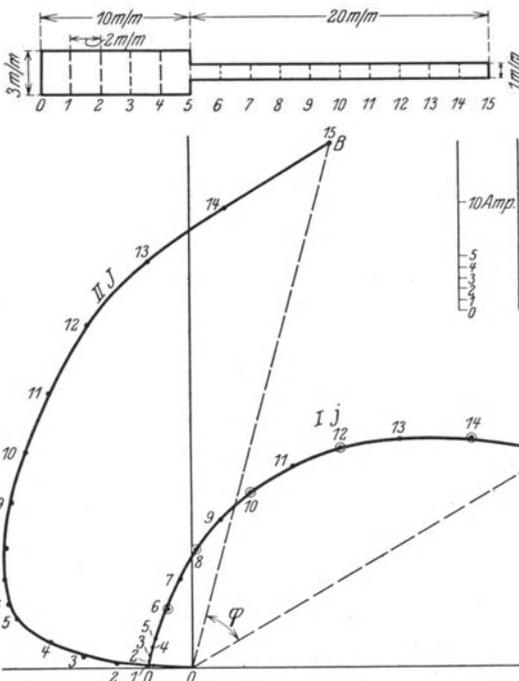


Abb. 101. Punktwise Berechnung von Stromdichte und Strom in den einzelnen Teilen des abgesetzten Stabes eines Wirbelstromläufers.

des Stabes, wenn ein Wechselstrom von 50 Hz und 50 Amp. fließt, wenn also die Stromstärke gleich dem Querschnitt in mm^2 ist. Eine einfache

oder des abgesetzten Leiters (Abb. 100a und b) zu verlassen. Die Berechnung eines solchen Querschnitts kann nur abschnittsweise geschehen, indem für jeden Abschnitt die Änderung der Stromdichte des Stromes, der Streukraftliniendichte und des gesamten Streukraftlinienflusses vom Nutengrunde bis zu dem betreffenden Abschnitt graphisch aufgetragen wird. Für die in Abb. 100b gezeigten Nuten- und Stabdimensionen ist die Verteilung der Ströme ausgerechnet worden. Die Kurve I in Abb. 101 zeigt die

Stromdichte an den verschiedenen Stellen

Betrachtung zeigt, daß die Stromdichte OA in der äußersten Faser in Phase mit der zugeführten Spannung und gleich dem Verhältnis von Wechselstromimpedanz zu Gleichstromwiderstand ist. Die Kurve II stellt den Strom vom Nutengrunde zu den einzelnen Punkten der Nute dar, OB also den Gesamtstrom. Aus dem Phasenverschiebungswinkel φ zwischen OA und OB können die Ohmsche und die induktive Komponente bestimmt werden. Für den betrachteten Fall ergab sich ein Verhältnis von Impedanz zu Gleichstromwiderstand = 5,6; in symbolischer Form: $4,0 + j \cdot 3,9$; daher: Vergrößerung des Ohmschen Widerstandes $K = 4$. Schwächung der Nutenstreuung $\lambda_0 = \frac{3,9}{8,8} = 0,45$, wo 8,8 das Verhältnis von Reaktanz zu Gleichstromwiderstand ist, wenn die Kraftlinienverteilung dieselbe bleiben würde wie bei Gleichstrom.

Konstruieren wir eine nicht abgesetzte Nute, die den gleichen Stabquerschnitt (50 mm^2) und die gleiche Nutenleitfähigkeit besitzt, so erhält man, wenn man wiederum die Nutenbreite 0,5 mm größer als die Stabbreite macht, eine Stabhöhe von 45 mm, eine Nutenbreite von 1,63 mm und eine Stabbreite von 1,13 mm. Für diesen Stab wäre $K = 3,75$ und $\lambda_0 = 0,4$. In dem abgesetzten Querschnitt ist K und λ_0 etwas ungünstiger, dafür ist aber ein wesentlicher Vorteil in der Nutenhöhe erhalten worden, 30,5 mm anstatt 47 mm (denn bei dem abgesetzten Querschnitt braucht kein Platz für die Befestigung der Stäbe vorgesehen zu werden). Auf gleiche Nutenhöhe bezogen tritt also ein beträchtlicher Vorteil ein.

Für den Wirbelstromläufer mit normalen Nuten läßt sich eine einfache Beziehung zwischen K und dem Verhältnis $\frac{\varepsilon_2}{\rho_v}$ (oder $\frac{x_2}{r_2}$) ableiten.

Wir teilen die gesamte relative Streuung ε in zwei Teile ε_1 und ε_2 , von denen sich ε_2 nur auf die Rotornutenstreuung, und zwar auch nur bis zur obersten Faser a des Leiters (siehe Abb. 99) beziehen soll. Der darüber liegende Teil (also zwischen b und a) soll zu ε_1 gezählt werden, in dem auch die Statornutenstreuung, Statorstirnstreuung, Streuung der Rotorendringe und die doppeltverkettete Streuung enthalten ist. ε_2 ist also ein wenig verschieden von dem entsprechenden Werte in dem Kap. 3, insofern als die Streukraftlinien, die mit den Endringen des inneren Käfigs verschlungen waren, ohne den äußeren Endring zu berühren, mit zu ε_2 gezählt wurden, während wir jetzt, wo nur ein einziger Endring pro Seite vorhanden ist, seine Streukraftlinien zu ε_1 rechnen. Der Unterschied ist aber praktisch nicht bedeutend.

Wir teilen ferner den Widerstand des Käfigs in zwei Teile r'_2 und r''_2 . Zu r'_2 rechnen wir den im Eisen liegenden Teil des Käfigs und zu r''_2 den außerhalb des Eisens liegenden Teil. r'_2 wird durch die Stromverdrängung beeinflusst, während r''_2 nicht beeinflusst werden kann. Anstatt r'_2 und r''_2 werden wir auch die entsprechenden Werte des Vollast-schlupfes ρ'_v und ρ''_v benutzen.

Wenn N' die vom Stator auf den Rotor übertragene Leistung darstellt, so muß $\rho'_v N'$ gleich dem Verluste in demjenigen Teil des Käfig-

ankers sein, der im Eisen liegt, also gleich

$$\frac{2,1 \cdot z_n l J_2^2 10^{-6}}{h \cdot b_c}, \quad (27a)$$

wo z_n = Zahl der Rotornuten,

l = Länge des Rotoreisens (inkl. Isolation in cm),

J_2 = Strom bei Vollast in einem Käfigstab,

h und b_c = Höhe und Breite des Stabes in cm.

Wir können nun auch einen einfachen Ausdruck für ε_2 finden:

$$\varepsilon_2 = \frac{2 \cdot 1,25 \cdot \sqrt{2} \cdot J_2' l h}{3 \Phi b_n}, \quad (27b)$$

wo b_n die Nutenbreite in cm ist, J_2' der Strom in einem Stabe des Käfigankers, wenn der Rotor stillsteht und in der Statorwicklung der Normalstrom fließt; Φ die Zahl der nützlichen Kraftlinien bei der normalen Spannung.

Führen wir noch $N' = 11,1 \cdot z_n \cdot J_2 \Phi_2 10^{-6}$ ein, wo Φ_2 den bei Vollast mit der Sekundärwicklung verschlungenen Kraftlinienfluß darstellt, so ergibt sich aus Gl. (27a) und Gl. (27b)

$$h^2 \frac{b_c}{b_n} = 1,6 \frac{\varepsilon_2}{\varrho_v'} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_2} \cdot \frac{J_2}{J_2'}$$

In normalen Motoren ist $\frac{\Phi}{\Phi_2} \cdot \frac{J_2}{J_2'}$ sehr nahe gleich 1, z. B. in dem Motor, der im 2. Kapitel beschrieben worden ist, etwa gleich 0,99 für den Schleifringmotor und 0,97 für den Motor mit Käfiganker. Wir können also mit genügender Genauigkeit setzen:

$$h \sqrt{\frac{b_c}{b_n}} = 1,27 \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varrho_v'}}$$

Für $f = 50$ ist aber $h' = \alpha h = h \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_n}}$ die reduzierte Stabhöhe, also besteht im ersten Moment des Anlaufes eines 50 \sim -Motors die einfache Beziehung:

$$h' = 1,27 \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varrho_v'}}$$

und ganz allgemein während der Beschleunigung

$$h' = 1,27 \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \sigma}{\varrho_v'}}$$

Der ideelle Schlupf des Motors beträgt also:

$$\varrho_v = \varrho_v'' + \varrho_v' \varphi(h'), \quad \text{wo } h' = 1,27 \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \sigma}{\varrho_v'}}. \quad (28)$$

Für $\sigma = 1$ ist meistens $h' > 2,5$, also $\varphi(h') \approx h'$ und mithin

$$\varrho_{v, \sigma=1} = \varrho_v'' + 1,27 \sqrt{\varepsilon_2 \varrho_v'}$$

Die relative Streuung ε_2 wird während der Anlaufzeit auf $\varepsilon_2 \lambda_0(h')$ verkleinert. Für $\sigma = 1$ läßt sich auch hierbei eine wesentliche Verein-

fachung erzielen, denn im gleichen Bereiche von h' (nämlich $h' > 2,5$), in dem $\varphi(h') = h'$ gesetzt werden konnte, ist $\lambda_0(h') = \frac{1,5}{h'}$.

Also ist

$$\varepsilon_{2,\sigma=1} = 1,2 \sqrt{\varepsilon_2 \varrho'_v}$$

Die Verkleinerung der sekundären Streuung beträgt also $1,2 \sqrt{\frac{\varrho'_v}{\varepsilon_2}}$.

B. Der Käfiganker mit mehreren Leitern pro Nute oder mit einem verdrehten Stabe.

Das Ergebnis der vorangehenden Betrachtungen war insofern überraschend, als die reduzierte Stabhöhe h' festgelegt war, sobald ϱ'_v und ε_2 gewählt waren, sobald also über den Wirkungsgrad und den $\cos \varphi$ des Motors eine Vereinbarung vorlag, denn eine Vergrößerung von ϱ'_v würde den Wirkungsgrad und eine Vergrößerung von ε_2 den $\cos \varphi$ verschlechtern. Bei $\varepsilon_2 = 0,12$ und $\varrho'_v = 0,025$ erhielt man $h' = 2,85$, was einer Leiterhöhe von ca. 3,2 cm entsprechen würde. Wenn die Leiterhöhe größer gemacht werden kann, so mußte, wie wir gesehen haben, der Leiterquerschnitt vergrößert, also ϱ'_v verkleinert werden.

Eine besondere Beachtung verdienen Reversiermotoren. Hier ist die Periodenzahl im Rotor nach der Umschaltung der Statorwicklung gleich der doppelten der Netzfrequenz, bei 50periodigen Motoren also gleich 100. Ferner ist es hier gestattet, ε_2 auf Kosten des Leistungsfaktors größer zu machen, und beide Einflüsse führen zu einer Vergrößerung von h' , etwa bis zu 5 cm.

Für diese Werte von h' ist zuerst von Kiersteadt die Benutzung des verdrehten Stabes vorgeschlagen worden. Rüdenberg hat später, aber unabhängig von Kiersteadt, die Eigenschaften dieses Motors in einem interessanten Vortrag¹ vor dem VDE beschrieben. Verdrehte Stäbe werden bekanntlich beim Bau großer Generatoren angewandt, in der Absicht, die zusätzlichen Verluste durch Stromverdrängung vollständig zu eliminieren. Es muß Erstaunen hervorrufen, daß das gleiche Mittel auch da angewandt wird, wo ein Maximum der Verluste erreicht werden soll. Die Erklärung ist die folgende: Der verdrehte Stab erhält zwecks Unterdrückung der zusätzlichen Verluste eine möglichst geringe Höhe des Einzelleiters. Vergrößert man diese, so wachsen die zusätzlichen Verluste und können bei einer gewissen Höhe des Einzelleiters ebenso groß und noch größer werden wie bei Anwendung des massiven Stabes. Ein Beispiel wird diese Eigentümlichkeit am besten erklären. Ein massiver Leiter habe eine reduzierte Höhe $h' = 5$ cm. Wir wissen aus dem Vorhergehenden, daß dann $K = 5$ ist, d. h. der Wechselstromwiderstand ist 5 mal größer als der Gleichstromwiderstand. Durch Unterteilung in eine größere Anzahl von Einzelleitern und Verdrehung derselben läßt sich K auf annähernd 1 reduzieren, vorausgesetzt, daß die Höhe des Einzelleiters sehr gering ist. Die verbleibenden Verluste lassen

¹ ETZ 1918, S. 483.

sich leicht berechnen. Durch die Verdrillung wird bewirkt, daß ein jeder Teilleiter den gleichen Anteil des gesamten Stromes erhält, die noch verbleibenden Verluste können also nur daher kommen, daß in jedem Einzelleiter, von der endlichen Höhe des Einzelleiters herrührend, noch eine ungleichmäßige Verteilung auftritt. Gleiche Verluste würden auch entstehen, wenn die Einzelleiter in Serie geschaltet würden, welcher Fall aber nach Gl. (21) der Berechnung zugänglich ist. Anstatt eines Leiters mit $h' = 5$ cm mögen also 50 Leiter mit $h' = 0,1$ übereinander vorhanden sein; hierfür ist $K = 1 + \frac{(50^2 - 1) \cdot 0,1^4}{3 \cdot 3} = 1,027^*$.

Es sind also 2,7% zusätzliche Verluste enthalten.

Bei einer Höhe des Einzelleiters, entsprechend einer reduzierten Höhe $h' = 0,5$ cm und mithin 10 Einzelleitern ist $K = 1 + \frac{(10^2 - 1) \cdot 0,5^4}{3 \cdot 3} = 1,69$, also sind jetzt schon 69% zusätzliche Verluste enthalten.

Sind nur 2 Einzelleiter mit je $h' = 2,5$ cm in Serie geschaltet, so wird

$$K = \varphi(2,5) + \frac{2^2 - 1}{3} \psi(2,5) = 2,4 + 1 \cdot 5 = 7,4.$$

Es sind also jetzt ca. 1,5mal so viel zusätzliche Verluste entstanden, als wenn ein massiver Leiter mit $h' = 5$ benutzt worden wäre.

In Abb. 97 stellt die gestrichelte Kurve den Wert $\varphi\left(\frac{h'}{2}\right) + \psi\left(\frac{h'}{2}\right)$ dar, gilt also für 2 Leiter übereinander. Man ersieht, daß oberhalb $h' = 3$ cm K größer wird für den unterteilten Leiter, als für den ganzen Leiter¹.

In der gestrichelten Linie der Abb. 98 ist die Schwächung der Nutenstreuung unter dem Einfluß der Stromverdrängung für den Fall des einfach unterteilten Leiters angegeben. Dabei ist des Vergleiches halber Gleichheit der gesamten radialen Kupferhöhe angenommen worden, d. h. für die punktierte Kurve muß die doppelte Höhe des Einzelleiters als Abszisse benutzt werden. Man ersieht, daß diese Schwächung wesentlich kleiner ist wie beim einfachen Leiter. Daraus folgt aber, daß der ideale Kurzschlußstrom

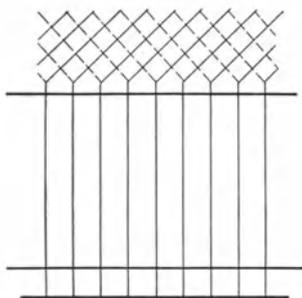


Abb. 102. Käfiganker mit 2 Leitern pro Nut und einseitigen gemeinsamen Endringen nach Punga.

* Für $h' < 0,5$ kann man setzen: $\psi(h') = \frac{h'^4}{3}$.

¹ Die Anfertigung des verdrehten Stabes für den Wirbelstromläufer geschieht am besten so, daß ein Kupferrohr plattgedrückt wird und daß durch Einfäsen eine Unterteilung vorgenommen wird, wobei ein jeder Teilleiter sich mindestens einmal um die Oberfläche herum bewegt.

Es würde durchaus nicht notwendig sein, einen verdrehten Stab anzuwenden, irgendein Mittel, welches beiden Leitern den gleichen Strom sichert, ist erlaubt; z. B. würde der von einem der Verfasser für andere Zwecke vorgeschlagene Käfiganker (Abb. 102) den gleichen Zweck erreichen, da ja 2 Leiter in Serie geschaltet sind. Daß die beiden in Serie geschalteten Leiter um eine Polteilung oder bei verkürztem Wickelschritt um weniger als eine Polteilung entfernt sind, ist dabei von untergeordneter Bedeutung.

im Anfange des Anlaufes nicht so groß wird wie beim einfachen Leiter, und da wir ja gesehen haben, daß $y_3 = J_{k,2}^2 \cdot r_2'$ eine maßgebende Rolle spielt, so wird aus diesem Grunde die Wirkung des unterteilten Leiters abgeschwächt.

Ein Motor mit den gleichen Werten von ϱ_v und ε_2 wie im letzten Beispiele (also $\varrho_v = 3\%$, $\varepsilon_2 = 6,3\%$) aber von genügend großer Leistung, daß die Anwendung von $h' = 6$ keine praktischen Schwierigkeiten verursacht, müßte nun den weitaus überwiegenden Anteil des sekundären Widerstandes in die Endringe verlegt bekommen, denn aus

$$h' = 1,27 \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varrho_v}}$$

folgt

$$\varrho_v' = \left(\frac{1,27}{6}\right)^2 \varepsilon_2 = 0,28\%$$

und

$$\varrho_v'' = 3\% - 0,28\% = 2,7\%.$$

Wenn jetzt dieser Läufer mit einem einzigen Stabe pro Nute ausgeführt wird, so folgt aus den Kurven:

$$\varrho_{v,\sigma=1} = 0,28 \cdot 6 + 2,7 = 4,4\%$$

und

$$\frac{J_{kt;\sigma=1}}{J_n} = \frac{1}{\varepsilon_1 + \lambda_0 \varepsilon_2} = \frac{1}{0,127 + 0,25 \cdot 0,063} = 7.$$

Werden aber 2 Leiter von halber Höhe in die gleiche Nute gelegt, so wird

$$\varrho_{v,\sigma=1} = 0,28 \cdot 9,6 + 2,7 = 5,4\%$$

und

$$\frac{J_{kt;\sigma=1}}{J_n} = \frac{1}{0,127 + 0,4 \cdot 0,063} = 6,55.$$

Das Drehmoment für $\sigma = 1$ ist im zweiten Falle 7% größer und der Strom 6,5% kleiner. Dieses günstige Ergebnis für den Wirbelstromläufer mit verdrehten Stäben ist aber an die Benutzung von sehr tiefen Nuten gebunden, wie sie nur bei Leistungen von 100 PS und darüber praktisch ausführbar sind. Auch muß ϱ_v' sehr klein gewählt werden, denn sonst wird ε_2 zu groß und der $\cos \varphi$ zu schlecht. ϱ_v' läßt sich aber nur mittels eines großen Aufwandes an Kupfer so niedrig wählen, und die Verlegung des nahezu gesamten sekundären Widerstandes in die Endringe löst auch einige Bedenken aus, die schon erwähnt worden sind, nämlich die Unregelmäßigkeit der Parallelschaltung der Endbleche zu den Endringen führt zu Abweichungen des Anlaufdrehmomentes in sonst gleichen Motoren.

Wird weniger auf eine Spitzenleistung in bezug auf das Drehmoment als auf einen guten Wirkungsgrad bei Vollast Wert gelegt, so ist der Kiersteadt-Motor bei großen Leistungen gut anwendbar. Zu Reversiermotoren eignet er sich vorzüglich, weil $h' = 5 \rightarrow 6$ schon bei kleineren Nuthöhen erreicht wird.

Für Reversiermotoren großer Leistung kommt auch ein dreifach unterteilter Leiter in Betracht.

C. Läufer mit Endringen aus großem Eisenquerschnitt.

Im 1. Kapitel war schon erwähnt worden, daß Hobart die Benutzung großer Eisenquerschnitte als Endringe vorgeschlagen hatte. Diese Idee ist unabhängig hiervon von der Firma Ganz & Co. AG in Budapest für Motoren großer Leistung in die Praxis übertragen worden.

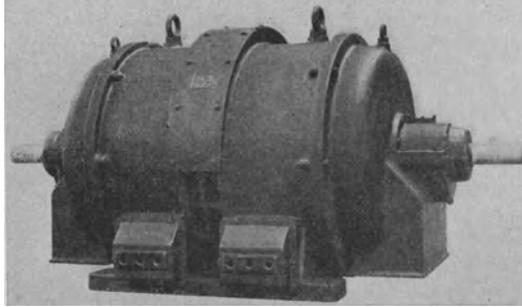


Abb. 103. Photographie eines 2poligen, 1200-PS-Drehstrommotors mit Läufer mit eisernen Endringen von großem Querschnitt der Firma Ganz & Co., A.-G.

Abb. 103 zeigt die Photographie eines 2poligen Motors für 1200 PS, 20,8 Hz, 500 V 1250 Umdr./min dieser Firma. Die Hauptabmessungen des Motors sind:

Ständer:	Innerer Durchmesser	592 mm.
	Eisenlänge inkl. Luftschlitz.	850 „
	Nutenzahl	60
Läufer:	Äußerer Durchmesser	585 „
	Nutenzahl	47

Der Läufer hat einen Stab von 12×24 pro Nute. Der Käfig hat

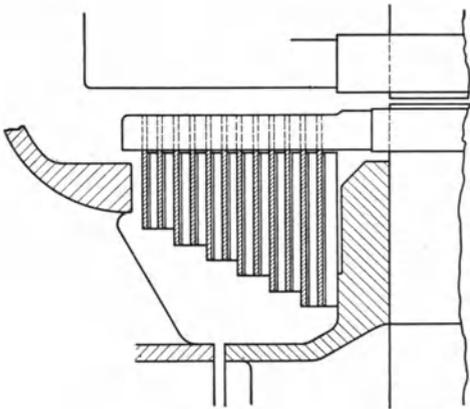


Abb. 104. Läuferkonstruktion des in Abb. 103 gezeigten Motors.

12 Ringe pro Seite, die aus Eisenblech von 3 mm Dicke mit einem Gesamtquerschnitt von 3120 mm^2 pro Seite bestehen. Abb. 104 zeigt die Anordnung dieser Ringe.

Es wurde gemessen:

Leerlaufstrom 224 Amp., Kurzschlußstrom 8740 Amp. Die Verluste des Motors bei Vollast betragen: 19,8 kW Leerlaufverlust, 15,3 kW im Statorcupfer und 26,2 kW im Rotorstromkreis. Der Motor hat also einen Wirkungsgrad von 93,8%. Der Schlupf beträgt bei Vollast 2,87%.

Beim Anlassen ($\sigma = 1$) hat sich aber der sekundäre Widerstand so vergrößert, als ob sein Schlupf bei Vollast 4,72% betrüge; d. h. der sekundäre Widerstand hat sich um 65% vergrößert.

Der zum Antrieb eines Turbogebläses dienende Motor wurde mittels eines Anlaßtransformators mit mehreren Anzapfungen angelassen. Auf der 1. Stufe wurde ein Drehmoment von 14,5% des normalen bei einem Netzstrom von ca. 50% des normalen beobachtet.

6. Drehstrommotoren mit Umschaltungen im Rotorstromkreis.

In den vorangegangenen Kapiteln haben wir uns mit Motoren beschäftigt, bei denen der Anlauf ohne irgendwelche Änderung des Rotorstromkreises vor sich ging. Dabei waren aber in den meisten Fällen Veränderungen des Statorstromkreises erforderlich; z. B. beim Anlassen nach der Stern-dreieckmethode wurde ja die Statorwicklung in der Anlaufstellung in Stern geschaltet, in der Laufstellung in Dreieck. Bei kleinen Motoren für niedere Spannung ist damit beim Bau des Motors kein beträchtlicher Nachteil verbunden. Bei größeren Motoren und im besonderen bei höheren Spannungen wird man aber die Bedingung der Schaltung sowohl in Stern als auch in Dreieck als lästig empfinden, und in solchen Fällen müssen Methoden, bei denen nicht die Statorwicklung, sondern die Rotorwicklung verändert wird, an Bedeutung gewinnen.

Betrachten wir den einfachsten Fall. Wir wollen gegenüber einem normalen Drehstrommotor mit Schleifringen lediglich die Bürsten und die Schleifringe vermeiden und somit den Anlaßwiderstand in den Rotor einbauen. Der Anlaßwiderstand ist in Reihe mit der Rotorwicklung geschaltet und muß kurzgeschlossen werden, wenn der Motor auf Touren gekommen ist. Der Kurzschluß kann entweder mit einem Hebel durch Handbedienung oder vermittels eines Zentrifugalschalters geschehen. Der letztere hat den Vorteil, daß das Kurzschließen unabhängig vom Bedienungspersonal und immer bei einer ganz bestimmten Drehzahl stattfindet, hat aber andererseits den Nachteil, daß er nicht Rücksicht nimmt, ob der Anlauf des Motors unter leichten oder schwierigen Verhältnissen vor sich geht.

Wenn nur eine einzige Stufe vorgesehen werden soll, so kann der Widerstand nach einem Vorschlage von Görges vermieden werden, indem eine einfache Umschaltung der Rotorwicklung vorgesehen wird. Der Rotor trägt in diesem Falle 2 verschiedene Wicklungen (siehe Abb. 105), deren effektive

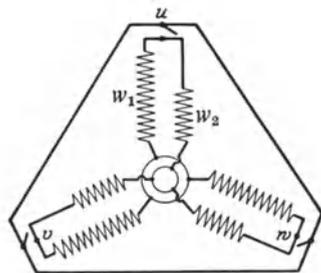


Abb. 105. Gegenschaltung von Görges.

Windungszahlen w_1 und w_2 verschiedener Größe sind. In der Laufstellung sind die Punkte u , v und w kurzgeschlossen, so daß die beiden parallel geschalteten Wicklungen nach Maß ihrer Leitfähigkeit an der Kraftübertragung teilnehmen. In der Anlaßstellung sind aber die Punkte u , v und w nicht kurzgeschlossen, und mithin werden die elektromotorischen Kräfte, die in der Wicklung mit w_1 Windungen erzeugt

werden, größer sein als in der Wicklung mit w_2 Windungen, und der in der Wicklung mit der kleineren Windungszahl fließende Strom wird entgegengesetzt verlaufen wie derjenige in der größeren Wicklung. Wenn also der Strom i in jeder Windung fließt, so erzeugt er in der Laufstellung $(w_1 + w_2) i$ Amperewindungen, in der Anlaufstellung aber nur $(w_1 - w_2) i$ Amperewindungen. Man ersieht also daraus, daß die Verluste im Rotor bei gleichviel Amperewindungen in der Anlaufstellung im Verhältnis $\left(\frac{w_1 + w_2}{w_1 - w_2}\right)^2$ größer sind als in der Laufstellung, m. a. W.

durch die Umschaltung ist der Widerstand der Rotorwicklung mit dem Faktor $\left(\frac{w_1 + w_2}{w_1 - w_2}\right)^2$ multipliziert worden. Durch entsprechende Wahl

des Verhältnisses $w_1 : w_2$ hat man es also in der Hand, den Widerstand in der Laufstellung in der gewünschten Weise zu vergrößern. Dabei haben wir bisher vorausgesetzt, daß die beiden parallel arbeitenden Wicklungen phasengleich seien. Man kann aber auch, wie schon Görges angegeben hat, die beiden Wicklungen phasenverschoben ausführen und erhält

dann eine Vergrößerung des Widerstandes beim Anlauf, die sich vektoriell einfach bestimmen läßt.

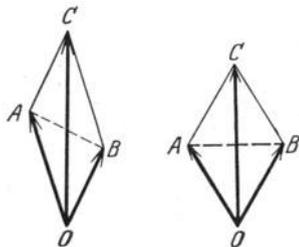


Abb. 106 a und b. Vektorielle Addition und Subtraktion der Amperewindungen von verschiedenen Teilen einer Phase.

In Abb. 106 a sei OA proportional w_1 , OB proportional w_2 , ferner sei OC die Resultierende von OA und OB . Dann läßt sich in einfacher Weise zeigen, daß die Vergrößerung des Widerstandes proportional dem Quadrate des Verhältnisses $\frac{OC}{AB}$ ist.

Denn wenn wir wiederum ein und denselben Strom durch beide Wicklungen fließend annehmen, so wird in der Laufstellung eine geometrische Addition der Amperewindungen stattfinden, in der Anlaufstellung aber eine geometrische Subtraktion. Bei gleichen Strömen werden also die effektiven Amperewindungen in der Laufstellung proportional OC und in der Anlaufstellung proportional AB sein. Auf gleiche Amperewindungszahl berechnet, müssen die in der Rotorwicklung fließenden Ströme umgekehrt proportional den Strecken OC und AB sein, d. h. die effektiven Widerstände, auf gleiche Amperewindungszahl bezogen, werden den Quadraten dieser beiden Strecken umgekehrt proportional sein, woraus ohne weiteres das obige Resultat folgt. Bei Benutzung der phasenverschobenen Wicklungen ist es ohne weiteres möglich, $w_1 = w_2$ zu machen, d. h. anstatt 2 verschiedene Wicklungen auf dem Rotor vorzusehen, kann man eine einzige Wicklung benutzen, in welcher die einzelnen Teile in der Anlaufstellung gegeneinander geschaltet werden (Abb. 106 b). Die Methode von Görges ist viele Jahre lang von den SSW benutzt worden.

Als Verbesserung der Görgesschen Schaltung dürfte eine von Prof. Schenfer (Moskau) angegebene Schaltung angesehen werden. Die Wicklung jeder Läuferphase ist in 2 gleiche Teile geteilt (1 und 1', 2 und

2', 3 und 3' in Abb. 107). Die Gruppe 1, 2 und 3 ist in Stern geschaltet, während die zweite Phasenhälfte mit der ersten in Serie geschaltet ist, aber in Gegenschaltung, so daß z. B. die Wirkung des Stromes, der in 1 fließt, wieder vollständig aufgehoben wird durch die Wirkung des Stromes in 1', da 1 und 1' in denselben Nuten liegen.

Das freie Ende von 1' wird mit *b*, der Mitte von 2, und ebenso das freie Ende von 2' und 3' mit *c* und *a*, der Mitte von 3 resp. 1 verbunden. Es entstehen 3 geschlossene Stromkreise, $oa-3'-3$, $ob-1'-1$ und $oc-2'-2$, in welchen nur je $\frac{1}{4}$ der Phasenspannung wirkt. Die zwei entgegengeschalteten Hälften wirken also in der Hauptsache im Sinne einer Vergrößerung des Widerstandes, denn ihre AW heben sich vollständig auf. Da aber die Stirnverbindungen der beiden Hälften verschiedene Lagen an der Peripherie haben, so wird die Rotorstreuung beträchtlich anwachsen.

Die Umschaltung von der Anlaufschaltung auf die Laufschtaltung kann nun entweder in einer oder in mehreren Stufen erfolgen. Im letzteren Falle sind die Kontaktgruppen $a_0b_0c_0$, abc , $a'b'c'$, $a''b''c''$ (Abb. 108) vorgesehen, die nacheinander kurzgeschlossen werden. In der letzten Schaltung sind offenbar die beiden Phasenhälften für sich kurzgeschlossen, so daß praktisch eine normale Laufwicklung entstanden ist. Prof. Schenfer hat noch andere Schaltungen entwickelt, bei denen z. B. die Vergrößerung des sekundären Widerstandes beim Anlauf noch größer wird. Wir verweisen hier auf seine Veröffentlichung in *El. u. Maschinenb.* 1926, S. 93, in der auch Prüfungsergebnisse größerer Motoren mitgeteilt werden.

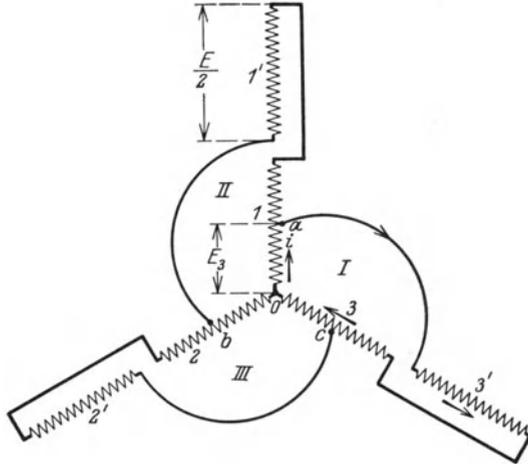


Abb. 107. Gegenschaltung nach Professor Schenfer.

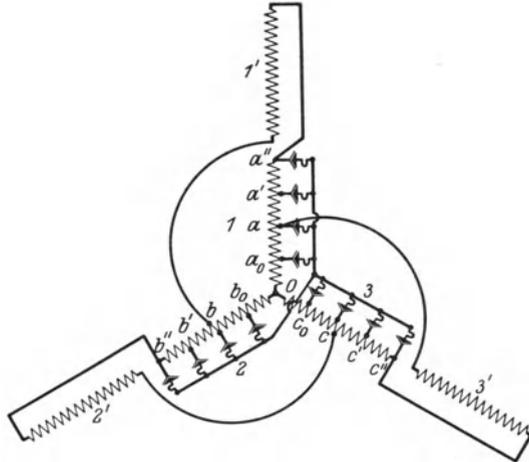


Abb. 108. Regelbare Gegenschaltung nach Professor Schenfer.

Anstatt eine Gegenschaltung von Teilen der Laufwicklung vorzunehmen, kann auch für den Anlauf ein besonderer Käfiganker vorgesehen werden, wobei dann die Laufwicklung während des Anlaufes offen, für den Lauf aber geschlossen ist. Da der Käfig jetzt nur für den Anlauf ausgebildet zu werden braucht, so kann er ohne Rücksicht auf Wirkungsgrad

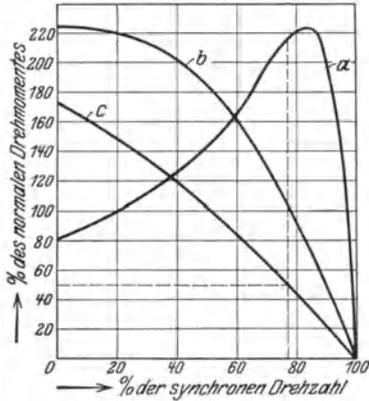


Abb. 109. Drehmomentkurve in Abhängigkeit von der Tourenzahl bei verschiedenen sekundären Widerständen.

4poligen Motor verschiedene Strom- und Drehmomentkurven in Abhängigkeit von der Drehzahl aufgetragen. Die Kurven *a* gelten für den normalen Betrieb mit dem Rotorwiderstand $r'_2 = 0,58$ Ohm. Die Kurven *b* sind für den Fall berechnet, daß der Widerstand des Rotorkreises

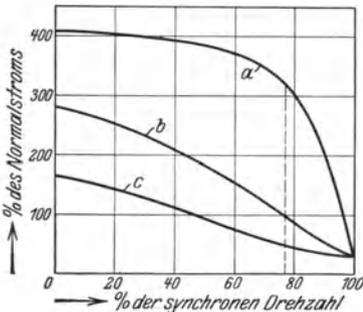


Abb. 110. Stromaufnahme des Drehstrommotors in Abhängigkeit von der Tourenzahl bei verschiedenen sekundären Widerständen.

so groß gemacht wird, daß der Motor mit dem maximalen Drehmoment anläuft. Es ist dann $r'_2 = 3,46$ Ohm. Wird der Rotorwiderstand noch weiter vergrößert, z. B. $r'_2 = 7,82$, so erhalten wir die Kurven *c*. Die Kurve *a* kommt für das Anlassen nicht in Frage, da hierbei der Anlaßstrom gleich dem 4,1fachen Normalstrom sein würde. Aber selbst die Kurven *b* können für das Anlaufen nicht benutzt werden, weil der Anlaßstrom immer noch gleich dem 2,8fachen Normalstrom sein wird. Um den Strom in zulässigen Grenzen zu halten, müssen wir die Kurven *c* verwenden, wobei Anlaßstrom und Anlaufdrehmoment

ungefähr das 1,7fache des Nennwertes betragen. Beide fallen aber mit steigender Tourenzahl rasch, wie die Kurven *c* zeigen. Hat z. B. der Motor eine Belastung hoch zu ziehen, die 50% des normalen Drehmomentes verlangt, so kann er nur auf 77% der synchronen Tourenzahl kommen, denn in diesem Punkte ist die Beschleunigung gleich Null. In diesem

und $\cos \varphi$ entworfen werden, da diese ja in der Hauptsache durch die Laufwicklung in normalen Grenzen gehalten werden. Ein solcher Käfiganker wird also praktisch die gleiche Wirkung ausüben wie ein Widerstand, der in Serie mit der Rotorwicklung geschaltet und nach Erreichung der normalen Tourenzahl kurzgeschlossen wird. Im allgemeinen ist es aber möglich, einen solchen Käfiganker bequemer und billiger unterzubringen als den rotierenden Widerstand, wenigstens für kleinere und mittlere Leistungen. Wir müssen jetzt näher eingehen auf das Anlaufdrehmoment und auf den Anlaufstrom, der auf diese Weise erreicht werden kann. In Abb. 109 und 110 sind für einen 7,5 kW,

unabhängig von der Drehzahl aufgetragen. Die Kurven *a* gelten für den normalen Betrieb mit dem Rotorwiderstand $r'_2 = 0,58$ Ohm. Die Kurven *b* sind für den Fall berechnet, daß der Widerstand des Rotorkreises so groß gemacht wird, daß der Motor mit dem maximalen Drehmoment anläuft. Es ist dann $r'_2 = 3,46$ Ohm. Wird der Rotorwiderstand noch weiter vergrößert, z. B. $r'_2 = 7,82$, so erhalten wir die Kurven *c*. Die Kurve *a* kommt für das Anlassen nicht in Frage, da hierbei der Anlaßstrom gleich dem 4,1fachen Normalstrom sein würde. Aber selbst die Kurven *b* können für das Anlaufen nicht benutzt werden, weil der Anlaßstrom immer noch gleich dem 2,8fachen Normalstrom sein wird. Um den Strom in zulässigen Grenzen zu halten, müssen wir die Kurven *c* verwenden, wobei Anlaßstrom und Anlaufdrehmoment

Punkte müssen wir also, wenn nur eine Stufe zur Verfügung steht, auf normalen Betrieb umschalten, also die Laufwicklung resp. den Vorschaltwiderstand kurzschließen. Nach dem Umschalten müssen wir die Kurven a benutzen. Das Drehmoment ist also plötzlich auf den 2,16fachen und der Strom auf den 3,2fachen Normalwert angestiegen. Unter dem Einfluß dieses starken Drehmomentes wird der Motor sich natürlich sehr schnell beschleunigen und seine Endtoureanzahl im allgemeinen in einem Bruchteil einer Sekunde erreichen. Immerhin ist aber der hier auftretende Stromstoß als ein wesentlicher Nachteil dieser Methode anzusehen und es muß das Bestreben sein, das Verfahren derart auszubilden, daß der Motor bei einem bestimmten Gegendrehmoment möglichst in die Nähe der Endtoureanzahl kommt. Stellen wir z. B. die Bedingung, daß der erwähnte Motor mit der Anlaufschaltung auf 90% seiner synchronen Tourenzahl komme, wobei beim Umschalten im ersten Augenblick nur der zweifache Normalstrom auftreten darf, so dürfte das Gegendrehmoment während der Anlaufperiode nur 21% des normalen betragen.

Eine kleine Verbesserung erhalten wir, wenn wir außer der Vergrößerung des Rotorwiderstandes noch eine zusätzliche Reaktanz in den Rotorstromkreis einführen. Bei dem oben betrachteten Motor betrug die auf die Statorwicklung bezogene Rotorreaktanz $x_2' = 1,60$ Ohm. Wir wollen jetzt diese Reaktanz auf 6,5 Ohm vergrößern und den Rotorwiderstand von 7,82 Ohm auf 4,82 Ohm reduzieren. In Abb. 111 u. 112 zeigen die Kurven d Anlaufstrom und Anlaufdrehmoment unter diesen neuen Bedingungen. Zum Vergleich ist die Kurve c aus der Abb. 109 übertragen worden. Die Verhältnisse sind so gewählt worden, daß der Anlaufstrom wenigstens für $\sigma = 1$ nicht verändert worden ist, dagegen ist das Anlaufdrehmoment für die Tourenzahl 0 von 170% auf 80% reduziert worden. Zunächst wird man geneigt sein, das als eine Verschlechterung der Anlaufverhältnisse anzusehen. Dem ist aber nicht so. Die Kurve d des Drehmomentes (Abb. 111) hat einen wesentlich günstigeren Verlauf

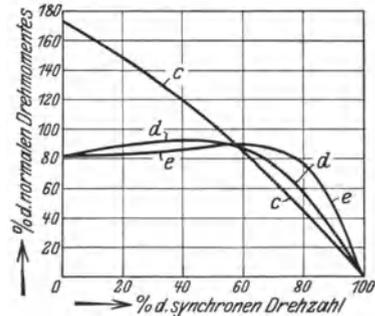


Abb. 111. Abhängigkeit des Drehmomentes von der Drehzahl bei Einbau von zusätzlicher Induktivität in den Rotorstromkreis.

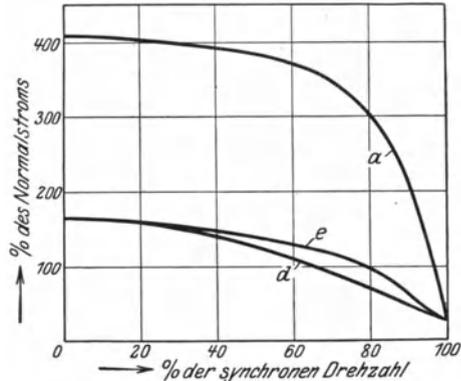


Abb. 112. Strom in Abhängigkeit von der Drehzahl bei Induktivität, die in Serie in den Rotorstromkreis geschaltet ist.

Bedingungen. Zum Vergleich ist die Kurve c aus der Abb. 109 übertragen worden. Die Verhältnisse sind so gewählt worden, daß der Anlaufstrom wenigstens für $\sigma = 1$ nicht verändert worden ist, dagegen ist das Anlaufdrehmoment für die Tourenzahl 0 von 170% auf 80% reduziert worden. Zunächst wird man geneigt sein, das als eine Verschlechterung der Anlaufverhältnisse anzusehen. Dem ist aber nicht so. Die Kurve d des Drehmomentes (Abb. 111) hat einen wesentlich günstigeren Verlauf

als die Kurve *c*, weil der Motor bei einem bestimmten Gegendrehmoment infolge des kleineren Ohmschen Widerstandes eine größere Tourenzahl erreicht als bei Kurve *c*. Wenn z. B. der Motor ein Gegendrehmoment von 50% des normalen Belastungsmomentes zu überwinden hat, so wird er jetzt auf eine Drehzahl von 84% der synchronen kommen, während er früher nur auf 77% kam, d. h. bei dem Umschalten wird jetzt der Stromstoß nur $2,73 J_n$ betragen anstatt $3,2 J_n$ im früheren Falle.

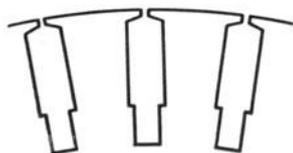


Abb. 113. Rotornuten mit Ansätzen zur Aufnahme von eisernen Anlaßstäben.

Nach einem Vorschlage eines der Verfasser wird diese Reaktanz auf äußerst einfache Weise vorgesehen dadurch, daß der Anlaßkäfig verhältnismäßig wenig Stäbe erhält, wodurch die doppeltverkettete Streuung wesentlich vergrößert wird¹. Als Laufwicklung wird eine gewöhnliche Stabwicklung benutzt mit 2 Leitern pro Nut. Die Stäbe des Anlaufkäfigs liegen unterhalb der Laufwicklung, und zwar wird zu diesem Zwecke die Nut mit verkleinerter Breite fortgesetzt. In Abb. 113 sind die Nuten gleich, aber nur die Hälfte oder ein Drittel dieser Nuten erhalten Anlaßstäbe, während in Abb. 114 von vornherein nur solche Nuten verlängert werden, die Stäbe enthalten sollen. In diesem Falle müssen immer 2 Nuten auf einmal gestanzt werden, wie dies ja an und für sich auch normalerweise öfters in der Praxis gemacht wird.

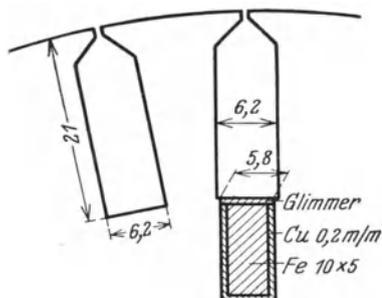


Abb. 114. Abwechselnd eine Nut, die nur die Laufwicklung besitzt, und eine Nut, in welcher sich sowohl die Laufwicklung als auch ein Stab des Anlaufkäfigs befindet.

Damit nun der Anlaßkäfig möglichst billig ausgeführt werden kann, bestehen die Stäbe aus Eisen und die Preßflanschen des Rotors werden gleichzeitig als Endringe des Anlaufkäfigs benutzt. Zusätzliches Material wird praktisch überhaupt nicht gebraucht, und als einzige Mehrkosten der Ausführung ist nur das Schweißen von einer verhältnismäßig kleinen Anzahl von Eisenstäben mit den Preßflanschen vorzusehen.

Der in Abb. 44 und 45 und Tabelle 1 und 2 gezeigte Motor wurde mit einem auf obige Weise gebauten Rotor versehen. Der Rotor hatte 34 Nuten, von denen 17 Nuten nur die Laufwicklung, die übrigen 17 Nuten sowohl Laufwicklung als auch Anlaufkäfig enthielten. Sämtliche Nuten waren 6,2 mm breit, die Nutentiefe war 21 mm für die eine Hälfte und 32,5 mm für die andere Hälfte der Nuten. Abb. 114 zeigt einen Schnitt durch 2 benachbarte Nuten nebst Wicklung. Der Eisenstab der Anlaufwicklung hatte den Querschnitt 10×5 und war umgeben von einem Kupferblech von 0,2 mm Dicke. An der Stelle, wo sich der Stab befand, war die Nute etwas verschmälert (5,8 mm anstatt 6,2 mm), damit der Stab bequem in den oberen Teil

¹ D. R. P. 328162.

der Nute eingeschoben und dann straff einpassend nach unten gedrückt werden konnte. Damit nämlich die Wärme, die sich beim Anlauf und besonders bei öfters erfolgenden Anläufen entwickelt, bequem in das Rotoreisen abfließen kann, muß auf ein gutes Anliegen des Anlaufstabes zwischen den Wänden der Rotornute geachtet werden. Als Endringe für die Anlaufstäbe dienten die schmiedeeisernen Preßplatten der Rotorbleche, die eine radiale Höhe von 40 mm und eine Dicke von 5 mm hatten.

Einige Versuchsdaten dieses Motors (aufgenommen von dem Institut von Prof. Ossanna in der Technischen Hochschule zu München) dürften von Interesse sein: Abb. 115 zeigt das Bremsdiagramm bei Benutzung der Laufwicklung, Abb. 116 die Ortskurve des Primärstromes und Abb. 117 die Strom- und Momentlinie mit und ohne Laufwicklung.

Schließlich sind noch die Versuche zu erwähnen, die gemacht wurden, um die Betriebssicherheit des Anlaufkäfigs bei wiederholtem Anlassen zu erproben:

„Die Belastung des Motors erfolgte dabei durch entsprechende Belastung der Bremsscheibe, so daß als zu beschleunigende Massen nur der Motorläufer mit der Bremsscheibe vorhanden waren. Der Anlauf erfolgte infolgedessen immer sehr rasch.

Als Moment an der Bremsscheibe wurde zunächst $\frac{2}{3}$ des normalen gewählt, also 3,3 mkg, und mit diesem Moment innerhalb von 15 Minuten der Motor 40 mal in Betrieb gesetzt. Im Anschluß daran wurde der Motor noch mit $\frac{1}{2}$ des normalen Momentes, also 2,5 mkg,

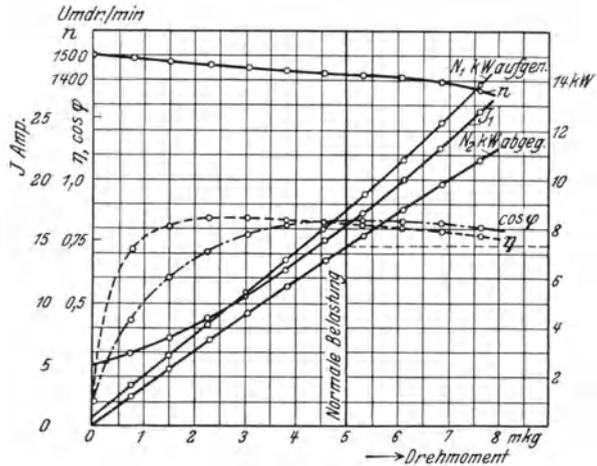


Abb. 115. Bremsdiagramm eines 7,5-kW-Punga-Motors, hergestellt von der Firma Schumanns Elektrizitätswerk.

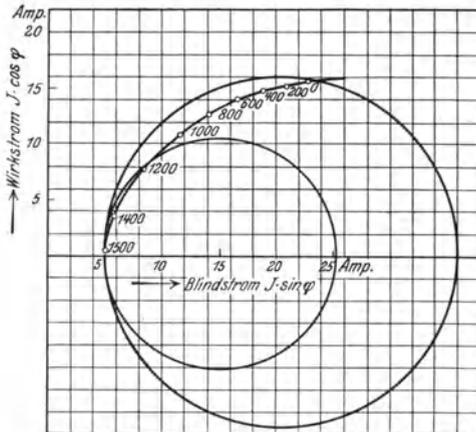


Abb. 116. Bremsdiagramm des 7,5-kW-Punga-Motors.

144 mal in 30 Minuten angelassen. Nach dieser Probe war der Läufer wohl warm geworden, ohne daß die Erwärmung jedoch zu Bedenken Veranlassung gegeben hätte. Auch an dem angebauten Anlaßschalter konnte eine Beschädigung durch das forcierte Anlassen nicht festgestellt werden.“

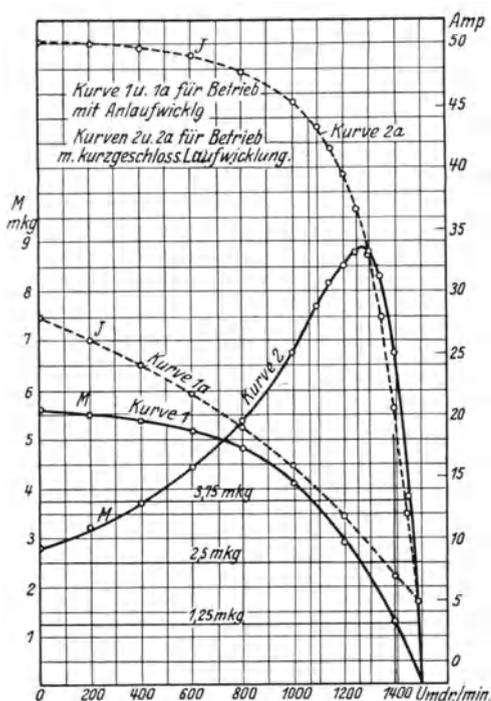


Abb. 117. Strom und Momentenlinie des 7,5-kW-Punga-Motors in Abhängigkeit von der Tourenzahl, und zwar sowohl mit als auch ohne Laufwicklung.

Anlaufes Kurzschluß der Laufwicklung.

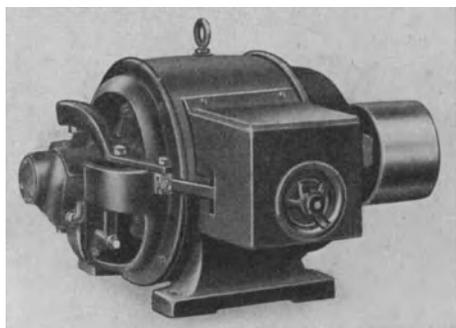


Abb. 118. Punga-Motor, hergestellt von der Firma Schumanns Elektrizitätswerk, mit angebautem zwangsläufigem Schalter.

Abb. 118, 119 und 120 a und b zeigen einige Ausführungen der Firma Schumanns Elektrizitätswerk und der Firma De Forenede Jernstoberier, Naestved (Dänemark). In Abb. 119 erfolgt das Kurzschließen der Laufwicklung nach Beendigung des Anlaufens mit Handgriff, während in Abb. 118 das Kurzschließen der Laufwicklung zwangsläufig mit dem Ein- und Ausschalten des Ständerstromes erfolgt. Die folgende Reihenfolge wird dabei eingehalten:

Beim Einschalten:
 1. Einschalten der Ständerwicklung bei offener Laufwicklung.
 2. Nach Beendigung des

Beim Ausschalten:
 1. Ausschalten der Ständerwicklung.
 2. Ausschalten der Laufwicklung.

Bei dem Entwurf dieser Motoren war nicht nur die Vergrößerung der Reaktanz, sondern auch Vergrößerung des Widerstandes während der Anlaßperiode durch Skin-effekt beabsichtigt, so daß also das Problem in seinem ganzen Umfange dahin gerichtet ist, die in den Kap. 3, 4 und 5 erörterten Gesetze

auch auf einen Rotor anzuwenden, der außer dem Käfiganker noch eine Laufwicklung besitzt, die aber erst nach Beendigung des Anlaufens

kurzgeschlossen wird. Da natürlich der Laufwicklung der überwiegende Teil des verfügbaren Platzes zugewiesen werden muß, so werden jetzt neue Gesichtspunkte untersucht werden müssen.

An die Ausbildung des Anlaßkäfigs als Doppelkäfiganker ist jetzt offenbar nicht zu denken, nur einfache Konstruktionsmittel, die die

Herstellungskosten praktisch nicht verteuern, sind anzuwenden. Bei der Abb. 114 tritt offenbar im Eisenstab und im Eisenendring ein Skineffekt ein und außerdem treten noch zusätzliche Verluste beim Anlassen (also vergrößerte Drehmomente!) dadurch ein, daß die Streukraftlinien oberhalb des Anlaufstabes das Kupfer der Laufwicklung treffen und hierbei Wirbelstromverluste erzeugen. Durch Benutzung von relativ tiefen Nuten und Hochkantkupfer (anstatt

Drahtwicklung) läßt sich dieses Moment in günstiger Weise vergrößern. Günstig wirkt auch die Verringerung der Zahl der Anlaßstäbe; denn wenn die letztere z. B. halb so groß gemacht wird wie die Zahl der Nuten, so hat sich der Strom pro Stab verdoppelt und die Verluste, die in der einen Hälfte der Laufwicklung durch die Streukraftlinien entstehen, sind 4mal so groß geworden. Die Gesamtverluste sind also trotz der halben Stabzahl doppelt so groß geworden.

Die Kurve *e*, Abb. 111, zeigt die Verbesserung des Anlaufdrehmoments bei Benutzung eines verkleinerten Widerstandes des Anlaßkäfigs und Verstärkung durch Stromverdrängung. Die entsprechende Stromkurve ist als Kurve *e* in Abb. 112 eingetragen.

Im folgenden soll noch ein größerer Motor, mit Anlaufkäfig ausgerüstet, beschrieben werden, und zwar für eine Leistung von 92 kW, 6000 V, 50 Hz, 735 Umdr./min. Der von der Firma Schumanns Elektrizitätswerk gebaute Motor diente zum Antrieb eines Gleichstromgenerators der Technischen Hochschule Darmstadt und hat also nur die Leerlaufverluste als Gegendrehmoment zu überwinden. Seine Hauptdaten sind:

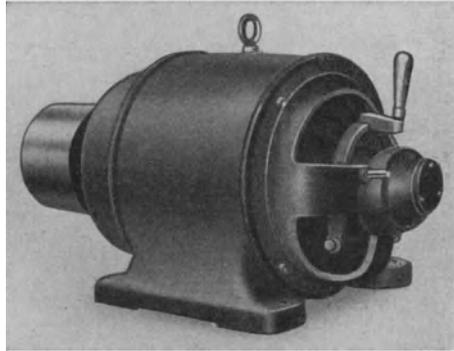


Abb. 119. Punga-Motor, hergestellt von der Firma Schumanns Elektrizitätswerk, mit Umschaltung des Rotors mit Handgriff.

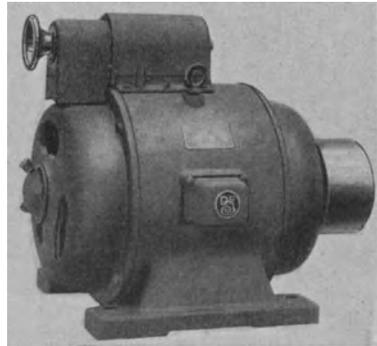


Abb. 120. Punga-Motor, hergestellt von der Firma De Forenede Jernstøberier, Naestved (Dänemark).

$J_n = 11,5 \text{ Amp.}$ $J_k = 16,5 \text{ ,,}$ $J_o = 3,1 \text{ ,,}$ $J_\mu = 2,1 \text{ ,,}$	} in Stern- schaltung gemessen.	Durchmesser: Stator innen . . . 610 mm Rotor außen . . . 608 ,, Eisen 250 ,, 2 Ventilationskanäle 30 ,, gesamt 280 ,,
--	---------------------------------------	---

Stator: 72 Nuten, $q = 3$, 60 Leiter pro Nut
 Rotor: Laufwicklung 80 Nuten, 2 Leiter pro Nut, Anlaufwicklung 40 Nuten, Eisenstäbe.

Stator- und Rotornutenquerschnitt sind in Abb. 121 und der Stirnring in Abb. 122 gegeben.

In einer Diplomarbeit von Wolman und Kaufmann wurde dieser Motor eingehend theoretisch und experimentell untersucht. Ein kurzer Auszug aus der Arbeit dürfte von Interesse sein:

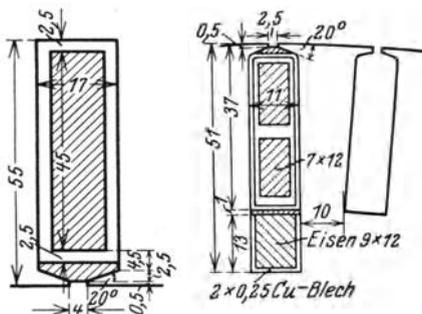


Abb. 121. Stator- und Rotor-Nutenquerschnitt eines 92-kW-Punga-Motors, hergestellt von der Firma Schumanns Elektrizitätswerk.

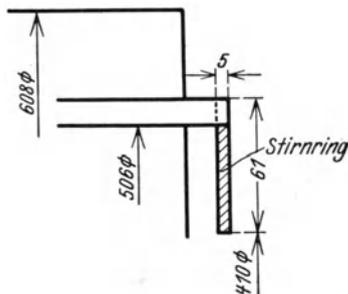


Abb. 122. Endring des 92-kW-Drehstrom-Motors der Firma Schumanns Elektrizitätswerk.

Die Berechnung des Skinneffektes und der Reaktanz der Eisenstäbe und des eisernen Endringes ist ein schwieriges, aber interessantes Problem. Um etwas einfachere Verhältnisse zu bekommen, hatten

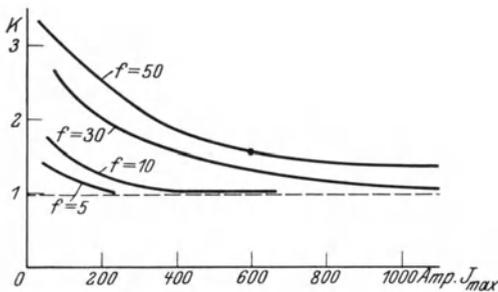


Abb. 123. Die Widerstandserhöhung eines eisernen Stabes in Abhängigkeit von Strom und Periodenzahl.

Wolman und Kaufmann zunächst den Stab $9 \times 12 \text{ mm}^2$ in einen Quadratstab $10,5 \times 10,5$ umgewandelt und die Eigenschaften unabhängig von der Rotornut untersucht. Die Abb. 123 zeigt die Widerstandserhöhung eines solchen Stabes in Abhängigkeit von der im Stabe fließenden Stromstärke und von der Periodenzahl, Abb. 124 die eigene Reaktanz des Eisenstabes, ebenfalls

in Abhängigkeit von Stromstärke und Periodenzahl, Abb. 125 und 126 die entsprechenden Kurven für die Endringe.

Die Tabelle 15 zeigt die Gegenüberstellung der relativen Streuung, für den Fall, daß nur die Laufwicklung und für den Fall, daß nur die Anlaufwicklung vorhanden ist; man erkennt daraus den großen Einfluß

Tabelle 15.

	Nur Laufwicklung wirksam	Nur Anlaufkäfig wirksam
Statornutenstreuung	138000	138000
Statorstirnstreuung	142000	142000
Rotornutenstreuung	115000	$630000 + \Phi_1$
Rotorstirnstreuung	98000	Φ_2
Doppeltverkettete Streuung	375000	820000

der Verminderung der Anlaufstabzahl auf die Rotornutenstreuung und auf die doppeltverkettete Streuung.

Darin sind Φ_1 die in Abb. 127 dargestellten Streukraftlinien, die unter dem Einfluß des im Eisenstab fließenden Stromes im Stabe selbst

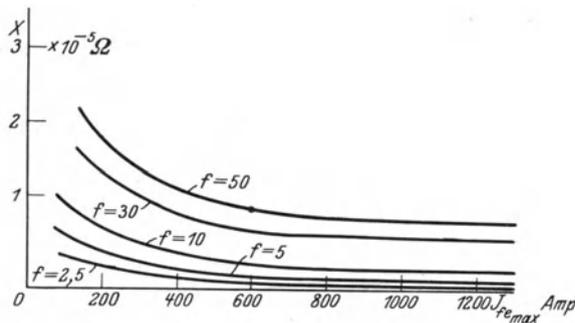


Abb. 124. Reaktanz eines eisernen Stabes in Abhängigkeit von Strom und Periodenzahl.

entstehen, und Φ_2 die in Abb. 128 dargestellten Streukraftlinien, die in den Stirnverbindungen entstehen. Da ja parallel zum Eisenstab ein Kupferstab geschaltet ist, so muß aus den Impedanzen der beiden Stromkreise für jede Periodenzahl die Verteilung der Ströme berechnet werden.

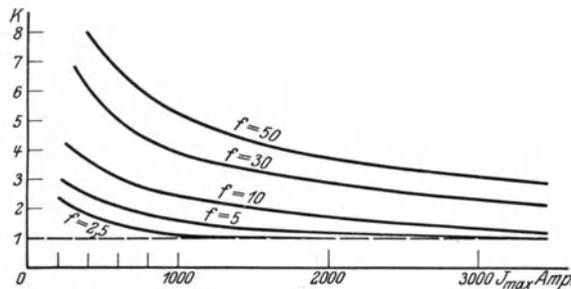


Abb. 125. Widerstandserhöhung der eisernen Preßflanschen in Abhängigkeit von Strom und Periodenzahl.

Bei der Berechnung der Verluste im Rotor muß nun ebenfalls der Einfluß der Periodenzahl und der Stromstärke auf die Widerstandserhöhung berücksichtigt werden.

Abb. 129 zeigt die Stromdiagramme des Motors unter dem Einfluß der Anlaufwicklung, und zwar 1. das berechnete und 2. das gemessene.

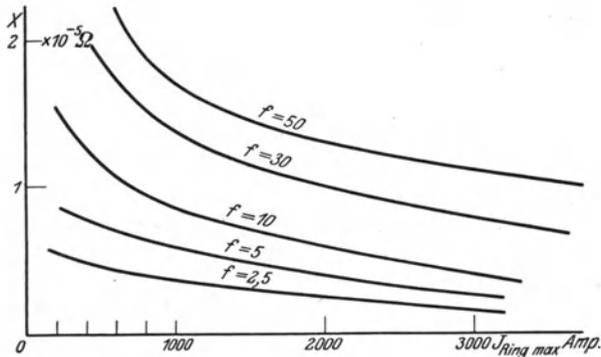


Abb. 126. Induktivität der eisernen Preßflanschen in Abhängigkeit von Stromstärke und Periodenzahl.

Der kleine Heylandkreis in der Nähe vom Synchronismus erklärt sich durch den Einfluß der inneren Induktivität im Eisen bei geringer Sättigung¹.

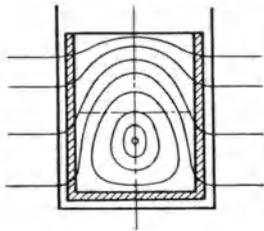


Abb. 127. Verlauf der Kraftlinien in einem eisernen Stab des Anlaufkäfigs.

Dadurch, daß man Kupfer und Eisen parallel schaltet, kann man die Anlaufbedingungen in weitem Maße verändern, ohne an der Konstruktion des Rotors irgend etwas zu ändern. Wenn also der vorliegende Motor für schwierige Anlaufbedingungen benutzt werden sollte, so müßte der Anteil

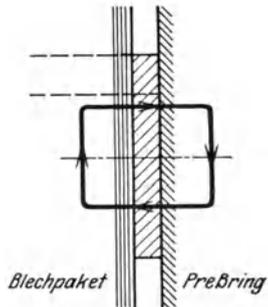


Abb. 128. Rotorstirn-streuung.

des Kupfers erhöht werden, damit sich ein größerer Anlaufstrom ausbilden kann.

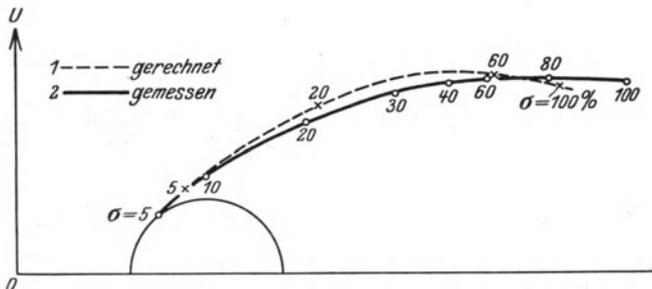


Abb. 129. Stromdiagramm des 92-kW-Punga-Motors unter dem Einfluß der Laufwicklung.

¹ Durch Benutzung von nebeneinander liegenden Eisenblechen und Kupfer könnte man diesen Nachteil vermeiden.

Abb. 130 zeigt Drehmoment und Strom in Abhängigkeit von der Drehzahl.

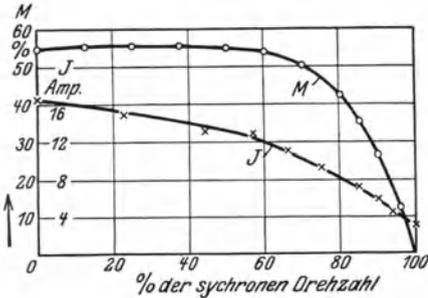


Abb. 130. Drehmoment und Strom des 92-kW-Punga-Motors in Abhängigkeit von der Drehzahl bei Benutzung der Anlaufabwicklung allein.

Auf Anregung eines der Verfasser wurden von den Herren Wolman und Kaufmann noch zwei andere Möglichkeiten für die

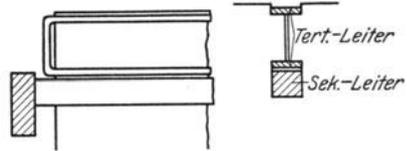


Abb. 131. Anwendung des Tertiärleiters zur Vergrößerung des Anlaufdrehmomentes.

Ausführung des Anlaßkäfigs untersucht, nämlich die Benutzung einer Tertiärwicklung und eines Wirbelstromleiters.

Abb. 131 zeigt die Anwendung der Tertiärleiter in einfachster Form. Angewandt auf

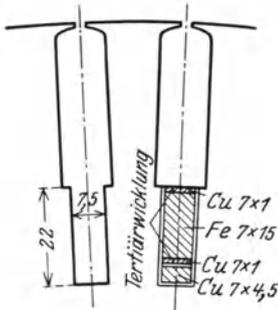


Abb. 132. 92-kW-Motor mit Tertiärleiter.

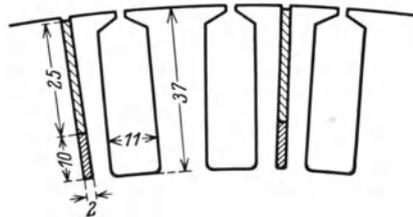


Abb. 133. 92-kW-Motor mit Anwendung des Wirbelstromprinzips für das Anlassen.

den 8poligen 92-kW-Motor erhält man die in Abb. 132 dargestellten Nuten, während Abb. 133 die Anwendung des Wirbelstromläufers auf den gleichen Motor zeigt.

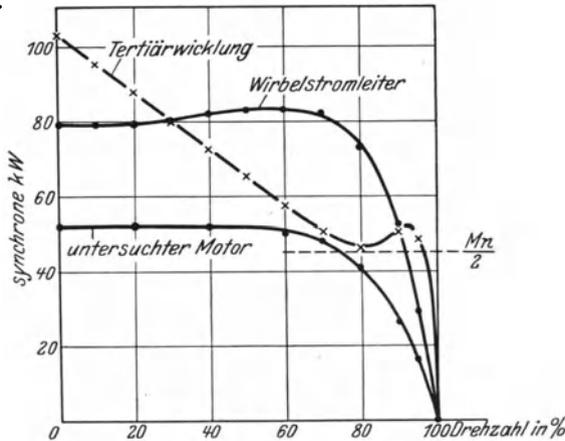


Abb. 134. Berechnete Kurven des 92-kW-Drehstrom-Motors unter Benutzung von Tertiärwicklung einerseits und Wirbelstromläufer andererseits zum Anlassen.

Die Abb. 134 gibt die Anlaufdrehmomente für diese beiden Konstruktionen, sowie für den untersuchten Motor, die Abb. 135 den Strom in Abhängigkeit von der Tourenzahl. Abb. 136 und 137 zeigen den

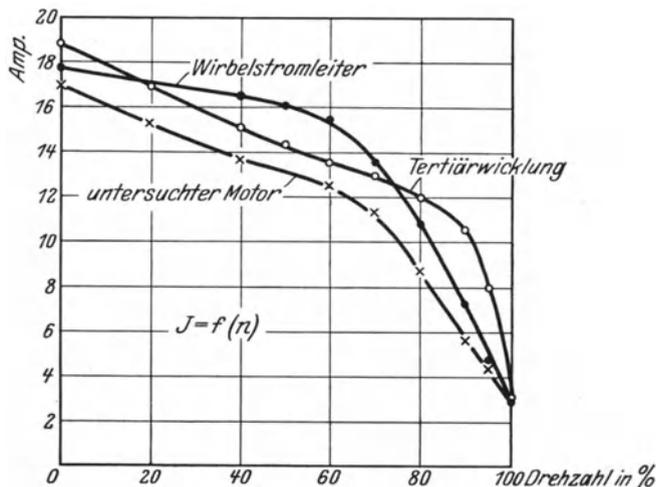


Abb. 135. Stromaufnahme zu den Kurven der Abb. 134.

Verlauf des Stromvektors für den Motor mit Tertiärwicklung und mit Wirbelstromleiter.

Zusammenfassend können wir sagen, daß der Motor mit Rotorumschaltung sich im wesentlichen für geringes und mittleres Anlauf-

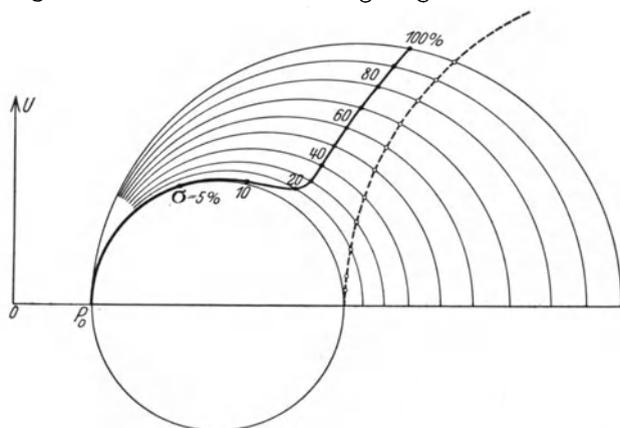


Abb. 136. Berechnetes Stromvektordiagramm für den Motor mit Tertiärwicklung.

drehmoment eignet und daß er ein starkes Gegendrehmoment wohl im ersten Anlauf überwinden kann, aber nicht die erforderliche hohe Tourenzahl zum Umschalten der Rotorwicklung erreicht. Das Umschalten geschieht ohne Unterbrechung des Stromkreises, so daß der größte Teil

der bei der λ - Δ -Methode des Umschaltens auftretenden Ausgleichspitze wegfällt. Dieses Fehlen der Unterbrechung macht sich bei Hochspannungsmotoren ganz besonders günstig bemerkbar. Verbunden mit einer

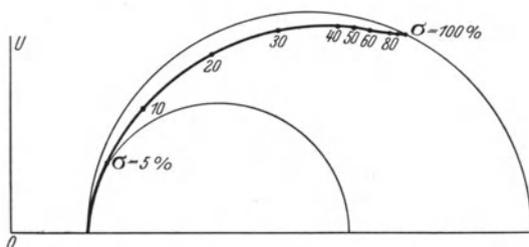


Abb. 137. Berechnetes Stromvektordiagramm für den Motor mit Wirbelstromläufer.

zwangsläufigen, fehlerfreien Rotorumschaltung nimmt er in bezug auf Herstellungskosten und Betriebssicherheit eine wichtige Stellung ein.

7. Drehstrommotoren mit Umschaltungen im Ständerstromkreis.

A. Der Bruncken-Doka-Motor.

Im Jahre 1899 nahm Boucherot ein Patent auf einen Doppelkäfiganker, der eine interessante Idee verwirklichte. Betrachten wir die auf derselben Welle sitzenden Käfiganker der Abb. 138, so können die

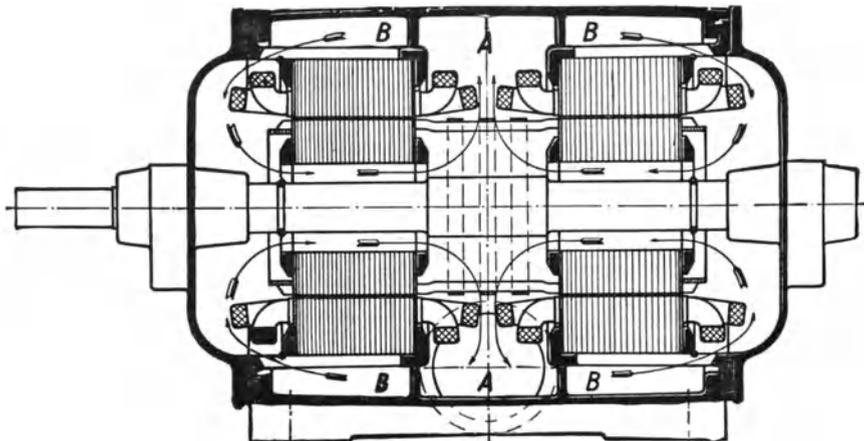


Abb. 138. Schnitt durch einen Bruncken-Doka-Motor.

vom Stator induzierten EMKE zwei extreme Phasenlagen annehmen, bedingt durch die gegenseitige Lage der zu den Ankern gehörenden Drehfelder. In Abb. 139a sind die EMKE gerade um 180° phasenverschoben und mithin heben sich die EMKE in einem Stabe, der durch beide Anker hindurchgeht, gerade auf. Bringt man nun in der Mitte zwischen den

beiden Läufern Endringe aus Widerstandsmaterial an, so werden die Läuferströme gezwungen, durch diese Endringe zu fließen und entsprechend den in diesen Endringen erzeugten Verlusten entsteht ein Drehmoment, das theoretisch genau so groß sein kann wie bei einem Schleifringmotor. Ebenso wird der Statorstrom den gleichen Wert wie bei einem Schleifringmotor gleicher Leistung haben. Wird nun das Drehfeld des einen Stators um 180 el. Grade verschoben, so haben die im Läuferstab erzeugten EMKe gleiche Phase und der Doppelkäfiganker verhält sich wie ein normaler Käfiganker. Durch die mittleren Endringe fließt kein Strom mehr. Die beiden äußeren Endringe sind also von kleinem Widerstand zu machen, um im normalen Betriebe einen guten Wirkungsgrad und geringe Erwärmung zu erzielen, während die mittleren Endringe einen relativ großen Widerstand besitzen müssen. Erforderlich ist ferner eine Vorrichtung, um das Drehfeld des einen Stators um 180 el. Grade zu verschieben, und zwar nicht in einer Stufe, sondern in 6 bis 7 Stufen, genau so wie bei dem Anlassen eines Schleifringmotors.

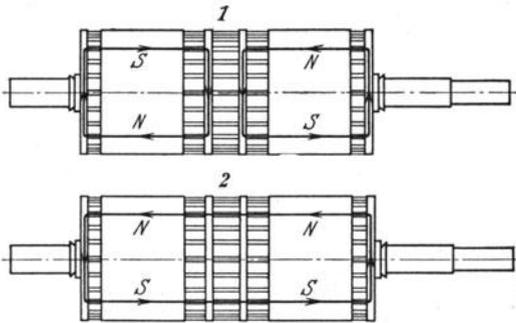


Abb. 139. Der Verlauf der Ströme in dem Käfig des Bruncken-Doka-Motors beim Anlauf und beim Betrieb.

Boucherot hatte schon verschiedene Ideen betreffs Verschiebung der relativen Lage des Drehfeldes angegeben. Die erste Idee bestand darin, den einen Stator drehbar anzuordnen. Die zweite Idee beruhte in der Benutzung eines Drehtransformators, welcher die dem einen Stator zugeführten Ströme in der Phase relativ zu den Strömen des zweiten Stators zu verdrehen gestattete.

Die Benutzung dieses Drehtransformators gestattet ein Anlassen von der Ferne, dürfte aber den Preis des Motors derart erhöhen, daß dieser Idee nur in ganz besonderen Fällen eine praktische Bedeutung zukommt.

Die erste Idee ohne allzu große Preiserhöhung zu verwirklichen, dürfte bei dem heutigen Stande der Werkstatttechnik durchaus möglich sein.

Im folgenden soll nun ein Patent der Firma Bruncken, Köln-Bickendorf, beschrieben werden, das die Verdrehung des Drehfeldes durch interessante Schaltungen bewirkt. Der Motor, Bruncken-Doka-Motor genannt, hat eine beträchtliche praktische Bedeutung erlangt. Die Verdrehung der Drehfelder erfolgt durch verschiedene Schaltungen der beiden Statorwicklungen, wobei Anzapfungen der einzelnen Phasen vermieden werden. Es wird also von jeder Phase nur Anfang und Ende zu einer oberhalb des Motors angebrachten Schaltwalze geführt, die mittels Handrad betätigt werden kann. Wie Abb. 139 und 140 zeigt, ist von der Firma Bruncken eine ventiliert gekapselte Ausführung entwickelt worden, bei welcher die zwischen den beiden Läufern befindlichen Stäbe als Ventilator wirken, die Luft durch axiale Ventilationskanäle aus den

beiden seitlichen Endräumen ansaugen und in den mittleren Statorraum pressen, von wo sie durch eine seitlich angebrachte runde Öffnung nach außen gestoßen wird. Eine zweite auf der Gegenseite befindliche Öffnung gestattet den Zutritt der Frischluft zu den beiden seitlichen Endräumen.

Wir haben oben erwähnt, daß es theoretisch und auch praktisch möglich ist, die gleichen Anlaufverhältnisse zu bekommen wie beim Schleifringmotor. Das bedingt aber einen relativ großen Widerstand des mittleren Endringes. Hierbei wird es notwendig, die Läuferstäbe vom Rotoreisen zu isolieren, denn im nicht isolierten Zustande bilden die Eisenbleche einen Shunt zu den Endringen. Ein großer Teil der Ströme, die in den Endringen fließen sollten, biegt also schon vor Verlassen des Eisenpaketes ab und fließt durch die Eisenbleche des Läufers zu den Stäben, die Ströme in entgegengesetzter Richtung führen. Um nun die großen Vorteile eines unisolierten, also unzerstörbaren Läufers zu er-

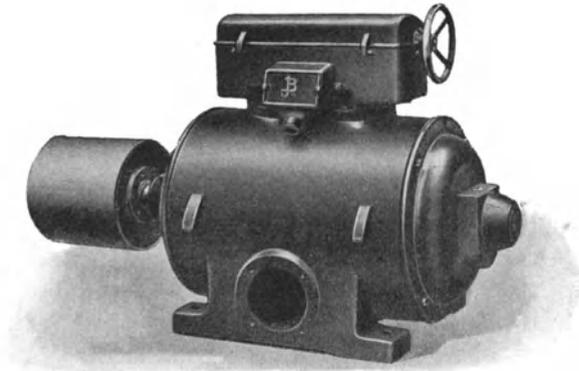


Abb. 140. Photographie eines Bruncken-Doka-Motors.

halten, verlegt die Firma Bruncken bei ihren Motoren die Anlaufwärme nur zum Teil in die mittleren Endringe und zieht auch die übrigen Teile des Doppelkäfigs zur Umsetzung in Wärme heran. In Abb. 141 sei das Heyland-Diagramm eines solchen Motors aufgezeichnet, und zwar ist der Heyland-Kreis für den schon im 2. Kapitel beschriebenen 7,5-kW-Motor benutzt worden, aber mit einem vergrößerten sekundären Widerstand, indem die Kupferverluste des Läufers genau so groß angenommen worden sind wie in dem Schleifringläufer. Der Punkt P_0 entspreche dem Leerlauf, der Punkt P dem Betriebe mit Vollast, P_k dem Kurzschluß des Doppelmotors mit den Drehfeldern der beiden Statoren in der Betriebslage, P'_k dem Kurzschluß des Doppelmotors, wenn die beiden Drehfelder die Anlaufphase einnehmen. P'_k wird in die Nähe des Kippunktes verlegt, wobei der durch die Lage OP'_k gegebene $\cos \varphi$ nicht wesentlich schlechter ist als der $\cos \varphi$ bei Vollast. Deshalb hat sich auch, wie man aus dem Diagramm erkennen kann, das Verhältnis des Anlaufstromes zum Anlaufdrehmoment, also das Verhältnis $\frac{OP'_k}{P'_k D_k}$ nur wenig

gegenüber dem Verhältnis $\frac{OP}{PD}$ verschlechtert. Das Güteverhältnis des Anlaufs dürfte etwa zwischen 0,75 und 0,88 liegen, wenn man dasjenige des Schleifringmotors mit 1 bezeichnet. (Man beachte, daß dieses Verhältnis bei einem normalen Käfiganker gleich 0,2 bis 0,25 und bei einem Doppelkäfiganker etwa 0,45 bis 0,57 ist.) Um nun den Anlaufpunkt nach P'_k zu verschieben, muß der sekundäre Widerstand etwa 3 bis 4 mal größer sein als der zu P_k gehörige. Wir erkennen dies aus dem Diagramm, wenn wir die Abschnitte betrachten, die von den Strahlen $P_o P_u$, $P_o P_k$ und $P_o P'_k$ von irgendeiner Vertikalen herausgeschnitten werden. Im vorliegenden Falle ist der Abschnitt $P'_k D'_k$ 4mal so groß wie der Abschnitt CD_k , d. h. der sekundäre Widerstand in der Anlaufschaltung ist 4mal größer als in der Betriebsschaltung. Wenn wir den Kraftlinienfluß des Motors noch weiter vergrößern, so würde sowohl der ideelle

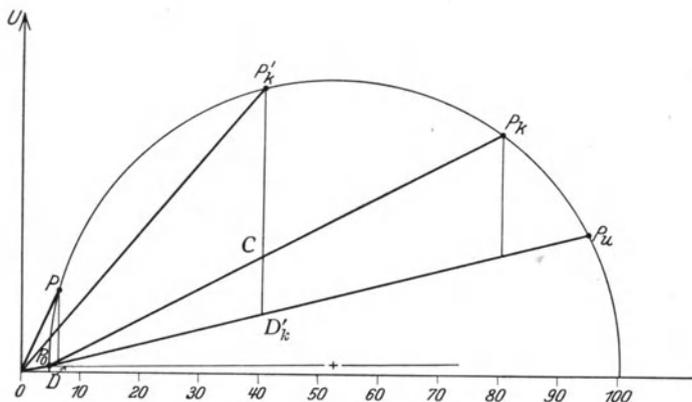


Abb. 141. Heyland-Diagramm des Bruncken-Doka-Motors.

Kurzschlußstrom als auch der Magnetisierungsstrom wachsen, der Punkt P'_k rückt dann weiter nach rechts, und der Unterschied zwischen dem zu Punkt P'_k und dem zu P gehörigen $\cos \varphi$ wird noch kleiner. Auf diese Weise kann der Widerstand der mittleren Endringe sehr stark reduziert werden, ohne die Anlaufverhältnisse wesentlich zu verschlechtern. Nur muß jetzt dafür Sorge getragen werden, daß der Statorstrom OP'_k auf die bei Schleifringmotoren zulässigen Werte reduziert wird. Die einzelnen von der Firma Bruncken hierfür entwickelten Schaltungen sollen nun besprochen werden.

Wir nehmen an, im normalen Betriebe seien die beiden Statorwicklungen, in \wedge geschaltet, ans Netz angeschlossen, wie dies durch Abb. 142 dargestellt wird, dann werden für den 1. Anlaufpunkt die entsprechenden Phasen der beiden Wicklungen in Serie geschaltet, und zwar so, daß gleichzeitig eine Verschiebung des einen Drehfeldes um 180° stattfindet (siehe Abb. 139a). Der Netzstrom (und natürlich auch das Drehmoment) wird dann $\frac{1}{4}$ von demjenigen Werte sein, der in Abb. 141 für den Punkt P'_k angegeben ist. Diese Verschiebung der Drehfelder um

180° wird auch in den Anlaufstufen 3 und 4 beibehalten, aber die effektive Windungszahl die für Stufe 1 gleich $2w$ gemacht worden ist, wird allmählich auf w reduziert; und zwar beträgt sie $1,16w$ für Stufe 3 und w für Stufe 4. Die Stufe 2 ist eine Zwischenstufe, bei der die beiden Drehfelder um 120° verschoben sind, wobei das eine Drehfeld $\sqrt{3}$ mal größer gemacht wird als das andere. Strom und Drehmoment liegen

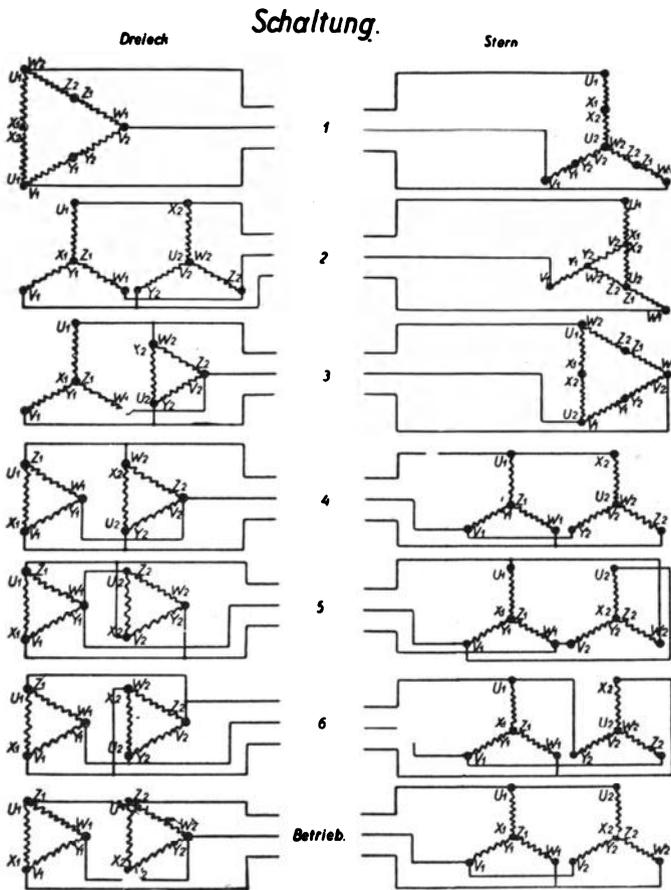


Abb. 143.

Abb. 142.

Abb. 142 und 143. Die Anlaufschaltung des Bruncken-Doka-Motors.

den Werten der Stufe 1 näher als denjenigen von 3. Die Netzströme und die Drehmomente sind also von Stufe 1 an auf etwa das 1,7fache für Stufe 2, etwa das 3fache für Stufe 3 und auf das 4fache für Stufe 4 gestiegen (immer unter der Annahme, daß der Rotor sich in Ruhe befindet).

In Abb. 141 ist das Anlaufdrehmoment bei direktem Schalten auf das Netz gleich dem 3fachen des normalen und der Strom gleich dem

4,3fachen des normalen¹. Es ergeben sich also auf den Stufen 1 bis 4, mit dem Rotor im Stillstand, die nebenstehenden Drehmomente und Ströme, jeweils im Verhältnis zum normalen Drehmoment und zum normalen Stromgesetz.

	Drehmoment	Strom
Stufe 1	0,75	1,1
„ 2	etwa 1,3	1,7
„ 3	2,2	3,2
„ 4	3	4,3

Der Motor, der unter Halblast anläuft, wird sich nun schon von der 1. Stufe an und der Motor, der gegen volles Drehmoment anläuft, von der 2. Stufe an in Bewegung setzen.

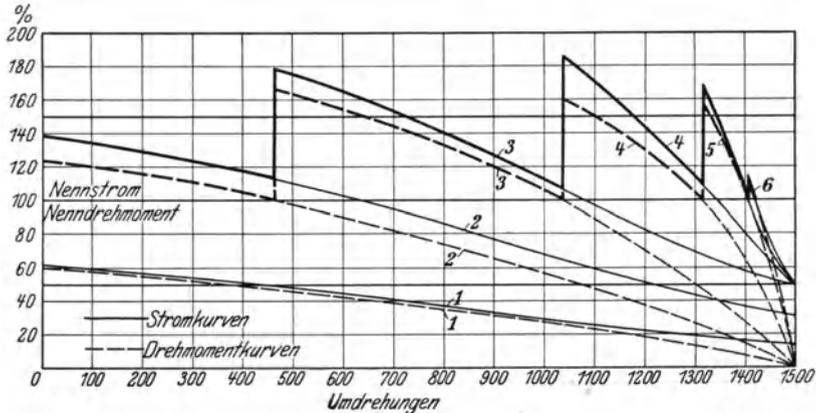


Abb. 144. Strom und Drehmoment eines 5,5 kW, 4 poligen Bruncken-Doka-Motors.

In der 5., 6. und 7. Stufe (siehe Abb. 142 5, 6 und 7) wird die effektive Windungszahl konstant gehalten (= w) aber die Phasenverschiebung

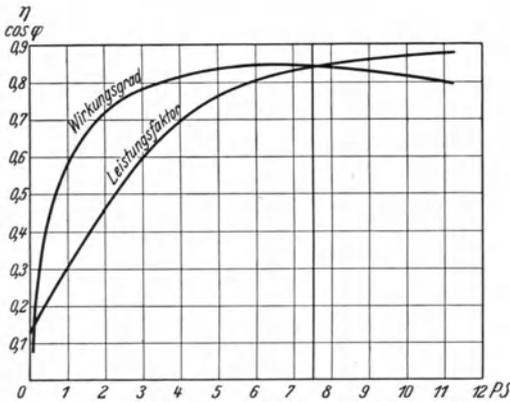


Abb. 145. Wirkungsgrad und $\cos \varphi$ eines 5,5 kW, 4 poligen Bruncken-Doka-Motors.

der beiden Drehfelder jeweils um 60° verändert, so daß also statt 180° wie in Stufe 4 nur noch 120° in Stufe 5, 60° in Stufe 6 und 0° in Stufe 7 vorhanden ist. In den 3 letzten Stufen wird also der sekundäre Widerstand des Doppelmotors stufenweise auf seinen normalen Betriebswert reduziert, d. h. der Kurzschlußpunkt wandert von P'_k in 3 Schritten nach P_k . Ganz ähnliche Schaltungen sind auch von der Firma Bruncken für den Fall aus-

¹ Verschieben wir P'_k in Abb. 141 nach links, d. h. wenden wir beim Anlauf einen größeren sek. Widerstand an, so werden die Anlaufverhältnisse noch günstiger.

probiert worden, daß der Motor im Betriebe in Δ geschaltet ist. Sie sind in Abb. 143 1 bis 7 aufgezeichnet. Stufen 1, 2, 4, 5, 6 und 7 sind den entsprechenden Stufen der Abb. 142 vollständig gleichwertig (die effektiven Windungszahlen sind für die 1. und 2. Stufe $2w$ und $1,73$, für die letzten 4 Stufen w , wobei bei der 3. Stufe die eine Statorwicklung in λ , die zweite Statorwicklung in Δ geschaltet, und an das Netz angeschlossen sind. Es wird also (ähnlich wie für Stufe 2, Abb. 142) der eine Stator verstärkt, und ein Verdrehungswinkel von 120° anstatt 180° angewandt. Diese beiden Stufen sind als Übergangsstufen zu bewerten, bei denen man sowohl von der Gleichheit der beiden Drehfelder, als auch von der Beibehaltung der 180° Phasenverschiebung abweichen müßte. Strom und Drehmoment für die Stufe 3 liegen etwa in der Mitte zwischen den Werten der Stufe 2 und 4. In Abb. 144 sind Strom und Drehmoment eines $5,5\text{ kW}$, 220 V 4poligen Bruncken-Doka-Motors in Abhängigkeit der von Tourenzahl wiedergegeben. Die ausgezogene und die gestrichelte Zickzacklinie würde den Anlauf des Motors gegen Vollastgedrehmoment darstellen.

Bei diesem Motor ist mit Rücksicht auf die kleine Leistung die 1. Stufe ausgelassen. Die vorletzte Stufe erscheint ebenfalls entbehrlich, sie wird aber nach Angaben der Firma deshalb benutzt, um die Ausgleichspitzen abzdämpfen, die bei einem Schaltschritt von 120° zu groß würden.

Abb. 145 gibt η und $\cos \varphi$ des obigen Motor in Abhängigkeit von der Belastung.

Abb. 146 stellt ein im Betrieb aufgenommenes Oszillogramm der An-

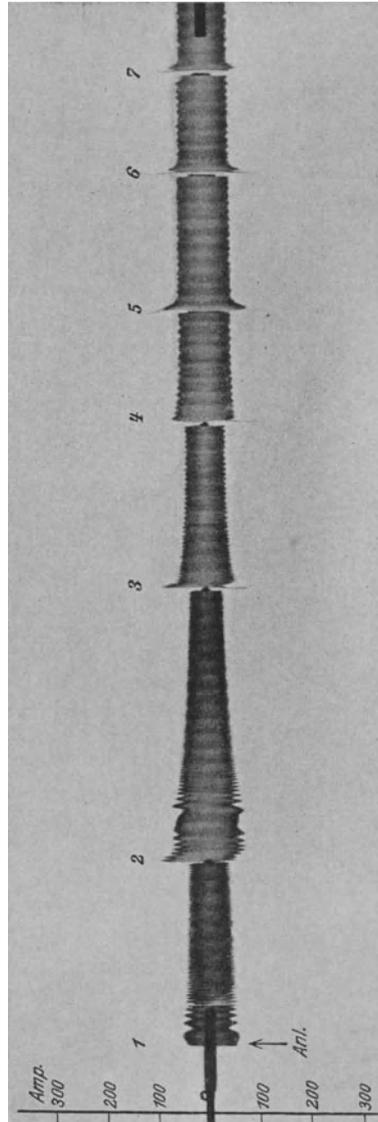


Abb. 146. Oszillogramm der Anlaufströme eines 40 kW , 6poligen Bruncken-Doka-Motors.

laufströme eines 40 kW, 380 V, 6 poligen Motors dar; der Motor trieb über ein Zahnradvorgelege einen Enke-Gassauger an.

Abb. 147 zeigt Strom und Drehmoment eines 15 kW, 4 poligen Bruncken-Doka-Motors in Abhängigkeit von der Tourenzahl. Die Statorwicklung war im Betrieb in λ geschaltet, das Schalten geht in 7 Stufen vor sich. Das Gegendrehmoment ist gleich $0,75 M_n$ angenommen. Abb. 148 zeigt die oszillographische Aufnahme eines 50 Hz, 40 PS, 380 V, 1500 Umdr./min Motors bei Benutzung von 7 Schaltstufen, und zwar sowohl ohne Belastung als auch bei $\frac{1}{2}$, voller und 1,5facher Belastung.

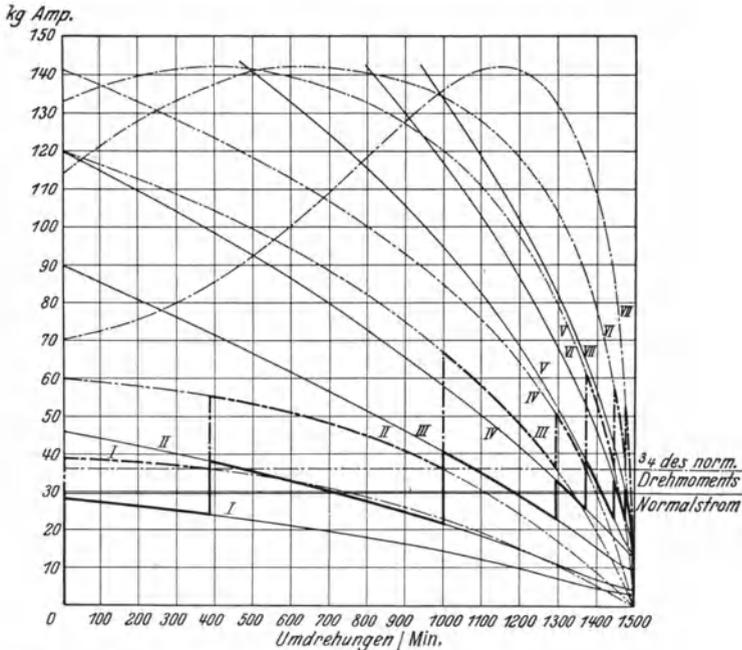


Abb. 147. Strom und Drehmoment eines 15 kW, 4 poligen Bruncken-Doka-Motors für die verschiedenen Anlaufschaltungen. Der Durchmesser der Bremsscheibe war 400 mm.

B. Der Richter-Motor.

Eine interessante, von den bisher genannten Anordnungen gänzlich abweichende Lösung zwecks Verkleinerung des Verhältnisses Anlaufstrom: Anlaufmoment hat Richter¹ angegeben.

Bei zwei in Reihe geschalteten, miteinander gekuppelten Drehstrommotoren verteilt sich die Spannung auf die beiden Ständerwicklungen nach Maßgabe der Scheinwiderstände der beiden Motoren (Abb. 149). Der Motor A mit großem Läuferwirkwiderstand wird daher gegenüber dem Motor B mit kleinem Läuferwirkwiderstand den größten Teil der Spannung und hierbei auch bei einem entsprechenden Widerstande

¹ ETZ 1925, S. 6. — D. R. P. 383693 und 383690.

des Läufers ein großes Drehmoment bei verhältnismäßig kleinem Strome übernehmen. Wenn der Motor *B* eine größere Polzahl besitzt als der Motor *A*, so wird mit steigender Drehzahl der Scheinwiderstand von Motor *B* schneller zunehmen als derjenige von Motor *A*. Die Spannung am Motor *B* wird wachsen, während die Spannung am Motor *A* sinkt. Der Motor *B* wird sich dadurch an der Drehmomententwicklung immer mehr beteiligen, während das Drehmoment des Motors *A* je nach der

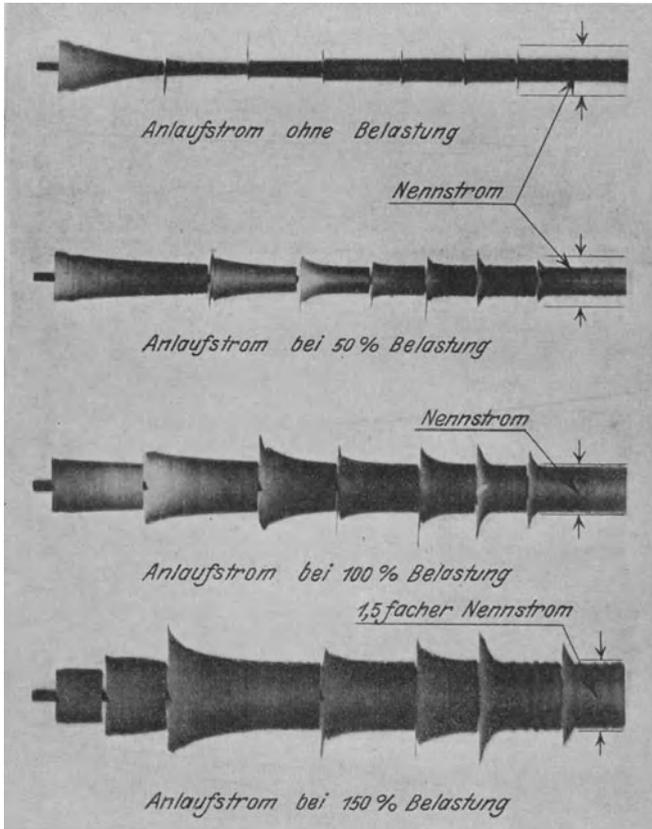


Abb. 148. Oszillographische Aufnahme des Anlaufes eines 40 PS, 4 poligen Bruncken-Doka-Motors.

Größe seines Läuferwirkwiderstandes entweder zunächst noch ansteigt und dann abfällt, oder auch gleichmäßig abnimmt. Die beiden miteinander gekuppelten Motoren streben einer Umdrehungszahl zu, welche bei Belastung etwas unterhalb der synchronen und bei reinem Leerlauf etwas oberhalb der synchronen Umdrehungszahl des Motors *B* liegt. In diesem Augenblick ist die Spannung am Motor *A* so gering, daß die Ständerwicklung desselben ohne merklichen Stromstoß durch den Schalter *K* kurzgeschlossen werden kann.

Diese Verhältnisse erfahren grundsätzlich keine Veränderung, wenn die beiden Wicklungen *A* und *B* in einem einzigen Motor mit einem Läufer mit zwei besonderen Käfigwicklungen angeordnet sind. Die eine Käfigwicklung kann hierbei eine einfache Käfigwicklung mit hohem Widerstande sein, die andere Käfigwicklung besteht aus einer Wicklung mit sehr kleinem Widerstande, die entsprechend der Polzahl der Wicklung *B* ebensoviele in Reihe geschaltete Stäbe besitzt und daher lediglich von der Wicklung *B* induziert werden kann.

Während des Anlaufes nimmt die Wicklung *A* den größeren Teil der Netzspannung auf, da von den beiden im Motor umlaufenden Drehfeldern *A* und *B* das letztere durch die Läuferwicklung mit kleinerem Widerstande stark abgedämpft wird. Der Motor läuft mit verhältnismäßig hohem Drehmoment bei verhältnismäßig kleinem Strom an. Während des Anlaufes nimmt die Spannung an der Betriebswicklung zu und diejenige an der Anlaufwicklung ab. Bei der der Betriebswicklung entsprechenden Umdrehungszahl kann die Anlaufwicklung ohne unzulässigen Stromstoß kurzgeschlossen werden, da das Drehfeld der Betriebswicklung in der Anlaufwicklung keine EMK hervorrufen kann. Der Motor besitzt jetzt das Verhalten eines gewöhnlichen Kurzschlußmotors.

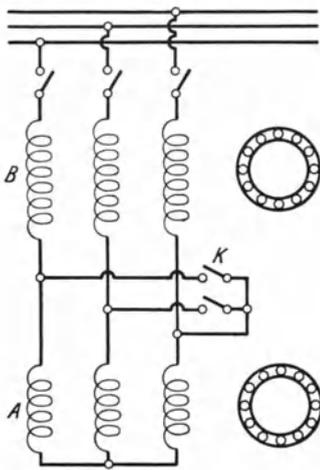


Abb. 149. Ersatzschaltbild des Richter-Motors.

Das resultierende Drehmoment hängt von der Größe der Wirkwiderstände der beiden Läuferwicklungen und von der Anzahl der Windungen der Anlaufwicklung ab. Man kann ein allmählich steigendes oder ein allmählich sinkendes oder ein im wesentlichen stetiges Drehmoment erhalten.

Das resultierende Drehmoment hängt von der Größe der Wirkwiderstände der beiden Läuferwicklungen und von der Anzahl der Windungen der Anlaufwicklung ab. Man kann ein allmählich steigendes oder ein allmählich sinkendes oder ein im wesentlichen stetiges Drehmoment erhalten.

Die beiden Läuferwicklungen lassen sich nun zu einer einzigen Wicklung vereinigen. Diese Wicklung muß derart angeordnet sein, daß der Widerstand, auf die Betriebswicklung bezogen, sehr gering und, auf die Anlaufwicklung bezogen, sehr groß ist.

Dies wird dadurch erreicht, daß nicht die einzelnen Stäbe an die Endringe angeschlossen werden, sondern Anfang und Ende eines aus 3 oder 4 in Serie geschalteten Leitern bestehenden Wechselstranges. — Abb. 150 zeigt eine solche Schaltung für drei Leiter pro Gruppe. In Abb. 151 ist das Verhältnis des Wickelschrittes zu den Polteilungen der Anlauf- und der Betriebswicklung gezeigt. Man erkennt, daß für die Betriebswicklung die in Serie geschalteten Leiter einen Wickelfaktor $f_{w, 2B}$ in der Nähe von 1 haben müssen, während sich für die Anlaufwicklung ein sehr niedriger Wickelfaktor $f_{w, 2A}$ ergibt. In einem praktischen Falle ergab sich $f_{w, 2B} = 0,913$ und $f_{w, 2A} = 0,16$, also 5,7mal kleiner als $f_{w, 2B}$. Der auf die Statorwicklung bezogene sekundäre Widerstand läßt sich auf diese Weise auf das 33fache desjenigen Wertes

erhöhen, der bei einem normalen Käfiganker auftreten würde, da der auf die Statorwindungszahl bezogene sekundäre Widerstand dem Quadrate des Wicklungsfaktors umgekehrt proportional ist. In einer Läufer-*nute* befinden sich ebensoviele Leiter als in einem Strange, z. B. in der Abb. 150 3 Leiter pro Nute übereinander. Diese Leiter führen während des Anlaufs Ströme von sehr verschiedener Phase, die nach außen hin eine wesentlich vergrößerte *Nutenstreuung* hervorrufen würden, wenn

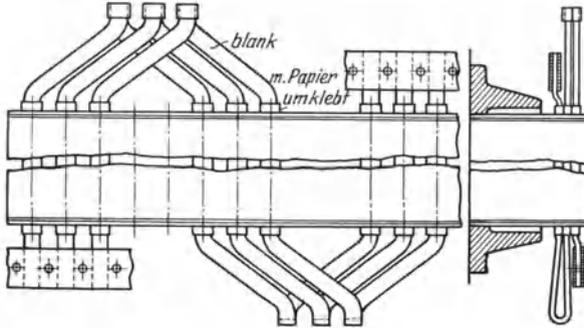


Abb. 150. Anordnung einer Gruppe von Leitern im Läufer des Richter-Motors.

jeder Leiter in einer eigenen *Nute* gelagert wäre. Durch die Lagerung in einer einzigen *Nute* werden die Vektoren der Ströme gewissermaßen erst geometrisch addiert, bevor ihre Wirkung nach außen hin in Erscheinung tritt.

In Band IV der Arbeiten aus dem Elektr. Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe beschreibt Dr. Heiles die Durchrechnung und Prüfung eines 4poligen 5-PS-Richter-Motors. Der Stator besaß eine in 2 Teilwicklungen verlegte 4polige Betriebswicklung, enthaltend 16, resp. 2 Leiter pro *Nute*, ferner eine 2polige Anlaufwicklung mit 5 Leitern pro *Nute*. In der Absicht, das Verhältnis der Windungszahl der Anlaufwicklung zu derjenigen der Betriebswicklung variieren zu können, um die günstigsten Betriebsverhältnisse zu erforschen, wurden 6 Schaltungen der Betriebswicklungen untersucht, nämlich Serienschaltung, Gegenschaltung und Abtrennen der kleinen 4poligen Teilwicklung, ferner Stern- und Dreieckschaltung der Phasen. Auf diese Weise konnte das Verhältnis der Windungszahl von 0,28 bis 0,62 variiert werden. Der Läufer hatte 24 *Nuten* und 3 Leiter pro *Nute* (entsprechend 3 in Serie geschalteten Leitern pro Wickelstrang).

Der Schritt zweier Leiter des gleichen Stranges war 5 *Nuten*, also 150 elektrische Grad für das 4polige Feld und 75 elektrische Grad für

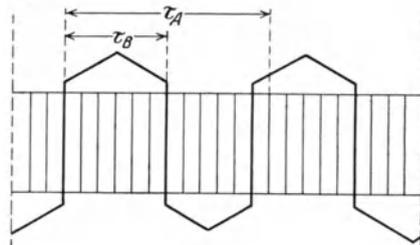


Abb. 151. Darstellung der relativen Lage der Stäbe im Läufer eines Richter-Motors im Verhältnis zur Polteilung.

das 2polige. Hieraus bestimmt sich der Wicklungsfaktor zu

$$f_{w,2A} = \frac{\sin 3 \cdot \frac{180 - 75}{2}}{3 \sin \frac{180 - 75}{2}} = 0,16$$

und

$$f_{w,2B} = \frac{\sin 3 \cdot \frac{180 - 150}{2}}{3 \cdot \sin \frac{180 - 150}{2}} = 0,913,$$

wie sich auch graphisch aus der Zusammensetzung der Spannungsvektoren (Abb. 152) ergibt. Das Verfahren, das Dr. Heiles bei der Aufstellung der Diagramme einschlägt, besteht darin, die Impedanz der 4poligen und der 2poligen Wicklung in Abhängigkeit von der Tourenzahl getrennt zu bestimmen und vektoriell zusammenzusetzen. Die

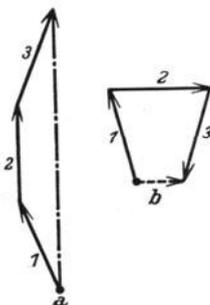


Abb. 152. Vektoren der in den Läuferstäben eines Richter - Motors erzeugten elektromotorischen Kräfte beim Anlauf und im Betrieb.

Klemmspannung wurde immer so gewählt, daß nach Abschaltung der Anlaufwicklung in allen Schaltungen die gleiche Luftspaltinduktion resultiert (nämlich 6250 Gauß).

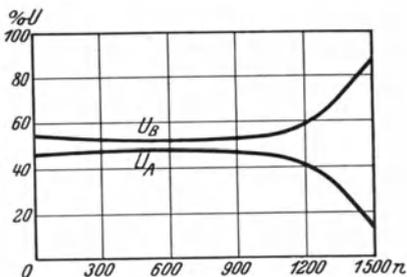


Abb. 153. Die Spannung an der Anlaufwicklung und an der Betriebswicklung in Abhängigkeit von der Tourenzahl.

Interessant ist nun das Aufteilen der gesamten Spannungen auf die Betriebs- und Anlaufwicklung. Die Spannung an der Betriebswicklung (U_B) ist am Anfang nahezu konstant und steigt erst im letzten Drittel der Tourenzahl, während die Spannung an der Anlaufwicklung (U_A) im letzten Drittel der Beschleunigungsperiode stark abfällt. Abb. 153 zeigt den Verlauf von U_A und U_B für den Fall, daß sich die Windungszahlen verhalten wie $\frac{w_A}{w_B} = 0,36$. Wird $\frac{w_A}{w_B}$ größer gewählt, so rückt U_A nach oben und U_B nach unten, der prinzipielle Unterschied im Laufe der Kurve während des letzten Drittels der Drehzahl ändert sich aber nicht. Die Resultate der Rechnung sind nun in folgender Tabelle 16 (S. 117) zusammengestellt.

Die Versuche ergaben gegenüber der Rechnung eine Verkleinerung des Drehmomentes um ca. 10 %, die wahrscheinlich dem Einfluß der bei der Berechnung nicht berücksichtigten Übereinanderlagerung zweier verschiedenpoliger Drehfelder in demselben Gehäuse zuzuschreiben ist. Diese Übereinanderlagerung bedingt eine Abweichung von dem Heylandkreis, weil eine Vergrößerung der Zahnsättigung gegenüber dem normalen Drehstrommotor eintritt. Dr. Heiles schreibt die Abweichung

Tabelle 16.

Verhältnis der Windungszahlen $\frac{w_A}{w_B}$	Verhältnis der Anlaufströme zum Normalstrom $i = \frac{J_a}{J_n}$	Verhältnis des An- laufmomentes zum Normalmoment $m = \frac{M_a}{M_n}$	Güteverhältnis des Anlaufs $\frac{m}{i}$
0,28	3,02	1,07	0,35
0,31	2,67	0,99	0,37
0,36	2,23	0,84	0,375
0,48	1,71	0,70	0,41
0,54	1,43	0,60	0,42
0,61	1,15	0,48	0,42

dem Einfluß des Widerstandes der beim Versuche benutzten zahlreichen Verbindungskabel und der Übergangswiderstände zu.

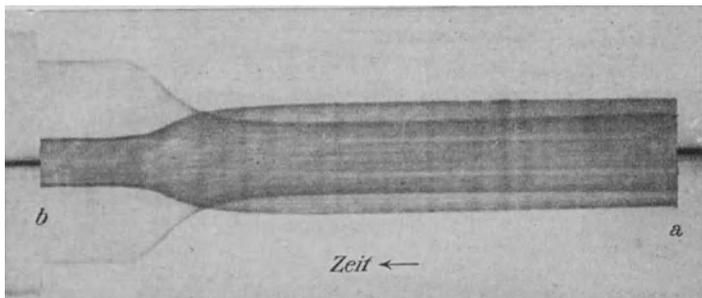


Abb. 154. Oszillographische Aufnahme der in der Anlauf- und in der Betriebswicklung erzeugten elektromotorischen Kräfte.

Abb. 154 zeigt die mittels Oszillograph aufgenommene Teilspannung U_A und U_B und Abb. 155 Strom und Tourenzahl.

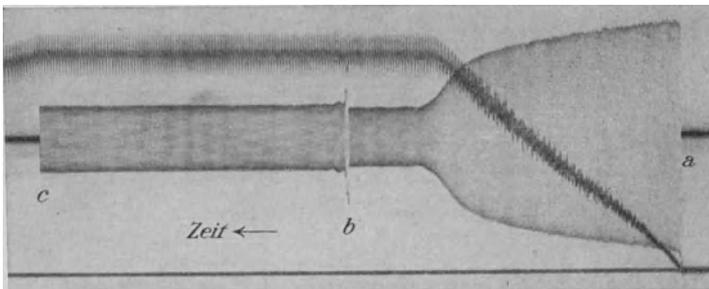


Abb. 155. Oszillographische Aufnahme von Strom und Tourenzahl beim Anlauf eines Richter-Motors.

Gegenüber einem normalen Drehstrommotor mit Käfiganker zeigt der Richter-Motor wesentlich verbesserte Anlaufverhältnisse, denn $\frac{m}{i}$ würde dann etwa den doppelten Wert erhalten.

Wie steht aber der Richter-Motor zu dem Doppelnutmotor ?

Aus der Durchrechnung des 7,5-kW-Motors und der Nachrechnung des 15-kW-Heemafmotors geht hervor, daß die Anlaufverhältnisse des Doppelnutmotors ebenso günstig sind wie die des Richter-Motors. Der Vergleich muß sich also auf die Betriebseigenschaften und die Herstellungskosten der beiden Motoren erstrecken. Der Richter-Motor wird entschieden teurer als der Doppelnutmotor, denn die besondere Anlaufwicklung bedingt erhöhte Wickelkosten und gegenüber einem normalen Motor vergrößerten Nutenraum. Nach den Berechnungen von Prof. Richter wirkt sich die Vergrößerung des Nutenraumes in eine Verkleinerung der Leistung für ein gegebenes Modell aus, und zwar um etwa 26% bei einem Statorinnendurchmesser von 20 cm. Dieser Prozentsatz steigt bei noch kleineren Leistungen stark an und fällt andererseits bei größerem Durchmesser, so daß bei einem Durchmesser von 40 cm nur etwa 6% Leistung verloren gehen.

Die Läuferwicklung ist ebenfalls etwas teurer als der doppelte Käfig, denn er stellt die Kombination einer normalen Kurzschlußwicklung mit einem Käfiganker dar. Entsprechend der Mehrzahl an Wicklungen wird auch die Frage der Betriebssicherheit zugunsten des Doppelnutmotors zu beantworten sein.

Eine Reihe von Punkten sprechen andererseits zugunsten des Richter-Motors. Zunächst ist der $\cos \varphi$ des Richter-Motors besser als derjenige des Doppelnutmotors. Er könnte theoretisch gleich demjenigen eines normalen Käfigankermotors gemacht werden. Praktisch wird man freilich die Zahl der Rotornuten wesentlich kleiner machen, um Platz für die erforderlichen 3 oder 4 Leiter zu erhalten, so daß wir wohl sagen können, der $\cos \varphi$ ist etwas schlechter als der $\cos \varphi$ des Drehstrommotors mit normalem Käfiganker und etwas besser als derjenige eines Doppelnutmotors. Der Wirkungsgrad des Richter-Motors wird denjenigen eines Motors mit normalem Käfiganker sogar übertreffen, denn die Verluste eines Läufers können so niedrig gewählt werden als der verfügbare Platz gestattet, ohne Rücksicht zu nehmen auf die Anlaufverhältnisse. Beim Motor mit 6 und mehr als 6 Polen werden die Anlaufverhältnisse noch günstiger werden als beim Doppelnutmotor. Wir haben ja im Richter-Motor das Zusammenwirken zweier verschiedenpoliger Felder erkennen können. Das 2polige Feld arbeitete mit einem großen Läuferwiderstand, das 4polige mit einem geringen Widerstand.

Das Verhältnis $\frac{m}{i}$ liegt beim 4poligen Felde wegen des geringen Läuferwiderstandes in der Nähe von 0,2 und dasjenige des 2 poligen Feldes etwas unterhalb 0,5, weil hierbei die synchrone Tourenzahl zweimal höher als die Betriebstourenzahl ist, und weil aus diesem Grunde, auch bei günstigstem Läuferwiderstand, der Wert 0,5 nicht überschritten werden kann. Durch die gemeinsame Wirkung beider Felder kann also nur ein zwischen 0,2 und 0,5 gelegenes Verhältnis herauskommen, und zwar um so näher an 0,5, je größer der Einfluß der Anlaufwicklung gemacht wird. Auf diese Weise ist im günstigsten Falle etwa $\frac{m}{i} = 0,4$ zu erwarten. Bei größeren

Polzahlen dürfte es aber möglich sein, günstigere Werte zu erreichen, denn bei einem 6poligen Motor wird man die Anlaufwicklung 4polig ausführen, so daß jetzt das beim Anlauf wirksamere Drehfeld mit einem Werte von $\frac{m}{i} = 0,67$ arbeitet. Wir ersehen also beim 6poligen Richter-Motor die Möglichkeit einer Verbesserung der Anlaufverhältnisse, während wir schon früher beim 6poligen Doppelnutmotor eine wesentliche Verschlechterung beobachten konnten.

Wir können also sagen: Je größer die Polzahl, um so günstiger wird sich der Richter-Motor in bezug auf die Anlaufverhältnisse dem Doppelnutmotor gegenüber verhalten. Bei kleineren Leistungen wird wahrscheinlich die Kostenfrage immer noch der ausschlaggebende Faktor sein und zugunsten des Doppelnutmotors sprechen, aber bei größeren Leistungen dürften die schon erwähnten Vorzüge des Richter-Motors den Ausschlag geben. Ein wesentlicher Vorzug des Motors ist dabei noch gar nicht erwähnt worden: Der Motor erreicht unter dem Einflusseiner Anlaufschaltung eine in der Nähe der Betriebsdrehzahl liegende Drehzahl, so daß das Kurzschließen oder Abschalten der Anlaufwicklung keinen nennenswerten Stromstoß verursacht. Die 2polige Anlaufwicklung kann auch durch Umschalten in eine 4polige verwandelt und dann mit der 4poligen Betriebswicklung zusammen arbeiten, diese Umschaltungen sind in Abb. 156a und b gezeigt.

Für eine ausführlichere Beschreibung wird auf die Arbeiten von Prof. Richter¹, Dr. Heiles² und Meyer³ verwiesen.

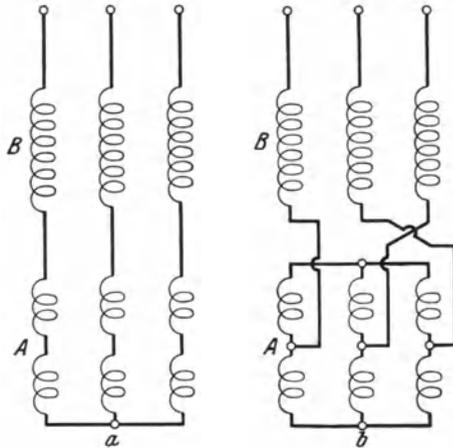


Abb. 156. Umschaltbare Anlaufwicklungen des Richter-Motors.

8. Fliehkraftriemenscheiben.

Die Fliehkraftriemenscheibe hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Eine sehr große Anzahl von Neukonstruktionen ist auf den Markt gebracht worden, die alle den Zweck erfüllen sollen, dem Drehstrommotor mit einfachem Käfigläufer an Stelle des Schleifringläufermotors den Netzanschluß unter Einhaltung der Anschlußbedingungen zu ermöglichen.

¹ ETZ 1925, S. 6.

² Arbeiten aus dem Elektrotechn. Institut der Techn. Hochschule Karlsruhe, Bd. 4.

³ ETZ 1928, S. 968.

Da der Doppelnutmotor dasselbe Ziel verfolgt, so erscheint es zweckmäßig, im Rahmen dieses Buches einen besonderen Abschnitt den Fliehkraftriemenscheiben zu widmen.

Es sollen zunächst eine Reihe bekannter Fliehkraftriemenscheiben näher beschrieben werden. Die zugehörigen Schaubilder sind meistens den Veröffentlichungen der Baufirmen entnommen.

A. Beschreibung von verschiedenen ausgeführten Fliehkraftriemenscheiben.

1. Die Fliehkraftriemenscheibe der AEG.¹

Der Bauart dieser Scheibe liegt insofern ein ganz neuer, eigenartiger Gedanke zugrunde, indem durch die Wahl bestimmter konstanter Daten erreicht wird, daß der Läufer praktisch ohne Belastung anläuft und für die Umschaltung von Stern auf Dreieck eine genügende Zeit zur Verfügung steht (Abb. 157).

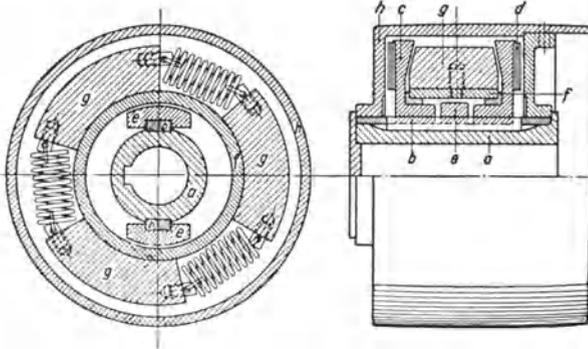


Abb. 157. Fliehkraftriemenscheibe der AEG.

Die auf der Welle axial verschiebbaren und mit Bremsbelägen d versehenen Scheiben c werden durch die Nabe a mitgenommen. Zwischen diesen Scheiben liegt ein Rotationskörper

f , welcher mittels Bolzen radial verschiebbare und durch vorgespannte Federn untereinander verbundene Fliehgewichte g mitnimmt. Von der Nabe a werden außerdem kleine Fliehgewichte e mitgenommen, welche sich beim Anfahren des Läufers gegen die innere Mantelfläche des Rotationskörpers f legen. Die Fliehgewichte g und die Scheiben c berühren sich im Arbeitszustande in Kegelmantelflächen. Auf der Nabe a ist freiliegend die Riemenscheibe h angeordnet.

Während des Anlaufens des Läufers wird teils durch die Fliehgewichte e und teils durch Reibung in den Lagerstellung auf den Rotationskörper ein Drehmoment M ausgeübt. Die Zeitdauer zwischen dem Anlauf des Läufers und dem Beginn der Leistungsübertragung ergibt sich zu

$$t = \frac{J \cdot \omega}{M}.$$

Hierin ist J die Summe der Massenträgheitsmomente von f und g und ω die Winkelgeschwindigkeit, welche der Drehzahl von f entspricht, bei der die Fliehkraftstücke g nach Überwindung der Federkraft die Brems-

¹ AEG-Mitteilungen 1927, S. 225.

scheiben c berühren. Die Zeitdauer t läßt sich durch geeignete Wahl von J , ω und M so bestimmen, daß eine gewisse Zeitspanne für die Umschaltung von Stern auf Dreieck vorhanden ist.

Die Fliehkewichte g erfahren durch die Berührung mit den Bremscheiben c eine zusätzliche Beschleunigung, sodaß nunmehr die Umlaufzahl der Fliehkstücke stärker anwächst, bis sie derjenigen der Brems-

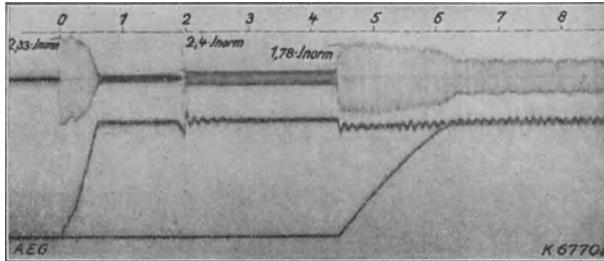


Abb. 158. Anlaufströme und Drehzahlen eines normalen Motors und der Scheibe in Verbindung mit einer AEG-Fliehkraftriemenscheibe bei Stern-Dreieck-Schaltung.

scheiben gleich ist. Die Bremscheiben werden durch die Reibwirkung der Fliehkewichte mit einer allmählich anwachsenden Kraft gegen die Bremsflächen der eigentlichen Riemenscheibe gedrückt. Die Lastmitnahme erfolgt daher nicht ruckartig, sondern vielmehr allmählich, sodaß Drehzahlschwankungen und Pendelerscheinungen nicht auftreten. Aus dem Oszillogramm Abb. 158 erkennt man, daß der Motor voll-

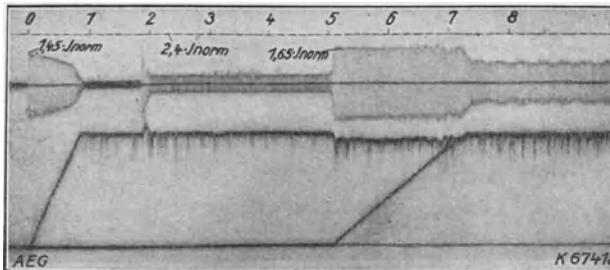


Abb. 159. Anlaufströme und Drehzahlen eines Doppelnutmotors und der Scheibe in Verbindung mit einer AEG-Fliehkraftriemenscheibe bei Stern-Dreieck-Schaltung.

kommen unbelastet anläuft, und daß eine genügend große Ruhepause für die Umschaltung von Stern auf Dreieck vorhanden ist. Die VDE.-Bestimmungen für den Anschluß von Kurzschlußläufer-Motoren werden nach dem Oszillogramm eingehalten. Aus demselben ergibt sich bis zur Mitnahme der Last eine Zeit von etwa 2 Sek., die für die Umschaltung in den meisten Fällen als ausreichend angesehen werden kann.

Die Abb. 159 gibt die Anlaufverhältnisse eines gleich großen Motors wieder, der jedoch mit einem Doppelnutläufer ausgerüstet ist. Die Charakteristik der Kurven ist dieselbe wie in Abb. 158. Der Unter-

schied liegt nur in der Höhe der Stromstärken während des Anlaufvorganges.

2. Die Fliehkraftriemenscheibe von SSW¹.

Die Scheibe besitzt Fliehkewichte, deren Fliehkraften gespannte Federn entgegenwirken. Die Wirkungsweise erscheint einfach, das Verhalten der Fliehkraftriemenscheibe während des Anlaufvorganges ist jedoch nicht so ohne weiteres zu erkennen. In einem Aufsätze in der Siemens-Zeitschrift¹ werden die mathematischen Beziehungen der einzelnen Größen der Scheibe zueinander

abgeleitet.

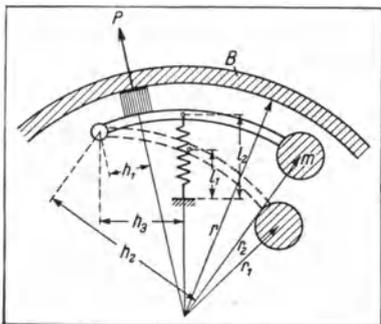


Abb. 160. Konstruktive Anordnung der SSW-Fliehkraftriemenscheibe.

Die grundsätzliche Anordnung der Scheibe geht ohne weiteres aus der Abb. 160 hervor. Im Inneren der Scheibe sind die Fliehkewichte derart befestigt, daß sie sich unter der Einwirkung der Fliehkraft nach außen bewegen können. Diese Bewegung kann aber erst dann eintreten, wenn die Fliehkraft größer als die Federkraft geworden ist. Hiernach schwingen die Gewichte aus, wobei die Fliehkraft infolge der Vergrößerung des Abstandes des Trägheits-

punktes vom Wellenmittel plötzlich ansteigt. Gleichzeitig tritt aber auch eine Vergrößerung der Rückzugskraft der Federn ein.

Die Fliehkewichte üben an einer bestimmten Stelle auf die auf der Welle gelagerte Buchse B einen Anpressungsdruck aus, welcher bei der normalen Drehzahl ein höchstes Drehmoment übertragen kann, dessen Größe durch den Druck, den Reibungskoeffizienten der Ruhe und den Reibungsradius begrenzt ist.

Aus der Abbildung lassen sich ohne weiteres folgende Gleichungen ableiten.

Das Drehmoment der Fliehkraftriemenscheibe ist $M = Pr \cdot \varrho$, wo P den Druck an der Mantelfläche der Buchse B , r den inneren Radius der Mantelfläche und ϱ den Reibungskoeffizienten darstellt. P muß gleich der Differenz des von den Zentrifugalkräften ausgeübten Druckes und der Federkraft sein, also unter Benutzung der Bezeichnungen in Abb. 160

$$P = m\omega^2 r_2 \frac{h_2}{h_1} - c \cdot (l_2 - l_0) \frac{h_3}{h_1}.$$

Dieser Druck wird aber erst dann ausgeübt, wenn m von der Ruhelage in die Endlage übergegangen ist. Die Tourenzahl der Umschaltung ergibt sich annähernd aus der Gl.

$$m\omega^2 r_1 h_2 = c \cdot (l_1 - l_0) h_3.$$

¹ Siemens-Zft. 1925, S. 37.

In dem erwähnten Aufsatz sind die Verhältnisse des Anlaufs sehr eingehend behandelt.

Die Abb. 161¹ zeigt die praktische Ausführung der Fliehkraftriemenscheibe, die nach dem Gesagten verständlich erscheint. Die Scheibe wird in vollkommen gekapselter Ausführung hergestellt.

Die Abb. 162 gibt die oszillographische Aufnahme des Anlaßvorganges eines Drehstrommotors mit Fliehkraftriemenscheibe wieder. Man erkennt, daß der Läufer vollständig leer auf eine verhältnismäßig hohe Tourenzahl kommt, bevor die Gewichte eingreifen, und daß eine genügend große Zeitspanne gegeben ist, um die Umschaltung von Stern auf Dreieck vorzunehmen.

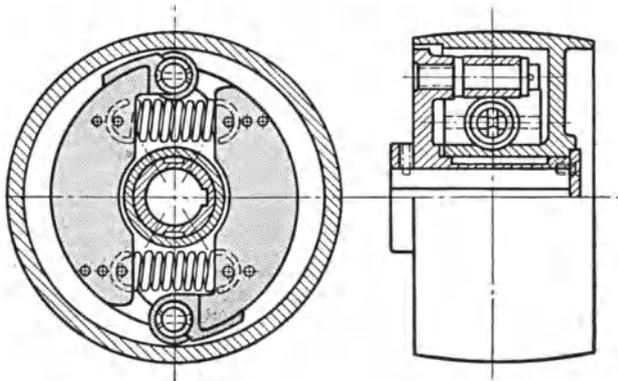


Abb. 161. Fliehkraftriemenscheibe von SSW.

3. Die Albo-Kupplung nach Dipl.-Ing. Obermoser².

Das charakteristische Merkmal dieser Fliehkraftriemenscheibe gegenüber allen sonst im Gebrauch befindlichen Fliehkraftkupplungen besteht darin, daß die Auslösung der Schwinggewichte genau in dem Augenblicke erfolgt, in welchem der Motor der Stern auf Dreieck umgeschaltet wird. Diese Kupplung nimmt somit eine Ausnahmestellung ein und verdient nicht nur wegen des Erfindungsgedankens, sondern auch wegen der Auswirkung auf die beim Anlaufvorgang auftretenden Stromstärken besondere Beachtung. Unbestreitbar zählt diese Kupp-

¹ Siemens-Zft. 1924, S. 140.

² Während der Drucklegung erfahren wir, daß die konstruktive Entwicklung der Albokupplung zu einer weiteren Vereinfachung geführt hat. Mit dieser neuen Anlaßkupplung (die sowohl als Anlaßriemenscheibe, als auch als Anlaßwellenkupplung ausgeführt werden kann) wird erreicht, daß je nach Wahl des Abwälzwinkels, unter welchem zugleich zur Überleitung der Umfangskraft späterhin benutzte Walzen einen die Fliehgewichte freigebenden Rollweg durchlaufen, der Einrückvorgang entweder auf den mechanischen Stoß bei Umschaltung von Stern auf Dreieck hin stattfindet oder aber in Abhängigkeit von einer wählbaren Zeitspanne, während welcher der Läufer genügend Zeit hat, hochzulaufen und der Schalter Zeit hat, zur Vollspannung überzugehen.

lung sowohl in bezug auf den Erfindungsgedanken als auch in konstruktiver Hinsicht zu den interessantesten Kupplungen.

Wenn ein Drehstrommotor, der in Sternschaltung annähernd auf synchrone Tourenzahl gekommen ist, auf Dreieck umgeschaltet wird, so bildet sich im Motor im ersten Augenblicke ein bremsendes Moment

aus, welches ruckartig in Erscheinung tritt. Dieses Verhalten des Motors benutzt der Erfinder dazu, um eine Verriegelung innerhalb der Kupplung freizugeben, so daß die Fliehgewichte in Tätigkeit treten. Beim Umschaltvorgang verläuft der Einschaltstrom nicht symmetrisch zur Nulllinie, denn dieser Strom setzt sich aus einer Wechselstrom- und einer Gleichstromkomponente zusammen (Ausgleichstrom). Die Wechselstromkomponente bildet das Drehfeld, welches vom ersten Augenblicke an mit synchroner Geschwindigkeit rotiert. Die Gleichstromkomponente erzeugt ein Gleichfeld, welches im Raume stillsteht und in seiner Stärke exponential abklingt. Es bilden sich in der Käfigwicklung des rotierenden Läufers infolge dieses Gleichfeldes Ströme aus, welche ein bremsendes Moment ausüben und mit einem Stoß auf die Scheibe verbunden sind.

Es war für den Erfinder von dem Gedanken bis zur Herstellung der Scheibe ein weiter, schwieriger Weg. Die heute auf dem Marke befindliche Scheibe weist gegenüber den Vorkonstruktionen eine fast überraschende Einfachheit im Aufbau auf.

Der Anfangszustand der Scheibe ist durch das Schnittbild links (Abb. 163) erkenntlich. Das mit der Welle fest verbundene Stück *B* nimmt die Fliehgewichte *S* mit, welche jedoch infolge der Lage der Verriegelungswalzen *C* der Fliehkraft nicht folgen können. Im Augenblicke der Umschaltung von Stern auf Dreieck tritt eine Relativbewegung der mit der Welle nicht fest verbundenen Fliehgewichte infolge der ruckartig auf den Läufer ausgeübten

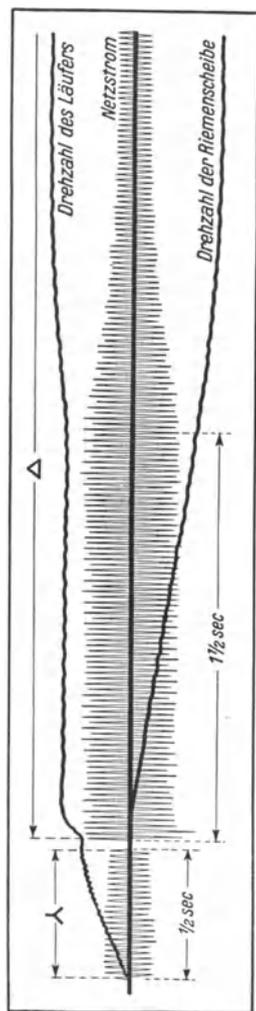


Abb. 162. Anlaufströme und Drehzahlen eines normalen Motors und der Scheibe in Verbindung mit einer SSW-Fliehkraftriemenscheibe bei Stern-Dreieckschaltung.

Bremswirkung auf. Hierdurch werden die Verriegelungsbolzen in die Aussparungen des Körpers *B* gebracht, wonach die Fliehgewichte unter Überwindung der Zugkraft der beiden Federn, welche die beiden Fliehgewichte miteinander verbinden, der Fliehkraft folgen können. Die Reibflächen A_1 und A_2 üben hiernach auf die eigentliche Scheibe

ein Bremsmoment aus, wodurch die Last bei stark veränderlichem Reibungskoeffizienten mitgenommen wird. Wenn der Motor stillgesetzt

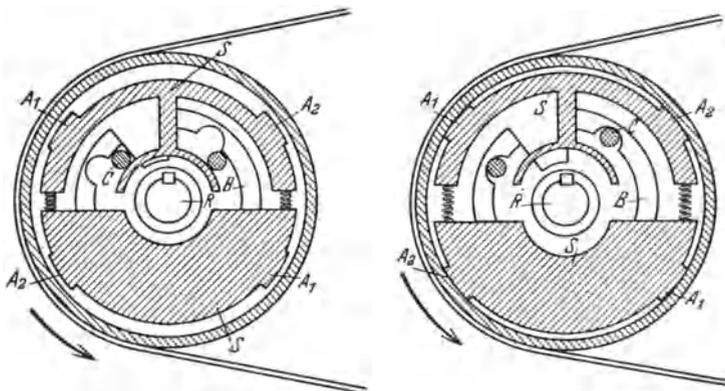


Abb. 163. Albo-Kupplung nach Obermoser.

wird, werden durch die Federkraft die Körper *S* wieder in ihre Anfangslage zurückgebracht. Ebenso nehmen die Verriegelungsbol-

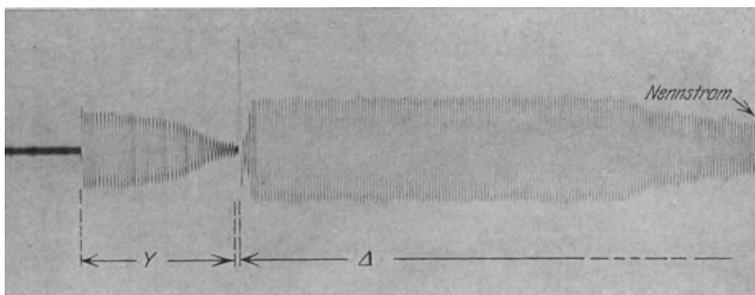


Abb. 164. Anlaufströme und Drehzahl des Läufers eines normalen Motors in Verbindung mit der Albo-Kupplung bei Stern-Dreieckschaltung.

zen *C*, die in einfachen Käfigen nach Art eines Wälzlagerkäfigs geführt werden, entweder hierbei oder spätestens bei Wiederinbetriebsetzung des Motors ihre Anfangslage auf ihrer Wälzbahn ein.

Die Bremsstücke *A* können an beliebigen Stellen des Umfanges der Fliehkörper *S* befestigt werden, wodurch die Kupplung

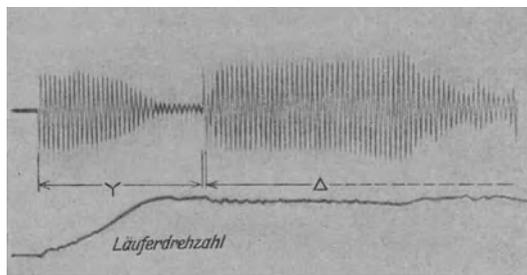


Abb. 165. Anlaufströme und Drehzahl des Läufers eines normalen Motors in Verbindung mit der Albo-Kupplung bei Stern-Dreieckschaltung.

sehr genau auf ein bestimmtes zu übertragendes Drehmoment eingestellt werden kann.

Die beiden Oszillogramme (Abb. 164 und 165) geben die Stromstärken wieder, die bei dieser Kupplung auftreten.

4. Die Elvola-Fliehkraftriemenscheibe.

(Lurgi-Apparatebau-Gesellschaft m. b. H., Frankfurt am Main.)

Während bei den bisher besprochenen Fliehkraftriemenscheiben die Bremswirkung in der Hauptsache entweder in Abhängigkeit von der Tourenzahl, oder, wie bei der zuletzt erwähnten Alboscheibe, in Abhängigkeit einer bei Umschaltung von Stern- auf Dreieckschaltung eintretenden Stoßwirkung eintritt, wird bei der Elvola-Fliehkraftriemenscheibe durch eine besonders angeordnete Auslösevorrichtung, welche für sich allein der Fliehkraft gehorcht, eine zeitliche Verzögerung in der Auswirkung der Fliehgewichte erreicht, derart, daß für die Betätigung

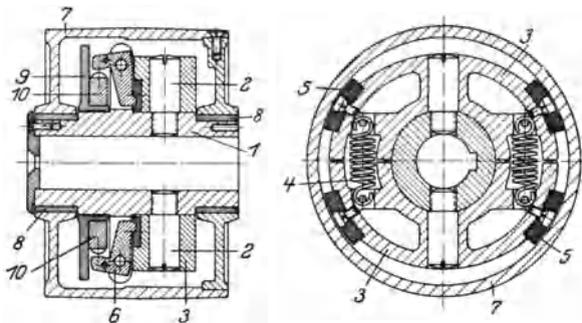


Abb. 166a. Elvola-Fliehkraftriemenscheibe für $\frac{J_a}{J_n} = 2,4$.

des Anlaßapparates (Stern-Dreieckschalter oder Ständeranlasser) eine relativ große Zeitspanne zur Verfügung steht, bevor die Bremswirkung eintritt.

Die Scheibe erhält hierdurch einen besonderen Wert, weil praktisch der Motor hierdurch vollständig leer bis zur ungefähr synchronen Tourenzahl angelassen werden kann. Es ist daher bei diesen Scheiben unter Verwendung eines Ständeranlassers oder auch eines Stern-Dreieckschalters mit eingebautem Vorschaltwiderstand möglich, den Ausgleichstrom zu unterdrücken.

In konstruktiver Hinsicht bietet die Scheibe eine interessante Bauart, die nachstehend kurz beschrieben werden soll.

Die Scheibe wird in zwei verschiedenen Bauarten ausgeführt, die sich lediglich durch die Anzahl der Fliehgewichte voneinander unterscheiden.

Bei der Bauart nach Abb. 166a ist für das Verhältnis Anlaufstrom: Normalstrom der Wert = 2,4 zugrunde gelegt.

Das auf die Welle aufzukeilende Mittelstück 1 ist mit 2 Mitnehmerbolzen 2 versehen, welche als Führung für die beiden Fliehgewichte 3 dienen. Diese Fliehgewichte stehen unter der Wirkung von Federn 4;

sie sind mit Bremsbelägen 5 ausgerüstet und für gewöhnlich durch den am Mittelstück gelagerten Riegel 6 gesperrt. Der Riemenscheibenkranz 7 ist auf den Kugel- oder Bronzelagern 8 auf dem Mittelstück 1 gelagert. Eine auf dem Mittelstück lose gelagerte Scheibe 9 trägt zwei z. B. durch eine Feder zusammengehaltene Fliehbacken 10. Diese Fliehbacken gehen deutlich aus der Abb. 166 a und aus der unten folgenden Abb. 166 b hervor.

Beim Einschalten läuft der Motor zusammen mit dem Mittelstück 1 rasch hoch, wobei die Fliehgewichte noch gesperrt bleiben. Es ist somit ein wirklicher Leeranlauf des Motors gewährleistet. Die lose auf dem Mittelstück 1 gelagerte Scheibe 9 mit dem Fliehbacken 10 braucht infolge ihres eigenen, genau bestimmten Trägheitsmomentes eine gewisse Zeit, bis sie dem Mittelstück 1 so weit nachgeeilt ist, daß sie mit ihm synchron läuft. Diese Zeit beträgt etwa 3 bis 6 Sekunden. Bevor dieser

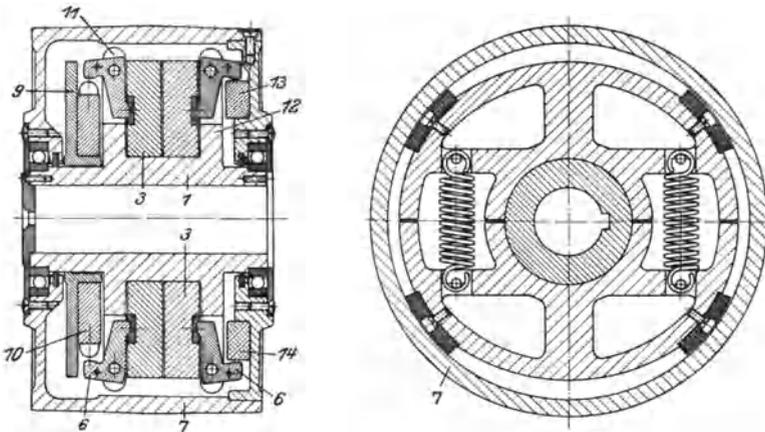


Abb. 166 b. Elvola-Fliehkraftriemenscheibe für $\frac{J_a}{J_n} = 1,6$.

Synchronismus erreicht ist, öffnen sich die an der Scheibe 9 sitzenden Fliehbacken 10 und veranlassen durch ihre noch bestehende Relativgeschwindigkeit gegenüber den Sperrhebeln 6 durch Anschlag gegen diese deren Ausrücken und dadurch die Auslösung der kuppelnden Fliehgewichte 3.

Da der Läufer eines Drehstrommotors in weniger als etwa einer Sekunde hoch läuft, die Auslösung der eigentlichen kuppelnden Fliehgewichte erst nach 3 bis 6 Sekunden stattfinden kann, so ergibt sich praktisch stets genügend Zeit, um in Ruhe die Umschaltung des Motors auf volle Spannung vorzunehmen.

Die Ausführungsform Abb. 166 b ist für das Verhältnis Anlaufstrom : Normalstrom gleich 1,6 gebaut; sie unterscheidet sich von der zuerst beschriebenen Ausführung dadurch, daß die Anzahl der Kupplungsfliehgewichte 3 verdoppelt ist. Es sind immer 2 Fliehgewichte nebeneinander angeordnet, wobei aber besondere Führungsbolzen fortgelassen sind und die Führung durch die Backen 11 und 12 des Mittelstückes 1 übernommen wird. Als Auslöseorgan für das zweite Fliehgewichtspaar 3 dienen

die auf dem angetriebenen Teil der Scheibe sitzenden durch eine Feder zusammengehaltenen Fliehgewichtshebel 13 und 14.

Der Einrückvorgang des linken Fliehgewichtspaares spielt sich genau wie bei der Ausführungsform nach Abbildung 166a ab. Durch die jetzt verhältnismäßig gering auftretende Bremswirkung wird die Last besonders sanft und ruhig mitgenommen. Die auf dem angetriebenen Teil der Scheibe befindlichen

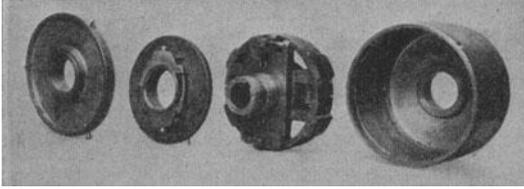


Abb. 167. Einzelteile der Elvola-Scheibe.

Fliehgewichtshebel 13 und 14 können entgegen der Wirkung ihrer Feder erst dann ausschlagen und dadurch die Sperrhebel 6 des zwei-

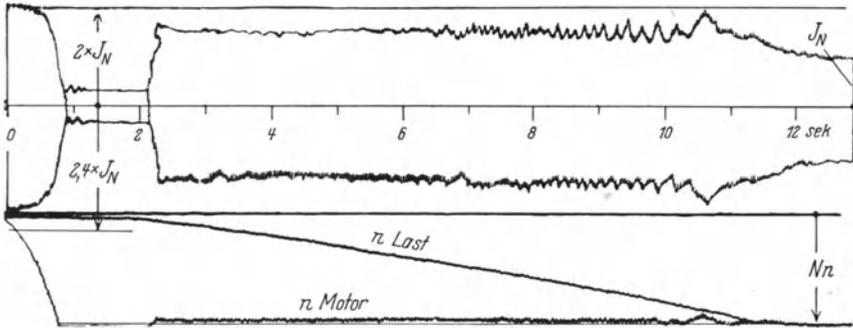


Abb. 168.

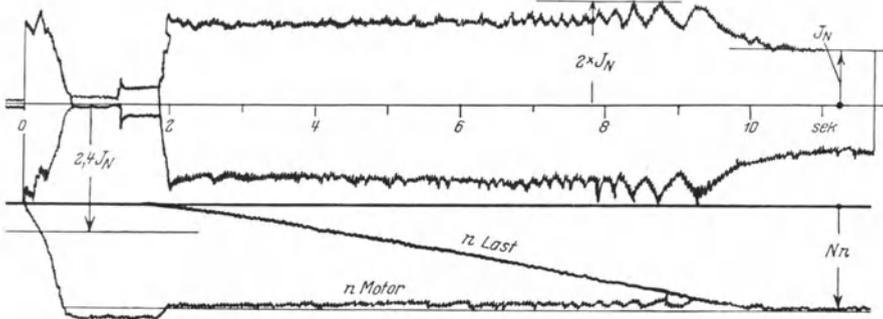


Abb. 169.

Abb. 168 und 169. Anlaufströme und Drehzahlen eines normalen Motors und der Scheibe in Verbindung mit einer Elvola-Scheibe für $\frac{J_a}{J_n} = 2,4$ bei Stern-Dreieckschaltung.

ten Kupplungsfliehgewichtspaares 3 entriegeln, dieses zweite Kupplungspaar also frei geben, wenn die anzutreibende Last ungefähr ihre volle Drehzahl erreicht hat.

Jedes einzelne der beiden Fliehgewichtspaare ist in Eigengewicht und Abmessung derart eingerichtet, daß ihr jedesmaliges Eingreifen keinen höheren Strom als den 1,3 bis 1,6fachen des Normalstromes hervorrufen kann, während die beiden Fliehgewichtspaare zusammen während des Betriebes eine etwa 2,5fache Überlastbarkeit der Kuppelung zulassen.

Die Ausführungsform nach Abb. 166 a ist für eine etwa 2fache Überlastbarkeit gebaut.

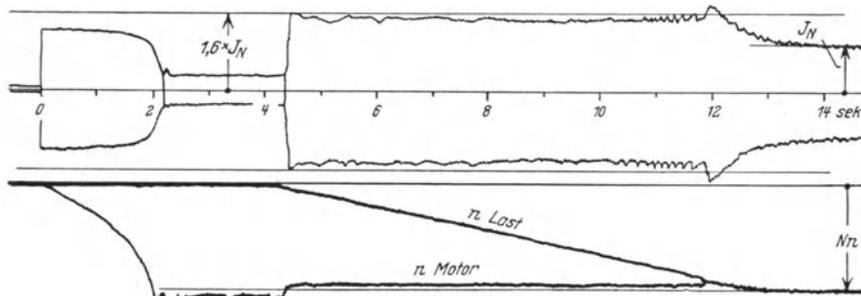


Abb. 170.

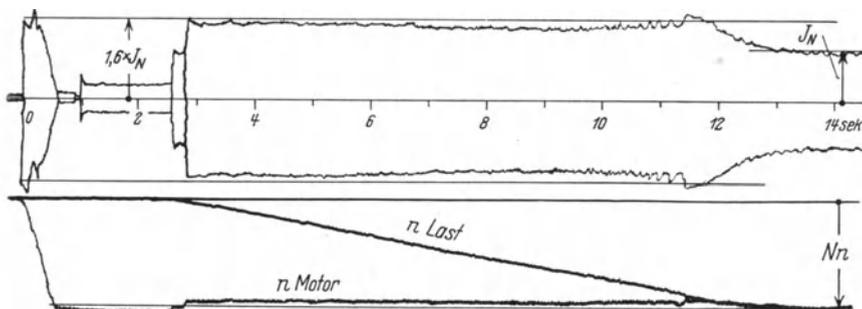


Abb. 171.

Abb. 170 und 171. Anlaufströme und Drehzahlen eines normalen Motors und der Scheibe in Verbindung mit einer Elvola-Scheibe für $\frac{J_a}{J_n} = 1,6$ bei Stern-Dreieckschaltung.

Die Abb. 167 zeigt die Kuppelung in auseinandergenommenem Zustande und läßt erkennen, daß die einzelnen Teile und der Zusammenbau verhältnismäßig einfach sind.

Die Scheibe kann ihrem ganzen Aufbau nach ebensogut mit einem Stern-Dreieckschalter als auch mit einem Statoranlasser benutzt werden. Im letzteren Falle kann auch der bei Verwendung eines Stern-Dreieckschalters beim Umschalten auftretende Ausgleichstrom vermieden werden.

Es sei noch erwähnt, daß die Lurgi-Apparatebau-Gesellschaft einen Statoranlasser mit Magnetsperrung in den Handel bringt, welcher derart wirkt, daß im Augenblicke des Abklingens des ersten Stromstoßes, also

dann, wenn der Läufer die normale Tourenzahl erreicht hat, die Magnet-sperrung auslöst und der Schalter in die Endlage springt. Hierdurch werden Bedienungsfehler unmöglich gemacht.

In der Technischen Hochschule zu Charlottenburg wurden 2 Scheiben für das Verhältnis Anlaufstrom: Normalstrom $\frac{J_a}{J_n} = 2,4$ und $\frac{J_a}{J_n} = 1,6$ einer Prüfung unterzogen, wobei die in den vier obenstehenden oszillographischen Aufnahmen aufgenommenen Werte gefunden wurden (Abb. 168—171).

5. Die Fliehkraftriemenscheibe der Pöge-Elektrizitäts-Akt.-Ges., Chemnitz.

Die von dieser Gesellschaft unter dem Namen DEM in den Handel gebrachte Scheibe nimmt insofern gegenüber den bislang beschriebenen Scheiben eine Ausnahmestellung ein, als die Gewichte lediglich der Flieh-

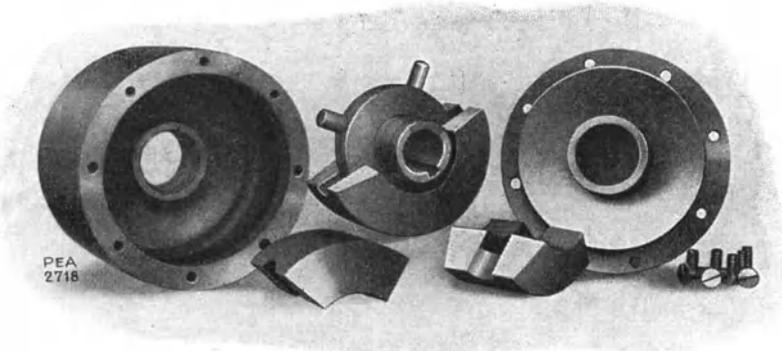


Abb. 172. Einzelteile der DEM-Scheibe von Pöge.

kraft folgen und durch keine Gegenfeder oder irgendeine sonstige Einrichtung in ihrer Bewegung gehemmt werden. Damit trotzdem eine sanfte und gleichmäßig zunehmende Fliehkraftwirkung vorhanden ist, bedient man sich eines höchst einfachen Mittels, welches darin besteht, daß die Scheibe mit Öl von einer bestimmten Beschaffenheit gefüllt wird. Es soll hierdurch erreicht werden, daß der Reibungskoeffizient während des ganzen Anlaufvorganges eine stark kontinuierliche Veränderung erfährt, und daß hierdurch die Last allmählich mitgenommen wird.

Der einfache Aufbau der Scheibe geht aus der Abb. 172 hervor.

Die Scheibe besteht aus dem Scheibentopf mit dem Verschußdeckel und einem Sicherungsring, ferner aus dem sternförmigen Scheibenkern mit seinen sechs Zacken, den Fliehklötzen und einer kleinen Menge Öl, das der Scheibe die besonderen charakteristischen Merkmale verleiht. Es sind also nur sehr wenige und konstruktiv einfache Teile vorhanden. Die untere Abb. 173 zeigt die Scheibe zusammengebaut auf dem Wellenstumpf aufgezogen. Der Kern mit seinen sechs Zacken sitzt mittels Keil

befestigt unmittelbar auf der Welle. Auf den Zacken ruhen die Fliehklotze, die durch die beiden Mitnehmerstifte mitgenommen werden.

Die Scheibe ist ohne weiteres für Rechts- und Linkslauf verwendbar; sie besitzt höchstens 6 Fliehklotze; die Anzahl der Fliehklotze richtet sich nach der zu übertragenden Leistung. Bei halber Anzahl der Fliehklotze überträgt zum Beispiel die Scheibe die halbe Leistung ihrer maximal möglichen Leistung.

Während des Anlaufvorganges bleibt der Scheibentopf *C*, auf dem der Riemen läuft, so lange in Ruhe und damit zugleich auch die mitzunehmende Last, bis durch den Anpreßdruck der Fliehklotze *B* der Topf mitgenommen wird. Solange die Scheibe in Ruhe ist, befindet sich das Öl im unteren Teile *G* des Scheibentopfes. Wenn der Läufer sich dreht, werden die Fliehklotze durch die Zacken mitgenommen und mit dem Öl in Berührung gebracht, welches als Polster hierbei auf die Reibflächen *F* getragen wird. Hierdurch wird ein längeres Gleiten zwischen den Fliehklotzen und den Reibflächen ermöglicht, wobei der Läufer ohne wesentliche Belastung auf eine genügend hohe Tourenzahl kommt. Mit zunehmender Beschleunigung des Läufers wird das Öl teils durch die Fliehkraft und teils durch den größer werdenden Anpreßdruck verdrängt; der Reibungskoeffizient erfährt kontinuierlich eine Vergrößerung, bis ein maximaler Wert erreicht wird, welcher dem verlangten Drehmoment entspricht.

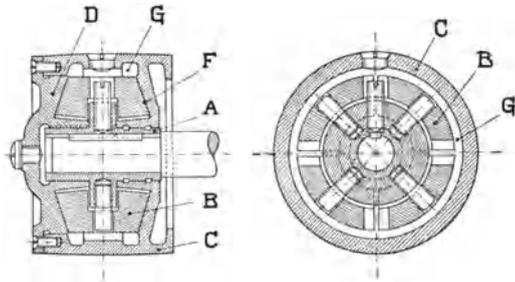


Abb. 173. Konstruktion der DEM-Scheibe von Pöge.

Der Wert der ölgefüllten Fliehkraftriemenscheibe besteht nicht nur darin, daß der Läufer praktisch ohne Last auf eine genügend hohe Tourenzahl gebracht wird, sondern auch darin, daß die Mitnahme der Last nicht ruckartig, sondern langsam und stetig erfolgt; ferner auch darin, daß eine Abnutzung der gegeneinander reibenden Teile möglichst vermieden wird.

Die Ölwirkung wird natürlich sehr stark von den spezifischen Eigenschaften des Öles, welches verwandt wird, abhängen. Die Pöge-Elektrizitäts-Gesellschaft sagt in ihren Prospekten, daß sie hierzu ein besonderes, auch im Handel befindliches Öl liefert, welches seinen Zustand mit der Temperatur nur wenig ändert, so daß auch bei tiefsten Temperaturen eine einwandfreie Wirkung der Scheibe gewährleistet bleibt.

Aus den nachstehenden von der Firma selbst aufgenommenen Oszillogrammen geht die Wirkungsweise der Scheibe hervor. Die Riemenscheibe mußte bei diesen Versuchen gegen ein Vollastdrehmoment anlaufen.

Das Oszillogramm Abb. 174 zeigt die Stromstärke während des Anlaufes bei Verwendung eines Stern-Dreieckschalters. Das Oszillo-

gramm Abb. 175 zeigt die Beschleunigung des Läufers und der eigentlichen Last.

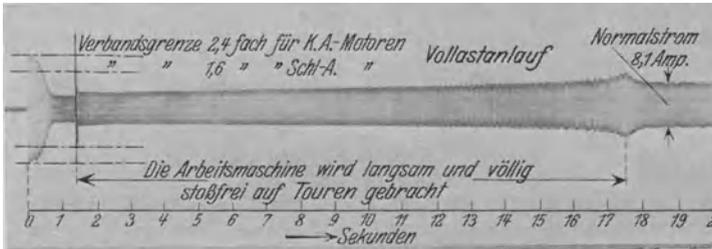


Abb. 174. Anlaufströme eines normalen Motors mit DEM-Scheibe gegen Vollast bei Stern-Dreieck-Schaltung.

In dem Oszillogramm Abb. 176 ist der Stromstoß während des Umschaltens besonders herausphotographiert. Der Ausgleichstrom ist hierbei

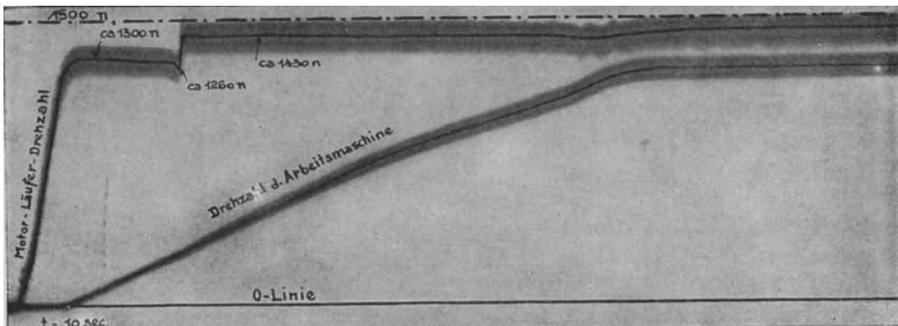


Abb. 175. Drehzahlen eines normalen Motors und der Arbeitsmaschine in Verbindung mit einer DEM-Scheibe bei Stern-Dreieck-Schaltung.

zu erkennen; er macht sich nur während einer halben Periode bemerkbar. Der eigentliche Umschaltstromstoß verläuft außerordentlich schnell; im allgemeinen dürfte aber wohl die Dauer dieses Stromstoßes länger

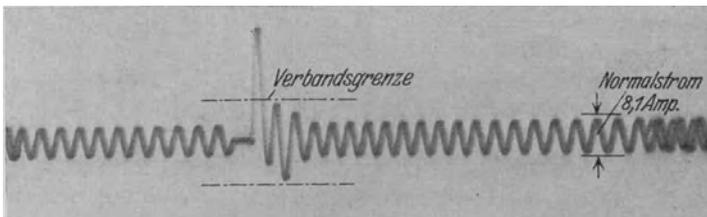


Abb. 176. Stromstoß und Ausgleichstrom bei Umschaltung von Stern auf Dreieck eines Motors in Verbindung mit DEM-Scheibe.

sein, so daß hier eine besonders günstige, an sich jedenfalls sehr interessante Aufnahme vorliegt.

Die folgenden zwei weiteren Diagramme (Abb. 177 und 178) zeigen die Anlaufverhältnisse bei direkter Einschaltung des Motors. Die Verbandswerte können hierbei aus der Natur des Motors heraus natürlich nicht eingehalten werden. Die Bilder zeigen aber, daß schon nach 7 Perioden, also nach 0,14 Sek., zulässige Stromwerte erreicht werden.

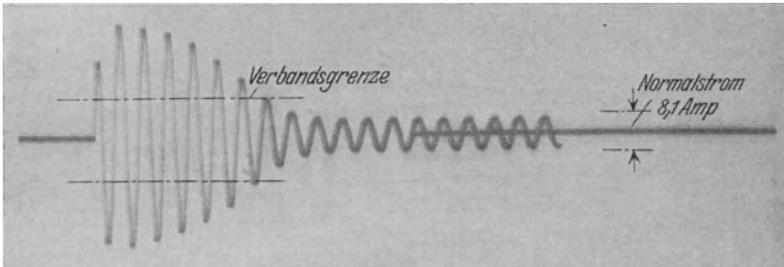


Abb. 177.

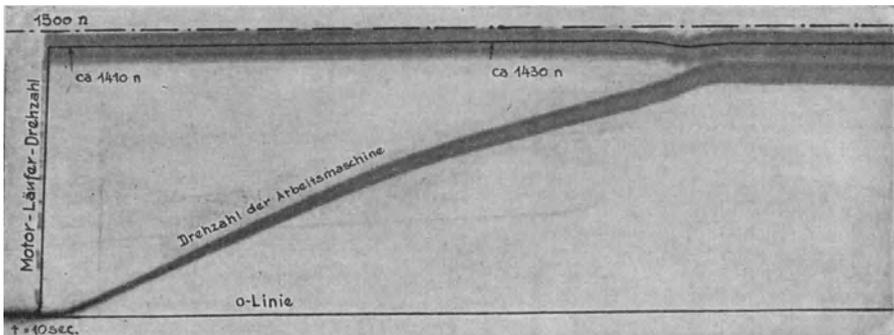


Abb. 178.

Abb. 177 und 178. Anlaufstrom und Drehzahl eines normalen Motors und der Scheibe in Verbindung mit einer DEM-Scheibe bei direkter Einschaltung.

6. Fliehkraftriemenscheibe der Metalluk Handels- und Fabrikationsgesellschaft.

Diese Scheibe weicht in ihrem Aufbau und Konstruktionsprinzip gänzlich von allen anderen Scheiben ab.

Aus der Abb. 179 geht ohne weiteres der Grundgedanke hervor. Die Scheibe besteht in der Hauptsache aus dem Scheibentopf, auf welchem der Riemen läuft und aus einem schaufelförmigen Innenteil, welcher auf der Achse festsetzt. Die inneren Kammern dienen zur Aufnahme von granuliertem Füllgut in Gestalt von kleinen Metallkugeln. Beim Anlauf der Scheibe und besonders bei starker Beschleunigung des Innenteiles,

z. B. bei Umschaltung von Stern auf Dreieck, geraten die an den Reibflächen des Scheibentopfes liegenden Kugeln zunächst in eine rollende Bewegung. Bei höherer Umfangsgeschwindigkeit wirken die dahinter

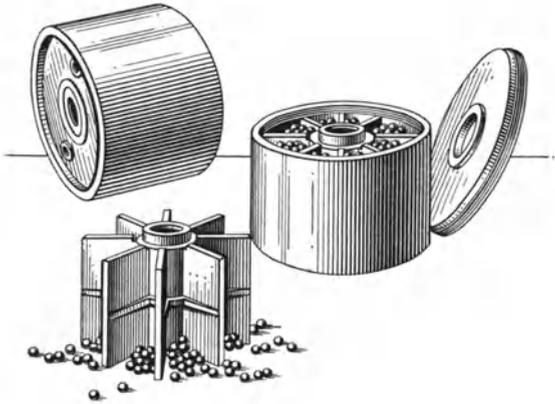


Abb. 179. Einzelteile der Metalluk-Scheibe.

liegenden Kugeln bremsend auf die vorderen Kugeln, bis die Relativbewegung aufhört und die Kupplung ohne Schlupf arbeitet.

Durch ein richtig bemessenes Gewicht von Kugeln wird die Leistung der Scheibe festgelegt.

Durch die Kugeln soll ein durchaus sanfter Anlauf erreicht werden; vor allem sollen Bremsstöße, wie sie unter Umständen bei anderen Fliehkraft-

riemenscheiben auftreten können, vermieden werden, da in allen diesen Fällen sofort eine rollende Bewegung der Kugeln eintreten müßte.

Die Scheibe zeichnet sich auf jeden Fall durch einen höchst einfachen Aufbau aus. Wahrscheinlich ist auch, daß eine Abnutzung der Reibflächen sowie der Kugeln nicht zu befürchten ist; ferner, daß die Scheibe stets in gleicher Weise arbeiten wird, da Änderungen im Reibungskoeffizienten nicht zu befürchten sind.

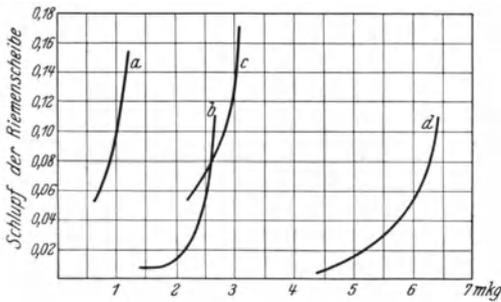


Abb. 180. Schlupf der Metalluk-Scheibe gegenüber der Motorwelle bei verschiedenen Scheibenfüllungen und Umdrehungen.

Von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt wurde eine Scheibe für eine Über-

tragung von 5 PS bei $n = 1460$ Umdr. geprüft. Die Normalfüllung betrug 3 kg, der Scheibendurchmesser 110 mm.

In der Abb. 180 ist der von der Reichsanstalt ermittelte Schlupf der Riemenscheibe gegenüber der Motorwelle bei $n = 1000$ und $n = 1500$ bei halber und ganzer Füllung wiedergegeben.

Kurve a:	Scheibenfüllung	50%,	$n = 1000$	Umdrehungen
„ b:	„	100%,	$n = 1000$	„
„ c:	„	50%,	$n = 1500$	„
„ d:	„	100%,	$n = 1500$	„

Bei voller Füllung kann die Scheibe bei $n = 1500$ Umdr. (Kurve d) etwa das 2fache Drehmoment übertragen. Der Schlupf würde hier ungefähr 0,02% ausmachen.

7. Die Fliehkraftriemenscheibe „Elektroma“¹.

Es handelt sich hier nicht nur um die Fliehkraftriemenscheibe allein, sondern um ein neuartiges, wohl beachtliches Anlaßverfahren. Der Motor wird nicht, wie in allen anderen Fällen, mittels eines Stern-Dreieckschalters, sondern grundsätzlich mittels eines Ständeranlassers in Verbindung mit einer Fliehkraftriemenscheibe eingeschaltet. Hierdurch ergeben sich ganz neue Anlaßbedingungen, welche im nachstehenden näher erläutert werden sollen.

Die Fliehkraftriemenscheibe unterscheidet sich durch ihre besondere Konstruktion von anderen Scheiben insofern, als die Fliehgewichte nicht im Inneren der Scheibe, sondern in einer besonderen Kammer untergebracht sind. Da man nicht an den Durchmesser der Scheibe gebunden ist, läßt sich ein größerer Schwerpunktsdurchmesser anwenden als es sonst möglich wäre. Die Fliehgewichte können somit, da das Übertragungsmoment mit der dritten Potenz des Durchmessers wächst, unter sonst gleichen Verhältnissen wesentlich leichter gemacht werden.

In der Abb. 181 bedeutet *a* den Mitnehmer, welcher fest auf dem Wellenstumpf aufgebracht ist. Dieser trägt die Fliehgewichte *b*, die zunächst durch Federn *c* gehalten werden, die den Fliehgewichten eine der Fliehkraft entgegengesetzt gerichtete Vorspannung geben, derart, daß etwa bei 70% der normalen Drehzahl der Gegenzug der Federn *c* aufgehoben wird. Von da an steigt das Übertragungsdrehmoment rasch an, wie dies früher schon erläutert wurde.

Auf den Fliehgewichten befinden sich Bremsbeläge, die einen guten Reibungskoeffizienten besitzen. Der Ständeranlasser besitzt mehrere Stufen. Auf der Vorstufe tritt etwa nur der 1,5fache Wert des normalen Stromes auf (Abb. 182). Bei der ersten Einschaltstufe erhalten wir den 1,9fachen Wert, bei dem sich der völlig unbelastete Läufer in Bewegung setzt und sich bis zu dem Schnittpunkt *a* der Drehmomentenkurve mit der Kurve des Übertragungsdrehmomentes der Kupplung beschleunigt. Auf der nun folgenden zweiten Einschaltstufe erhält man wiederum den etwa 1,9fachen Strom. Der Läufer erhält eine weitere Beschleunigung bis zum Schnittpunkt *b* der Drehmomentenkurve auf der zweiten Einschaltstufe mit der Kurve des Übertragungsmomentes. Es folgt nunmehr die dritte Einschaltstufe mit wiederum dem 1,9fachen

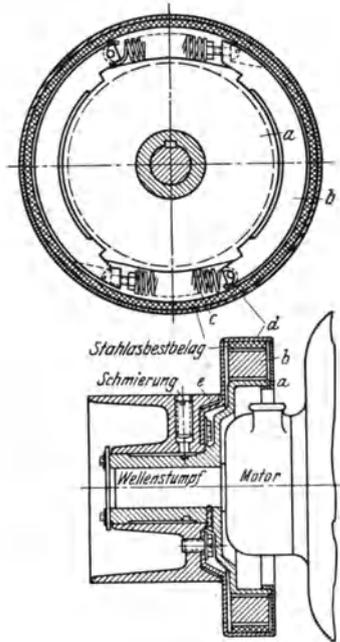


Abb. 181. Konstruktion der Elektroma-Scheibe.

¹ Früher von den Klöckner-Works hergestellt.

Strome und dem Schnittpunkte *c*; darauf wird der Anlasser kurzgeschlossen, wobei wieder der gleiche Stromstoß auftritt und das etwa 1,5fache Übertragungsmoment im Schnittpunkt *d* erreicht wird. Der Läufer erfährt eine weitere Beschleunigung bis zu dem Punkte *e*, welcher der Nennbelastung entspricht.

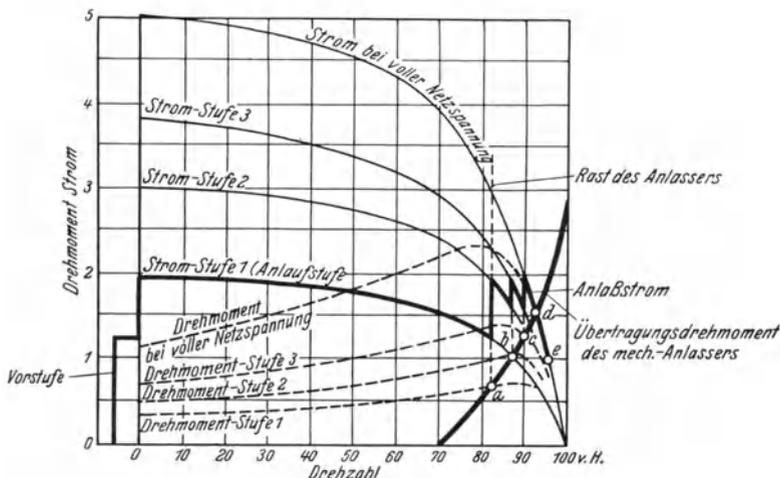


Abb. 182. Anlaufströme und Anlaufmomente eines normalen Motors in Verbindung mit einer Elektroma-Scheibe und einem Ständeranlasser.

Der Anlaufvorgang entspricht hierbei, abgesehen von der absoluten Höhe der Stromstärke, dem Anlaufvorgange bei einem Schleifringläufer mit Anlasser, indem die Stromstärke fast immer auf derselben Höhe gehalten wird.

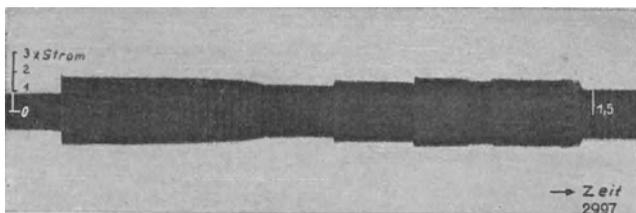


Abb. 183. Anlaufströme eines normalen Motors in Verbindung mit einer Elektroma-Scheibe und einem Ständeranlasser.

Das Oszillogramm Abb. 183, welches von den Eltwerken aufgenommen ist, zeigt den Anlaßstrom bei einem normalen Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer in Verbindung mit der Elektroma-Anlaßvorrichtung.

Die Eigenschaften dieses neuen Anlaßverfahrens kennzeichnen sich wie folgt:

Durch eine Vorstufe kann ein äußerst niedriger Einschaltstrom erzielt werden. Der Ausgleichstrom, welcher sich bei Stern-Dreieckschal-

tung ausbildet, fällt fort. Beim Anlassen mit Vollast wird ein 1,9facher Wert des normalen Stromes nicht überschritten. Das Netz wird praktisch gleichmäßig während des Anlaßvorganges belastet. Die Installation wird im Vergleich mit einem Stern-Dreieck-Anlaßverfahren einfacher, da nur 3 Leitungen zwischen Anlasser und Motor notwendig sind; andererseits wird der Anlasser selbst etwas teurer sein als der Stern-Dreieckschalter. Die Motoren werden für Sternschaltung anstatt für Dreieckschaltung gewickelt, womit eine gewisse Verbilligung des Motors erzielt wird.

Die Übertragung des Lastdrehmomentes erfolgt allmählich, wodurch Stöße auf die anzutreibende Maschine vermieden werden.

Die elektromechanische Anlaßvorrichtung stellt somit zweifellos einen Fortschritt in der Verwendungsmöglichkeit des Kurzschlußmotors dar.

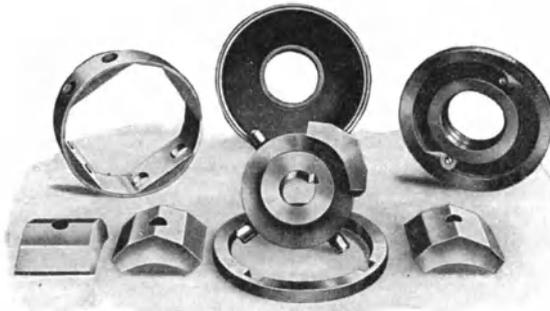


Abb. 184. Einzelteile der DEM-Eglo-Scheibe.

8. Die DEM-Eglo-Scheibe¹.

Die Scheibe entspricht in der Hauptsache genau dem Aufbau der beschriebenen DEM-Scheibe mit der auf den Wellenstumpf aufzuziehenden sternförmigen Nabe, dem Riemenscheibenkörper (Scheibentopf mit Verschußdeckel) und den Fliehklotzen. Außerdem befindet sich bei dieser Scheibe ein Anlaufring, welcher eine wichtige Aufgabe zu erfüllen hat (Abb. 184).

Beim Anlauf wird zunächst der Nabenstern, welcher die Fliehklotze führt, in Bewegung gesetzt. Die Klötze erfahren durch den Anlaufring eine Sperrung derart, daß sie sich nicht sofort weiter nach außen bewegen können. Dagegen wird der in der Scheibe lose eingesetzte Anlaufring von den Fliehklotzen mitgenommen, die bei weiterer Steigerung der Drehzahl infolge ihrer besonderen Form eine Druckkomponente in tangentialer Richtung auf den Ring ausüben, sodaß der Ring gegenüber den Fliehklotzen eine Voreilung erfährt. Hierdurch wird der Weg für das Fassen der Klötze im Konus des Scheibentopfes frei, sodaß letzterer von den Klötzen mitgenommen wird. Infolge der

¹ Hersteller: Ernst & G. Lohoff, Saarbrücken.

ebenso wie bei der DEM-Scheibe vorhandenen Ölfüllung geschieht die Mitnahme des Scheibentopfes allmählig, wodurch stärkere Stromstöße vermieden werden. Von dem Augenblicke des Einschaltens des Motors bis zur Mitnahme des Scheibentopfes vergeht eine Zeit von etwa 4 Sekunden, welche für die Beschleunigung des Läufers auf seine volle Tourenzahl und ebenso für die Umschaltung von Stern auf Dreieck bzw. für die Betätigung des Ständeranlassers genügt.

Der Motor kann auf diese Weise vollständig leer anlaufen. Das Oszillogramm Abb. 185, von dem Fabrikanten zur Verfügung gestellt, zeigt die Stromstärke eines gegen das volle Drehmoment anlaufenden

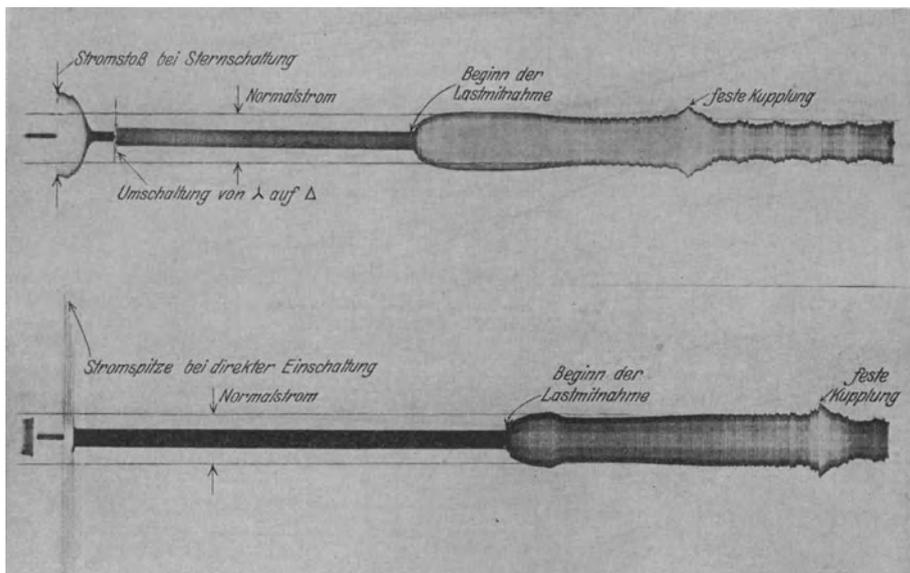


Abb. 185. Anlaufströme eines normalen Motors in Verbindung mit einer DEM-Eglo-Scheibe bei Stern-Dreieck-Schaltung und direkter Einschaltung.

Motors, und zwar einmal bei Stern-Dreieck-Schaltung und ferner bei direkter Einschaltung.

Die Scheibe wurde auf dem Prüffeld der Deutschen Elektrizitätswerke, Garbe, Lahmeyer & Co. Aachen untersucht, und zwar in Verbindung mit einem Motor für 3 PS, 220 V, 8,2 Amp., 1430 Umdr.

Bei Einschaltung in Sternschaltung wurde der normale Sternschaltungsstromstoß gemessen. Der Läufer beschleunigt sich auf etwa 1450 Umdrehungen.

Bei Umschaltung von Stern auf Dreieck erfolgte der 2. Stromstoß in Höhe von etwa 14 Amp. (etwa 1,7fach).

Nach etwa 4 Sekunden wurde der Riemenscheibentopf mitgenommen. Während des Hochlaufens der Riemenscheibe, welche eine Maschine antrieb, durch welche der Motor voll belastet wurde, waren 2 Stromstöße

wahrnehmbar, die aber nicht wesentlich über dem Nennstrom lagen. Diese Stromstöße werden durch die Mitnahme des Scheibentopfes und später durch Übergang von dem Zustand der gleitenden Reibung in den Zustand der Reibung der Ruhe hervorgerufen.

Dieser Anlaufvorgang entspricht ziemlich genau dem Anlaufvorgange, wie er durch das vorstehende Oszillogramm dargestellt wird.

Die Scheibe wurde hiernach ohne den Sperring geprüft. Hierbei fiel die Zeitverzögerung in der Mitnahme des Scheibentopfes fort; die Scheibe verhielt sich in diesem Zustande genau wie die früher beschriebene DEM-Scheibe. Die Prüfung wurde mehreremal mit demselben Ergebnis wiederholt.

Ob diese Ergebnisse unter allen Umständen und bei allen Scheiben stets erzielt werden, müssen die weiteren praktischen Ergebnisse zeigen. Es ist jedenfalls darauf hinzuweisen, daß keine Zwangsläufigkeit in der zu Anfang vorhandenen gegenseitigen Stellung der Fliehklotze und des Anlauftringes vorhanden ist, so daß immerhin der Fall denkbar ist, daß die Fliehklotze nicht immer die gedachte Sperrung erfahren. Ohne Frage stellt aber diese Scheibe einen weiteren Fortschritt auf dem Gebiete der Fliehkraftriemenscheiben dar.

9. Die Fliehkraftriemenscheibe nach Betrenot.

In der französischen Zeitschrift *Revue générale de l'électricité*¹ finden wir die Beschreibung einer neuartigen Fliehkraftriemenscheibe, die erwähnenswert ist und deshalb hier beschrieben werden soll.

Die Fliehgewichte sind stark unterteilt, was den Vorteil mit sich bringt, daß die einzelnen Fliehgewichte sicherer wirken als bei schwacher Unterteilung.

Die eigentliche Riemenscheibe 7 (Abb. 186) sitzt lose auf der Welle, während der innere Teil fest mit der Welle verkeilt ist. Eine Schar von Fliehgewichten 5 ist auf Hebeln 3, die um den Drehpunkt 4 an dem mit der Welle fest verbundenen Teil 2 beweglich sind, befestigt. Diese Hebel werden durch Gegenfedern 6 festgehalten. Eine andere Schar von Fliehgewichten 14 sitzen auf den Hebeln 11, die um den Drehpunkt 12 an der eigentlichen Riemenscheibe beweglich sind und ebenfalls durch Federn 13 in ihrer Ruhelage festgehalten werden. Die keilartig ausgebildeten Fliehgewichte greifen in den Keilnuten 10 bzw. 15 an.

Der Anlaufvorgang ist derart, daß zunächst die Fliehgewichte 5 die Riemenscheibe mitnehmen. Hierauf treten die Fliehgewichte 14 in Tätigkeit, die die eigentliche Riemenscheibe auf volle Geschwindigkeit bringen.

Der Verfasser weist in dem angezogenen Artikel nach, daß sich die beiden Abschnitte der Entwicklung des Drehmomentes in enge Beziehung

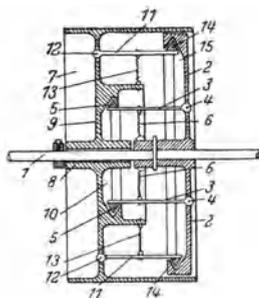


Abb. 186. Fliehkraftriemenscheibe nach Betrenot.

¹ Betrenot, J.: *Rev. gén. de l'électr.* 1928, S. 541.

zu der Zugkraft des Motors durch genaue Einstellung der Gegenfedern und Wahl der Größe der Fliehgewichte bringen lassen.

Der Aufbau der Riemenscheibe geht aus den beiden Bildern der Abb. 187 hervor, in denen dieselben Zahlen wie in Abb. 183 wiederkehren. Es wird durch eine gute Ventilation dafür gesorgt, daß die

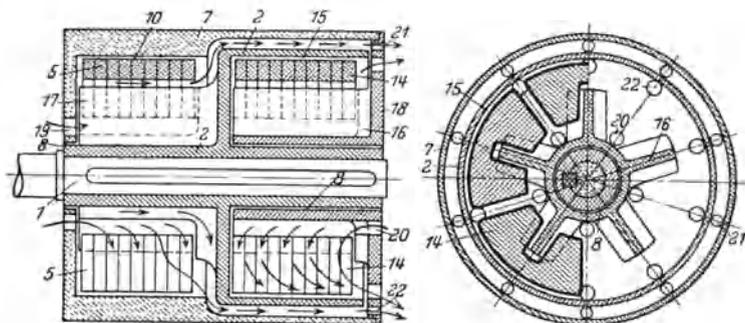


Abb. 187. Fliehkraftriemenscheibe nach Betrenot.

Scheibe gekühlt wird, indem durch Öffnungen 19 und 20 die Kühlluft direkt über der Welle angesaugt wird, um über die ganze Kupplung hinwegzustreichen und aus den Öffnungen 21 und 22 nahe am Umfange ausgeblasen zu werden.

B. Einteilung der Fliehkraftriemenscheiben.

Man kann grundsätzlich 3 Arten von Fliehkraftriemenscheiben unterscheiden, die voneinander gänzlich abweichende Anlaufcharakteristiken besitzen.

Bei der ersten Art, der reinen Fliehkraftriemenscheibe, unterliegen die Fliehgewichte ausschließlich der Zentrifugalkraft; die bremsende Wirkung kann somit schon bei Erreichung einer sehr geringen Umdrehungszahl des Läufers ihren Anfang nehmen.

Bei der zweiten Art ist durch eine Gegenfederung erreicht worden, daß der Läufer zuerst ganz bremslos anläuft und erst von einer gewissen Tourenzahl ab, nachdem die Fliehkraft der entgegengerichteten Federkraft das Gleichgewicht hält, belastet wird. Wir können sie als Fliehkraftriemenscheiben mit Vorspannung bezeichnen.

Bei der dritten Art ist zwischen dem Einschalten und dem Auslösen der Fliehgewichte eine zeitliche Verzögerung der Auslösung der Fliehgewichte eingeschaltet, die gestattet, den Anlauf in der Sternschaltung vollständig unbelastet erfolgen zu lassen. Wir können sie Fliehkraftriemenscheiben mit Zeitverzögerung nennen.

Eine Sonderstellung in dieser dritten Gruppe nimmt die Albo-Kupplung ein, bei welcher das Eingreifen der Fliehkkräfte zwangsläufig mit dem Umschalten von Stern auf Dreieck erfolgt.

Die charakteristischen Eigenschaften der Fliehkraftriemenscheiben sollen nach dieser dreifachen Gruppierung an Hand eines Artikels von

Kloß¹, der durch die Versuche des Materialamtes des Schweizer Elektrotechnischen Vereins ergänzt wird, näher beschrieben werden. Die Abb. 188 bis 190 sind dem Aufsatz von P. Schmid² über diese Versuche entnommen.

1. Reine Fliehkraftriemenscheiben.

In dem oberen der beiden Schaubilder Abb. 188a und b sind die Drehmomentenkurven M_λ bei Stern- und M_Δ bei Dreieckschaltung, sowie das durch die Fliehgewichte übertragbare Drehmoment M_K in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl aufgetragen. In dem unteren Schaubild sind die zugehörigen Ständerströme (unter Fortlassung der Ausgleichströme) eingezeichnet.

Wenn der Motor in Sternschaltung angelassen wird, so kann die Umdrehungszahl sich nicht über den Schnittpunkt C der beiden Kurven M_λ und M_K hinaus erhöhen, vorausgesetzt, daß der Motor mit Last anlaufen muß. Die Fliehgewichte gleiten hierbei, und die abgegebene Arbeit setzt sich in Wärme um. Bei Umschaltung von Stern auf Dreieck erfolgt infolge der Stromunterbrechung ein Abfall in der Umdrehungszahl von C nach C_2 , wobei gleichzeitig das übertragbare Drehmoment der Drehmomentkurve M_K von dem Wert C auf den Wert C_2 sinkt.

Das antreibende Moment des Motors erhöht sich aber auf den Wert C_3 , es tritt eine starke Beschleunigung der Umdrehungszahl ein bis zu der Höhe, wo die Kurve M_K den Wert der Normallast N erreicht hat. Von hier ab werden die Last und der Läufer gemeinsam bis zu dem Punkte E beschleunigt. Da der Reibungskoeffizient sich bei Abnahme der Relativgeschwindigkeit zwischen den Fliehkraftgewichten und der Riemenscheibe etwas ändert, so tritt hierdurch eine kleine Erhöhung des übertragbaren Drehmomentes M_K ein. Die gestrichelte Kurve soll das übertragbare Drehmoment darstellen, wenn die Relativgeschwindigkeit gleich Null ist. Anstatt des Schnittpunktes E erhält das übertragbare Drehmoment in dem Augenblicke, in welchem die Relativ-

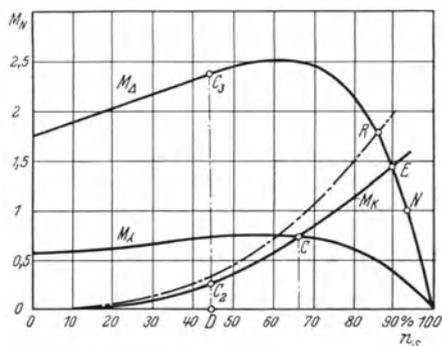


Abb. 188 a.

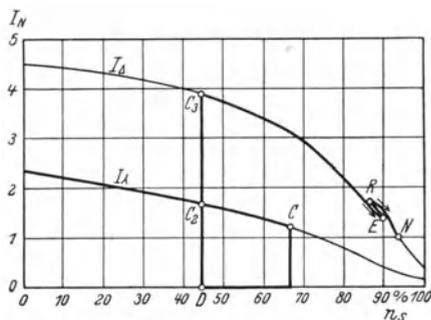


Abb. 188 b.

Abb. 188 a und 188 b. Drehmoment und Stromstärken bei Verwendung der reinen Fliehkraftriemenscheibe.

¹ ETZ 1927, S. 721. ² Bulletin des SEV. 1928, H. 7.

geschwindigkeit zu Null wird, den Wert R auf der gestrichelten Kurve. Hierbei tritt zugleich ein geringer Abfall der Umdrehungszahl ein. Von dem Punkte R ab nimmt die Beschleunigung der Last und des Läufers gemeinsam zu, bis in dem Punkte N der Beharrungszustand erreicht ist.

Aus dem unteren Schaubild ergibt sich der Verlauf des Ständerstromes. Es treten sehr hohe Anlaufströme auf, die weit über das zulässige Maß hinausgehen.

Diese reinen Fliehkraftriemenscheiben finden daher auch keine all-

gemeine Einführung; sie werden deshalb auch auf dem Markte selten anzutreffen sein.

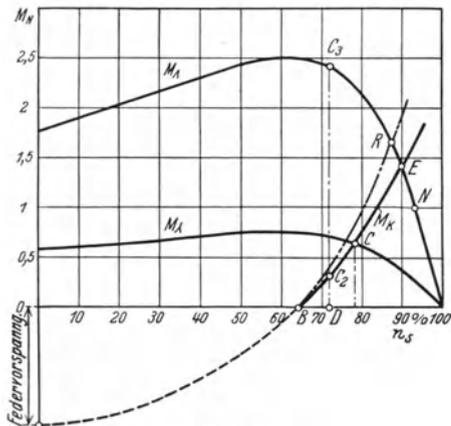


Abb. 189 a.

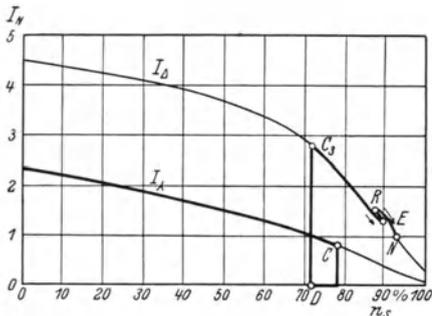


Abb. 189 b.

Abb. 189 a und 189 b. Drehmoment und Stromstärken bei Verwendung einer Scheibe mit Vorspannung.

Der Motor läuft bis zum Punkte B vollständig leer hoch. Die entsprechende Umdrehungszahl liegt meistens etwa bei 60 bis 70 % der normalen Umdrehungszahl. Vom Punkte B ab üben die Fliehkewichte eine bremsende Wirkung aus, der Läufer beschleunigt sich bis zu dem Schnittpunkt C der M_A -Kurve und der M_K -Kurve. Bei der jetzt vorzunehmenden Umschaltung von Stern auf Dreieck tritt infolge der Stromunterbrechung ein Abfall der Umdrehungszahl von C nach C_2 auf, während zugleich das Drehmoment des Läufers auf C_3 ansteigt. Der Läufer erfährt eine

2. Fliehkraftriemenscheiben mit Vorspannung.

Der Hauptnachteil der reinen Fliehkraftriemenscheiben liegt, wie dies aus den Schaubildern, Abb. 188 a und b, ohne weiteres ersichtlich ist, darin, daß die Fliehkewichte schon von einer sehr geringen Umdrehungszahl ab eine bremsende Wirkung ausüben. Dieser Nachteil soll bei den Scheiben mit Vorspannung dadurch nach Möglichkeit aufgehoben werden, daß vermittels einer Gegenfeder die Bremswirkung erst bei einer höheren Umdrehungszahl eintritt. Die Kurve M_K erfährt hierdurch eine Verschiebung derart, daß ihr Scheitel anstatt im Nullpunkt der Koordinaten zu liegen, in den negativen Teil der Y -Achse fällt.

In den Schaubildern Abb. 189 a und b sind die Anlaufvorgänge mit entsprechenden Bezeichnungen wie in den vorigen Schaubildern wiedergegeben.

worden ist, nach R ; der Läufer und die Last werden in gleicher Weise beschleunigt, bis der Punkt N erreicht ist.

Aus dem unteren Schaubild Abb. 190 b ergeben sich die Stromstöße, die, wie zu ersehen ist, viel kleinere Werte besitzen, als bei den zuerst beschriebenen beiden Fliehkraftriemenscheiben.

4. Bewertung der Fliehkraftriemenscheiben.

Die Abb. 188 bis 190 lassen erkennen, daß der Gruppe *II* und noch mehr der Gruppe *III* eine erhöhte Bedeutung beizumessen ist. Die von Kloß und Schmid in den schon erwähnten Aufsätzen wiedergegebenen Versuchsergebnisse bestätigen dies. Ein Teil der letzteren Ergebnisse soll in den beiden Abb. 191 und 192 in Kurvenform veranschaulicht werden.

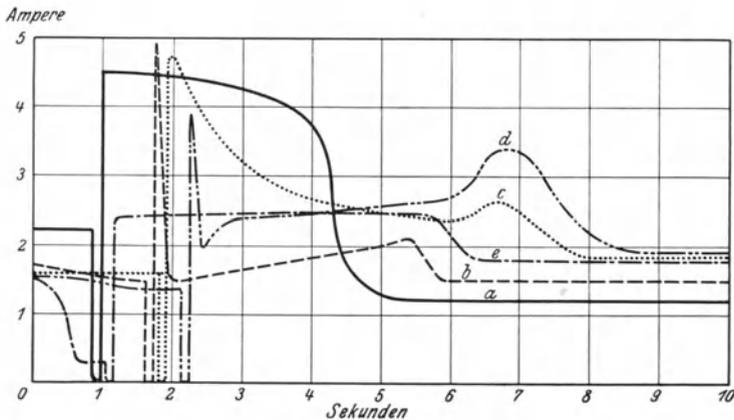


Abb. 191. Anlaufströme bei Stern-Dreieck-Schaltung mit verschiedenen Fliehkraftriemenscheiben.

In Abb. 191 sind die beobachteten Anlaufströme und in Abb. 192 die Läuferdrehzahlen wiedergegeben, und zwar unter jeweils schweren Anlaufbedingungen.

Die Kurven *a* (ausgezogen) beziehen sich auf die Benutzung einer festen Riemenscheibe. Das Gegendrehmoment betrug das 1,3fache des normalen Drehmomentes.

Die Kurven *b* (gestrichelt) beziehen sich auf die Benutzung einer reinen Fliehkraftriemenscheibe, die als Flanschkupplung ausgeführt ist. Die Reibung wird durch mit Blechstücken beschwerte Lederstücke hervorgerufen. Die Kupplung kann jeweils nur in einer Drehrichtung benutzt werden. Das Drehmoment betrug das 1,4fache des normalen Drehmomentes.

Die Kurven *c* (punktirt) beziehen sich auf eine mit Öl gefüllte Scheibe. Bei zunehmender Drehzahl wird das Öl durch Druck von den Reibungsflächen allmählich entfernt. Der Reibungskoeffizient steigt bis zum Starrwerden erheblich an. Die Kupplung kann ohne weiteres in beiden Drehrichtungen benutzt werden. Das Gegendrehmoment betrug das 1,6fache des normalen Drehmomentes.

Die Kurven *d* (gestrichelt, doppelt punktiert gestrichelt) beziehen sich auf eine Fliehkraftriemenscheibe mit Vorspannung. Das Gegenmoment betrug das 1,7fache des normalen.

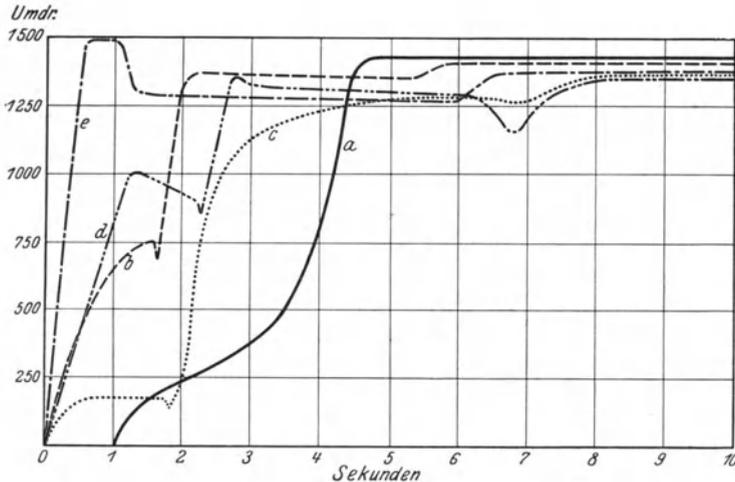


Abb.192. Läuferdrehzahlen bei Stern-Dreieck-Schaltung mit verschiedenen Fliehkraftriemenscheiben.

Die Kurven *e* (gestrichelt, punktiert gestrichelt) beziehen sich auf die Albo-Kupplung. Das Gegenmoment betrug während des Anlaufes das 1,7fache des normalen.

Alle Versuche wurden in Stern-Dreieckschaltung ausgeführt.

Die Versuchsanordnung ist in Abb.193 dargestellt. M_1 ist der Motor mit Käfiganker, K ist die zu untersuchende Kupplung, B_1 die Bremscheibe. Der Motor M_2 wird dazwischen geschaltet als Ersatz der sonst vorhandenen Schwunggewichte (Transmission). D ist eine Tachometerdynamo.

Die Nennleistung des zu den Kupplungen passenden Motors betrug 5 PS für die Kurven *b* und *c* und 4 PS für *d* und *e*.

Das Gewicht der Kupplungen betrug 12 kg für *b*, *c* und *d* und 6,5 kg für *e*. Eine Neukonstruktion von *e* hatte sogar nur ein Gewicht von 5,6 kg.

Die Kurven *a* lassen erkennen, daß bei fester Riemenscheibe der Anlaufvorgang bei einem 1,3fachen Gegenmoment bei Sternschaltung nicht erfolgen kann. Der Motor fängt erst nach Umschaltung auf Dreieck an, sich zu drehen. Der dabei auftretende Strom ist der 4,5fache Normalstrom, welcher dem vollen Kurzschlußstrom gleichkommt.

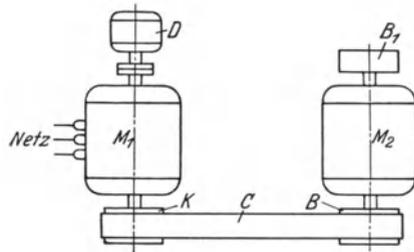


Abb. 193. Versuchsanordnung zur Prüfung von Fliehkraftriemenscheiben.

Die Kurven *b* und *c* zeigen, daß bei den entsprechenden Kupplungen das Auftreten des vollen Kurzschlußstromes nicht vermieden wird. Die Zeitdauer wird aber wesentlich verringert.

Die Kurven *d* zeigen günstigere Verhältnisse, obgleich auch hier noch ein etwa 0,1 Sek. dauernder Stromstoß vom 3,9fachen des normalen auftritt.

Die Kurven *e* können als vollkommen angesehen werden.

Wir finden somit, daß von *a* bis *e* eine stetige Besserung der Anlaufströme auftritt, während sich gleichzeitig das Gegendrehmoment in der gleichen Weise vergrößert hat.

In einem Ergänzungsaufsatz von Kloß¹ wird auf die Bedeutung der Ausführung des Stern-Dreieckschalters hingewiesen. Bei den ersten Versuchen von Kloß betrug die Umschaltzeit etwa 0,1 Sek. Um den Einfluß der Umschaltzeit zu ermitteln, wurden die Versuche mit 3 Schnellschaltern mit einer Umschaltzeit von max. 0,01 Sek. angestellt.

Als Ergebnis wird mitgeteilt, daß z. B. bei einer Scheibe der Gruppe *II* infolge der außerordentlich kurzen Umschaltzeit von ca. 0,01 Sek. die Verbandsnormalien für Kurzschlußankermotoren eingehalten werden, während dies bei dem früher verwandten Schalter mit einer Umschaltzeit von 0,1 Sek. nicht der Fall war. Bei zwei neuen Scheiben der Gruppe *III* ergibt sich, daß die eine Scheibe sowohl mit Stern-Dreieck-Schnellschalter, als auch mit einem Statoranlasser, dessen Nachteil darin liegt, daß bei Einhaltung derselben Stromverhältnisse das Anlaufdrehmoment auf den dritten Teil des Drehmomentes bei Stern-Dreieckschalter sinkt, unter Einhaltung der zugelassenen Werte für Kurzschlußankermotoren verwendet werden kann. Bei der anderen Scheibe werden bei Benutzung eines Statoranlassers sogar die zugelassenen Werte für Schleifringankermotoren eingehalten.

Zusammenfassend kommt Kloß zu dem Ergebnis, daß bei Verwendung eines Schnellschalters mit einer Umschaltzeit von 0,01 Sek. bei den Scheiben der Gruppe *II* die Verbandswerte für Kurzschlußankermotoren eingehalten werden können, und daß die Scheiben der Gruppe *III* und die Alboscheibe sich noch besser verhalten und zum Teil sogar unter Verwendung eines Statoranlassers bei Einhaltung der Verbandswerte für Schleifringankermotoren benutzt werden können.

Ein endgültiges Urteil über die verschiedenen Fliehkraftriemenscheiben zu fällen, erscheint heute noch nicht möglich, denn einerseits werden beständig Verbesserungen der älteren Ausführungen vorgenommen und andererseits läßt sich ein wichtiger Faktor durch Laboratoriumsversuche nicht entscheiden, nämlich die Betriebssicherheit.

Diese Frage kann nur an Hand jahrelanger Beobachtungen entschieden werden und hängt im gleichen Grade von dem Konstrukteur und der ausführenden Werkstatt ab.

¹ ETZ 1929, S. 223.

9. Anschlußvorschriften.

Die Zulassung von Motoren mit Käfigankern wird durch Vorschriften geregelt, die für jedes Land verschieden sind und die außerdem noch für jedes einzelne Elektrizitätswerk durch Sonderbestimmungen ergänzt werden.

A. Deutschland.

Allgemeine Vorschriften des VDE und der Vereinigung der Elektrizitätswerke (§ 9 bis 11 der VDE-Vorschriften).

Anlaßstrom von Drehstrommotoren.

a) Bei Schleifringmotoren und Vollastanlauf soll das Verhältnis Anlaßspitzenstrom zu Nennstrom nicht überschreiten:

Nennleistung kW	1,5—5	über 5—100
$\frac{\text{Anlaß-Spitzenstrom}}{\text{Nennstrom}}$	1,75	1,6

b) Bei Kurzschlußmotoren soll das Verhältnis Anlaßspitzenstrom zu Nennstrom nicht überschreiten:

Nennleistung	kW 1,5—15		
$\frac{\text{Anlaß-Spitzenstrom}}{\text{Nennstrom}}$	bei 3000 und	1500 Umdr./min	2,4
	„ 1000 „	750 „	2,1
	„ 600 „	500 „	1,7

Im Anschluß an Niederspannungsverteilungsnetze sind Kurzschlußmotoren im allgemeinen bis zu Leistungen von 4 kW einschließlich zulässig, wenn das vom Motor beim Anlauf zu überwindende Drehmoment nicht größer als ein Drittel seines Nenndrehmomentes ist; Kurzschlußmotoren größerer Leistung nur dann, wenn das vom Motor beim Anlauf zu überwindende Drehmoment nicht größer als ein Sechstel seines Nenndrehmomentes ist und der Anlaßstrom nicht größer ist als 10 kVA entspricht.

In Anlagen, die aus einem besonderen Transformator bis zu 100 kVA gespeist werden, sind Kurzschlußmotoren bis zu 15 kW Leistung zulässig.

Übersteigt die Leistung des Einzeltransformators 100 kVA, so können mit dem Elektrizitätswerk auch höhere Leistungen für Kurzschlußmotoren vereinbart werden.

Sonderbestimmungen

für den Anschluß von Einphasenmotoren und Drehstrommotoren an die Netze von: Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk A.-G., Essen; Bergisches Elektrizitätswerk m. b. H., Reisholz; Elektrizitätswerk Berggeist Brühl; Bergische Licht- und Kraftwerke A.-G., Lennep; Niedersächsische Kraftwerke A.-G., Osnabrück; Rheinisch-Westfälische Elektrizitätsversorgung G. m. b. H., Lennep; Rhein-Nahe-Kraftversorgungs-A.-G., Bad Kreuznach; Elektrizitätswerk Siegerland, Siegen.

§ 16.

Wechsel- und Drehstrom.

Wechselstrommotoren dürfen in Drehstromnetzen nur bis zu einer Leistung von 0,5 kW verwandt werden.

Drehstrommotoren müssen so bemessen oder mit solchen Anlaßvorrichtungen versehen sein, daß weder der Einschaltstrom noch der Anlaßspitzenstrom das 1,7fache des Nennstromes überschreiten, jedoch ist ein Höchstwert entsprechend 7,5 kVA Scheinleistung (13 kVA) in jedem Falle zulässig.

Die Höchstwerte lassen bei normalen Kurzschlußankermotoren zu: bis zu einer Nennleistung von 0,5 (1,1) kW direkte Einschaltung, bei einer Nennleistung über 0,5 bis 1,1 kW (1,1 bis 2,2 kW) Stern-Dreieck-Einschaltung,

bei einer Nennleistung über 1,1 (2,2) kW Einschaltung mit Hilfe von Anlaßvorrichtungen,

die den Höchstwert der Anlaßscheinaufnahme auf 7,5 kVA (13 kVA) bzw. die dem 1,7fachen Wert des Nennstromes entsprechende Aufnahmen begrenzen.

Die eingeklammerten Zahlen haben Gültigkeit, sofern die Netzverhältnisse dies zulassen. Die Entscheidung hierüber behält sich das EW vor.

Sonderbestimmungen
der Berliner Elektrizitätswerke Akt.-Ges., (Bewag).
§ 9.

Stromsystem	Motorart	Leistung	Anlasser
Einphasenstrom	Kurzschlußläufer	bis 1 kW	Schalter
Drehstrom	„	„ 1 „	„
„	„	über 1 bis 4 kW	Stern-Dreieckschalter
„	Kurzschlußläufer mit Fliehkraftkupplung	bis 4 kW	Schalter
„	desgl.	über 4 „	Stern-Dreieckschalter

Kurzschlußmotoren besonderer Bauart werden für jede Leistung zugelassen, wenn bei Vollastanlauf das Verhältnis Anlaßspitzenstrom zu Nennstrom wie bei Schleifringmotoren 1,6 nicht überschreitet.

B. Frankreich.

Auszug aus den Vorschriften von „Union des Syndicats de l'Électricité“, Ausgabe 1929:

Motorleistung	maximal zulässiger Anlaufstrom
über 0,4 bis 0,75 kW	$7 \cdot J_n$
„ 0,75 „ 1,5 „	$5 \cdot J_n$
„ 1,5 „ 5 „	$3,7 \cdot J_n$
„ 5 „ 15 „	$2,2 \cdot J_n$
„ 15 kW	$1,8 \cdot J_n$

Auszug aus den Vorschriften von „Secteur de l'Ouest Lumière“:

Motorleistung	Anlaßstrom
bis 1 PS	$2,5 \cdot J_n$
über 1 bis 10 PS	$1,5 \cdot J_n$
„ 10 PS	$1,0 \cdot J_n$

C. Belgien.

Maßgebend sind im allgemeinen die Vorschriften von „L'Union des Exploitations Électriques en Belgique“ sowie im besonderen die Sondervorschriften von einzelnen Elektrizitätswerken ähnlich wie dies in Deutschland der Fall ist. Auszug aus den Vorschriften von „L'Union des Exploitations . . .“, Ausgabe 1926 (§ 76 und 77):

Motorleistung in kW	maximal zulässiger Anlaßstrom
bis 0,75 kW	$3 \cdot J_n$
über 0,75 kW bis 1,5 kW	$2,5 \cdot J_n$
„ 1,5 „ „ 10 „	$2,0 \cdot J_n$
„ 10 kW	$1,75 \cdot J_n$

In besonderen Fällen kann ein höherer Anlaßstrom zugelassen werden wie folgt:

bis 10 kW	2,25
über 10 „	2,0

Motoren bis 1 kW können direkt eingeschaltet werden. Motoren über 1 kW sollen grundsätzlich Schleifringläufer besitzen, trotzdem dürfen Motoren bis 2 kW mit Käfigläufer ausgerüstet werden, wenn die obigen Anlaßströme nicht überschritten werden.

D. England.

Die in England zur Zeit bestehenden Bestimmungen sind außerordentlich verschiedenartig gestaltet. Es gibt dort etwa 630 Elektrizitätswerke, welche für ihren Distrikt meistens ihre eigenen, oft stark voneinander abweichenden Anschlußbedingungen haben. Es hat sich aber die Erkenntnis Bahn gebrochen, daß einheitliche Bestimmungen eine Notwendigkeit sind, die durch eine dazu ernannte Kommission aufgestellt werden sollen.

Nachstehend sollen die Anschlußbedingungen für Drehstrommotoren einiger Elektrizitätswerke angeführt werden:

Leistung	Ausführung	Schaltapparat	zulässiger Anlaßstrom
Electricity Department. City of Nottingham. Drehstrommotoren für 400 V, 50 Perioden.			
bis 3 PS über 3 PS bis 25 PS über 25 PS	Käfigläufer zulässig " " nur Schleifringläufer	Stern-Dreieckschalter " " Anlasser	2fach 1¼fach 1fach ¹
Dublin Corporation Electricity Supply			
bis 3 PS über 3 PS	Käfigmotor Schleifringmotor	Stern-Dreieckschalter Schleifringanlasser	1,25fach 1,25 „
Metropolitan Borough of Islington (London)			
bis 1 PS über 1 PS	Käfigmotor Schleifringmotor	Stern-Dreieckschalter Schleifringanlasser	1,5fach 0,8 kVA/PS
Liverpool Corporation Electric Supply Departement.			
bis 5 PS über 5 PS bis 30 PS über 5 PS über 30 bis 100 PS	Käfigmotor Käfigmotor, wenn Leeranlauf Schleifringmotor, wenn Anlauf mit Last Käfigmotoren im besonderen Einvernehmen mit dem Werk	direkte Einschaltung Stern-Dreieck- oder Statoranlasser Schleifringanlasser	— 2fach 1 „
Corporation of Glasgow (25 Perioden). Ausgabe November 1922.			
bis 5 PS über 5 bis 50 PS	Käfigmotor Käfigmotor	direkte Einschaltung Stern-Dreieckschalter, Ständeranlasser oder Autotransformator	— 2,5fach
Oldham Corporation Electricity Supply 400 Volt 50 Perioden			
bis 20 PS über 20 PS	Käfigmotor Schleifringmotor	— Schleifringanlasser	nicht mehr als 60 Amp. Anfangs- strom bis 60 Amp., stufenweise ansteigend bis Vollast- strom

E. Österreich.

Nach den neuesten Bestimmungen des Wiener Elektrizitätswerks sind Käfigankermotoren den Schleifringmotoren gleichgestellt, sofern der Einschaltstrom bei den 2 und 4poligen Typen nicht größer als das 2,4fache und bei den 6 bis 12poligen Typen nicht größer als das 2,0fache des Nennstromes ist. Es kann somit praktisch jeder Drehstrommotor mit Stern-Dreieckschalter zugelassen werden, wobei jedoch vorausgesetzt ist, daß das Gegendrehmoment nicht mehr als 50% des

¹ Auffallend ist der geringe Anlaßstrom beim Schleifringmotor über 25 PS, obschon beim Käfigmotor bis 25 PS der 1,75fache Strom bei Stern-Dreieckschaltung zugelassen ist.

normalen Drehmomentes beträgt. Bei größeren Gegendrehmomenten kann unter Verwendung einer Anlaufkupplung im Einvernehmen mit dem Elektrizitätswerk auch noch ein Käfigmotor zugelassen werden.

Diese neuen Anschlußbedingungen werden von Dr. Velisek, Wien, in einem längeren Aufsatz¹ besprochen, in dem auch die Gründe dargelegt werden, welche die Wiener Elektrizitätswerke zu diesem bedeutungsvollen Entschluß veranlaßt haben. Maßgebend war vor allem die Erkenntnis der Vorzüge des Käfigmotors im Vergleich zum Schleifringmotor, ferner die praktischen guten Erfahrungen, die man im Betriebe in bezug auf Lichtstörungen durch Spannungsschwankungen gemacht hatte und vor allem das ganz allgemeine Streben, der Wirtschaft keine unnötigen Erschwerungen aufzuerlegen, die Verwendung von Drehstrommotoren ganz allgemein zu erleichtern und damit zugleich auch größeren Stromabsatz zu erzielen.

Soweit aus der Literatur zu ersehen ist, finden sich bisher in keinem anderen Lande solche großzügigen Anschlußbestimmungen.

F. Beurteilung der Vorschriften.

Wir erkennen eine große Mannigfaltigkeit der verschiedenen Vorschriften sowohl in bezug auf die Größe der Motoren, die zugelassen werden, als auch in bezug auf die Art und Weise, wie die Zulassung formuliert wird.

Es soll nun versucht werden, die Vorschriften auf ihre Zweckmäßigkeit zu untersuchen. Bei vielen Vorschriften scheint die Abfassung einzig und allein von dem Gesichtspunkte aus vorgenommen worden zu sein, daß eine Störung der Lichtleitung durch das Anlassen von Käfigankern um jeden Preis vermieden werden müßte, und es scheint der ungünstigste Fall, der in dem betreffenden Leitungsnetz überhaupt vorkommen kann, als Basis für die Bestimmung des größten zulässigen Motors mit Käfiganker gedient zu haben. Demgegenüber kann man aber auch die Meinung vertreten (und wir vertreten dieselbe), daß das Problem der Zulassung von Motoren mit Käfiganker im Rahmen der gesamten Wirtschaft untersucht und behandelt werden muß. Die Einführung eines billigen Motors mit besserem Leistungsfaktor und Wirkungsgrad ist eine Forderung der gesamten Wirtschaft. Die Vorteile kommen in erster Linie dem Konsumenten zugute, indirekt aber auch in verhältnismäßig kurzer Zeit dem Elektrizitätswerk, indem Hand in Hand mit der Verkleinerung der Kosten der Anschaffung eine verstärkte Anwendung des elektrischen Motors gehen wird. Der Vorteil des besseren Leistungsfaktors kommt aber dem Elektrizitätswerk unmittelbar zugute und hätte doch eigentlich bei dem großen Interesse, das für eine Verbesserung des Leistungsfaktors in den letzten Jahren zutage getreten ist, ein größeres Interesse auch für die Anwendung des Motors mit Käfiganker erwecken müssen. In einem kleinen Artikel² hat einer der Verfasser die Auffassung

¹ Dr. Velisek, Wien: Neue Anschlußbestimmungen für Kurzschlußmotoren der Wiener Elektrizitätswerke. El. u. Maschinenb. 1929, S. 713.

² ETZ 1921, 3. Nov.

vertreten, daß eine stärkere Bezugnahme auf den individuellen Fall erwünscht und durchaus möglich ist. Wenn ein Kunde die Überzeugung hat, daß die Installation eines Motors mit Käfiganker bei dem Nachbar keinen größeren Spannungsabfall hervorrufen wird als ein vom Elektrizitätswerk festgelegter Wert, so müßte ihm die Installation des Motors mit Käfiganker gestattet sein, unabhängig von den allgemeinen Vorschriften. Es wird also in diesem Falle nur notwendig sein, daß die allgemeinen Gesetze, nach denen eine Störung des Lichtbetriebs hervorgerufen wird, zum mindesten bei den Installateuren allgemein bekannt würden, um sofort eine Vergrößerung der Anwendung des Motors mit Käfiganker in einer ungeahnten Weise zu veranlassen. Diese Gesetze könnten ganz allgemein von der Vereinigung der Elektrizitätswerke aufgestellt werden und würden auf alle Elektrizitätswerke anwendbar sein, weil sie von der Ursache der Störung ausgehen, also von dem zulässigen Spannungsabfall, während die bisherigen Vorschriften sich ganz einfach auf die Größe des Motors bezogen, der aber in verschiedenen Netzen und an verschiedenen Stellen des gleichen Netzes einen ganz verschiedenen Spannungsabfall hervorruft. Die Faktoren, welche die Lichtstörung beeinflussen, sollen nun kurz erörtert werden, ohne daß aber ein Anspruch auf restlose Behandlung dieses überaus wichtigen Problems erhoben wird.

Zunächst würde die Frage zu untersuchen sein, welche Spannungsänderung im Lichte eines Kunden als störend empfunden wird. Sonderbarerweise ist hierüber nur wenig veröffentlicht worden¹.

Offenbar ist die Veränderung der Spannung nicht das allein Maßgebende für die Störung im Lichtbetrieb. Es wird auch darauf ankommen, mit welcher Steilheit und mit welcher Häufigkeit diese Veränderung vor sich geht. Wenn z. B. im Laufe des Abends die Spannung sich einmal innerhalb einer Minute um 5% vergrößern und in der zweiten Minute sich um 5% senken würde, so würde dies kaum beobachtet werden. Wenn sich aber die gleiche Spannungsänderung in einer Sekunde vollzieht und sich außerdem noch 20 bis 30 mal im Laufe des Abends wiederholt, so würde man von einer wesentlichen Störung des Lichtes sprechen. Was nun die Steilheit anbelangt, so wird beim Einschalten von Motoren mit Käfigankern ein plötzlicher Spannungsabfall eintreten und in dieser Beziehung einen ungünstigen Fall darstellen. Was aber die Häufigkeit anbelangt, so hängt diese ganz von der Art des Betriebes ab. Es werden Motoren installiert, die einmal am Morgen und einmal zu Mittag eingeschaltet werden und im übrigen konstant durchlaufen. Solche Motoren können ihrer ganzen Natur nach den Lichtbetrieb überhaupt nicht stören. Der ungünstigste Fall tritt wohl auf bei dem Aufzugmotor, der unter Umständen hundertmal in einer Stunde benutzt wird. Für diesen letzteren Motor müßten ganz strenge Bedingungen vorgesehen werden. Auch die Art der Lampen und die Art der Beschäftigung des Kunden selbst spielt eine wichtige Rolle. Lampen mit einem verhältnismäßig dicken Faden sind Lichtschwankungen

¹ Siehe Kehoe: A. J. E. E. Bd. 43, S. 848, ferner Williams Vortrag vor der Pennsylvania El. Assoc. in Phil. (nicht im Druck erschienen).

weniger unterworfen als Lampen mit dünnem Faden. Es besteht also an und für sich die Möglichkeit, daß eine Person, die auf sehr konstantes Licht angewiesen ist, sich durch Anschaffung geeigneter Lampen das Licht verbessern kann, und von diesem Standpunkt aus würde es genügen, wenn man bei der Behandlung von Lichtstörungen die Benutzung von normalen Lampen und das Vorhandensein eines normalen Kunden voraussetzt. Auf Grund der bisher vorgenommenen Veröffentlichungen ließe sich vielleicht der zulässige Spannungsabfall an Hand der nebenstehenden Tabelle bestimmen.

Tabelle 17.

Schalzhäufigkeit pro Jahr	Zulässiger Spannungsabfall
100— 300	4,5%
300— 1000	3,7%
1000— 3000	3 %
3000— 10000	2,4%
10000— 30000	1,9%
30000— 100000	1,5%

Diese Zahlen stellen vorläufig nur einen Vorschlag dar, der diskutiert werden kann. Man wird einwenden, daß die Schalzhäufigkeit im Laufe des Jahres nicht genau kontrolliert werden kann; man sieht aber, daß selbst ein großer Fehler in der Schätzung der Schalzhäufigkeit nur wenig Einfluß auf das Endresultat hat.

Die zweite Frage bezieht sich nun auf die Berechnung des zulässigen Spannungsabfalles, wenn der Anlaßstrom und die Verhältnisse des Netzes an der betreffenden Stelle bekannt sind. Hier finden wir nun sehr große Verschiedenheiten in den einzelnen Ländern, in den einzelnen Städten und selbst in einzelnen Teilen ein und desselben Leitungsnetzes. Im allgemeinen liegen die Verhältnisse am günstigsten in den amerikanischen Städten. Die Transformatoren haben durchweg eine größere Leistung und die Leitungen einen größeren Querschnitt. Was aber das Wichtigste ist: In den meisten Fällen finden wir in Amerika für Licht und für Kraft getrennte Leitungen, so daß also schon von vornherein der zulässige Spannungsabfall wesentlich größer gewählt werden kann als im Falle gemeinsamer Leitung von Licht und Kraft. Dies erklärt auch, warum in Amerika der Motor mit Käfiganker diese vorherrschende Stellung einnimmt, und zwar sowohl in bezug auf die Zahl der Motoren, die mit Käfiganker geliefert werden, als auch in bezug auf die Größe der Motoren. Dies erklärt auch die Bestrebungen, die jetzt in Amerika im Gange sind, den Motor noch wesentlich zu verbilligen dadurch, daß er ohne Zuhilfenahme eines Anlaßtransformators direkt auf das Netz geschaltet wird. Anscheinend gehen die Bestrebungen dahin, bis zu einer für europäische Verhältnisse überraschend großen Leistung das direkte Einschalten der Motoren mit Käfiganker als einzig richtiges System der Zukunft zu proklamieren. Damit würde natürlich die Möglichkeit bestehen, die Vorteile des Käfigankermotors in bezug auf Wirkungsgrad und $\cos \varphi$ voll auszunützen.

Schon im Jahre 1921/23 wurden von dem Verbands der Kraftwerke (National Electric Light-Association NELA) zwei führende Motorenfabriken aufgefordert, Motorenserien für direktes Einschalten mit etwa $\frac{1}{2}$ des bisherigen Anlaßstromes unter Beibehaltung des be-

stehenden Wirkungsgrades und Leistungsfaktors zu bauen. Der Erfolg entsprach jedoch zunächst nicht den Erwartungen, bis die Entwicklung der Motoren mit Wirbelstromläufer Fortschritte gemacht hatte, so daß die von der NELA festgesetzte Begrenzung der Anlaufströme eingehalten wurde. Es wird angegeben, daß bei diesen Motoren ein Anlaufdrehmoment von 140 bis 180% des Nenndrehmomentes erzielt wird, bei einem Kippmoment gleich dem 1,9 bis 2,4fachen des normalen.

Nachstehend einige Zahlen aus der Tabelle der NELA für die Grenzen der Anlaufströme:

Tabelle 18.

Größe des Motors in PS	Stromaufnahme bei freiem Anlauf unter Last als Vielfaches von J_n	Stromaufnahme bei festgebremstem Läufer als Vielfaches von J_n
1	6,6	8,76
3	5,5	7,3
5	5,03	6,7
7,5	4,5	6,0
10	4,1	5,5
15	3,9	5,2
25	3,7	4,9
35	3,2	4,3
40	2,9	3,9
50	2,5	3,3

Die Bestimmungen der NELA erfüllen, wie aus dem Berichte der letzten Tagung des American Institute of Electr. Eng.¹ hervorgeht, noch nicht die Wünsche der Verbraucher und Motorenhersteller. Man verlangt größere Zugeständnisse unter Hinweis auf viele Fälle, in denen Motoren von 700 bis 800 kVA Aufnahme

von einem Transformator mit nur 350 kVA aus ohne Störung direkt eingeschaltet werden und daß viele Motoren von 100 PS von der städtischen Leitung ebenfalls direkt eingeschaltet werden; es wurden Fälle nachgewiesen, in denen Motoren mit Leistungen von 2400 PS ebenfalls direkt an das Netz gelegt wurden, alles ohne Störung benachbarter Stromverbraucher.

Die Verfasser haben versucht, durch direkte Anfragen bei verschiedenen deutschen Elektrizitätswerken eine Schätzung des Spannungsabfalles zu erlangen, der durch das Anlassen eines 10-PS-Motors in λ - Δ -Schaltung entstehen würde, und zwar sowohl an einer ungünstig gelegenen und an einer günstig gelegenen Stelle.

Stadt A.

Der ungünstigste Fall wird erreicht bei einer Transformatorstation von 50 kVA Leistung, 5000/400 Spannung, 3,8% Kurzschlußspannung und bei einer Kabellänge von 1000 m und einem Kupferquerschnitt von $3 \times 25 \text{ mm}^2$ Cu. Der günstigste Fall ergab sich bei einem Niederspannungskabel von 700 m Länge und $3 \times 95 \text{ mm}^2$ Querschnitt, das von beiden Seiten gespeist wurde, auf der einen Seite von einem Transformator von 2000 kVA, 8,15% Kurzschlußspannung und auf der an-

¹ ETZ 1929, S. 759. Schüler, L., Berlin: Bericht über die Tagung des A. I. E. E.

deren Seite von einem 400-kVA-Transformator mit 4,2% Kurzschlußspannung.

Im allgemeinen hat der Anlaßstrom dieser kleinen Motoren keinen meßbaren Spannungsabfall in der Hochspannungsleitung zur Folge, so daß wir uns bei der Berechnung der Spannungsabfälle auf den Einfluß von Transformator und Niederspannungsleitung beschränken können. Wenn wir für den 2000-kW-Transformator die Cu-Verluste zu 1% annehmen, so ergibt sich für letzteren Transformator und das daranschließende Niederspannungskabel bis zum Motor

$$R_{\text{Tr.}} = 0,79 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm,}$$

$$R_{\text{Kabel}} = 64 \cdot 10^{-3} \text{ ,,}$$

$$X_{\text{Tr.}} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ ,,}$$

$$X_{\text{Kabel}} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ ,,}$$

also

$$Z' = 0,065 + j \cdot 0,0264.$$

Für den 400-kW-Transformator sind die Cu-Verluste zu 1,5% angenommen, und es ergibt sich für Transformatoren und Kabel bis zum Motor

$$Z'' = 0,071 + j \cdot 0,0356.$$

Die kombinierte Impedanz von Z' und Z'' in Parallelschaltung ist

$$0,032 + j \cdot 0,0146.$$

Unter Benutzung des Anlaßstromes der Abb. 52 (in λ -Schaltung) ergibt sich ein Spannungsabfall

$$J_a R \cos \varphi_a + J_a X \sin \varphi_a = 0,365 + 0,42 = 0,785,$$

also

$$\frac{0,785}{220} \times 100 = 0,36\%.$$

Für die Berechnung des ungünstigsten Falles ergibt sich

$$Z = 0,786 + j \cdot 0,171$$

und ein Spannungsabfall = 6,3%.

Der Spannungsabfall im günstigsten Falle ist also ca. 17mal kleiner als im ungünstigsten Falle¹.

Stadt B.

Im Stadtinnern ergaben sich nur 0,8% Spannungsabfall beim Anlassen des erwähnten Motors. Die Leistung der Transformatorstation

¹ Für überschlägige Rechnungen im nichtvermaschten Netze wird es im allgemeinen genügen, den Spannungsabfall gleich $k \left(\frac{J_a}{J_n} \epsilon_{\text{Cu}} + \frac{J_a R_{\text{Kabel}}}{U_p} \cdot 100 \right)$ zu setzen, wo ϵ_{Cu} der prozentuale Kupferverlust des Transformators bei Vollast ist. k soll die induktive Komponente durch eine Vergrößerung von $\cos \varphi_a$ berücksichtigen; etwa

$k \approx 0,6$ für normale Käfiganker und

$k \approx 0,75$ für Doppelnutmotoren einzusetzen, wobei Einheitstransformatoren und Niederspannungskabel angenommen sind.

war 160 oder 250 kVA mit 3,7 resp. 3,6% Kurzschlußspannung, der Leiterquerschnitt betrug $3 \times 70 \text{ mm}^2$ bei etwa 200 m max. Entfernung. Dagegen ergaben sich in einem kleinen Ortsnetz, in dem noch $3 \times 110 \text{ V}$ Drehstrom vorhanden war, außerordentlich ungünstige Verhältnisse (ca. 35% Spannungsabfall).

Stadt C.

Transformatorleistung der Station: 30 kVA min., 160 kVA max. mit Kurzschlußspannung der Einheitstransformatoren, Kabelquerschnitt $3 \times 50 \text{ mm}^2$, maximale Entfernung von der nächsten Speisesäule 1000 m.

Stadt D.

Ausgeführte Messungen ergaben einen Spannungsabfall von 2 bis 3% für eine mittlere Lage des 10-PS-Motors.

Aus diesen Beispielen erkennt man deutlich, daß in einer überwältigend großen Anzahl von Fällen die Möglichkeit der Installation von Motoren mit Käfiganker gegeben wäre, während dies nach den herrschenden Vorschriften, die auf den ungünstigsten Fall zugeschnitten sind, unmöglich ist. Wenn in einzelnen Vorschriften die Möglichkeit des Zulassens auf Grund eines besonderen Antrages prinzipiell besteht, so fragt sich aber immer noch, wie nun in der Praxis dieser Antrag weiter behandelt wird. Häufig findet man bei den führenden Stellen die Ansicht vorherrschend, daß dem Antrage auf Zulassung eines Motors mit Käfiganker auch dann nicht stattzugeben sei, wenn der Motor allein keinen unzulässigen Spannungsabfall erzeuge, weil ja doch die Möglichkeit bestehe, daß mehrere Motoren zu gleicher Zeit angelassen werden. Untersucht man aber die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Anlassens von Motoren etwas näher, so erkennt man, daß diese sehr gering ist, denn das Anlassen dauert im allgemeinen zwischen 1 und 10 Sekunden, im Durchschnitt etwa 4 Sekunden, und von diesen 4 Sekunden wird nur der erste, einen Bruchteil einer Sekunde ausmachende Stoß als Störung empfunden. Es müssen also schon eine sehr große Anzahl von Motoren und vor allem Motoren mit sehr häufiger Schaltzahl an dem gleichen Niederspannungskabel hängen, ehe ein Zusammenfallen von zwei Einschaltvorgängen in Erwägung gezogen zu werden braucht. Liegen aber sehr viele Motoren am gleichen Niederspannungskabel, so sind ja von vornherein Kabelquerschnitt und Transformatorleistung dieser starken Motorbelastung angepaßt, und unter Berücksichtigung dieser Tatsache kann man den Satz aufstellen: Je größer die Zahl der an einem Niederspannungskabel liegenden Motoren mit Käfiganker ist, um so kleiner ist die Lichtstörung. Motoren mit häufiger Schaltzahl können dieses Ergebnis ebenfalls nicht abändern, wenn die in der Tabelle 17 vorgeschlagenen kleineren Spannungsabfälle nicht überschritten werden.

Daß tatsächlich die Installation von Motoren mit Käfiganker in der weit überwiegenden Anzahl von Fällen keine Lichtstörung zur

Folge haben wird, geht schlagend aus einer interessanten Arbeit hervor, die von Elsässer und Stock in der „Elektrowirtschaft“ Dezember 1929 veröffentlicht worden ist, und in der Beobachtungen über das Anlassen von gängigen Motoren mit Schleifringanker enthalten sind¹. Sie fanden, daß die im allgemeinen beim Schleifringanker erwarteten theoretischen Anlaßströme in der Praxis gar nicht auftreten, ja, daß diese um ein Vielfaches höher sind, so daß sie beinahe an die Ströme heranreichen, die beim direkten Einschalten eines Motors mit Käfiganker auftreten. Dieses überraschende Resultat erklärt sich folgendermaßen: Seit 1922 ist die Kontaktzahl der Anlasser erheblich heruntergesetzt worden, und die Zeit, die ein Arbeiter für das Anlassen benutzt, wenn man ihm „langsames Einschalten“ vorschreibt, ist wesentlich kleiner als die Zeit, die in vielen Fällen zur Beschleunigung der Massen notwendig ist. Während der Strom beim Anlauf gegen Nennmoment den 1,6fachen Nennstrom nicht überschreiten sollte, wurde tatsächlich der 5,8fache Nennstrom beobachtet. Dies wirkt sich ungünstiger aus als ein gleich großer Strom beim direkten Einschalten von Kurzschlußmotoren, weil die Zuckung des Lichtes im letzteren Falle nur einmal, beim Schleifringmotor aber mehrmals auftritt.

Es muß auch darauf hingewiesen werden, daß die Anlasser in groben Stufen normalisiert worden sind, und daß in der Praxis nicht zu jedem Motor ein besonderer Anlasser berechnet wird, sondern daß der nächstliegende Normalanlasser benutzt wird. Die Benutzung der „*u-v-w*“-Schaltung im Anlasser, die billiger ist, aber bestimmte Unsymmetrien in den einzelnen Rotorphasen zuläßt, hat ebenfalls einen gewissen Einfluß auf das überraschende Beobachtungsmaterial. Dabei hat sich niemand über die ohne weiteres zugelassenen Motoren beklagt, was beweist, daß die im Sinne einer Verbilligung des Schleifringmotors getroffenen Maßnahmen berechtigt waren. Hätte aber ein Kunde die Zulassung eines Motors mit Käfiganker und \wedge - Δ -Schaltung bei dem gleichen Elektrizitätswerk beantragt, so wäre eine Ablehnung wahrscheinlich gewesen, obgleich dieser nur die Hälfte des Anlaßstromes verlangt hätte. Das Wort „Käfiganker“ wirkt auf viele Direktoren von Elektrizitätswerken wie ein rotes Tuch.

Wenn wir bisher nur diejenigen Möglichkeiten untersucht haben, die in den Elektrizitätswerken ohne irgendwelche Vergrößerung des Kabelnetzes zur Verfügung stehen, so würden wohl im eigenen Interesse auch Aufwendungen von seiten der Elektrizitätswerke berechtigt sein.

Von Bedeutung sind die Forderungen, die Dr. Rosenberg aufgestellt hat²:

1. In Fabriken und größeren Werkstätten sollen nur Kurzschlußmotoren aufgestellt werden.
2. Für landwirtschaftliche Zwecke dürfen nur Kurzschlußmotoren verwandt werden.

¹ Siehe auch Abb. 32.

² Dr. Rosenberg, Wien: Rettung des Leistungsfaktors durch Kurzschlußmotoren. ETZ 1927, S. 643.

3. Kurzschlußmotoren sind überall da erlaubt, wo ihre Anwendung keine Störung erbringt.

4. Kurzschlußmotoren sind an Stelle von Schleifringmotoren überall da erlaubt, wo sie nicht mehr stören als Schleifringmotoren.

Der Leitsatz 1 gründet sich darauf, daß in fast allen Fällen der Anschlußwert der Anlage derart groß ist, daß die einzelnen Motoren unter der praktisch immer zutreffenden Annahme der nicht gleichzeitigen Einschaltung der Motoren entweder direkt oder mit Stern-Dreieck-Schalter eingeschaltet werden können.

Der Leitsatz 2 geht davon aus, daß der landwirtschaftliche Motor in fast allen Fällen nur gegen ein verhältnismäßig geringes Gegendrehmoment und meistens während des Tageslichtes anzulaufen hat; er berücksichtigt dabei die großen Vorteile, welche ganz besonders in der Landwirtschaft der Käfigmotor gegenüber einem Schleifringmotor besitzt. Es erübrigen sich die bei letzterem Motor vorgeschriebenen ganz gekapselten Schleifringe, welche oft Störungen verursachen; die Verstaubung eines Käfigmotors ist bei weitem nicht so bedenklich wie die eines Schleifringmotors.

Die beiden Leitsätze 3 und 4 bedeuten an sich eine Selbstverständlichkeit und bedürfen daher keiner besonderen Begründung.

Wir können diese Forderungen unterstützen mit der einzigen Einschränkung, daß Motoren, die in der Landwirtschaft unter schwierigen Verhältnissen anzulaufen haben, wie sie z. B. bei dem Antrieb von Dreschmaschinen vorliegen, besonders behandelt werden, auch die Sicherung solcher Motoren verdient noch besondere Erwägung.

Bei dieser Gelegenheit möchten wir nicht verfehlen, auf den ausgezeichneten Vortrag von D. B. Hoseason vor dem Inst. El. Eng. 1927 (Squirrel Cage Induction Motors) hinzuweisen, in welchem besonders auf die wirtschaftliche Seite dieses Problems eingegangen wird.

Wir können zusammenfassend die Behauptung aufstellen, daß die Abfassung der Vorschriften für die Zulassung von Motoren mit Käfiganker und von Doppelnutmotoren einer grundsätzlichen Revision bedarf, an der sowohl die Elektrizitätswerke als auch die Fabrikationsfirmen in gleicher Weise interessiert sind. Das Beispiel des Wiener Elektrizitätswerkes und der amerikanischen Elektrizitätswerke muß dahin ausgewertet werden, daß der Schleifringmotor seine vorherrschende Stellung verliert und erst von einer verhältnismäßig großen Leistung an angewandt werden darf. Ob wir nun diese Leistung zu 30 oder 50 oder 100 PS einsetzen, bleibt der Zukunft vorbehalten. Das darunterliegende Gebiet muß in allen Fällen, wo das Gegendrehmoment $\frac{2}{3}$ des normalen nicht übersteigt, dem gewöhnlichen Käfiganker resp. dem Doppelnutmotor gehören. Bei Anlauf mit vollem Gegendrehmoment kommen dann Spezialausführungen des Doppelnutmotors und der Fliehkraftriemenscheiben in Betracht.

Anhang.

1. Die symbolische Methode.

Denkt man sich eine Zeitlinie OZ (Abb. 194) mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω um den Punkt O rotierend, so werden die Projektionen einer feststehenden Strecke OA auf diese Zeitlinie die Funktion $OA \cos(\omega t + \alpha)$ darstellen, wenn im Anfangspunkt der Zeitzählung OA mit OZ den Winkel α bildet. Diese Darstellung läßt sich anwenden auf sinusförmig verlaufende Ströme und Spannungen. Es ist gebräuchlich geworden, nicht die Amplituden des Stromes (resp. der Spannung) in das Diagramm einzuführen, sondern den Effektivwert. Die Strecke OJ , die mit der im Anfang der Zeitzählung horizontal gedachten Zeitlinie den Winkel ψ_1 einnimmt, stellt also den Ausdruck $OJ \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \psi_1)$ dar und die Strecke OE den Ausdruck $OE \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \psi_2)$. Der Strom OJ eilt der Spannung OE um den Winkel $\varphi = \psi_2 - \psi_1$ nach. In dieser Darstellung können OJ und OE als Vektoren angesehen werden, die den Gesetzen der geometrischen Addition und Subtraktion gehorchen. $OJ'' = OJ + OJ'$ besagt, daß der Strom OJ'' die Resultierende aus den Strömen OJ und OJ' ist, wenn geometrische Addition angewandt wird¹. Auch die in der Vektorenrechnung bekannten inneren und äußeren Produkte können auf Strom und Spannung angewandt werden. Das erstere, geschrieben $|OJ \cdot OE|$, ist der Wirkleistung und das zweite, geschrieben $OJ \cdot OE$, ist der Blindleistung gleich.

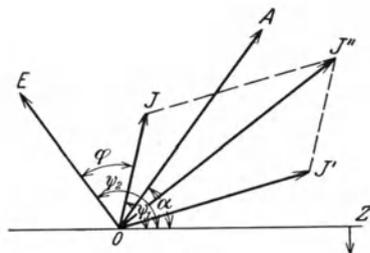


Abb. 194.

Als verschieden von den Vektoren sind nun diejenigen Operatoren anzusehen, die einen Vektor in einen anderen umzuwandeln gestatten. Wir wollen sie Vektorquotienten nennen, weil sie als Verhältnis zweier Vektoren aufgefaßt werden können.

Wir wissen z. B., daß der Strom J , der unter dem Einfluß einer sinusförmigen Spannung U in einem Stromkreise fließt, der Ohmschen Widerstand und Selbstinduktion enthält, numerisch von U verschieden ist und auch eine Phasenverschiebung gegenüber U besitzt. Wir sagen:

Die Impedanz Z eines Stromkreises bewirkt eine Veränderung der Größe und Richtung von J gegenüber U . Wenn die Veränderung der Größe durch den Faktor c und die Verdrehung durch den Winkel φ dargestellt wird, so können wir symbolisch schreiben: $Z = (c, \varphi)$, wo $c = |Z|$ der absolute Wert und $\varphi = \sphericalangle Z$ das Argument von Z genannt wird.

¹ Wo eine Verwechslung möglich ist, sollen gerichtete Strecken durch deutsche Buchstaben dargestellt werden.

Wenn wir nun einen Vektor zunächst mit $q_1 = (c_1, \varphi_1)$ und den neuen Vektor mit $q_2 = (c_2, \varphi_2)$ multiplizieren, so können wir das gleiche Endresultat erhalten, indem wir den ersten Vektor um $\varphi_1 + \varphi_2$ verdrehen und seine Amplitude mit $c_1 c_2$ multiplizieren, also

$$q_1 \cdot q_2 = ((c_1 \cdot c_2) (\varphi_1 + \varphi_2)).$$

Die Multiplikation zweier Vektorquotienten geschieht, indem die absoluten Werte c_1 und c_2 multipliziert, die Argumente φ_1 und φ_2 addiert werden.

Wir wollen jetzt einen Vektorquotienten q_0 untersuchen, der eine Verdrehung von 90° bewirkt, die Amplituden aber nicht ändert, also:

$$q_0 = \left(1, \frac{\pi}{2}\right).$$

Wird ein Vektor zweimal hintereinander mit q_0 multipliziert, so muß sich ein um 180° gedrehter Vektor ergeben, also

$$q_0 \cdot q_0 = -1$$

oder

$$q_0 = \pm \sqrt{-1} = \pm j.$$

Unter $q_0 = j$ wird also eine Verdrehung um 90° verstanden, und zwar wollen wir unter $+j$ eine Voreilung von 90° und unter $-j$ eine Nacheilung von 90° verstehen.

Die Vektorquotienten folgen in bezug auf Addition und Subtraktion den gleichen Gesetzen wie die Vektoren, denn wir können offenbar den Kunstgriff anwenden, daß wir uns einen Vektor von der Länge 1 in horizontaler Richtung als Anfangsvektor denken, dann ist die Addition und Subtraktion von q_1 und q_2 gleichbedeutend mit der Addition und Subtraktion von $q_1 a_1$ und $q_2 a_2$, also von Vektoren.

Die Vektorquotienten folgen in allen Rechnungsarten den Gesetzen der komplexen Größen. Die Tatsache, daß eine Multiplikation mit $j = \sqrt{-1}$ als eine Drehung um 90° aufgefaßt werden kann, erleichtert das Verständnis der Gesetze der komplexen Zahlen.

Unter a und jb sehen wir schon im Geiste die beiden senkrecht zueinander stehenden Vektoren von der Größe a und b und unter der Summe die Hypotenuse. Unter dem Werte $\cos \varphi + \sqrt{-1} \sin \varphi$ erkennen wir einen Operator von der Größe 1, der gegen die Anfangsrichtung um φ verdreht ist. Daß $(\cos \varphi + \sqrt{-1} \sin \varphi)^n = \cos n\varphi + \sqrt{-1} \sin n\varphi$, wird eine Selbstverständlichkeit, denn der erstere Ausdruck besagt offenbar, daß ein Anfangsvektor n mal um den Winkel φ gedreht werden soll und der zweite Ausdruck, daß er einmal, dafür aber um den Winkel $n\varphi$ gedreht werden soll.

2. Die inversen Abbildungen.

Im Elektromaschinenbau tritt nun sehr oft das Problem auf, den Endpunkt eines Stromvektors zu verfolgen, wenn bei gegebener konstanter Spannung die Tourenzahl eines Motors variiert wird, mit an-

deren Worten, die Impedanz der Maschine in Abhängigkeit von einer skalaren Variablen darzustellen. Die einfachsten Fälle sind:

1. $y = q_1 + \lambda q_2$, wo λ einen jeden reellen Wert zwischen $-\infty$ und $+\infty$ annehmen kann.

Offenbar stellt dieser Ausdruck eine Gerade dar, die durch den Endpunkt von q_1 geht und mit q_2 parallel ist (Abb. 195).

2. Aus $OA = q_1 = (c_1, \varphi_1)$ können wir folgern: $\frac{1}{q_1} = \left(\frac{1}{c_1}, -\varphi_1\right)$ und ersehen daraus, daß $\frac{1}{q_1}$ graphisch durch $OB = \frac{1}{c_1}$ dargestellt ist, wobei OB mit der Horizontalen den Winkel $-\varphi_1$ bildet. Wir können uns aber auch so ausdrücken:

Zu OA bilden wir den reziproken Wert OB' (B' auf OA), spiegeln OB' an der Horizontalen und erhalten $OB = \frac{1}{q_1}$.

3.
$$y = \frac{1}{q_1 + \lambda q_2}.$$

Nach obigem bilden wir zunächst den reziproken Wert der Geraden $q_1 + \lambda q_2$ (siehe 1), was bekanntlich einen durch O gehenden Kreis ergibt (Abb. 195), dessen Mittelpunkt M' auf der von O auf $q_1 + \lambda q_2$ gefällten Senkrechten liegt und spiegeln dann den Kreis an der Horizontalen. Der neue Kreis mit dem Mittelpunkt M geht ebenfalls durch O .

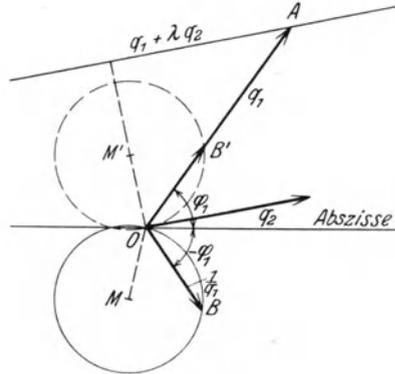


Abb. 195.

4.
$$y = \frac{q_3 + \lambda q_4}{q_1 + \lambda q_2}.$$

Dieser Ausdruck kann auf 3 zurückgeführt werden; denn

$$\frac{q_3 + \lambda q_4}{q_1 + \lambda q_2} = q_5 + \frac{q_6}{q_1 + \lambda q_2},$$

wobei

$$\frac{q_4}{q_2} = q_5 \quad \text{und} \quad q_3 - \frac{q_4 q_1}{q_2} = q_6$$

gesetzt wird.

Wir ersehen, daß der in 3. gefundene Kreis $\frac{1}{q_1 + \lambda q_2}$ zunächst mit q_6 multipliziert werden muß, wodurch sowohl die Größe des Kreises als auch die Lage des Mittelpunktes verändert wird. Der neue Kreis geht noch durch O . Nun tritt aber noch eine Verschiebung des auf diese Weise erhaltenen Kreises um q_5 ein, so daß wir jetzt den Kreis in allgemeiner Lage dargestellt haben.

3. Anwendung auf Wechselstromkreise.

Wir wollen nun vor allem einige der einfachsten Wechselstromkreise untersuchen und für diese den Zusammenhang zwischen Spannung U und Strom J symbolisch ausdrücken.

Wir fangen mit einem Stromkreis an, der nur einen Ohmschen Widerstand R enthält. Für diesen ist offenbar

$$U = JR$$

eine aus der Gleichstromtechnik wohlbekannte Beziehung, die aber hier auch das besagt, daß der Stromvektor mit dem Spannungsvektor in Richtung zusammenfällt und nur der Größe nach um den Faktor R verschieden ist.

Nun enthalte der Stromkreis eine Induktivität L . Wir wissen, daß dann die Spannung dem Strome 90° voreilt und dem Werte der Selbstinduktion L und der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ proportional ist. Wir können also symbolisch schreiben:

$$U = Jj\omega L.$$

Wir erhalten also eine ähnliche Beziehung wie beim Stromkreise mit Ohmschem Widerstand, nur daß statt R jetzt der Ausdruck $j\omega L$ hineinkommt.

Enthält der Stromkreis eine Kapazität C und fließt darin 1 Amp., so wird an den Klemmen der Kapazität eine Spannung herrschen, die dem Strome 90° nacheilt und die Größe $\frac{1}{\omega C}$ besitzt, denn je größer die Kapazität und die Frequenz, um so kleiner die Spannung, die den Strom hindurchzudrücken vermag. Es wird also

$$U = \frac{-Jj}{\omega C}.$$

Ganz allgemein kann ein einfacher Stromkreis Ohmschen Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität in Reihenschaltung enthalten. Dann sagen wir, daß der Stromkreis eine aus diesen drei Teilen zusammengesetzte Impedanz Z enthält, deren symbolischer Ausdruck nach dem vorhin Gesagten

$$Z = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}$$

ist. Und es ist

$$J = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}.$$

Die meisten zusammengesetzten Stromkreise bestehen aus hintereinander oder parallel geschalteten Impedanzen oder aus einer Kombination dieser beiden Fälle.

Erinnern wir uns der einfachen Gesetze der Gleichstromtechnik, wonach bei in Reihe geschalteten Widerständen der resultierende Widerstand gleich der Summe der Einzelwiderstände und bei parallel geschalteten Widerständen der resultierende Leitwert gleich der Summe der einzelnen Leitwerte ist, so können wir das Resultat, selbst für die kompliziertesten Stromkreise, meistens sofort als Kettenbruch hinschreiben, indem man bei Wechselstrom statt Widerstand sinngemäß Impedanzen einführt, also: Impedanzen (Z) in Reihenschaltung und ebenso Leitwerte $\left(\frac{1}{Z}\right)$ in Parallelschaltung addieren sich in der symbolischen Schreibweise.

Kreisdiagramm des Induktionsmotors.

Die gefundenen Regeln sollen auf die symbolische Darstellung des Kreisdiagrammes des Induktionsmotors angewandt werden.

In Abb. 196 ist das Ersatzdiagramm des Drehstrommotors dargestellt.

$z_1 = r_1 + jx_1$ ist die Streuimpedanz der Statorwicklung; unter y_a soll die Admittanz des Erregerkreises dargestellt werden; die Rotorreaktanz ist durch x'_2 und der Rotorwiderstand durch r'_2 dargestellt. Der ' soll andeuten, daß sowohl der Widerstand wie die Reaktanz des Rotors auf die Windungszahl des Stators umgerechnet sind. Zu erklären ist noch der Wert $\frac{r'_2}{\sigma}$. Wir können

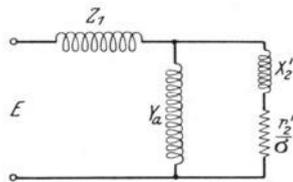


Abb. 196.

einen Drehstrommotor bei der Tourenzahl n immer zurückführen auf das Verhalten im Stillstand, vorausgesetzt, daß wir uns den Ohmschen Widerstand des Rotors in entsprechender Weise verändert denken. Wenn n_0 die synchrone Tourenzahl und n die wirkliche ist, so wird von der vom Stator auf den Rotor übertragenen Leistung N' ein Teil, und zwar $\frac{n}{n_0} N'$ auf die Welle weiter übertragen, während der Rest $(1 - \frac{n}{n_0}) N'$ in dem elektrischen Stromkreis des Rotors vernichtet wird. Der Wert $1 - \frac{n}{n_0}$ wird bekanntlich als Schlupf (σ) bezeichnet, und das Zusammenwirken der beiden Einflüsse kann durch Einsetzen des Widerstandes $\frac{r'_2}{\sigma}$ berücksichtigt werden.

Über den Wert der Admittanz y_a macht man sich am besten einen Begriff, wenn wir uns einen Motor mit offener Rotorwicklung und vernachlässigbar kleiner Statorstreuung vorstellen, dann ist offenbar $y_a U$ identisch mit dem Leerlaufstrom. y_a muß also sowohl eine Komponente enthalten, die die Eisenverluste berücksichtigt, als auch eine Komponente, die den Magnetisierungsstrom darstellt; da letzterer um 90° der Spannung nacheilt, so muß sich y_a in der Form $b - j \cdot g$ darstellen lassen, wo bU den Wirkstrom (Eisenverluste) und gU den Blindstrom darstellt.

In obigem Stromkreise muß man also die Impedanz z_1 addieren zu der Impedanz des übrigen Stromkreises. Von letzterem versuchen wir aber gar nicht, die Impedanz zu berechnen, sondern sofort den reziproken Wert, also die Admittanz.

Nach diesen Erklärungen ist das Resultat

$$J = \frac{U}{z_1 + \frac{1}{y_a + \frac{1}{\frac{r'_2}{\sigma} + j x'_2}}}$$

somit hinschreiben, oder

$$J = \frac{U [r'_2 y_a + \sigma (1 + j x'_2 y_a)]}{r'_2 (1 + z_1 y_a) + \sigma [(z_1 + j x'_2)(1 + z_1 y_a)]}$$

Die letzten zwei Winkel stellen aber die Neigung von OP_u und P_oP_u gegen die Vertikale dar; ihre Differenz ist der Winkel P_oP_uO , den wir mit β bezeichnen wollen.

Eine sehr gute Annäherung¹ ergibt für $\sphericalangle k$ den Wert $\arctan \frac{J_0 r_1}{U}$, so daß also M auf einer durch P_o gehenden Geraden liegt, die zur Horizontalen den Winkel $\beta + \arctan \frac{J_0 r_1}{U}$ bildet, wobei β positiv einzusetzen ist, wenn OP_u einen größeren Winkel mit der Horizontalen bildet als OP_o .

¹ Denn

$\sphericalangle (1 + z_1 y_a) = \sphericalangle (1 + (r_1 + j x_1) y_a) = \sphericalangle (1 + r_1 y_a) + \sphericalangle (1 + j x_1 y_a)$
oder annähernd:

$$\sphericalangle (1 + z_1 y_a) = \sphericalangle (1 + r_1 y_a) + \sphericalangle (1 + j x_1 y_a)$$

$$\sphericalangle k = - \sphericalangle (1 + r_1 y_a) = \arctan \frac{r_1 \cdot J_0}{U}.$$

Der Drehstrommotor. Ein Handbuch für Studium und Praxis.
Von Professor Julius Heubach, Direktor der Elektromotorenwerke Heidenau G. m. b. H. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 222 Abbildungen.
XII, 599 Seiten. 1923. Gebunden RM 20.—

Die asynchronen Drehstrommaschinen mit und ohne Stromwender. Darstellung ihrer Wirkungsweise und Verwendungsmöglichkeiten. Von Professor Dipl.-Ing. Franz Sallinger, Eßlingen. Mit 159 Textabbildungen. VI, 197 Seiten. 1928. RM 8.—; gebunden RM 9.20

Die asynchronen Drehstrommotoren und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Von Betriebsingenieur Jakob Ippen. Mit 67 Textabbildungen. VII, 90 Seiten. 1924. RM 3.60

Der Drehstrom-Induktionsregler. Von Professor Dr. sc. techn. H. F. Schait, Winterthur. Mit 165 Textabbildungen. VIII, 356 Seiten. 1927. Gebunden RM 25.50

Die wirtschaftliche Regelung von Drehstrommotoren durch Drehstrom-Gleichstrom-Kaskaden. Von Dr.-Ing. H. Zabransky. Mit 105 Textabbildungen. IV, 112 Seiten. 1927. RM 9.—

Berechnung von Drehstrom-Kraftübertragungen. Von Oberingenieur Oswald Burger. Mit 36 Textabbildungen. V, 115 Seiten. 1927. RM 7.50

Entwurf und Bau von Schaltanlagen für Drehstrom-Kraftwerke. Von Oberingenieur Johann Waltjen. Mit 373 Abbildungen im Text. XVI, 268 Seiten. 1929. Gebunden RM 39.—

Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Kommutator- und Induktionsmotoren. Von Professor Dr. Gustav Benischke. Zweite, erweiterte Auflage. Mit 109 Abbildungen im Text. V, 123 Seiten. 1929. RM 11.40; gebunden RM 12.60

Elektrische Maschinen. Von Professor Dr.-Ing. Rudolf Richter, Direktor des Elektrotechnischen Instituts, Karlsruhe.

Erster Band: **Allgemeine Berechnungselemente. Die Gleichstrommaschinen.** Mit 453 Textabbildungen. X, 630 Seiten. 1924.

Gebunden RM 32.—

Zweiter Band: **Synchronmaschinen und Einankerumformer.** Mit Beiträgen von Professor Dr.-Ing. Robert Brüderlink, Karlsruhe. Mit 519 Textabbildungen. XIV, 707 Seiten. 1930.

Gebunden RM 39.—

Wirkungsweise elektrischer Maschinen. Von Dr. techn. Milan Vidmar, ord. Professor an der jugoslavischen Universität Ljubljana. Mit 203 Abbildungen im Text. VI, 223 Seiten. 1928.

RM 12.—; gebunden RM 13.50

Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine.

Von Dr. techn. Milan Vidmar, ord. Professor an der jugoslavischen Universität Ljubljana. Mit 7 Textabbildungen. V, 113 Seiten. 1918. RM 5.60

Elektromaschinenbau. Berechnung elektrischer Maschinen in Theorie und Praxis. Von Privatdozent Dr.-Ing. P. B. Arthur Linker, Hannover. Mit 128 Textfiguren und 14 Anlagen. VIII, 304 Seiten. 1925.

Gebunden RM 24.—

Die Elektromotoren in ihrer Wirkungsweise und Anwendung. Ein Hilfsbuch für die Auswahl und Durchbildung elektromotorischer Antriebe. Von Oberingenieur Karl Meller. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 153 Textabbildungen. VII, 160 Seiten. 1923.

RM 4.60; gebunden RM 6.—

Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Ein Lehrbuch von Professor Dr.-Ing. Rudolf Richter, Direktor des Elektrotechnischen Instituts, Karlsruhe. Mit 377 Textabbildungen. XI, 423 Seiten. 1920. Berichtiger Neudruck 1922. Gebunden RM 20.—

Die symbolische Methode zur Lösung von Wechselstromaufgaben. Einführung in den praktischen Gebrauch. Von Hugo Ring. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 50 Textabbildungen. VII, 80 Seiten. 1928. RM 4.50