

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 25 (1934)
Heft: 20

Artikel: Anlauf und Betriebsverhältnisse der Induktionsmotoren bei Verwendung verschiedener Rotorarten
Autor: Dünner, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060175>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des
Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:
A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich 4
Stauffacherquai 36/40

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXV. Jahrgang

N^o 20

Mittwoch, 26. September 1934

Bericht über die Diskussionsversammlung des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)

abgehalten am Samstag, dem 7. April 1934, in Olten.

621.313.333

Die Diskussionsversammlung des SEV vom 7. April 1934 fand unter dem Vorsitz von Herrn Direktor Schiesser, Präsident des SEV, statt. Sie war von 130 Mitgliedern und Gästen besucht. Es wurden folgende Themata behandelt:

1. Anlauf und Betriebsverhältnisse der Induktionsmotoren bei Verwendung verschiedener Rotorarten; einleitendes Referat von Herrn Professor E. Dünner, Zürich.
2. Die neuesten Fortschritte im Transformatorenbau; einleitendes Referat von Herrn Dr. J. Goldstein, Zürich.
3. Der elektrische Unfall; einleitendes Referat von Herrn Ing. F. Sibler, Starkstrom-Inspektor, Zürich.

Wir beginnen in dieser Nummer mit der Veröffentlichung des ersten Referates und der zugehörigen Diskussion.

L'assemblée de discussion de l'ASE du 7 avril 1934, présidée par M. Schiesser, président de l'ASE, a réuni environ 130 membres et hôtes. Les sujets suivants y ont été traités: 1^o Le démarrage et l'exploitation des moteurs à induction pour différents types d'induits, par Monsieur E. Dünner, professeur, Zurich.

2^o Les plus récents progrès dans la construction des transformateurs, par Monsieur J. Goldstein, ingénieur, Zurich.

3^o Les accidents dans les installations électriques, par Monsieur F. Sibler, ingénieur à l'inspectorat des installations à courant fort, Zurich.

Nous reproduisons dans le présent numéro la première conférence et la discussion qui suivit.

Anlauf und Betriebsverhältnisse der Induktionsmotoren bei Verwendung verschiedener Rotorarten.

Referat, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 7. April 1934, in Olten, von Prof. E. Dünner, Zürich.

Es wird in prägnanter Form ein vollständiger Ueberblick über die Betriebseigenschaften des Drehstrom-Asynchronmotors in seinen verschiedenen Formen (Schleifringanker, gewöhnlicher Kurzschlussanker, Stromverdrängungsanker) gegeben und gezeigt, wie diese Eigenschaften durch konstruktive Massnahmen und Anlassapparate beeinflusst werden können, und es werden wertvolle Richtlinien für die Wahl der Motortype und für die Festsetzung der Anschlussbedingungen für solche Motoren gegeben.

L'auteur donne sous une forme précise un aperçu complet des propriétés des différents types de moteurs asynchrones triphasés (à bagues, en cage d'écureuil, à effet pelliculaire, etc.), et montre comment ces propriétés peuvent être influencées par des mesures constructives ou par les dispositifs de démarrage. Des directives précieuses pour le choix du type d'induit et pour l'établissement des conditions de raccordement pour ces moteurs terminent cet exposé.

Unter der Bezeichnung Induktionsmotoren, die in der Ankündigung des Vortrages gebraucht ist, sind die Asynchronmotoren verstanden, von denen wiederum die mehrphasigen, speziell die Dreiphasen- oder Drehstrommotoren, unser Interesse beanspruchen.

Der Aufbau dieser Motorenart zeigt aussen den feststehenden Teil, den Stator, innen den rotierenden Anker, den Rotor. Der Stator enthält die in halbgeschlossenen Nuten gelagerte Statorwicklung, eine eingeträufelte oder durchgezogene Dreiphasenwicklung; durch Variation der Windungszahl kann für gegebene Klemmenspannung der magnetische Fluss und dadurch das Drehmoment eingestellt werden; naturgemäss werden dadurch auch der Wirkungsgrad, der Leistungsfaktor und die Erwärmung beeinflusst. Die folgenden Ausführungen

betreffen nur den Rotor; sie setzen immer die richtige Statorwicklung voraus.

Die Rotorwicklung ist mit wenig Ausnahmen ebenfalls in halbgeschlossenen Nuten gelagert; die Variante der ganz geschlossenen Nute findet sich nur bei den geräuschlosen Motoren. Die ganz geschlossene Nute ergibt grosse Nutenstreuung und damit u. a. schlechten Leistungsfaktor, die ganz offene Nute bei den üblichen kleinen Luftspalten grosse Pulsationsverluste und damit schlechten Wirkungsgrad; die halbgeschlossene Nute geht mitten durch (Fig. 1 a). Die Rotorwicklung übernimmt die Rolle einer Ankerwicklung, da in ihr vom Stator her als erregendem Teil durch elektromagnetische Induktion Spannung und damit bei geschlossener Wicklung Strom induziert wird. Ihre technologische Ausführung zeigt verschiedene Va-

rianten: die Phasenwicklung und die Kurzschluss- oder Käfigankerwicklung.

Das entscheidende Merkmal der ersten, der Wicklung der Schleifringankermotoren, liegt darin, dass eine aus isolierten Leitern gebildete Mehrphasenwicklung vorliegt, deren Phasenenden auch

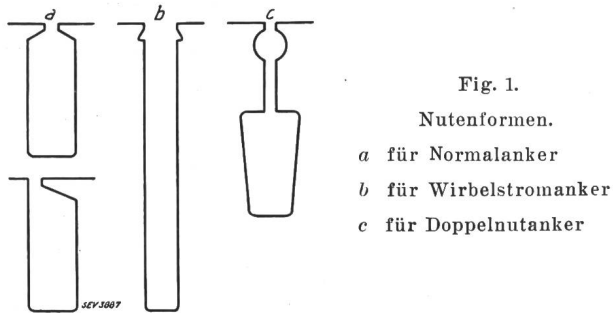


Fig. 1.

Nutenformen.

a für Normalanker

b für Wirbelstromanker

c für Doppelnutenanker

bei Lauf zugänglich sind, so dass eine Aenderung der internen Schaltung oder das Zuschalten eines äusseren Stromkreises (Anlasswiderstand) möglich ist.

Die zweite Variante fassen wir unter dem Namen Käfigankerwicklung zusammen. Hier besteht die Rotorwicklung aus einer in sich geschlossenen, von aussen her nicht beeinflussbaren Wicklung; eine Aenderung der Schaltung oder Zuschalten eines äusseren Widerstandes, z. B. eines Anlassers, ist ausgeschlossen; die Leiterzahl pro Nute ist wohl immer 1. Die Fabrikanten bevorzugen heute für den Nutenleiter den nackten Kupferstab, für die Stirnverbindung den Kurzschlussring aus Kupfer oder einer giessbaren, kupferhaltigen Legierung. Einzelne Firmen giessen die ganze Rotorwicklung aus Aluminium.

Vor der Untersuchung des Einflusses der Rotor-ausbildung soll die Wirkungsweise eines Asynchronmotors kurz betrachtet werden. Für Stator- und Rotorkreis in vektorieller Schreibweise gilt das allgemeine Gesetz, dass Summe der eingepprägten oder induzierten Spannungen gleich der Summe der Spannungsabfälle ist (Gl. 1 und 2):

$$U_1 = \Im_1 R_1 + j \Im_1 \omega_1 L_{1,1\Delta} + j \Im_2 \omega_1 M_{2,1\Delta} \quad (1)$$

$$0 = \Im_2 R_2 + j \Im_2 \omega_2 L_{2,2\Delta} + j \Im_1 \omega_2 M_{1,2\Delta} \quad (2)$$

Der Index 1 gilt für den Stator, der Index 2 für den Rotor. Der Zusammenhang $\omega_2 = s\omega_1$ gestattet, in Gleichung (2) die Winkelgeschwindigkeit ω_2 durch diejenige des Stators zu ersetzen; Gl. (2 a)

$$0 = \Im_2 \frac{R_2}{s} + j \Im_2 \omega_1 L_{2,2\Delta} + j \Im_1 \omega_1 M_{1,2\Delta} \quad (2a)$$

enthält nun den mit der Schlüpfung s variablen Rotorwiderstand. Aus (2) stellen wir $\Im_2$ frei und führen seinen Wert in Gl. (1) ein; der Zusammenhang zwischen der aufgedrückten Klemmenspannung U_1 und dem aufgenommenen Strom I_1 ergibt sich, wenn $M_{1,2\Delta} = M_{2,1\Delta} = M_{\Delta}$, zu

$$U_1 = \Im_1 \left[R_1 + j \omega_1 L_{1,1\Delta} + \frac{\omega_1^2 M_{\Delta}^2}{\frac{R_2}{s} + j \omega_1 L_{2,2\Delta}} \right] = \Im_1 \Im_1 \quad (3)$$

Der Inhalt der Klammer ist die Impedanz des Motors; da die einzige Variable s im Nenner steht, gibt die graphische Darstellung der Impedanz einen Kreis. Für U_1 konstant und I_1 variabel schreiben wir den Ausdruck (4), der ebenfalls einen Kreis bedeutet, den *Stromkreis*.

$$\Im_1 = \frac{U_1}{\Im_1} \quad (4)$$

Dieser Zusammenhang zwischen angelegter Klemmenspannung U und aufgenommenem Strom I bei variabler Belastung wurde zuerst von A. Heyland angegeben¹⁾, daher die bekannte Bezeichnung *Heylandkreis*. Meistens benützt man die von Ossanna gegebene Darstellung, welche einige von Heyland nachträglich im Interesse der Einfachheit gemachten Vernachlässigungen vermeidet. Fig. 2 gibt den *Ossannakreis*. Der grosse Wert des Kreisdiagrammes beruht darauf, dass zu seiner Aufstellung nur zwei, sehr wenig Leistung benötigende Versuche auszuführen sind, nämlich der Leerlauf- und der Kurzschlussversuch; die für diese Versuche bereitzustellende Leistung beträgt nur wenige Prozente der Nutzleistung.

Lassen wir den Punkt P , den Endpunkt des primären Stromvektors, auf dem Kreise wandern, so durchlaufen wir von Leerlauf P_0 ausgehend bis zum Kurzschluss P_k den Betrieb als Motor; von P_k bis zur Abszisse wird die Maschine als Bremse anzusprechen sein, da sie sowohl mechanische wie elektrische Leistung aufnimmt. Unterhalb der Abszisse liegen die Punkte, für welche die Maschine als Generator arbeitet. Für die heutige Bespre-

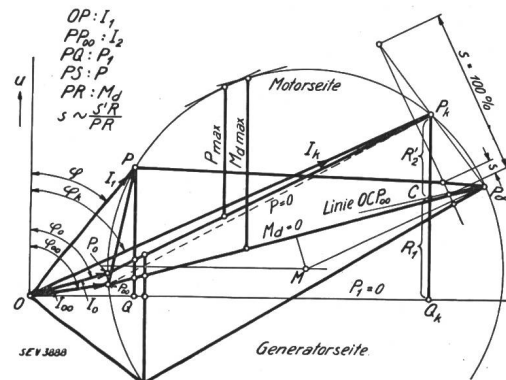


Fig. 2.

Stromdiagramm (Ossanna).

chung von Interesse ist nur der Betrieb als Motor, also Bogen P_0 bis P_k ; dabei sind die Anlaufverhältnisse durch den Stillstandspunkt P_k festgelegt. Der Abstand dieses Punktes von der Drehmomentgeraden $P_{00} P_{\infty}$ gibt das vom Motor entwickelte Drehmoment. Die Figur zeigt, dass trotz grossen

¹⁾ ETZ 11. Okt. 1894.

Stromes ein mässiges Moment entwickelt wird; Erfahrungszahlen sind 4- bis 8facher Normalstrom für 1- bis 1½faches Normalmoment. Die Drehmomentgerade legt sich durch den ideellen Leerlaufpunkt fest, der in den Zeichnungen fast mit dem wirklichen zusammenfällt und durch den Punkt P_∞ , der letztere bestimmt durch seine Verbindungslinie mit O den Punkt C ; die Strecke CQ_k wiederum ist der Statorwiderstand R_s . Erhöhen wir den Rotorwiderstand, so steigt der Punkt P_k nach links und das Moment wird grösser. Die physikalische Erklärung dieser Erscheinung liegt darin, dass im Stillstand der Kupferverlust im Rotor Drehmoment bedeutet. Eine Erhöhung des Rotorwiderstandes bedeutet daher für den Stillstand, also auch für das Einschalten, neben einer Verkleinerung des Einschaltstromes auch eine Vergrösserung des Drehmomentes. Durch Verschieben des Anlaufpunktes bis zum Laufpunkt müsste mit Einschaltstrom gleich Normal- oder Nennstrom erreicht werden. In der Praxis muss allerdings mit Rücksicht auf die Variation des Momentes mit der gegenseitigen Nutzenstellung Stator-Rotor mit etwas grösserem Strom gerechnet werden; ebenso bedarf es für doppeltes Nennmoment im Anlauf etwas mehr als doppelten Nennstrom. Die Funktion des Anlasswiderstandes ist also sehr übersichtlich und sehr nützlich; leider bedeutet er für den Motor eine Komplikation und eine Verteuerung (über 10 %), dies um so mehr, als mit dem Anlasser meist noch eine Kurzschluss- und Bürstenabhebevorrichtung verbunden ist. Die Schwächen dieser mechanischen Vorrichtung sind bekannt; sie setzt richtige Reihenfolge der Betätigungsbebewegungen voraus und kann bei kurzzeitigem Ausbleiben der Spannung eventuell nicht mehr auf Anlauf zurückgeschaltet werden, so dass die wiederkehrende Spannung den Motor in Lauf- statt in Anlaufstellung trifft.

Richtige Schaltreihenfolge und stete Bereitschaft für Anlassen gewährleisten die *Zentrifugalanlasser*, welche zur Betätigung des stufenweisen Kurzschliessens des Anlasswiderstandes die Zentrifugalkraft des hochlaufenden Rotors benützen. Ein solcher, automatisch arbeitender Anlasser ist vom mechanischen Standpunkte aus eine ganz wesentliche Verbesserung; er schaltet falsches Manipulieren aus, ebenso die aus kurzzeitigem Aussetzen der Spannung möglichen schädlichen Folgen. Dagegen haften ihm die mit der Automatizität verbundenen Nachteile an; spielt etwas nicht richtig, so bleiben Anlasser und Motor bei irgendeiner Umdrehungszahl stehen und verbrennen. Bei Netzen mit unkonstanter Spannung oder Frequenz müssen daher Sicherheitsvorrichtungen in Form von Nullspannungsschaltern oder Thermorelais vorgesehen werden, wodurch sich der Preis wiederum erhöht. Immerhin darf gesagt werden, dass für bekannten Anlauf bei gewickelten Ankern wohl weit überwiegend Motoren mit Zentrifugalanlassern in Frage kommen, der Handanlasser nur

noch da, wo eine Anpassung an das Lastmoment während des Hochlaufens gewünscht wird, z. B. bei Kranen.

Die Betätigung des Anlassers, Hand- oder Zentrifugalanlasser, erfolgt stufenweise, entsprechend dessen üblicher Ausbildung als gestufter Widerstand aus Metall, und zwar meist aus galvanisiertem Eisen. Der Strom und damit das Drehmoment erfahren daher stufenweise Aenderungen, die je nach der Grösse unter Umständen Nachteile haben können. Die Grösse der Stromsprünge hängt in erster Linie von der Zahl der Anlaßstufen und deren Verteilung ab; als sehr ungünstig in dieser Beziehung erweist sich das unsymmetrische Schalten, d. h., dass bei dreiphasiger Wicklung der Widerstand nicht auch dreiphasig betätigt wird. Die Angaben, die dem Anlassvorgang bezüglich entwickelten Momentes meist zugegeben werden, z. B. Anlassen für Halblast, und die auch für den Anlaßstrom eine Festlegung bedeuten in dem Sinne, dass für Halblast ein Einschaltstrom nicht wesentlich grösser als halber Nennstrom, für Vollast nicht wesentlich grösser als voller Nennstrom zu erwarten ist, gelten nur für den ersten Stromstoss, den Einschaltstromstoss. Dagegen verpflichten sie nicht für die weiteren, während des Hochlaufens eintretenden Stromstösse; hier spielt neben der Stufung auch die Zeitfolge der einzelnen Schaltbetätigungen eine Rolle. Da es unmöglich ist, die durch die Theorie vorgeschriebene zeitliche Stufung nach der geometrischen Reihe einzuhalten, wird bei Handanlassern am besten nach dem Gehör angelassen.

Hand- und Zentrifugalanlasser setzen einen gewickelten Anker voraus. Die Wicklung wird zweiphasig, viel häufiger dreiphasig gebaut; ebenso ist für den Anlasser die dreiphasige Anordnung des Widerstandes die Norm. Die bei Stillstand in der Rotorwicklung und damit auch in der Anlasserwicklung auftretenden Spannungen, die dann mit zunehmender Drehzahl des Rotors abnehmen, liegen im Rahmen von 100 Volt für kleine, bis 1000 Volt für sehr grosse Motoren. Diese Spannung, wenn auch nur kurzzeitig wirkend und im Lauf auf wenige Prozente reduziert, benötigt für die Ankerwicklung und auch für die Anlasserwicklung eine gewisse Isolation, die im Anker speziell mit Rücksicht auf die mechanische Beanspruchung durch die Rotation verhältnismässig kräftig gehalten sein muss. Die mechanische Beanspruchung wird im weitem jede schwache Stelle sofort zum Defekt ausbilden, so dass der Anker ein beliebiger Ort für Windungs- und Eisenschlüsse ist. Alle die Leiter- und Nutenisolation betreffenden Fragen und Sorgen der Statorwicklung wiederholen sich so beim Anker; der Gewinn durch die kleinere Spannung wird durch die stärkere mechanische Beanspruchung aufgehoben. Es existieren Schätzungen, welche bis zu 30 % der Motordefekte auf Schädigungen an der Rotorwicklung zurückführen. Ueber alle an Wicklungen, Schleifringen und an-

deren Ortes auftretenden Störungen und Krankheiten orientiert ausführlich das von R. Spieser unter Mitarbeit von Fachleuten der Firma Brown, Boveri & Cie. herausgegebene Buch «Krankheiten elektrischer Maschinen, Transformatoren und Apparate». ²⁾

Höherer Preis und die Gefahr des Wicklungsdefektes sind die wesentlichsten Nachteile des gewickelten Ankers mit Anlasser, sein Vorteil dagegen die Möglichkeit der Reduktion des Einschaltstromes und der Einstellung des Einschaltmomentes. Die skizzierten Nachteile umgeht der *Käfiganker*. Die aus blanken Kupferstäben und beidseitig nackten Kurzschlussringen bestehende Wicklung liegt hier ohne Isolation in den Nuten; Wicklungsdefekte im Sinne von Isolationsdefekten sind unmöglich. Die Verbindung Leiter-Kurzschlussring durch Hartlöten oder Vergiessen schaltet die letzte Möglichkeit eines Wicklungsdefektes praktisch aus. Der Wegfall eines Anlassers schaltet eine weitere Defektmöglichkeit aus; die erwähnten technologischen Nachteile sind also restlos verschwunden. Ferner: Der Wegfall der Nutenisolation und die grössere Freiheit in der Wahl der Nutenzahl kann eine Leistungssteigerung zur Folge haben, die sich namentlich bei kleinen Motoren als ganz erheblich erweist; zudem wird durch den Wegfall der Schleifringe oder des eingebauten Anlassers der Motor kürzer und billiger. Die Aufzählung der Vorteile muss im weitem die kleinere Rotorstreuung enthalten, die bessere Laufverhältnisse zur Folge hat, d. h. bessern Leistungsfaktor und Wirkungsgrad. Je kleiner der Motor, desto ausgeprägter zeigen sich alle diese Vorteile; sie betreffen einmal die elektrischen Daten, dann, was viel höher zu werten ist, die Betriebssicherheit und, was oft entscheidend ist, den Preis.

Die in sich geschlossene Rotorwicklung schliesst das Zuschalten eines äusseren Widerstandes aus, und damit entfällt die Möglichkeit, den Einschaltstrom und das Einschaltmoment zu variieren. Es wird sich der durch den Kurzschlusspunkt P_k im Stromkreis bestimmte grosse Stromwert einstellen, ohne entsprechend grosses Drehmoment. Hier liegt der schwache Punkt des sonst als ideal betrachteten Käfigankermotors. Bekannt sind die verschiedenen Mittel, mit denen seit langer Zeit versucht wird, diese Schwäche zu beheben, oft allerdings nur zu verdecken. Am verbreitetsten ist das Anlassen mit Stern-Dreieckschaltern, d. h. Anlauf in Stern, was pro Phase eine auf $U : \sqrt{3}$ reduzierte Spannung ergibt, und Lauf in Dreieck, wobei jede Phasenwicklung die ihr zugehörige volle Spannung U erhält. Die Komplikation des Schalters und die Verteuerung desselben sind unwesentlich und gegenüber dem Gewinn bezüglich Stromstoss nicht ins Gewicht fallend. Leider haftet diesem sympathischen Mittel, durch das der Einschaltstrom auf rund $1/3$ desjenigen bei direktem Einschalten redu-

ziert wird, ein grosser Nachteil an; die Reduktion des Stromes wird erkauft durch eine gleichzeitige Reduktion des entwickelten Momentes, das ebenfalls auf $1/3$ sinkt. Dieses kleinere Moment, nur $1/3$ bis $2/3$ des Nennmomentes betragend, genügt nun für viele Antriebe nicht. Zu Antrieben, die sicher mit Stern-Dreieck angelassen werden können, gehören die Umformergruppen, ferner die Antriebe mit Voll- und Leerscheibe; andere, die für diesen Anlauf prädestiniert scheinen, ergeben oft Misserfolg, wie Pumpen und Ventilatoren. Immerhin, da, wo leichter Anlauf gewährleistet und mässiger Einschaltstrom vorgeschrieben, wird die Lösung mit Kurzschlussanker und Stern-Dreieckanlauf die richtige sein. Häufig allerdings ist der Gewinn bezüglich Stromstoss fiktiv. Fig. 3 zeigt den Verlauf des Stromes und des Drehmomentes für einen Käfigankermotor; die Kurven lassen erkennen, dass das Umschalten von Stern auf Dreieck bei einer verhältnismässig kleinen Schlüpfung stattfinden muss, soll nicht der Uberschaltstromstoss gross werden. Wann das Umschalten statt-

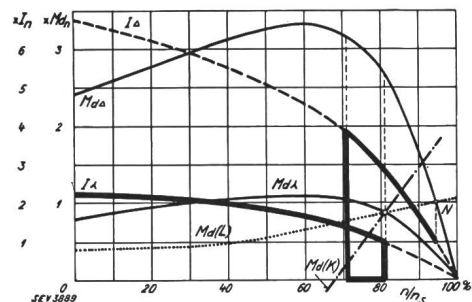


Fig. 3.

Drehstrom-Kurzschlussankermotor in Δ und Δ -Schaltung.

- I_Δ Strom bei Sternschaltung.
- $M_{d\Delta}$ Drehmoment bei Sternschaltung.
- I_Δ Strom bei Dreieckschaltung.
- $M_{d\Delta}$ Drehmoment bei Dreieckschaltung.
- $M_{d(L)}$ Drehmoment der Last.
- $M_{d(K)}$ Kupplungsdrehmoment.

Der dickausgezogene Linienzug ist der Stromverlauf bei Stern-Dreieckanlauf bei frühzeitigem Umschalten für die Last $M_{d(L)}$.

findet, hängt erstens vom Bedienenden, zweitens vom Gegenmoment ab. Das eingezeichnete Lastmoment $M_d(L)$ erfordert z. B. unbedingt ein zu frühes Umschalten. Hier liegt auch der schwache Punkt der meisten in den letzten Jahren auf den Markt gekommenen Zentrifugalkupplungen; Fig. 3 zeigt dick ausgezogen ein Beispiel des Stromverlaufes für diesen Fall.

Es sei in diesem Zusammenhang noch auf den Umstand aufmerksam gemacht, dass der Einfluss von Beschleunigungsstössen bei den verschiedenen Geschwindigkeiten verschieden ist. Die aufgespeicherte Energie ist gegeben durch den Ausdruck $\frac{m v^2}{2}$, also wirkt eine Geschwindigkeitsänderung von X m/s bei grosser Geschwindigkeit viel stärker als bei kleiner Geschwindigkeit oder beim Einschalten in Stillstand. Eine Beschleunigungsänderung, die z. B. beim Umschalten von Stern in Dreieck stattfindet, wird auf ein Getriebe eine viel grö-

²⁾ Verlag Springer, Berlin, 1932; siehe Bull. SEV 1933, Nr. 2, S. 37.

sere Beanspruchung zur Folge haben als der Stoss beim direkten Einschalten mit kräftigem Uebererschussmoment. Sprungweises Aendern des Stromes und damit des Momentes ist in erster Linie bei hohen Drehzahlen gefährlich und nicht beim Uebergang von Ruhe zur Bewegung; dieser Punkt spricht gegen Stern-Dreieck und gegen brüsk wirkende Zentrifugalkupplungen. Auch dem Anlassen mit gestuftem Anlasser haftet diese Schwäche an und setzt genügend viele, richtig verteilte Widerstandsstufen voraus. Sehr günstig in dieser Beziehung ist der Drehmomentverlauf des Motors mit Spezialanker, siehe Fig. 8.

Zusammenfassend darf gesagt werden, dass der Käfigankermotor technologisch dem Motor mit gewickeltem Anker unbedingt überlegen ist und der grosse Einschaltstrom dem Antrieb kaum schadet. Nachteile für das Netz können erst die Stromstösse grosser Motoren ergeben.

Unter Benützung der auf induktiver Wirkung beruhenden Stromverdrängung ist es gelungen, Motoren zu entwerfen, welche auch für grössere

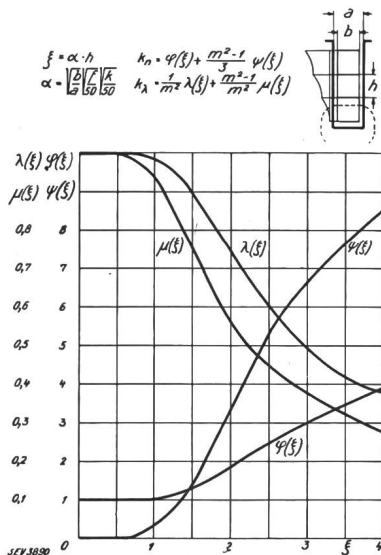


Fig. 4.
Widerstandszunahme
und Streuungsver-
minderung bei Strom-
verdrängung.

Leistungen, beispielsweise 10 kW, den Einschaltstrom auf das für die Netze als zulässig erachtete Mass reduzieren. Damit ist der einzige dem Käfiganker entgegen gehaltene Vorwand entkräftet und die Möglichkeit geschaffen, die heutigen Anschlussbeschränkungen des Kurzschlussankermotors um ein wesentliches Stück zu reduzieren oder überhaupt wegfallen zu lassen.

Die physikalische Erklärung der Wirkungsweise solcher neuerer Motoren, die häufig als Motoren mit Stromverdrängungsanker oder kürzer mit Spezialanker bezeichnet werden, ist die folgende: Jeder stromdurchflossene Leiter bildet um sich herum ein magnetisches Kraftfeld aus, das bei einer ganz oder teilweise offenen Nute von Unterkant Leiter gegen die Nutöffnung zunimmt, also Oberkant des oder der Leiter sein Maximum besitzt, siehe Fig. 4 oben. Ist der Leiter von Wechselstrom durchflossen, so pulsiert dieses Nutenstreufeld und indu-

ziert im Leiter selbst Spannung und Strom. Dieser Strom fliesst, abgesehen von Phasenverschiebungen, Oberkant gleichsinnig wie der Nutzstrom, Unterkant ihm entgegen. Dieses Mehr oben und Weniger unten bedeutet im ganzen eine Stromverdrängung nach oben oder aussen; die ursprünglich gleichmässige Stromverteilung ändert in eine ungleichmässige und die Kupferverluste, die dem Strome im Quadrat proportional sind, nehmen zu, trotzdem der Leiterstrom im gesamten nicht geändert hat. Diese Mehrverluste werden als zusätzliche Kupferverluste bezeichnet und können rechnungsgemäss durch eine Erhöhung des Ohmschen Widerstandes erfasst werden. Das Gesetz des Anwachsens dieser zusätzlichen Verluste mit der Leiterhöhe ist in den Kurven der Fig. 4 dargestellt; für einen einzigen Leiter in der Nute gilt die Kurve $\varphi(\xi)$.

In der als Abszisse benützten reduzierten Leiterhöhe steckt die Frequenz in der Wurzel; mit sinkender Frequenz, wie das für den Rotorstrom beim Anlaufen des Rotors der Fall ist, nehmen die Verluste, bzw. der Widerstand ab; bei Lauf mit normalem Schlupf ist das Phänomen praktisch verschwunden und es wirkt nur noch der rein Ohmsche Widerstand. Der Vorgang stellt also eine ganz ideale Anlassmethode dar, indem die Aenderung des Rotorwiderstandes von gross auf klein zwangsläufig mit der Schlüpfung erfolgt. Falsche Anlassmanipulation und dergleichen ist also vollkommen ausgeschlossen; für Strom und Beschleunigungsstösse ist auch kein Platz mehr. Diese Anlassmethode ist auch derjenigen mit Zentrifugalanlasser bei weitem überlegen, da ein Versagen ausgeschlossen ist. Für den bei Käfiganker üblichen Fall eines einzigen Stabes in einer parallelwandigen Nute geht die Widerstandsvermehrung bei grösseren Werten proportional der reduzierten Leiterhöhe ξ ; für kräftige Stromverdrängung, also starke Widerstandserhöhung, braucht es daher schmale, tiefe Nuten. Die für Anlauf mit Normalstrom nötige Widerstandsvermehrung liegt im Rahmen 5 bis 10; der die reduzierte Leiterhöhe bestimmende Faktor α , der neben der Frequenz die Kupferfüllung in der Nutbreite und die elektrische Leitfähigkeit des Wicklungsmaterials umfasst, erreicht günstigsten Falles den Wert 0,9, so dass für die obige Widerstandszunahme Nutentiefen von 6 bis 12 cm nötig werden. Das ist für kleinere Maschinen aus mechanischen Gründen unmöglich und für grosse Maschinen aus elektrischen Gründen nicht zu empfehlen; die Widerstandsvermehrung ist also wohl theoretisch, aber nicht praktisch unbeschränkt.

Eine andere, auf gleicher physikalischer Grundlage beruhende und zu gleichen Resultaten führende Lösung ist die Ausbildung des Rotors als *Doppelnutanker*. Die übliche Ausbildung der Nute ist in Fig. 1c angegeben; der obere Nutteil oder die obere Nute enthält einen Wicklungsstab mit sehr viel Widerstand, die untere Nute oder der

untere Nutteil ergibt dank des grossen Querschnittes für den Leiter nur geringen Widerstand. Der Streuhals zwischen den beiden Nuten oder Nutteilen schafft grosse magnetische Streuung und damit kräftiges Spielen des skizzierten Problems der Stromverdrängung, die hier den Strom in den obern Leiter mit seinem grossen Widerstand abdrängt und damit den grossen Kupferverlust, der sich wie Widerstandsvermehrung auswirkt, hervorruft. Der Umstand, dass im Anlauf der Strom fast ausschliesslich den obern Stab benützt, für diesen Betriebszustand dieser also mit seinem grossen Widerstand die elektrischen Verhältnisse bestimmt, bei Lauf jedoch die ganze Nute, wodurch der kleine Widerstand des untern Stabes entscheidet, lässt leicht erklären, dass das Stromdiagramm dieses Motors Stücke zweier Kreise enthalten muss und der Uebergang vom einen zum andern eine mehr oder weniger grosse Einsattlung zur Folge hat, die eine entsprechende Variation des Drehmomentes ergibt. Diese Sattelbildung prägt sich bei Wirbelstromankern viel weniger aus und ist in experimentell aufgenommenen Kurven kaum nachweisbar.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die Stromverdrängung, da die angelegte Spannung gegeben ist, einer Stromverarmung gleich kommt. Dadurch wirkt sie auf die Streuung zurück, in dem Sinne, dass diese durch die zusätzlichen Kupferverluste in diesem Fall reduziert wird. Die Korrektur ist bestimmt durch die Kurven $\lambda(\xi)$ und $\mu(\xi)$, wobei für nur einen Nutzenstab die Funktion $\lambda(\xi)$ die Reduktion bestimmt. Das Zusammenspiel dieser beiden Vorgänge, mathematisch erfassbar durch sehr komplizierte Funktionen, nötigt zu punktwiser Berechnung.

Verlassen wir mit diesen Hinweisen die Berechnung und fragen wir uns, ob diese elegante Anlassmethode ohne Nachteile erkaufte wird? Die innere Ursache der Stromverdrängung ist die Pulsation des Nutzenstreufeldes; starke Stromverdrängung und grosses Nutzenstreufeld gehen Hand in Hand. Das Nutzenstreufeld, gross gemacht durch schmale, tiefe Nuten oder starken Streuhals, bleibt nun auch bei Lauf bestehen, wo es nicht mehr gebraucht wird und verschlechtert den Motor. Hier liegt die Kehrseite dieser im übrigen glänzenden Anlassmethode; wohl gelingt es uns, den Anlaufstrom bei gleichzeitiger Verbesserung des Drehmomentes zu reduzieren; gleichzeitig aber verschlechtern wir die Laufverhältnisse des Motors infolge der Vergrösserung der Streuung. Im Diagramm wirkt sie sich als eine Verkleinerung des Stromkreises aus; es leidet daher in erster Linie die Ueberlastungsfähigkeit, daneben der Leistungsfaktor und meist auch der Wirkungsgrad. Es ist nun in erster Linie die Verschlechterung der Laufverhältnisse, welche die Erfüllung des Wunsches Anlaufstrom gleich Normalstrom, trotzdem im Bereiche der Möglichkeit liegend, verbietet. Der Gewinn an Drehmoment gestattet indessen häufig die

Anwendung der Stern-Dreieckschaltung, die mit Normalanker infolge des kleinen Momentes nicht mehr zulässig wäre; dann kann die Vergrösserung der Streuung in mässigem Rahmen gehalten werden. Ueber Gewinn und Verlust bei Verwendung solcher Stromverdrängungsanker orientiert Fig. 5. Hier sind für einen vierpoligen 10 PS-Motor³⁾ die gemessenen Werte des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors für die drei Lösungen: gewickelter Anker, normaler Käfiganker und Doppelnutenanker aufgetragen. Wir erkennen bei diesem Motor, dass die erwähnte Verschlechterung durch die grössere Streuung für den Spezialanker immer noch bessere Verhältnisse als für den gewickelten Anker ergibt; zur vollen Charakterisierung sind allerdings noch die Anlaufverhältnisse zu berücksichtigen. Der Spezialanker reduziert den Einschaltstrom vom 6,5fachen Nennstrom auf den 4,2fachen bei gleichzeitiger Erhöhung des Einschaltmomentes

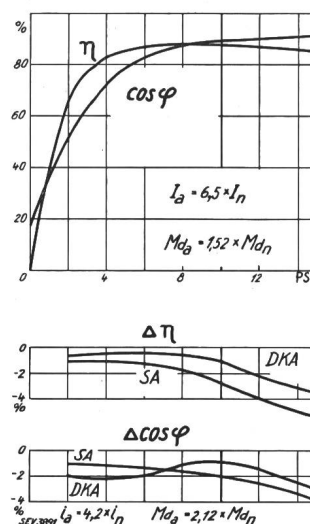


Fig. 5.
Wirkungsgrad u. Leistungsfaktor eines vierpoligen 10 PS-Motors.
DKA Doppelnutenanker
SA Schleifringanker.

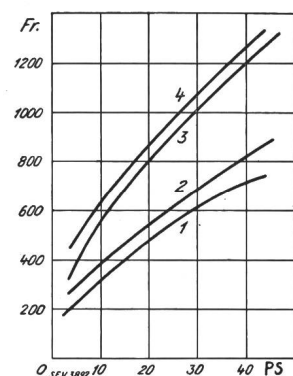


Fig. 6.
Vergleichspreise eines vierpoligen Motors mit
1 Käfiganker,
2 Doppelnutenanker,
3 Schleifringanker,
4 Zentrifugalanlasser.

tes von 152 % auf 212 % des Nennmomentes; bei Anlauf in Stern-Dreieck würde der letzte Motor mit ca. 1,4fachen Nennstrom rund 70 % des Nennmomentes entwickeln, was für die meisten Antriebe genügen dürfte. In Fig. 6 sind die Preise für Motoren bis zu 30 kW in den verschiedenen Ausführungsarten aufgetragen; der Mehrpreis für die Motoren mit Spezialanker ist gering; als teuerste Variante erscheint der gewickelte Anker mit Anlasser, dessen Preis zu 70 bis 140 Fr. pro PS

³⁾ Mit Ausnahme des Diskussionsbeitrages von Herrn Rigenbach wurde in diesem Bericht als Leistungseinheit das PS verwendet, offenbar deshalb, weil die Leistungsangabe auf dem Motorschild (Nennleistung) heute meistens noch in dieser Einheit erfolgt. Wir machen aber darauf aufmerksam, dass nach den Regeln des SEV für elektrische Maschinen (SREM, Publikation 108, zu beziehen beim Generalsekretariat), welche auf den 1. Mai 1934 in Kraft traten, die (mechanische) Nennleistung auf dem Motorschild in kW anzugeben ist. (Red.)

einzusetzen ist. Die angegebenen Zahlen sind Listenpreise und in erster Linie als Vergleichszahlen zu werten; die wirklichen Preise umfassen noch einen durch verschiedene Umstände bestimmten Rabatt.

Bei allen Antrieben, bei denen die Anzugsverhältnisse die entscheidende Rolle spielen und die Ueberlastbarkeit und übrigen Garantiewerte erst in zweiter Linie kommen, ist der Käfigankermotor mit Spezialanker unbedingt der gegebene. Als besonders günstig in dieser Beziehung erweist sich der Aufzugsbetrieb, wo der Gewinn durch den Wegfall der Anlassvorrichtung den kleinen Nachteil, der in der Verschlechterung der elektrischen Daten besteht, weit überwiegt. Fig. 7 zeigt die Betriebskurven eines 6poligen 5 PS-Aufzugsmotors für 50 Per./s. für die beiden Varianten, gewickelter Anker und Doppelnutanker. Der angegebene Einschaltstrom in der Grösse des 3fachen Nennstromes sollte für einen solchen Betrieb immer zulässig sein; die Verschlechterung des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors ist minim und für Aufzugsbetrieb belanglos.

In diesem Zusammenhang sei noch auf folgenden Punkt aufmerksam gemacht: Es hat sich die Gepflogenheit entwickelt, die Anschlussbedingungen für Motoren, also auch diejenigen für Käfigankermotoren, durch den zulässigen Einschaltstrom festzulegen. Dabei wird dieser als zulässiges Vielfaches des Nennstromes angegeben, z. B. in Deutschland für 2- und 4polige Motoren der 2,4-

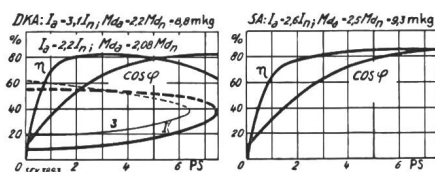


Fig. 7.

Wirkungsgrad und Leistungsfaktor eines 6poligen 5 PS-Aufzugsmotors.

DKA mit Doppelkäfiganker,
SA mit Schleifringanker.

fache Nennstrom. Eine derartige Bestimmung ist nur dann brauchbar, wenn gleichzeitig bindende Vorschriften über den Nennstrom gemacht werden, beispielsweise durch Festlegen des minimalen Wirkungsgrades und $\cos \varphi$. Wie sonst eine derart halbhatzige Bestimmung ausgenützt werden kann und wird, zeigt die in Fig. 7 ebenfalls eingezeichnete Stromkurve 3 für einen nach dem Gesichtspunkt eines möglichst günstigen Verhältnisses: Anlaufstrom zu Nennstrom, entwickelten Motors. Infolge

Vergrößerung des Nennstromes durch Reduktion der Garantiewerte bei Lauf gelingt es so, das doppelte Anlaufmoment bei nur wenig mehr als doppeltem Nennstrom zu erreichen. Vergleicht man aber den einzig stichhaltigen Wert, mkg/kVA, so zeigt sich, dass der mit dem grösseren Verhältnisswert, 3facher Nennstrom, anlaufende Motor, der also eventuell nicht zugelassen wird, effektiv mit kleinerem Strome anlauft, also in jeder Beziehung der bessere Motor ist. Anschlussbedingungen, die den Einschaltstrom berühren, sollen von einer Anschlußscheinleistung sprechen, die dann in Relation

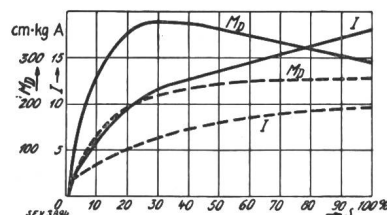


Fig. 8.
Strom- und Drehmoment eines 3 PS-Kurzschlussankermotors.
— Käfiganker.
- - Doppelkäfiganker.

zur Nennleistung gebracht werden kann; jede Vorschrift über einen x -fachen Strom wirkt falsch oder für den Fortschritt hemmend.

Dass Motoren für kleine Leistungen, bei denen der Stromstoss beim direkten Einschalten, wie er sich bei normalem Käfiganker einstellt, zulässig ist, zu Unrecht mit Spezialankern ausgestattet werden, zeigt Fig. 8, wo für einen 4poligen 3 PS-Motor die Betriebskurven für Normalanker und Doppelnutanker aufgetragen sind. Wohl liegt ein Gewinn bezüglich Einschaltstrom vor; er wird aber durch eine ganz wesentliche Reduktion der übrigen elektrischen Eigenschaften, namentlich der Ueberlastungsfähigkeit erkauft. Nach den Messungen sinkt bei diesem Motor der Wirkungsgrad bei Vollast von 85 % auf 80 %; der $\cos \varphi$ von 0,84 auf 0,77 und die maximale Leistung von 6,5 PS auf 4 PS.

Von welcher Leistung an der Motor mit solchen Spezialankern der gegebene ist, hängt in erster Linie von der Wichtigkeit der Strombegrenzung beim Einschalten ab; im allgemeinen dürfte für normale Motoren für Industrie und Gewerbe die Grenze über 5 PS liegen.

Es wird nicht möglich sein, eine der angeführten Rotorarten als die einzig richtige zu bezeichnen; denn jede hat Vor- und Nachteile. Die grossen technologischen Vorteile des Käfigankermotors lassen es aber nach Ansicht des Referenten gerechtfertigt erscheinen, die Anschlussgrenzen für diese Motorart möglichst hoch anzusetzen.

Diskussion.

Der Vorsitzende spricht Herrn Professor Dünner für das vorzügliche Referat den besten Dank aus und eröffnet die Diskussion:

M. Krontl, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich-Oerlikon: Die Betriebseigenschaften des Doppelkäfiganker-Motors (DKA-Motors), hauptsächlich seine Anlaufcharakteristik (Verlauf des Stromes und des Drehmomentes in Abhängigkeit von der Drehzahl beim Anlauf) können bei der Be-

rechnung und Konstruktion in weiten Grenzen beliebig bestimmt werden. Dies ist ein Vorteil des DKA-Motors gegen den einfachen Käfiganker-Motor (KA-Motor), und auch zum Teil wohl gegen den Tiefnutmotor. Diese beiden letzten Motorarten gewähren keine so grosse Freiheit in der Auslegung der Betriebseigenschaften, und sie lassen sich daher weniger gut den verschiedenen Betriebsbedingungen anpassen.

Im folgenden wollen wir einige typische Beispiele von DKA-Motoren kurz beschreiben:

Listenmässige, normale DKA-Motoren werden mit dem relativen Anlaufdrehmoment¹⁾ = ca. 1,7 bis 2, dem relativen Anlaufstrom¹⁾ = ca. 4,2 (bei zweipoligen 4,5) und dem relativen Kippmoment¹⁾ = ca. 2 ausgeführt. In Fig. 1 ist das Stromdiagramm²⁾ und die Drehmomentcharakteristik beispielsweise dargestellt. Das Drehmoment ist vom Stillstand bis fast zur vollen Drehzahl konstant, was ein ruhiges Anziehen, besonders bei Riemenantrieben, verbürgt. Bei Stern/Dreieck-Anlauf ist das relative Anlaufdrehmoment ca. 0,55 bis 0,6, der relative Anlaufstrom ca. 1,4. Der Motor kommt gegen Halblast in Sternschaltung bis fast auf die volle Drehzahl (Fig. 1), so dass beim Umschalten in Dreieck nur ein kleiner (ca. = 1,6facher Nennstrom) und kurzzeitiger Stromstoss entsteht. Der Wirkungsgrad des normalen DKA-Motors ist gleich demjenigen des gewöhnlichen KA-Motors, der Leistungsfaktor ist nur unwesentlich kleiner als beim KA-Motor und höher als beim Schleifringanker-Motor gleicher Leistung.

Fig. 2 zeigt das Stromdiagramm und die Drehmomentcharakteristik eines *Aufzugs-DKA-Motors*. Das Drehmoment ist am grössten im Stillstand, wo auch die passiven Widerstände des Aufzuges am grössten sind, und fällt dann ab, so dass die Beschleunigung des Aufzuges nicht unnütz gross wird. Das relative Anlaufdrehmoment ist ca. 2 bis 2,2, der relative Anlaufstrom ca. 3, der Nennschlupf ca. 10 %. Ein so hoher Schlupf ist hier zulässig; denn bei einem Aufzugsmotor wird der grösste Teil der totalen Verluste beim Anlauf erzeugt, und die Anlaufverluste sind vom Nennschlupf unabhängig. Es ist aber nachteilig, wenn der Nennschlupf bedeutend höher als 10 % gemacht wird, da dann die Fahrgeschwindigkeit des Aufzuges von der Belastung und der Netzspannung allzu sehr abhängig ist, und das Einhalten eines konstanten Bremsweges Schwierigkeiten macht; wollte

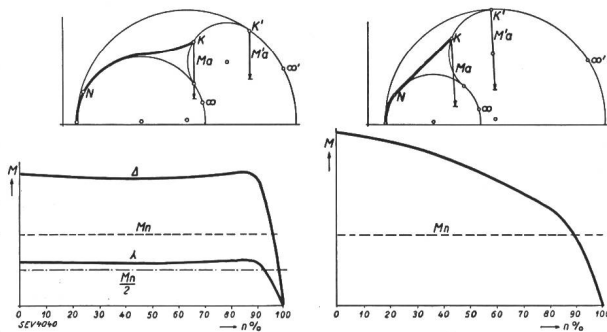


Fig. 1. Normaler DKA-Motor.

Fig. 2. Aufzugs-DKA-Motor.

Oben: Stromdiagramm (stark ausgezogen).

N = Nennpunkt, K = Anlaufpunkt, M = Anlaufdrehmoment (im Strommassstab). Der grosse, schwach ausgezogene Kreis ist das Kreisdiagramm des einfachen KA-Motors, von dem der DKA-Motor abgeleitet wurde, und der den gleichen Nennschlupf hat; K' = Anlaufpunkt, M_a = Anlaufdrehmoment dieses zugrundegelegten KA-Motors.

Unten: Zugehörige Drehmomentcharakteristik.

man für die angeführten Anlaufverhältnisse ($M_a = 2,2$, $I_a = 3$) einen KA-Motor entwerfen, so müsste dieser einen Nennschlupf von ca. 18 bis 20 % haben.

Bei manchen Antrieben, z. B. in der Textilbranche, ist es erwünscht, dass der Motor aus dem Stillstand zur Ueberwindung der statischen Reibung stark anzieht, dann aber *sanft anläuft*. Die Drehmomentkurve soll bei Beschleunigung aus dem Stillstand abfallen. Diesen Verlauf kann man bei einem DKA-Motor dadurch erzielen, dass man den Drehmoment-Sattel absichtlich vergrössert (Fig. 3).

Bei *Pumpenantrieben* ist dagegen das Entstehen eines Drehmomentsattels in der Nähe der vollen Drehzahl un-

erwünscht, da sonst die Pumpe beim Anlauf in Sternschaltung des Motors hängen bleibt und der Motor beim Umschalten in Dreieck einen grossen Stromstoss bekommt. Fig. 4 zeigt die Diagramme eines sehr grossen DKA-Motors, der speziell so entworfen wurde, dass seine Drehmomentkurve ohne Sattel verläuft. In Sternschaltung ist das relative Anlaufdrehmoment = ca. 0,27, bei dem relativen Anlaufstrom von ca. 1,7. Der Stromstoss beim Umschalten ist etwa 1,4-

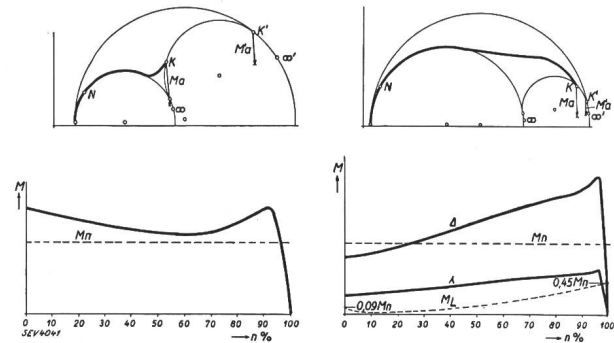


Fig. 3. Spezial-DKA-Motor.

Fig. 4. Grosser DKA-Motor für Pumpenantrieb.

Oben: Stromdiagramm (stark ausgezogen).

N = Nennpunkt, K = Anlaufpunkt, M = Anlaufdrehmoment (im Strommassstab). Der grosse, schwach ausgezogene Kreis ist das Kreisdiagramm des einfachen KA-Motors, von dem der DKA-Motor abgeleitet wurde, und der den gleichen Nennschlupf hat; K' = Anlaufpunkt, M_a = Anlaufdrehmoment dieses zugrundegelegten KA-Motors, das Gegendrehmoment der Pumpe mit geschlossenem Schieber.

Unten: Zugehörige Drehmomentcharakteristik.

facher Nennstrom. Ein gewöhnlicher KA-Motor ohne jede Stromverdrängung müsste bei Einhaltung der gleichen Anlaufwerte einen ca. zweimal grösseren Nennschlupf haben, wodurch der Wirkungsgrad etwa um 1 % sinken würde, also von etwa 95 auf 94 %.

Durch diese Beispiele wurden natürlich nicht alle Möglichkeiten des DKA-Motors erschöpft. Die Beispiele sollten nur andeuten, welche grosse Mannigfaltigkeit dieser Motoren möglich ist. Man sieht auch, dass man nur mit Vorsicht von — guten oder schlechten — Betriebseigenschaften der DKA-Motoren *im allgemeinen* sprechen darf, da Verallgemeinerungen leicht zu Missverständnissen Anlass geben könnten.

Durch den Hinweis auf einige Vorteile der obigen Ausführungen des DKA-Motors soll keineswegs die Meinung hervorgerufen werden, dass der gewöhnliche KA-Motor durch den DKA-Motor überall verdrängt werden sollte. Im Gegenteil, man wird immer trachten, den billigsten und einfachsten aller Motoren, den gewöhnlichen KA-Motor, zu benutzen. Bei grösseren Leistungen ist dies aber wegen der Anlaufbedingungen doch nicht immer möglich. Der Stromverdrängungsmotor erweitert wesentlich den Verwendungsbereich des Kurzschlussmotors, und er wird daher für grössere Leistungen mit Recht immer mehr benutzt.

Mit dem gewöhnlichen KA-Motor und auch mit dem Stromverdrängungsmotor lässt sich der Vollastanlauf bei gleichzeitiger Zulassung eines kleinen Stromstosses (kleiner als ca. 2,4facher Nennstrom) mit fester Kupplung nicht erreichen. Gewöhnliche Zentrifugal-Kupplungen (mit oder ohne Feder) geben, wie Herr Professor Dünner ausführte, keine restlos befriedigenden Resultate. Die einzige befriedigende Lösung ist mit *Kupplungen* nach den «Albo»-Patenten (Liz. MFO) möglich. Im Prinzip funktionieren diese Kupplungen so, dass ihre Bremsklötze erst nach einiger Zeitverzögerung, nachdem der Motor leer auf volle Drehzahl gekommen ist, sachte eingreifen und die andere Kupplungshälfte oder die Riemenscheibe mitnehmen³⁾. Fig. 5 zeigt ein Oszillogramm des Anlaufs gegen das 1,7fache Nennmoment (mit einer Original-«Albo»-Kupplung) in Stern/Dreieck-

¹⁾ Auf die Nennwerte (Nennmoment, Nennstrom) bezogen.

²⁾ Näheres über die Konstruktion des Stromdiagrammes s. z. B.: Krondl, «Das Arbeitsdiagramm des Boucherot-Motors». E. u. M. 1931, S. 161.

³⁾ Näheres über Anlass-Kupplungen s. z. B.: Punga-Raydt, Drehstrommotoren mit DKA, Springer, 1931. Siehe auch Bull. SEV 1928, Nr. 7, S. 239.

Schaltung des Motors. Der grösste Stromstoss ist ca. 2,4facher Nennstrom.

Im Oszillogramm Fig. 6 ist der Anlauf eines Motors mit gewickeltem Rotor und Zentrifugalanlasser gegen Vollast aufgenommen. Der Rotorwiderstand wird in 3 Stufen

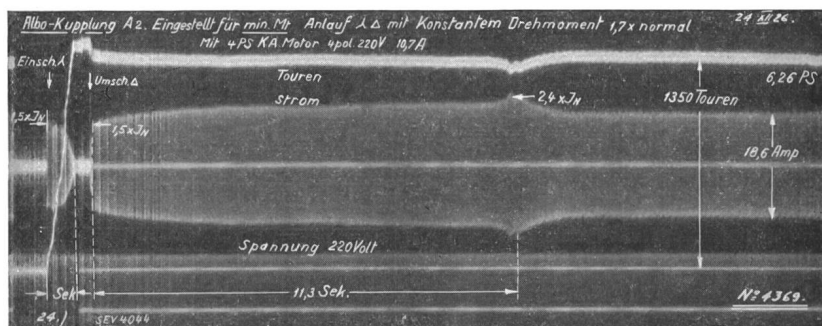


Fig. 5.

Oszillogramm des Anlaufs eines KA-Motors gegen 1,7faches Nennmoment, mit Stern/Dreieck-Schaltung und einer «Albo»-Kupplung. Grösster Stromstoss: $2,4 \cdot I_n$.

kurzgeschlossen. Bei grösseren Motoren baut man mehr Widerstandsstufen ein, so dass die Stromstösse kleiner werden.

Da in letzter Zeit immer mehr *Einphasen-Induktionsmotoren* für den Antrieb von Haushaltmaschinen verwendet werden, sollen einige Ausführungen kurz besprochen werden:

Für ein relatives Anlaufdrehmoment von 1 bis 1,5 baut man Einphasen-Induktionsmotoren mit einem Zentrifugalschalter, welcher nach erfolgtem Anlauf die Hilfswicklung mit erhöhtem Widerstand abschaltet. (Verwendung: Antriebe von Oelfeuerungen, Waschmaschinen etc.)

Für ein relatives Anlaufdrehmoment von 2 bis 3 wird ein Kondensator in die Hilfsphase eingeschaltet; die Hilfsphase wird aber durch einen Zentrifugalschalter nach erfolgtem Anlauf unterbrochen. (Verwendung: Antrieb von Kältemaschinen, kleinen Aufzügen.)

Für ein relatives Anlaufdrehmoment von 0,3 bis 0,4 wird der Kondensator dauernd in der Hilfsphase eingeschaltet gelassen; diese Motoren haben also keinen Zentrifugalschalter. (Verwendung: Antrieb von Ventilatoren, kleinen Werkzeugmaschinen etc.)

(Der Referent zeigte eine Reihe von Lichtbildern über Ausführungsformen dieser Motoren; diese Bilder mussten hier aus Raummangel weggelassen werden. Red.)

Nachträglich schriftlich eingereicht: Es ist vielleicht interessant, die Diskussion durch Hinweis auf eine elementare und wohlbekannte Beziehung zu ergänzen, welche ein sehr einfaches und klares Bild über die Anlaufverhältnisse von Kurzschlussankermotoren gibt und den Vergleich der einfachen Kurzschlussmotoren mit Stromverdrängungsmotoren in eindeutiger Weise erlaubt.

Diese Beziehung lautet für Kurzschlussmotoren ohne Stromverdrängung

$$M_a = s_n \cdot I_{a,2}^2 \quad (1)$$

M_a = (Anlaufdrehmoment) : (Nennmoment) = relatives Anlaufdrehmoment.

$I_{a,2}$ = (Rotor-Anlaufstrom) : (Rotor-Nennstrom) = relativer Rotor-Anlaufstrom.

s_n = Schlupf bei Nennlast.

Man kennt meistens nicht den relativen Anlaufstrom für den Rotor ($I_{a,2}$) sondern nur für das Netz (I_a). Der erste Wert weicht aber vom zweiten bei grösseren Motoren nur wenig ab; es ist:

$$I_{a,2} = I_a \cdot (1,05 \text{ bis } 1,1) \quad (2)$$

Aus der physikalisch streng richtigen Gleichung (1) folgt für einfache Kurzschlussmotoren (also ohne jegliche Stromverdrängung oder andere Aenderung des Rotorwiderstandes beim Anlauf⁵⁾, dass von den drei Betriebsgrössen: Anlaufmoment, Anlaufstrom, Nennschlupf — nur zwei in gewissen Grenzen frei wählbar sind und die dritte durch Gl. 1 zwangsläufig bestimmt ist. Die Grösse des Schlupfes ist durch Rücksicht auf die Erwärmung und den Wirkungsgrad nach oben begrenzt. Je grösser der Motor, desto kleiner ist der Schlupf und daher bei gleichem relativem Anlaufstrom auch das relative Anlaufdrehmoment. Es gibt bei Kurzschlussmotoren ohne Stromverdrängung kein Mittel, diese drei Betriebsgrössen gegen die von Gl. 1 gegebenen Werte zu verbessern.

Bei Stromverdrängungsmotoren wird der Rotorwiderstand beim Anlauf vergrössert; genau im gleichen Masse vergrössert sich auch das Anlaufdrehmoment⁶⁾ (bei listenmässigen Doppelkäftankern z. B. vergrössert sich der Rotorwiderstand im Anlauf etwa 2- bis 3mal).

Die Eigenart der Stromverdrängungsmotoren ist dadurch auf einfachste Weise charakterisiert, und ihr Vorteil im Anlauf einwandfrei erwiesen.

Beispiel: Ein listenmässiger vierpoliger DKA-Motor von 40 PS hat: das rel. Anlaufdrehmoment $M_a = 1,7$, den rel. Anlaufstrom $I_a = 4,2$ und den Nennschlupf $s_n = 0,033 = 3,3\%$. Wir fragen nun, welchen Schlupf müsste ein KA-Motor bei gleichen Anlaufverhältnissen (M_a, I_a) haben? Der rel. Rotoranlaufstrom wäre (s. Gl. 2):

$$I_{a,2} = I_a \cdot 1,05 = 4,2 \cdot 1,05 = 4,4$$

Daher wäre nach Gl. 1 der Nennschlupf

$$s_n = \frac{1,7}{4,4^2} = 0,088 = 8,8\%$$

Dieser Schlupf von 8,8 % ist ca. 2,6mal grösser als normal und wäre unzulässig, einerseits wegen der Erwärmung, anderseits wegen des Wirkungsgrades. Der Wirkungsgrad wäre etwa um 4 % schlechter als normal, also 85 % statt 89 %. Man sieht, dass es *unmöglich* ist, einen einfachen Kurz-

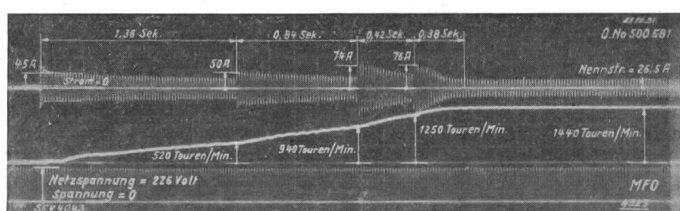


Fig. 6.

Oszillogramm des Anlaufs eines Motors mit Zentrifugalanlasser gegen Vollast.

schlussankermotor der angegebenen Grösse mit gleichen Anlaufdaten wie einen Stromverdrängungsmotor zu bauen.

Bemerkung: Bei grösseren KA-Motoren werden oft im Rotor Kupferstäbe verwendet, deren Höhe grösser als 1 cm

⁴⁾ Bei Stern/Dreieck-Anlauf ändert sich das Uebersetzungsverhältnis Stator/Rotor $\sqrt{3}$ mal und anstatt Gl. (2) ist für den Anlauf in Stern zu setzen:

$$I_{a,2} = I_a \cdot (1,05 \text{ bis } 1,1) \cdot \sqrt{3}$$

⁵⁾ Beim Messen des Anlaufdrehmomentes sollte immer darauf geachtet werden, dass der Rotor nicht über die betriebsmässig vorkommende Temperatur erwärmt wird, da sonst infolge der abnormalen Widerstandserhöhung des Rotors die Messresultate gefälscht werden.

⁶⁾ S. auch Voigt, «Der Anlauffaktor der Stromverdrängungsmotoren». E. u. M. 1931, S. 239.

ist. Diese Motoren haben teilweise Stromverdrängung, bilden also einen Uebergang zu Tiefnutmotoren und haben bessere Anlaufverhältnisse als die einfachen Kurzschlussmotoren ohne jegliche Stromverdrängung. Motoren mit runden Rotorstäben haben dagegen meistens praktisch vernachlässigbare Stromverdrängung.

M. Riggensbach, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden: Nachdem Ihnen mein Vorredner, Herr Dr. Krondl, an vielen interessanten Beispielen gezeigt hat, wie man die Anlaufverhältnisse der Doppelnutmotoren je nach Entwurf des Rotors auf sehr mannigfaltige Weise beeinflussen kann, möchte ich an die Ausführungen von Herrn Professor Dün-

250 %. Bei Anlauf in Sternschaltung erhalten wir ca. 30 % dieser Werte, d. h. einen Strom von etwa 21 A oder ca. 183 % des normalen und 67 % Anzugsmoment. Das Güteverhältnis des Anzugs ist also in Stern-Schaltung $\frac{67}{183} = 0,38$,

wenn man darunter das Verhältnis des prozentualen Anzugsmomentes zum prozentualen Einschaltstrom versteht.

Tauschen wir nun, ohne dass am Stator etwas verändert wird, den Rotor durch einen Doppelnutläufer aus, der so entworfen wurde, dass eine wesentliche Reduktion des Kurzschlussstromes eintritt, so erhalten wir die in Fig. 3 dargestellten Anlaufverhältnisse (Kurven 3 und 4). Zum

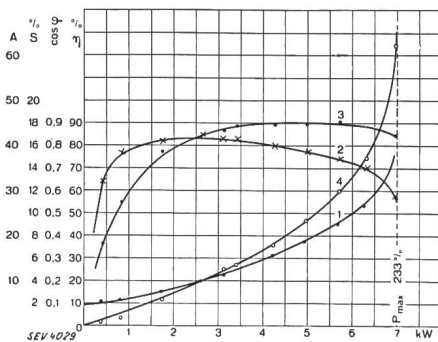


Fig. 1.

Fig. 1.
Arbeitskurven aus Bremsung mit normalem Käfiganker.

Dreiphasenmotor 3 kW, 220 Volt Δ ,
 $f = 50$, $n = 1500$.
1 Strom 3 Leistungsfaktor
2 Wirkungsgrad 4 Schlupf

Fig. 2.
Anlauf mit normalem Käfiganker.
Dreiphasenmotor 3 kW, 220 Volt Δ ,
 $f = 50$, $n = 1500$.

1 Strom 2 Anlaufdrehmoment } bei Anlauf in Dreieckschaltung
3 Strom 4 Anlaufdrehmoment } bei Anlauf in Sternschaltung

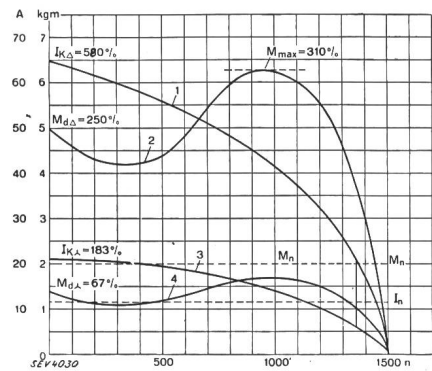


Fig. 2.

ner anknüpfen und Ihnen an Hand eines konkreten Beispiels zeigen, wie sich ein- und derselbe Motor sowohl im Anlauf als auch im Betrieb verhält, wenn er nacheinander mit verschiedenen Rotoren ausgerüstet wird. Ich habe hiezu einen 4poligen Kurzschlussankermotor für eine Leistung von 3 kW bei 220 Volt verketteter Spannung und 50 Per./s. gewählt,

der zuerst mit einem normalen Käfiganker moderner Bauart, dann mit einem Doppelnutrotor (DN I), der eine starke Reduktion des Kurzschlussstromes bewirkt, und einem weiteren Doppelnutrotor (DN II), der Anlaufverhältnisse ergibt, die zwischen denjenigen der beiden erstgenannten Rotoren liegen, ausgerüstet wird.

Fig. 1 zeigt die aus dem Bremsversuch ermittelten Arbeitskurven mit dem normalen Käfiganker. Wir bemerken bei Nennlast einen Wirkungsgrad von 83 %, einen Leistungsfaktor von 0,87 und einen Schlupf von 4,7 %; der Normalstrom ist dabei ca. 11 A. Die Kippleistung beträgt 7 kW, d. h. der Motor hat eine Ueberlastbarkeit von 233 %. Betrachten wir nun den Anlauf dieses Motors, einmal bei direktem, das andere Mal bei Stern/Dreieck-Anlauf, so erhalten wir die in Fig. 2 dargestellten Kurven. Bei direktem Einschalten nimmt der Motor einen Strom von 65 A, d. h. 580 % des normalen auf und entwickelt dabei ein Anzugsmoment von 5 kgm oder

Vergleich sind die Anlaufkurven des ersten Rotors nochmals eingezeichnet. Wir sehen, dass der verwendete Doppelnutrotor den Kurzschlußstrom von 65 A auf 36 A herabdrückt, und er somit nur 330 % des Normalstromes beträgt, wobei immer noch ein Anzugsmoment von 3,5 kgm oder 175 % herauskommt. Das Güteverhältnis des Anzuges ist also jetzt auf $\frac{175}{330} = 0,53$ gestiegen, d. h. mit andern Worten, die Anlaufverhältnisse des Motors sind besser geworden. Nach diesem Punkt allein darf aber der Motor nicht bewertet werden, sondern wir müssen auch seine Arbeitskurven betrachten. Wie Fig. 4 zeigt, erhalten wir bei 3 kW Abgabe wieder praktisch den gleichen Wirkungsgrad wie früher; der Leistungsfaktor ist von 0,87 auf 0,79, d. h. um ganze acht Hundertstel zurückgegangen, und die Kippleistung beträgt noch 4,75 kW oder 158 %, gegenüber 233 % bei Verwendung des normalen Rotors. Die auf den ersten Blick erfreulich erscheinende Verbesserung der Anlaufverhältnisse wurde also durch eine ganz wesentliche Verschlechterung der Betriebseigenschaften erkauft. Nun werden Sie mir aber entgegenhalten,

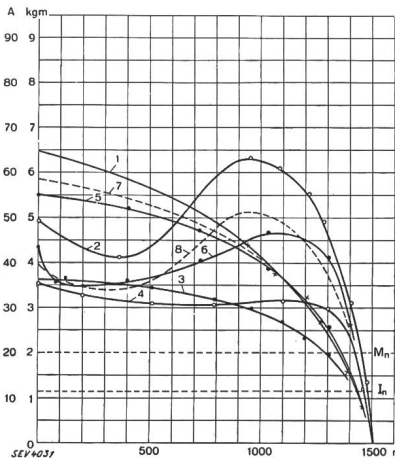


Fig. 3.
Schaltung Dreieck.

Anlauf mit verschiedenen Rotoren.
Dreiphasenmotor 3 kW, 220 Volt Δ ,
 $f = 50$, $n = 1500$.

1 Strom 2 Drehmoment } Normaler Käfiganker,
3 Strom 4 Drehmoment } Doppelnutrotor I
5 Strom 6 Drehmoment } Doppelnutrotor II
7 Strom 8 Drehmoment } Normaler Käfiganker
Feld geschwächt

tor hat eine Ueberlastbarkeit von 233 %. Betrachten wir nun den Anlauf dieses Motors, einmal bei direktem, das andere Mal bei Stern/Dreieck-Anlauf, so erhalten wir die in Fig. 2 dargestellten Kurven. Bei direktem Einschalten nimmt der Motor einen Strom von 65 A, d. h. 580 % des normalen auf und entwickelt dabei ein Anzugsmoment von 5 kgm oder

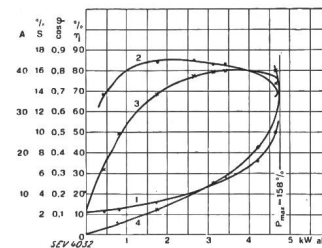


Fig. 4.
Arbeitskurven aus Bremsung mit Doppelnutrotor I.

Dreiphasenmotor 3 kW,
220 Volt Δ , $f = 50$, $n = 1500$.

1 Strom 3 Leistungsfaktor
2 Wirkungsgrad 4 Schlupf

dass das erwähnte Beispiel einen extremen Fall darstelle, denn eine so starke Reduktion des Kurzschlußstromes wird nicht immer nötig sein, und dann werden sich auch die Betriebseigenschaften wenig ändern.

Wir wollen nun diesen Doppelnutrotor in selben Stator ersetzen gegen einen anderen, der Anlaufverhältnisse ergibt, die zwischen den beiden erwähnten Fällen liegen, und erhalten dabei in Fig. 3 beim direkten Anlauf die Kurven 5 und 6, also einen Anlaufstrom von 55 A oder 500 %, und ein Anzugsmoment von 4,3 kgm oder 215 %; das Güteverhältnis des Anzuges wird also 0,43. Bei der Bremsung erhalten wir bei Nennlast (Fig. 5) wiederum 83 % Wirkungsgrad, einen Leistungsfaktor von 0,82 und eine Kipplast von

5,7 kW oder 190 %. Alle diese erwähnten Versuche wurden bei gleicher Feldstärke und überall gleichem Luftspalt vorgenommen, weshalb der Vergleich unter diesen Umständen korrekt ist. Wir konstatieren auch im letzten Falle, wo nur eine bescheidene Vergrößerung des Güteverhältnisses angestrebt wurde, wiederum einen bedeutenden Rückgang der Ueberlastbarkeit und des Leistungsfaktors.

In Fig. 6 sind die Leistungsfaktoren und maximalen Leistungen der eben erwähnten Beispiele als Funktion des

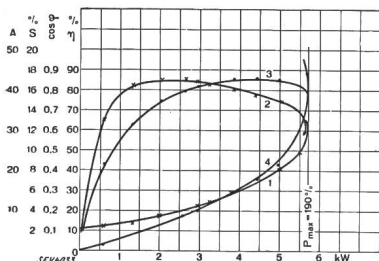


Fig. 5.
Arbeitskurven aus Bremsung mit Doppelnutrotor II.
Dreiphasenmotor 3 kW,
220 Volt Δ , $f = 50$,
 $n = 1500$.
1 Strom
2 Wirkungsgrad
3 Leistungsfaktor
4 Schlupf

Anzugsgüteverhältnisses dargestellt. Die Tatsache der Verschlechterung des $\cos \varphi$ und der maximalen Leistung liegt in der Natur des Stromverdrängungsmotors begründet, an welcher sich nicht rütteln lässt. Ich kann Ihnen diese Erscheinung vielleicht noch deutlicher am Arbeitsdiagramm des Kurzschlussankermotors vor Augen führen. Wie Ihnen Herr Professor Dünner gezeigt hat, liegen beim Induktionsmotor die Endpunkte aller Stromwerte zwischen Leerlauf und Kurzschluss auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt und Durchmesser sich aus dem Leerlauf- und Kurzschlussstrom bestimmen lassen. Beim Stromverdrängungsmotor dagegen besteht dieses Gesetz nicht mehr und das Kreisdiagramm geht in eine eigenartig geformte Kurve über. In Fig. 7 ist das Diagramm für den normalen Kurzschlussläufer sowie für den ersten Doppelnutläufer für den eben betrachteten Motor, wie es aus dem Versuche ermittelt wurde, aufgezeich-

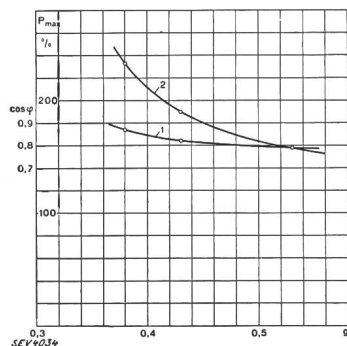


Fig. 6.
Leistungsfaktor und maximale Leistung in Funktion des Anzugsgüteverhältnisses.
1 Leistungsfaktor
2 maximale Leistung

net. Die Punkte der Stromvektoren liegen für das erste Beispiel ziemlich genau auf dem durch Leerlauf- und Kurzschlusspunkt gehenden Kreis. Beim Doppelnutmotor, der den gleichen Leerlaufstrom wie der normale Motor hat, biegt die Kurve, welche der geometrische Ort der Stromvektoren ist, sehr bald vom Kreisdiagramm ab. Sämtliche Diagramme von Stromverdrängungsmotoren, deren Kurzschlussströme Zwischenwerte des eben erwähnten Doppelnutrotors und des normalen Rotors ergeben, verlaufen nun zwischen der Doppelnut-Kurve PK' und dem Kreise durch P und K. Sollte nun einer dieser Stromverdrängungsmotoren bei kleinerem Kurzschlussstrom als dem des normalen Rotors den gleichen Leistungsfaktor wie jener ergeben, so müsste sein Diagramm mit dem Kreise wenigstens im Gebiete der Nennlast identisch sein. Diese Forderung ist aber unmöglich, denn nur im Leerlaufpunkt fallen die beiden Kurven zusammen. Es folgt also, dass der Leistungsfaktor eines jeden Stromverdrängungsmotors, gleicher Magnetisierungsstrom selbstverständlich vorausgesetzt, immer kleiner als der des normalen Kurzschlussankermotors ist. Da die Ueberlastbarkeit, wie bekannt, direkt von der Größe des Kurzschlussstromes abhängt, so muss zwangsläufig jede

künstliche Verkleinerung des Kurzschlussstromes eine Reduktion der Ueberlastbarkeit mit sich bringen. Sehr oft werden diese beiden Punkte bei der Beurteilung eines Doppelnutmotors ausser acht gelassen und der Motor wird einzig und allein auf Grund seiner Anlaufeigenschaften beurteilt, was natürlich ein ganz falsches Bild ergibt.

Wir wollen nun sehen, ob die eben geschilderten Verhältnisse, die mit dem zweiten Doppelnutläufer erzielt wer-

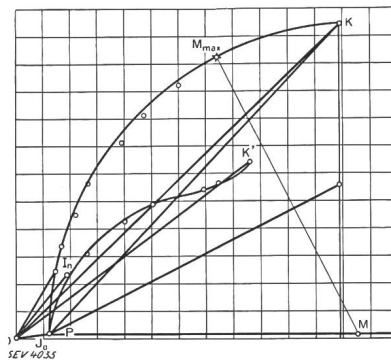


Fig. 7.
Arbeitsdiagramm.
Kreis durch P und K:
Normaler Käfiganker
Kurve durch P u. K':
Doppelnutrotor I
O J₀ Leerlaufstrom
(für beide Rotoren gleich)
O K Kurzschlussstrom normaler Käfiganker
O K' Kurzschlussstrom Doppelnutrotor I

den, wirklich nur mit einem Stromverdrängungsmotor erreichbar sind oder nicht. Wir betrachten nochmals die Darstellung der verschiedenen Anlaufcharakteristiken in Fig. 3 und sehen daraus, dass mit dem normalen Rotor ein höheres Anzugsmoment, bei allerdings höherem Strom als beim Doppelnutrotor II, erzielt wird. Lassen wir nun den normalen Rotor wie er ist, wickeln aber den Stator für etwas schwächeres Feld und zwar so, dass das Anzugsmoment den gleichen Wert erreicht wie beim Doppelnutrotor II, so fällt der Kurzschlussstrom auf den gestrichelt eingezeichneten Wert und ist nur noch um wenige Prozente höher als beim Doppelnutmotor. Praktisch erhalten wir also die gleichen Anlaufeigenschaften wie beim Doppelnutmotor, während das Kippmoment und der Leistungsfaktor noch immer etwas

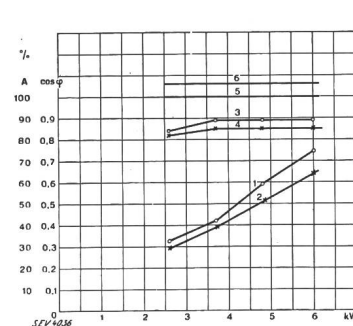


Fig. 8.
Vergleich zwischen normalen Käfigankermotoren und Doppelnutmotoren.
1 Anlaufstrom, normaler Kurzschlussankermotor
2 Anlaufstrom, Doppelnutmotor
3 Leistungsfaktor, normaler Kurzschlussankermotor
4 Leistungsfaktor, Doppelnutmotor
5 Preis in %, normaler Kurzschlussankermotor
6 Preis in %, Doppelnutmotor

höher als bei jenem sind. Beim Anlauf in Sternschaltung erhalten wir ebenfalls noch ca. 60 % Anzugsmoment bei ca. 160 bis 170 % Strom. Wir sehen also, dass für diesen Fall der Doppelnutmotor absolut nicht nötig ist, da mit dem normalen Motor fast die gleichen Verhältnisse erreicht werden können. Das eben geschilderte Beispiel gilt nun aber nicht nur für diesen einzigen Motor, sondern es lässt sich zeigen, dass Kurzschlussankermotoren mit normalen Rotoren, d. h. mit einfachen Käfigankern moderner Bauart für 4 bis 8 Pole für Leistungen bis ca. 35 kW für 160 bis 180 % Einschaltstrom bei etwa 60 % Anzugsmoment bei Stern-Anlauf ausführbar sind, wobei sie neben den erwähnten besseren elektrischen Eigenschaften auch billiger als Doppelnutmotoren, d. h. also in jeder Beziehung wirtschaftlicher als jene sind.

Fig. 8 gibt einen Ueberblick über den Vergleich zwischen Normal-Kurzschlussankermotoren und Doppelnutmotoren, der einer im Jahre 1931 von Schöler in der ETZ veröffentlichten Arbeit entnommen ist. Es handelt sich um Motoren eines der grössten deutschen Unternehmen, welches kleinere Kurzschlussankermotoren in zwei Serien, nämlich mit normalen und mit Doppelnutrotoren ausrüstete, wobei diese

so entworfen waren, dass sie das gleiche Anzugsmoment wie die normalen Rotoren entwickelten, bei etwas geringerem Anlaufstrom. Wie diese Darstellung zeigt, werden aber die ganz unwesentlich besseren Anlaufeigenschaften teuer erkauft, da einmal der Preis für den Doppelnutmotor um 6 % grösser und ferner der Leistungsfaktor wesentlich ungünstiger ist. Wenn man nicht durch einen zwingenden Grund, z. B. allzu ängstliche Anschlussbedingungen eines Elektrizitätswerkes mit schwachem Netz, gezwungen ist, kleine Anlaufströme unbedingt einhalten zu müssen, wird man daher zum normalen und nicht zum Doppelnutmotor greifen.

Diese Darlegungen sollen jedoch keineswegs dem Doppelnutmotor seine Daseinsberechtigung absprechen, denn er hat unbestritten sein bestimmtes Arbeitsgebiet, wo er gerade in neuester Zeit den Schleifringankermotor stetig verdrängt; doch soll er da und nur da verwendet werden, wo seine Anwendung wirtschaftlich und technisch begründet ist. Hierüber soll später noch kurz die Rede sein.

Es ist nun noch die Frage zu erläutern, ob die 50 bis 60 % Anzugsmoment, die der normale Kurzschlussankermotor bei Stern/Dreieck-Anlauf entwickelt, genügen, oder ob vielleicht höhere Anzugsmomente nötig sind.

Als vor etwa 8 Jahren eine bedeutende deutsche Firma mit ihren kleinen Kurzschlussankermotoren, die ebenfalls mit einer Art Doppelnutläufer ausgerüstet waren, und zwar für ca. 160 % Anlaufstrom und 50 % Anzugsmoment, auf den Markt kam, war sich diese Firma nicht im klaren, ob dieses Moment genüge oder nicht, weshalb sie den Vertrieb dieser Motoren zusammen mit einer speziellen Anlaufkupplung aufnahm. Diese Kupplung übertrug erst nach erfolgreichem Hochlauf, also erst nach dem Umschalten von Stern auf Dreieck-Schaltung, die Last auf den Motor, so dass der Motor praktisch leer anliefe. Solche Kupplungen oder Anlaufriemenscheiben tauchten in jener Zeit in sehr grosser Zahl auf, aber sie sind ziemlich bald wieder verschwunden, denn sie erwiesen sich als völlig überflüssig, da es sich herausstellte, dass in 90 % aller Fälle Anlaufdrehmomente von 50 % vollauf für einen sicheren Hochlauf genügen.

Die bisher besprochenen Motoren beziehen sich auf kleinere Leistungen, die in Gewerbe und Industrie am häufigsten verlangt werden, und wo der Stern/Dreieck-Anlauf mit Ausnahme der kleinsten Leistungen, wo direkt eingeschaltet wird, die Regel ist. Aber nicht nur hier, sondern auch für grosse Leistungen gewinnt der Kurzschlussankermotor ständig grössere Verbreitung. Wenn bei kleineren Leistungen, wie wir gesehen haben, der normale Kurzschlussankermotor am Platze ist, so ist es hier der Stromverdrängungsmotor,

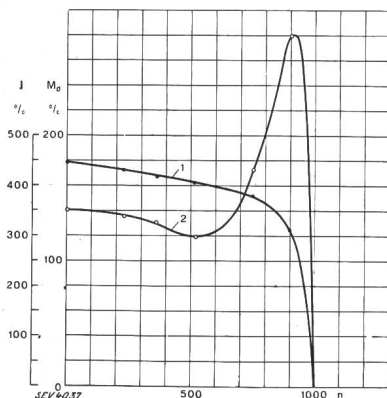


Fig. 9.

Anlauf eines
Tiefnutmotors für
180 kW, bei direktem
Einschalten.

- 1 Strom
2 Drehmoment

und zwar für Stern/Dreieck-Anlauf sowohl der Doppelnut als auch der Tiefnutmotor, während für direktes Einschalten der Tiefnutmotor fast ausschliesslich zur Verwendung kommt. Unter Tiefnutmotor ist im folgenden eine Variante des von Herrn Professor Dünner erwähnten Stromverdrängungsmotors mit schmalen, tiefen Nuten verstanden, wo das Rotor-Stabprofil L-förmigen Querschnitt hat. Dadurch lässt sich bei wesentlich kleinerer Nutentiefe als bei Rechteckstäben die gleiche Stromverdrängung erzielen, und zudem ist die Nutenstreuung im normalen Betrieb kleiner als bei den für gleiche Stromverdrängung bzw. Widerstandserhöhung erforderlichen Stabhöhen der Rechteckstäbe.

Die Doppelnutmotoren werden in der Regel so ausgelegt, dass sie bei Stern-Anlauf 60 bis 80 % Anzugsmoment entwickeln bei 120 bis 180 % Strom, wobei sich die niedrigen Werte auf hohe, die grössern auf kleine Polzahlen beziehen, während die Tiefnutmotoren bei direktem Einschalten für Anzugsmomente von 100 bis 150 % bei Strömen von 350 bis 550 % je nach Grösse und Polzahl ausgeführt werden. Der Verlauf des Anlaufdrehmomentes dieser Motoren ist verschieden, und zwar sinkt beim Tiefnutmotor in der Regel

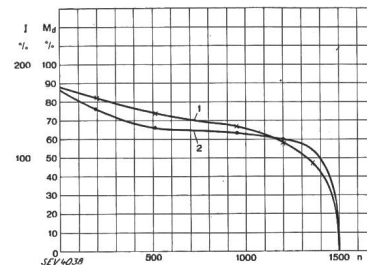


Fig. 10.

Anlauf eines
Doppelnutmotors für
150 kW bei Stern-
schaltung (Betrieb in
Dreieckschaltung).

- 1 Strom
2 Drehmoment

das Drehmoment vom Stillstand aus leicht ab, um dann wieder anzusteigen, um kurz vor Erreichen der synchronen Drehzahl ein stark ausgeprägtes Maximum zu bilden. Anders beim Doppelnutmotor, wo in der Regel das maximale Moment im Stillstand erreicht wird und der Kippunkt weniger ausgeprägt ist. Der Tiefnutmotor ist deshalb für Betriebe mit stark wechselnden Belastungen besonders geeignet, da er grosse Belastungsschüsse ohne merklichen Drehzahlabbau aufnehmen kann, während der Doppelnutmotor dort angewendet werden soll, wo speziell hohe Anzugsmomente in Frage kommen, der Betrieb jedoch ruhiger ist.

Für die erwähnten Anlaufverhältnisse und Leistungsgebiete, nämlich von etwa 40 bis zu mehreren 100 kW, sind die Leistungsfaktoren bei Verwendung richtig entworfener Rotoren die gleichen, wie die der entsprechenden Schleifringankermotoren. Fig. 9 und 10 zeigen noch je die Anlaufdrehmomente eines Tiefnutmotors für 180 kW für direktes Einschalten und eines für schweren Anlauf bestimmten Doppelnutmotors für 150 kW für Stern/Dreieck-Anlauf, wobei dieser bei 175 % Strom 85 % Anzugsmoment zu entwickeln hatte, wie z. B. zum Antrieb von Kolbenkompressoren verlangt wird.

Die Tiefnut- und Doppelnutmotoren haben in neuerer Zeit in der Schwerindustrie bis zu ganz grossen Leistungen eine grosse Verbreitung gefunden, wo sie namentlich zum Antrieb von Kompressoren und Pumpen aller Art verwendet werden. Wenn sich hier die beiden Motorarten je nach Anlaufart in das Arbeitsgebiet teilen, so gibt es noch ein spezielles Gebiet, wo bisher nur der Schleifringankermotor verwendet wurde, der aber seit ganz wenigen Jahren immer mehr durch den Doppelnutmotor ersetzt wird. Es ist dies der Aufzugsbetrieb. Bis vor kurzem konnte nur der Schleifringankermotor die nötigen hohen Anzugsmomente erzeugen, nämlich etwa 200 %, ohne dabei das speisende Netz durch zu grosse Stromspitzen zu belasten. In den letzten Jahren konnte jedoch die Bauart des Doppelnutmotors so weit verbessert werden, dass er 200 % Anzugsmoment bei nur 300 % Anlaufstrom entwickeln kann, wobei durch ganz spezielle Durchbildung auch der für den Aufzugsbetrieb nötige, praktisch geräuschlose Lauf erzielt wird. Naturgemäss ist bei diesen Motoren mit so hochgetriebenen Anlaufgüteverhältnissen von 0,67 bis 0,7 die Ueberlastbarkeit gering, was aber im Aufzugsbetrieb nicht von Belang ist, da keine Belastungsschwankungen während der Fahrt vorkommen. Ebenso muss bei diesen Motoren ein relativ kleiner Leistungsfaktor in Kauf genommen werden. Ähnlich ausgelegte Motoren kommen auch für den Antrieb von Zentrifugen in Frage.

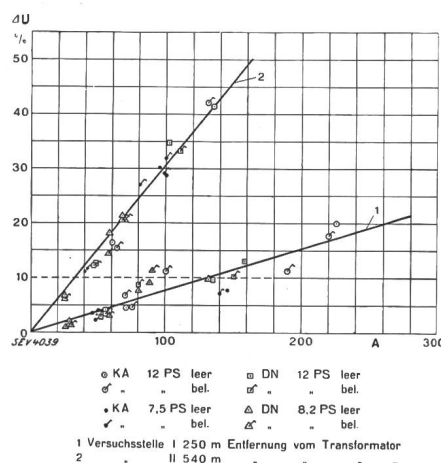
Wie die bisherigen Erörterungen gezeigt haben, sollte der Stromverdrängungsmotor eigentlich nur dort verwendet werden, wo es die technischen Bedingungen wirklich verlangen; ihn generell an Stelle des gewöhnlichen Kurzschlussankermotors zu setzen, ist aber, vom Standpunkte des Verbrauchers aus gesehen, unwirtschaftlich. Abgesehen davon,

dass auch die Energielieferanten alles Interesse haben, dass nur Motoren mit möglichst hohem Leistungsfaktor angeschlossen werden.

Vom Standpunkte des Energielieferanten ist aber noch ein anderer Punkt zu beachten, nämlich der des Einschaltstromstosses beim Einschalten des Motors. Der Energiekonsument hat das Recht, vom Werk zu verlangen, dass die bezogene Energie in guter Qualität geliefert wird, d. h. in erster Linie bei konstanter Spannung; Belastungsschwankungen dürfen sich nicht durch Spannungsschwankungen auswirken, dass z. B. das Licht dauernden Zuckungen unterworfen ist. Je stärker das Netz ist, umso geringer werden bei wechselnder Belastung die momentanen Spannungsschwankungen sein, je schwächer das Netz, um so grösser wird sich die Rückwirkung einer plötzlichen Belastung gestalten.

Das Einschalten eines jeden Motors stellt für das Netz stets eine mehr oder weniger starke momentane Belastung dar, und es ist klar, dass diese Belastungsschüsse von seiten der Energielieferanten begrenzt werden müssen. Versuche, die durch den VDE durchgeführt wurden, zeigten, dass bei Verwendung moderner Glühlampen plötzliche Spannungsschwankungen dann als unangenehm in Erscheinung traten, wenn sie grösser als 10 % waren. Zum gleichen Resultat führten auch zahlreiche Versuche, die im Jahre 1927 im Versuchslokal der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden bei Anlaufversuchen von Kurzschlussanker-Motoren durchgeführt wurden. Diese Versuche zeigten, dass verschiedene Beobachter keine Lichtzuckungen bemerken konnten, wenn die momentane Spannungsabsenkung etwa 5 % betrug; 10 % wurde fast immer als leichte Zuckung bemerkt, während solche von 13 bis 15 % stets deutlich wahrgenommen wurden.

Die Grenze der anzuschliessenden Motorleistung eindeutig festzulegen, ist praktisch kaum möglich, da sie für jedes Netz und sogar für jeden Standort des Motors verschieden ist. Um diese Frage etwas abzuklären, wurden in einem deutschen Netze, bei Anlass der Neuregelung des VDE, für



die Anschlussbedingungen von Motoren Versuche durchgeführt, deren Resultate von Kolb in der «Elektrizitätswirtschaft» im Oktober 1931 veröffentlicht wurden. In einem Dorfe in Thüringen, dessen Netz von einem Transformator von 70 kVA, 10 000/230 Volt gespeist wird, wurden Versuche durchgeführt, das eine Mal an einem Hauptverteilpunkt in 240 m Entfernung vom Transformator (Verbraucherstelle 1), das andere Mal in 540 m Abstand am Ende einer Leitung (Verbraucherstelle 2). Die Versuche erstreckten sich auf die Bestimmung des Einschaltstromstosses und der Spannungsabsenkung beim Einschalten von einem 12,5-PS-Schleifringanker-Motor im Vergleich zu einem 12-PS-Kurzschlussanker-Motor mit normalem Rotor und einem 12-PS-Doppelnutmotor einerseits und einem 7,5-PS-Kurzschlussanker- und 8,2-PS-Doppelnutmotor andererseits. Der Schleifringanker-Motor war mit Rotoranlasser versehen, während die Kurzschlussanker-Motoren entweder direkt oder mit Stern/Dreieck-Schalter mit Sprungschaltung eingeschaltet wurden. Die Verbraucherstelle 1 konnte entweder

nur über eine, oder über zwei parallellaufende Leitungen gespeist werden, während von hier ab zur Verbraucherstelle 2 nur eine Leitung geführt war. Die Versuche wurden nun so vorgenommen, dass die Motoren auf eine Transmission arbeiteten, welche eine Kreissäge antrieb, und zwar wurde einmal nur die Transmission, das andere Mal die Kreissäge mitangetrieben. Die Einschaltung erfolgte entweder direkt, oder bei Stern/Dreieck-Anlauf, wobei bei Stern/Dreieck-Anlauf das eine Mal normal, das andere Mal rasch geschaltet wurde. Mit dem Schleifringanker-Motor wurden bei richtiger Betätigung des Anlassers naturgemäss die kleinsten Stromstösse erzielt, während bei zu raschem Schalten von Stufe zu Stufe ebenfalls sehr grosse Stösse erzielt wurden. In den in Fig. 11 zusammengestellten Resultaten sind die Versuche mit dem Schleifringanker-Motor weggelassen und nur diejenigen der Kurzschlussanker-Motoren eingetragen, und zwar bei dem Zustand des Netzes, wo die Verbrauchsstelle 1 mit beiden Speiseleitungen mit dem Transformator verbunden war, siehe Kurve 1. Wir sehen, dass hier Stromstösse bis etwa 130 A Spannungsabfälle von etwa 10 % zur Folge haben, was bezüglich Lichtschwankungen, wie erwähnt, gerade noch zulässig ist. Die Messpunkte oberhalb 130 A rühren von Versuchen mit falsch bedientem Stern/Dreieck-Schalter oder von solchen, wo direkt eingeschaltet wurde, her. Die aufgenommene Scheinleistung beträgt in diesem Falle ca. 50 kVA.

Bei diesem Netz, d. h. also in der Nähe des Transformators, können also sowohl die 7,5 bzw. 8,2-PS-Motoren, als auch die 12-PS-Motoren, sei es normaler Kurzschlussanker-Motor oder Doppelnutmotor, bei richtig bedientem Stern/Dreieck-Schalter, ohne weiteres angeschlossen werden. Anders liegen die Verhältnisse bei der Verbraucherstelle 2. Wir sehen aus Kurve 2, dass dort die Motoren für 12 PS, auch der Doppelnutmotor, durchwegs grössere Spannungsabfälle als 10 % ergeben, während die 7,5-PS-Motoren gerade noch zulässig sind, allerdings nur bei richtig betätigtem Stern/Dreieck-Schalter; der zulässige Stromstoss beträgt dabei nur ca. 32 A, d. h. die aufgenommene Scheinleistung ca. 13 kVA.

Wir sehen also, dass die maximal zulässige Einschaltstromstärke, bzw. Leistungsaufnahme in ein- und demselben Netze je nach Aufstellungsort in sehr weiten Grenzen variiert. Es wäre nun ungerecht, würde man die Grösse der zuzulassenden Motorleistungen nur nach der unteren Grenze bestimmen, da diese nur für Aufstellung der Motoren an ganz ungünstigen Netzpunkten gilt. Dem erwähnten 32-A-Einschaltstrom entspricht bei einem 4poligen Motor mit normalem Kurzschlussrotor etwa 6,5 A Normalstrom, bei einem Kurzschlussstrom von ca. 500 %. Es würde dies also einem Motor von etwa 2,5 PS bei 230 V entsprechen; d. h. dieser Motor könnte selbst unter den erwähnten ungünstigen Verhältnissen noch direkt eingeschaltet werden, ohne dass eine grössere Spannungsabsenkung als 10 % auftreten würde. Nehmen wir einen Doppelnutmotor, der nur 420 % Kurzschlussstrom hat, so würde sich eine Motorleistung von etwa 2,8 PS ergeben, also etwa 12 % mehr Leistung als für den normalen Motor. Bei Stern-Anlauf, wo der normale Kurzschlussanker-Motor etwa 170 % Strom aufnimmt, kommen wir bei einer analogen Ueberlegung zu einer Motorleistung von etwa 8 PS und bei Verwendung des Doppelnutmotors mit nur 135 % Strom zu etwa 9,5 PS.

Dieses Beispiel eines sehr schwachen Netzes zeigt, dass unter Umständen die Verwendung eines Doppelnutmotors, welcher jedoch schon einen ziemlich stark reduzierten Kurzschlussstrom aufweisen muss, eine bescheidene Erhöhung der anzuschliessenden Motorleistung gestattet. Es wäre aber nicht richtig, wenn man sich bei der Herausgabe von Vorschriften für den Anschluss von Kurzschlussanker-Motoren an öffentliche Netze nun einzig und allein auf so schwache Netze beziehen würde und etwa gar nur Doppelnutmotoren zulassen wollte. In sehr vielen anderen Fällen verursacht auch der normale Kurzschlussanker-Motor keine störenden Stromstösse, und zudem kann er, wie wir gesehen haben, auch so ausgelegt werden, dass er bei weitaus besseren Betriebseigenschaften praktisch den gleichen Kurzschlussstrom aufnimmt wie ein Doppelnutmotor.

Zusammenfassend sei nochmals darauf hingewiesen, dass, wo immer möglich, der normale Kurzschlussanker-Motor zur Anwendung gelangen sollte, da er die besseren Eigenschaften als der Stromverdrängungsmotor hat und billiger in der Anschaffung, also kurz wirtschaftlicher als jener ist.

Gerade heute, wo in Kleingewerbe und Landwirtschaft der Explosionsmotor dem Elektromotor ernsthafte Konkurrenz zu machen beginnt, sollten im Interesse eines vermehrten Anschlusses von billigen und wirtschaftlichen Motoren die zuzulassenden Anlaufströme nicht allzu niedrig angesetzt werden. Dabei sollte nicht der Anlaufstrom als Vielfaches des Nennstromes festgelegt werden, sondern richtiger, die zulässige Scheinleistung des Motors beim Anlauf, wie Herr Professor Dünner an Hand eines Beispiels sehr instruktiv gezeigt hat. Ueber die Rotorbauart sollten eigentlich keine Bedingungen aufgestellt werden. Wenn für den Anschluss von Motoren je nach Leistung ein bestimmter zulässiger Wert für die aufgenommene Scheinleistung beim Anlauf vorgeschrieben wird, so ist damit eindeutig die Bedingung festgelegt, an deren Erfüllung der Energielieferant interessiert ist. Am Lieferanten des Motors liegt es dann, für die bestehenden Anschlussbedingungen den Motor mit dem vorteilhaftesten Rotor und das richtige Anlassverfahren zu wählen.

(Fortsetzung des Berichtes folgt.)

W. Huber, Elektrizitätswerk Luzern: Vor 14 Jahren haben wir in einem Dorf das Netz von 2×220 Volt auf $3 \times 380/220$ Volt umgebaut und zwei Motoren von je 3 PS, welche früher während der Hauptbeleuchtungszeit gesperrt waren, mit gewöhnlichen Schaltern an das Netz angeschlossen und nicht mehr gesperrt. Die Motoren dienten einem Bäckerei- und einem Schreinereibetrieb.

Innert einiger Tage trafen Reklamationen von Lichtabonnenten wegen Spannungsschwankungen ein. Durch Einbau von Stern-Dreieckschaltern und Instruktion der Abonnenten konnten die Schwankungen auf ein Minimum reduziert werden. Die Klagen wegen Schwankungen blieben aus.

10 % Spannungsabfall beim Anlauf von Motoren dünkt mich für das Einheitsnetz etwas viel, wenn es sich nicht nur um ganz kurze, nur mit Oszillograph bestimmbare Spannungsabfälle handelt.

Vielerorts kommt es auch darauf an, ob die Abonnenten bisher mit ruhigem Licht verwöhnt wurden oder nicht.

Der Vorsitzene bestätigt, dass die 10 % Spannungsabfall, von denen Herr Riggenbach (siehe Seite 537, links) sprach, nur sehr kurzzeitig auftreten.

Er dankt den Herren Diskussionsrednern für ihre wertvollen Beiträge, und wiederholt seinen Dank an den Hauptreferenten, Herrn Professor E. Dünner.

Eigenschaften kautschukfreier, nicht keramischer plastischer Isolierstoffe.

Von A. Imhof, Zürich, und H. Stäger, Baden.

(Fortsetzung von Seite 516 und Schluss.)

621.315.616.9

Eigenschaften.

Wir haben versucht, im folgenden die Eigenschaften in einigen Tabellen zusammenzustellen. Im Interesse der Uebersichtlichkeit wurden je in eine Tabelle zusammengefasst alle *mechanischen Eigenschaften*, in eine zweite Tabelle alle *elektrischen Eigenschaften*, in die dritte das *Verhalten gegen Wärme und Feuer*, in der vierten das *hygroskopische und chemische Verhalten*, in der fünften die namentlich für die *Fabrikation* wichtigen Eigenschaften. Da die meisten Werte erheblichen Schwankungen unterliegen, geht es nicht wohl an, nur etwa Mittelwerte verschiedener Quellen anzugeben. Die Tabellen enthalten Minimalwerte, die zum Teil durch Normen festgelegt sind, zu einem anderen Teil erfahrungsgemäss bei sorgfältiger Fabrikation mindestens erreicht werden, dann Mittelwerte und endlich Maximalwerte, die nur in besonders günstigen Fällen mit grösster Sorgfalt erreichbar und nicht beliebig reproduzierbar sind. Der Konstrukteur wird seinen Berechnungen im allgemeinen die Minimalwerte zugrunde legen. In vielen Fällen, wo diese nicht ausreichen, werden durch besondere Vereinbarung mit dem Fabrikanten höhere Werte verlangt werden können. Die angegebenen Maximalwerte werden aber *nie als Garantiewerte* verlangt werden dürfen.

Zu den einzelnen Eigenschaftsgruppen seien noch einige Bemerkungen gemacht.

1. Mechanische Eigenschaften.

(Tabelle II.)

Die bei Metallen in erster Linie beachtete Zugfestigkeit eignet sich bei den Preßstoffen weniger

gut zur Charakterisierung, weil bei der im allgemeinen sehr niedrigen Dehnung kleine Krümmungen der Probestäbe zu starker Streuung Anlass geben, weil weiterhin die Druckbeanspruchung in den Einspannstellen zu Fehlresultaten führen kann. Allgemein wird die Biegefestigkeit ermittelt, ferner die Druckfestigkeit und die Härte. Besonders charakteristisch ist auch die Schlagbiegefestigkeit, variiert sie doch je nach Preßstoff zwischen etwa 2 und 40 cmkg/cm². Die Härtebestimmung ist schwieriger durchzuführen als bei Metallen. Während im allgemeinen die Brinellprobe mit Kugeln von 5 oder 10 mm $\varnothing$ gemacht wird, hat sich die schweizerische Isolierstoff-Kommission zur Prüfung mit Flachstempel geeinigt. Die Werte der Dehnung vor dem Bruch werden leider im Zusammenhang mit der Biegefestigkeit noch selten angegeben, obwohl sie für viele praktische Anwendungen wesentlich und auch für die Zusammensetzung und Behandlungsart recht charakteristisch sind. Als einfach bestimmbare Grösse haben wir deshalb in manchen Fällen die Durchbiegung vor dem Bruch angegeben.

Den Tabellenwerten liegen VDE-Stäbe von $120 \times 15 \times 10$ mm zugrunde. Die Schlagbiegefestigkeiten können nicht auf Werte umgerechnet werden, die an anders dimensionierten Stäben gefunden wurden.

Es sei ausdrücklich bemerkt, dass die an Prüfstäben gemessenen Werte in sehr vielen Fällen grösser sind als an Stäben, die aus dem fertigen Pressgegenstand herausgeschnitten werden. Dies hängt mit der presstechnisch günstigen Form der Prüfstäbe zusammen. Besonders dann werden sich Verschlechterungen ergeben, wenn durch die Art