Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 26 (1935)
Heft: 20

Artikel: Geräuschuntersuchungen an elektrischen Maschinen [Fortsetzung]
Autor: Moser, Hans
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058480

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 21.11.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVIe Année | N° 20 | Vendredi, 27 Septembre 1935

Geräuschuntersuchungen an elektrischen Maschinen.

(Fortsetzung von Bull. SEV 1935, Nr. 12, S. 322.)

Von *Hans Moser*, Zürich.

534.41 : 621.313

C. Der nutenlose Rotor des Asynchronmotors.

Im Teil C dieses Artikels wird über neue Rotorausführungen der Asynchronmotoren mit Kurzschlussanker berichtet, welche geräuschfreien Betrieb ergeben. Auf der Suche nach einem Weg, der prinzipiell einen geräuschlosen Lauf des Motors garantiert und auf Grund der Tatsache, dass die Nutung des Motors die Ursache der Oberfelder und damit des magnetisch erzeugten Geräusches ist, wurde auf den seit den Anfängen der Elektrotechnik bekannten nutenlosen, massiven Eisenrotor zurückgegriffen. Dieser, hinsichtlich Geräuschlosigkeit ideale Rotor wurde bisher in der Praxis kaum angewendet, weil seine Laufeigenschaften in jeder Beziehung ausserordentlich schlecht sind.

Durch Verwendung von verschiedenen Schichten aus geeigneten Materialien gelang es nun, ohne Beeinträchtigung der sehr guten Anlaufeigenschaften auch die Laufeigenschaften dieses wicklungs- und nutenlosen Rotors sehr stark zu verbessern. Die beigefügten Kurven zeigen, dass der neue Rotor selbst bei einfachster radialer Schichtung aus konzentrischen Eisen-, Kupfer- und Eisenzylindern für verschiedene Antriebe in elektrischer und in wirtschaftlicher Beziehung praktisch brauchbar ist. Der neue Rotor kann in normalen, genuteten Statoren der üblichen Bauart betrieben werden. Seine Verwendung in ***Drehstrommotoren*** *ist besonders für* ***intermittierenden*** *Betrieb dank der ganz vorzüglichen Anlaufeigenschaften günstig (z. B. für Liftantrieb). Für* ***Dauerbetrieb*** *muss zur Zeit aus Gründen der etwas schlechteren Garantiewerte eine Leistungsreduktion in Kauf genommen werden. Bei kleinen* ***Einphasenmotoren,*** *die zwecks ausgeglichenem Betrieb und kräftigem Anzugsmoment mit (nicht abschaltbarem) Kondensator arbeiten müssen, ist dagegen selbst bei Dauerbetrieb keine Leistungsreduktion nötig. Aus den Kurven eines Oelfeuerungsmotors geht beispielsweise hervor, dass der Vollastwirkungsgrad bei der Verwendung eines nutenlosen, geschichteten Rotors gleich gross ist wie bei einem normalen Käfiganker. Ferner zeigen die Kurven, dass der Leistungsfaktor im Anlauf wie im Lauf immer sehr nahe der Einheit bleibt; und endlich, dass die Anlaufsverhältnisse bezüglich Anlaufstrom und Anlaufmoment beim nutenlosen Rotor bedeutend besser sind als bei dem verglichenen normalen Käfiganker.*

Allgemein liegt der Vorteil des neuen Rotors, abgesehen von der Geräuschlosigkeit, darin, dass der Motor — im Gegensatz zu den meisten übrigen sogenannten praktisch geräuschlosen Motoren — magnetisch voll ausgenützt werden kann. Günstig für die praktische Anwendung des nutenlosen Rotors ist ferner sein ausserordentlich einfacher Aufbau, die Verwendung billiger Materialien und seine thermische Unverwüstlichkeit; endlich die Möglichkeit der Verwendung normaler Statoren der üblichen Bauart.

Le chapitre C de cet article est consacré aux nouveaux types de rotors pour moteurs asynchrones à induit court-circuité, à marche silencieuse. En recherchant une solution offrant une marche silencieuse, et reconnaissant que les encoches du moteur sont la cause des champs dus aux harmoniques et par conséquent du bruit, on a repris le rotor en fer massif connu depuis les débuts de l'électrotechnique. Celui-ci n'a été jusqu'ici que très peu utilisé pratiquement, car ses qualités de marche laissent beaucoup à désirer à tous les points de vue. En utilisant différentes couches de matériaux appropriés on a réussi à améliorer fortement les qualités de marche de ce rotor sans encoches, sans porter atteinte à ses qualités excellentes au démarrage. Les courbes annexées prouvent que le nouveau rotor est parfaitement utilisable pour différents genres de commande, tant au point de vue électrique qu'économique, lors même qu'il ne présente que les trois couches fer-cuivre-fer. Le nouveau rotor peut marcher dans les stators à encoches du type normal. Comme rotor de ***moteur triphasé,*** *il se prête particulièrement au régime* ***intermittant,*** *grâce à ses qualités excellentes au démarrage (p. ex. pour les ascenseurs). Pour un service* ***permanent*** *il faut actuellement se contenter d'une puissance un peu réduite en raison des garanties moins bonnes. Pour des petits moteurs monophasés par contre, qui exigent un condensateur (non déconnectable) afin d'obtenir une marche balancée et un couple de démarrage puissant, il n'est pas nécessaire de réduire la puissance, même en service permanent. Des courbes d'un moteur pour chauffage au mazout il ressort par exemple que le rendement à pleine charge est le même, qu'on utilise un rotor sans encoches et à couches ou un rotor normal en cage d'écureuil. Ces courbes montrent en outre que le facteur de puissance reste sensiblement voisin de l'unité au démarrage comme en charge et, finalement, que les conditions au démarrage, intensité et couple, sont sensiblement meilleures que pour l'induit normal en cage d'écureuil ayant servi de comparaison.*

Outre le démarrage et la marche en charge absolument silencieux, l'avantage général de la nouvelle construction réside dans le fait que le moteur — à l'encontre de la plupart des autres moteurs pratiquement silencieux — peut être construit avec une saturation magnétique très poussée. D'autres facteurs favorables à l'utilisation pratique du rotor sans encoches sont sa construction excessivement simple, son insensibilité aux fortes températures, le prix peu élevé des matières premières nécessaires et, finalement, la possibilité de l'utiliser avec des stators normaux de construction courante.

I. Anforderungen an einen geräuschlosen Elektromotor.

Bei manchen elektrischen Antrieben wird heute Geräuschlosigkeit verlangt. Diese Forderung bedingt aber noch nicht *absolute* Geräuschlosigkeit des Motors. Denn aus den Definitionen der Geräuschlosigkeit (s. Abschnitt A, 6) geht hervor, dass ein Motor schon praktisch geräuschlos ist, d. h. vom «Grundgeräusch» des Raumes fast gänzlich verdeckt wird, wenn er nur 10 bis 20 Phon weniger laut ist als das Grundgeräusch. Daher genügen für die meisten industriellen Antriebe Motoren, die an sich keineswegs absolut geräuschlos sind.

Dagegen gibt es viele nicht industrielle Antriebe in Privathäusern, Hotels, Krankenhäusern usw., deren Grundgeräusch bis unter 20 Phon fallen kann. Dort werden Motoren aufgestellt werden müssen, die geräuschfrei sind. «Namentlich in Gebäuden aus armiertem Beton, wo Geräusche ausserordentlich leicht weitergeleitet werden, ist der beste geräuschlose Motor gerade gut genug» (Riggenbach, BBC-Mitt. 1933, S. 141).

An einen geräuschlosen Elektromotor werden heute ausser der Geräuschlosigkeit noch weitere Anforderungen gestellt. Es müssen 3 Bedingungen eingehalten werden:

1. Absolute, von Zufälligkeiten des mechanischen Aufbaues unabhängige Geräuschlosigkeit bei Leerlauf, Last und im Anlauf.

2. Hohe Materialausnützung, d. h. niedriger Preis.

3. Möglichst gute elektrische Anlauf- und Laufdaten bezüglich des Drehmoment- und des Stromverlaufes und der Garantiewerte.

Der am meisten verbreitete Elektromotor ist bekanntlich der Asynchronmotor mit Käfiganker. Die Praxis zeigt, dass heute bei diesem Motor mit den im Abschnitt B, V genannten Mitteln zur Geräuschverminderung ein mehr oder weniger geräuschloser Betrieb erzielt werden kann. Die Einphasenmotoren und die Dreiphasenmotoren mittlerer und grösserer Leistung sind heute noch, speziell im Anlauf, weniger geräuschlos. Durch übermässige Ausnützung der genannten Mittel, z. B. durch weitgehende Reduktion der Luftspaltsättigung, kann allerdings in den meisten Fällen genügende Geräuscharmut erzielt werden. In diesem Sinne ist daher das Problem des «praktisch geräuschlosen» Elektromotors eigentlich gelöst. Es stellt sich daher neuerdings vielmehr die Frage, ob eine Einhaltung der Geräuschlosigkeit ohne Vernachlässigung der Materialausnützung und der elektrischen Daten möglich ist.

In der Praxis ist es vorläufig noch so, dass ein sog. geräuschlos laufender Motor magnetisch stark untersättigt werden muss. Es ist z. B. verschiedentlich üblich, die Sättigung praktisch geräuschloser Motoren auf 70 % der Sättigung normaler Motoren (bei denen kein Wert auf geräuschlosen Gang gelegt wird) zu reduzieren. Dieser Reduktion der Sättigung entspricht ungefähr (bei gleichem Schlupf) eine Reduktion der Motorleistung auf die Hälfte. D. h. die Geräuschlosigkeit zwingt dazu, den Motor entweder weniger auszunützen oder (für die gleiche abzugebende Leistung) einen grösseren Motortyp zu wählen. Diese Tatsache dürfte zum grössten Teil auch der Grund sein, warum «geräuschlos laufende Motoren» 20 bis 60 % teurer sind als Normalmotoren der gleichen Leistung.

II. Der nutenlose, massive Eisenrotor.

1. *Oberfelder, Parasitärkräfte, Schall.*

Um sicher zum voraus einen magnetisch wirklich geräuschlosen Motor entwerfen zu können, und um allen Zufälligkeiten des mechanischen Aufbaues entgegentreten zu können, muss man die *Oberfelder als die Ursachen der Parasitärkräfte und des Schalles* beseitigen. Man muss zu radikalen Methoden greifen, wenn absolute Geräuschlosigkeit angestrebt werden soll. Es genügt nicht, die Schalleistung normaler Motoren z. B. auf die Hälfte herunterzusetzen, sondern es muss eine Reduktion um eine oder mehrere Zehnerpotenzen vorgenommen werden.

Aus dem Abschnitt B «Die Ursachen des magnetisch erzeugten Geräusches bei Asynchronmaschinen» geht hervor, dass die *beidseitige Nutung* von Stator und Rotor die Oberfelder verursacht. Nun zeigen die Gleichungen (12) bis (14a) (Abschnitt B, I), dass beim *Wegfall der Rotornutung* alle schädlichen Oberfelder verschwinden. Tatsächlich können bei der Verwendung eines nutenlosen Rotors und bei symmetrischer Statorwicklung keine *resultierenden* Kraftwirkungen, wie Pendelmomente und Rüttelkräfte, auftreten. Ausserdem verschwinden auch die meisten *lokalen* Kräfte fast restlos. Denn durch den Wegfall der Rotornutung wird, selbst bei der Drehung des Rotors, der magnetische Widerstand des Luftspaltes zeitlich konstant. Daher verschwinden die stärksten der hörfrequent pulsierenden Lokalkräfte auf die Statorzähne.

Solange nur die Rotornuten, nicht aber auch die Statornuten wegfallen, bleiben immer noch die *Statoroberfelder* bestehen. Glücklicherweise laufen jedoch die stärksten Statoroberfelder, die Oberfelder der Wicklung und der Nutung so langsam um, dass sie im *Stator* nur die Frequenz des Grundfeldes [s. Gleichung (9)] induzieren. Daher erzeugen sie dort keine hörbaren Töne. Auf den *Rotor* allerdings wirken sie bei Lauf des Rotors mit der hörbaren Frequenz $f_{1,2}$ [s. Gleichung (10)]. Trotzdem tritt im allgemeinen praktisch kein Schall auf, auch nicht bei den im folgenden beschriebenen, *geschichteten* Rotoren, offenbar, weil die äusserste Rotorschicht aus Eisen einen Kurzschluss für diese Oberfelder darstellt, und weil der Rotor dank seiner massiven Bauart kaum schwingungsfähig ist.

Aus dem gleichen Grund — weil die in den Rotor eindringenden Statoroberwellen durch die äusserste Rotoreisenschicht ausgelöscht werden — sind auch die *asynchronen Parasitärmomente* sehr klein.

Diese entstehen zwar prinzipiell auch bei den nutenlosen Rotoren ($Z_2 = 0$) aus dem Zusammenwirken der Statoroberfelder ν_1 mit den Rotoroberfeldern gleicher Ordnungszahl: $\nu_2 = \nu_1$ [s. Gl. (12)]. Abgesehen aber davon, dass diese Momente im Vergleich zum Grundfeldmoment hier vernachlässig-

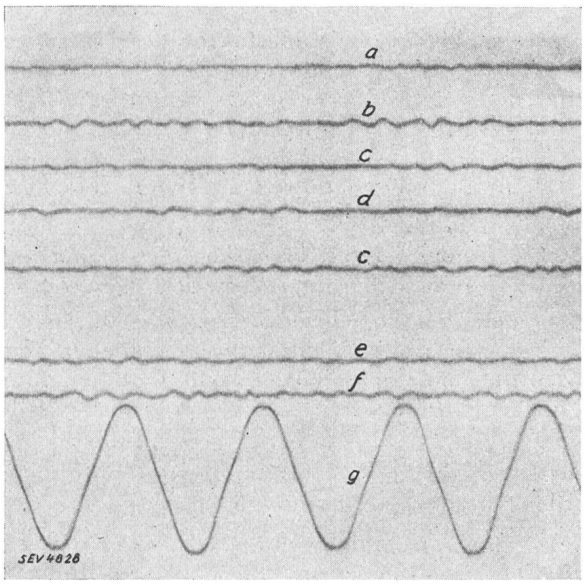

Fig. 19.
Oszillogramme des Schalldruckverlaufes und des Flussverlaufes in einem Statorzahn eines 4-poligen 3 PS Drehstrom Asynchronmotors mit nutenlosem, geschichtetem Rotor
bei Nennspannung (Luftspaltsättigung $B_{\delta_0} = 7000$ Gauss) und bei einer Netzfrequenz: $f_1 = 50/s$.

Zeitlicher Schalldruckverlauf:

a) im Leerlauf mit Spannung.
b) im Leerlauf ohne Spannung.
c) im Stillstand ohne Spannung (Raum- und Verstärkergeräusch).
d) bei Vollast.
e) bei 50 % Ueberlast.
f) beim Auslauf ohne Spannung und bei ½ synchroner Drehzahl.

Aufnahmen des Schalldruckes im stark gedämpften Raum. Lautstärke bei Vollast nicht messbar (geschätzt: ≈ 15 Phon). Mikrophone 30 cm vom Motor entfernt.

Zeitlicher Flussverlauf:

g) bei Vollast (Aufnahme mit Prüfschleife um einen Statorzahn).

bar klein sind [41]), ist ihre Grösse auch zeitlich konstant. Daher können sie *naturgemäss* weder Luft- noch Bodenschall hervorrufen.

Prinzipiell wirken die soeben besprochenen Rotoroberfelder: $\nu_2 = \nu_1$, soweit sie überhaupt noch auftreten, auf den Stator zurück mit den bei Lauf hörbaren Frequenzen $f_{2,1}$ [s. Gl. (13)]. Ferner wirken auf den Stator mit hörbaren Frequenzen die Statoroberfelder der Sättigung und die Harmonischen der Netzspannung. Diese Oberfelder konnten wir experimentell nur noch sehr schwach in der Flusskurve, meist nicht mehr aber im Schall nachweisen. Man darf daher sagen, dass ein Motor mit nutenlosem Rotor, der im mechanischen Aufbau von Stator und Rotor und im Material fehlerlos ist, praktisch frei ist von Anlauf- und von Laufgeräusch.

[41]) Festgestellt wurden maximal etwa 5 % bei den geschichteten Rotorausführungen nach Fig. 21a und b.

Den Unterschied im Schall und im Oberwellengehalt der Flusskurve zwischen einem der später besprochenen nutenlosen Rotoren (Abschnitt C, III, 3a, Fig. 21a) und einem normalen Käfigrotor zeigen die Oszillogramme Fig. 19 und 20. Die Aufnahmen erfolgten bei gleichen normalen Betriebsbedingungen bei normaler Sättigung. Die Schalldruckoszillogramme des vierpoligen 3 PS-Motors mit nutenlosem Rotor zeigen bei Stillstand, Leerlauf, Vollast und Ueberlast praktisch keinen Unterschied. Die Unregelmässigkeiten im Oszillogramm werden hauptsächlich durch Raumgeräusche und durch das Verstärkerrauschen verursacht. Die Lautstärke des Motors konnte mit dem objektiven Phonmesser von Siemens & Halske, dessen untere Messgrenze bei 20 bis 25 Phon liegt, nicht mehr gemessen werden; sie liegt schätzungsweise bei etwa 15 Phon. Die Flusskurve wurde bei Vollast mit Hilfe

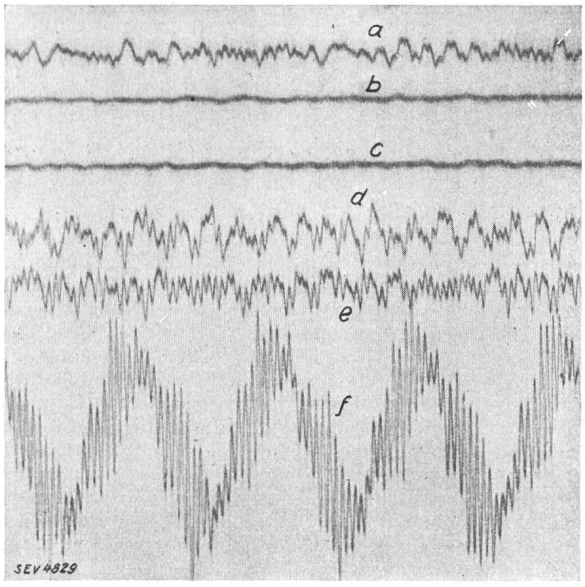

Fig. 20.
Oszillogramme des Schalldruckverlaufes und des Flussverlaufes in einem Statorzahn eines 4-poligen 3 PS Drehstrom-Asynchronmotors mit Käfiganker
bei Nennspannung (Luftspaltsättigung $B_{\delta_0} = 7000$ Gauss) und bei $f_1 = 50/s$.

Zeitlicher Schalldruckverlauf:

a) im Leerlauf mit Spannung.
b) im Leerlauf ohne Spannung.
c) im Stillstand ohne Spannung (Raum- und Verstärkergeräusch).
d) bei Vollast.
e) bei 50 % Ueberlast.
Aufnahmen des Schalldruckes im stark gedämpften Raum. Lautstärke bei Vollast 45 Phon. Mikrophone 30 cm vom Motor entfernt.

Zeitlicher Flussverlauf:

f) bei Vollast (Aufnahme mit Prüfschleife um einen Statorzahn).

einer Prüfschleife aufgenommen. Die schwache Verzerrung der Sinusform der Grundfeldkurve wird in erster Linie durch die Sättigungsoberfelder des Stators verursacht.

Fig. 20 zeigt den Verlauf des Schalldruckes und des Flusses in einem Statorzahn bei demselben vierpoligen 3 PS-Motor mit Käfiganker. Der hochfrequente Ton 1225 Per./s der Schalldruckkurven a, d, e, welcher den Hauptanteil des hörbaren Ge-

räusches bildet, wurde aber von der Meßschleife nicht genügend stark aufgezeichnet. Der Frequenzgang dieser Meßschleife ist derart, dass die Empfindlichkeit bei 1225 Per./s fünfmal kleiner ist als bei 50 Per./s. Die hochfrequenten Schwankungen der Schalldruckkurven von Fig. 20 sollten daher in Wirklichkeit fünfmal stärker zum Ausdruck kommen.

2. *Die elektrischen Daten des massiven, homogenen Eisenrotors.*

Es ist schon sehr lange bekannt, dass der massive Eisenrotor infolge der Wirbelstrombildung im Drehfelde läuft, ferner dass seine *Anlauf*eigenschaften sehr gut, seine *Lauf*eigenschaften aber hinsichtlich Drehmoment, Schlupf, Ueberlastungsfähigkeit, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor ausserordentlich schlecht sind. Die schlechten Laufeigenschaften sind auch der Grund, warum dieser Rotor in der Praxis bei den üblichen Netzfrequenzen kaum verwendet werden kann [42]).

Messungen an einem nutenlosen, massiven Grauguss- und an einem weichen Stahlrotor in einem normalen 3,5 PS-Drehstromstator mit 7700 Gauss Luftspaltsättigung ergaben folgende Daten:

Maximale, mechanisch abgegebene Leistung: 1,25 PS (Guss) und 1,6 PS (Stahl) bei 45 %, bzw. 35 % Schlupf. Abgegebene Leistung bei 10 % Schlupf: 0,52 PS (Guss), bzw. 0,9 PS (Stahl). (Die maximal abgegebene Leistung bei Verwendung normaler genuteter Rotoren wie auch bei den nachstehend beschriebenen nutenlosen, geschichteten Rotoren in demselben Stator bei den gleichen Versuchsbedingungen beträgt 5 bis 7 PS! Die Nennleistung 3,5 PS wird bei diesen schon bei 10 % Schlupf und weniger erreicht.) Es genügt also der massive Eisenrotor schon hinsichtlich Leistungsabgabe nicht. Die Garantiewerte des massiven Eisenrotors bei 10 % Schlupf betragen: Wirkungsgrad: 55 % (Guss), bzw. 51 % (Stahl) und Leistungsfaktor: 0,33 (Guss), bzw. 0,48 (Stahl) bei einem Luftspalt von 0,3 mm. Diese Werte liegen weit unter denjenigen normaler genuteter und nutenloser geschichteter Rotoren.

Der *massive* nutenlose Eisenrotor genügt also auch hinsichtlich der Garantiewerte für eine praktische Anwendung bei weitem nicht.

3. *Die Ursachen der schlechten Laufeigenschaften des massiven, homogenen Eisenrotors.*

Die Schuld an diesen sehr schlechten Laufeigenschaften tragen im wesentlichen folgende drei Punkte:

a) Die durch den Skineffekt der Wirbelströmung bedingte *zu kleine Eindringtiefe* des magnetischen Flusses und des Stromes. Daher ist der für die Stromleitung gegebene aktive Eisenquerschnitt viel zu klein. Trotzdem im Lauf bei kleiner Rotorfrequenz die Eindringtiefe noch etwas grösser ist als im Anlauf, lässt die sehr kleine Rotorspannung nur einen sehr schwachen Rotorstrom und daher nur ein sehr schwaches Drehmoment entstehen.

[42]) S. auch Rüdenberg, ETZ 1918, S. 485, und Schenfer, Arch. Elektrotechn. 1926, S. 168. Schenfer hat die Drehmomentbildung des massiven nutenlosen Rotors durch eine *stirnseitige* Kupferschicht etwas verbessert. Auch eine *mantelseitige* Kupferschicht ist schon versucht worden.

b) Der niedrige Wirkungsgrad des massiven Stahlrotors ist eine Folge der *hohen Oberfelderverluste im Rotor.* Diese Verluste werden durch die Statoroberfelder der Wicklung und der Nutung verursacht. Die so erzeugten asynchronen Oberfeldmomente wirken zudem bei Lauf des Rotors in der Nähe der synchronen Drehzahl auf das Grundfeldmoment bremsend ein.

c) Der niedrige Leistungsfaktor des Motors mit massivem Guss- oder Stahlrotor wird hauptsächlich durch den *schlechten Leistungsfaktor der Wirbelstromtransformation* verursacht.

III. Der nutenlose, geschichtete Massivrotor [43]).

1. *Verbesserung der Laufeigenschaften des massiven Rotors durch Schichtung geeigneter Materialien.*

Versuche und Theorie zeigen, dass durch eine Kombination von Schichten aus geeigneten Materialien die Laufeigenschaften des nutenlosen Rotors in jeder Hinsicht sehr stark verbessert werden können.

a) Das *zu kleine Laufdrehmoment* konnte *erhöht* werden durch Anwendung von:

α) Schichten, welche eine *Steigerung der Eindringtiefe* des Flusses in den massiven Rotor ergeben. Eine solche Schicht besteht z. B. aus einer *magnetischen Legierung,* deren *Sättigungsgrenze* niedriger als diejenige des reinen Eisens ist; oder sie besteht aus einer *axialen Schichtung* von Kupfer- und Eisenblechen (Fig. 21c, Pos. 3). Mit der Steigerung der Eindringtiefe des Flusses wächst auch der für die Stromleitung aktive Eisenquerschnitt und daher der Rotorstrom und das Drehmoment.

β) Schichten möglichst *hoher elektrischer Leitfähigkeit,* erstens in *axialer* Richtung und zweitens an den beiden Stirnseiten des Rotors in *tangentialer* Richtung.

Die erste Forderung, die gute Leitfähigkeit in axialer Richtung, kann z. B. erfüllt werden durch einen konzentrisch zur Welle angeordneten, dünnen *Kupfer*zylinder (Fig. 21a und b, Pos. 3), oder durch eine axiale Schichtung aus Kupfer- und Eisenblechen (Fig. 21c, Pos. 3), oder durch eine Schicht, bestehend aus einer *elektrisch sehr gut leitenden Legierung* niedriger Sättigungsgrenze, z. B. einer Sinterlegierung aus Kupfer und Eisen (Fig. 21a und b, Pos. 3).

Die zweite Forderung wird erfüllt durch Stirnverbindungsringe aus elektrisch gut leitendem, unmagnetischem Material, welches an beiden Stirnseiten des Rotors angebracht wird (Fig. 21, Pos. 2 und 2′) [44]).

b) Der niedrige *Wirkungsgrad* massiver Stahlrotoren kann sehr stark erhöht werden durch eine konzentrisch angeordnete «*Schutzschicht*» (Fig. 21, Pos. 4). Diese Schicht muss aus *elektrisch sehr*

[43]) Pat. ang.

[44]) Für Pos. 2, Fig. 21a, s. auch Schenfer, Arch. Elektrotechn. 1926, S. 168.

schlecht leitendem Material bestehen, dessen magnetische Sättigungsgrenze niedriger als bei reinem Eisen liegt. Die Schutzschicht bewirkt für die eindringenden Statoroberfelder einen Kurzschluss, so dass sich diese Oberfelder in der innern, drehmomentbildenden Schicht (Fig. 21, Pos. 3) kaum mehr

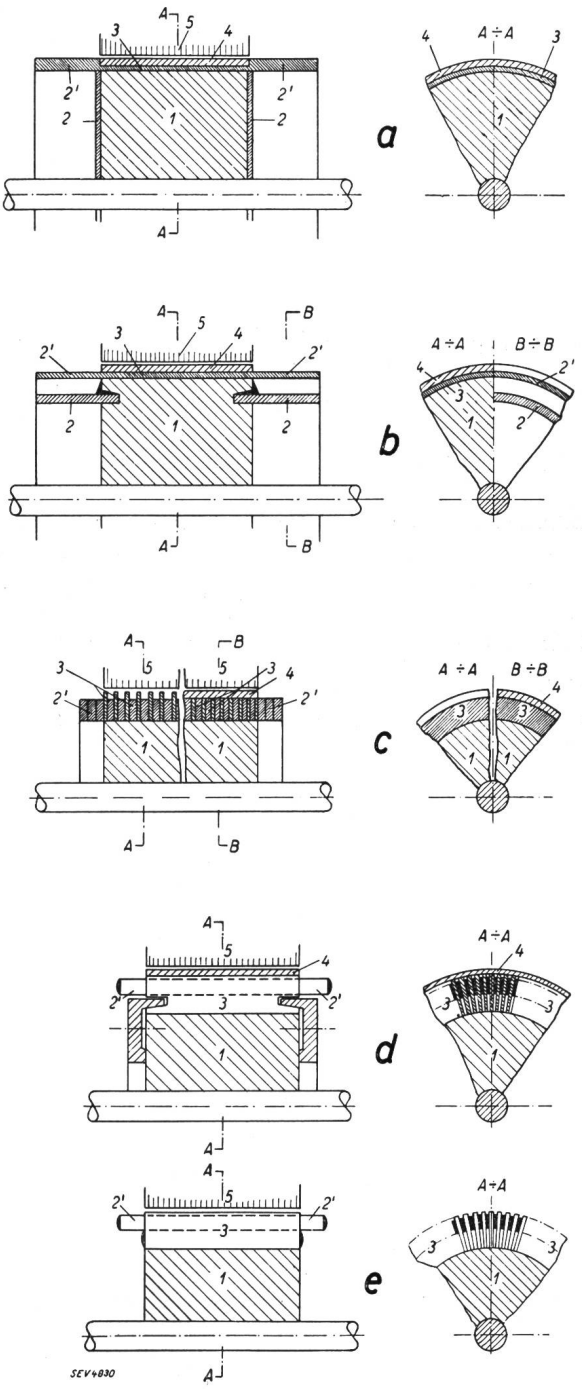

Fig. 21.

Verschiedene praktische Ausführungsformen von nutenlosen geschichteten Rotoren (schematisch).

Fig. 21 a u. b *Radial* geschichteter Rotor.
Fig. 21 c *Axial* geschichteter Rotor.
Fig. 21 d u. e *Tangential* geschichteter Rotor (Hochnutrotor).

1 Kern aus *massivem* Eisen.
2 u. *2'* Stirnverbindungen aus Kupfer.
3 Schicht aus Kupfer oder aus Kupfer-Eisen.
4 Schicht aus Nickeleisen oder aus gespritztem Eisen.
5 Stator.

schädlich auswirken können. Allerdings wird durch diese Schicht die Streuung etwas vergrössert. Praktische Ausführungen zeigen jedoch, dass die Streuungszunahme meist nicht bedeutend ist, erstens, weil die Wandstärke der Schutzschicht klein ist und zweitens, weil die maximale Sättigung des Materials kleiner ist als die Sättigung des reinen Eisens. Messungen an nutenlosen geschichteten Rotoren nach Fig. 21a und b haben gezeigt, dass durch Anwendung einer solchen Schicht (Pos. 4) die zusätzlichen Rotorverluste gegenüber einem nutenlosen Rotor ohne diese Schicht ausserordentlich stark herabgesetzt werden können. Dies wirkt sich in einer ganz beträchtlichen Erhöhung des Motorwirkungsgrades aus. Dass die Zunahme der Streuung bei einer praktischen Ausführung nicht bedeutend ist, geht aus dem geringen Steilheitsunterschied der Stromvektorkurven 3 und 4 der Fig. 26 hervor.

c) Verbesserung des *Leistungsfaktors.* Fig. 26 zeigt, dass der Leistungsfaktor der Wirbelstromtransformation durch Schichtung geeigneter Materialien wesentlich gesteigert werden kann. Der Gesamtleistungsfaktor des Motors hängt aber weiter noch vom Magnetisierungsstrom, also hauptsächlich von der Grösse des Luftspaltes ab. Daher wird bei der einfachsten radialen Schichtung von Eisen-Kupfer-Eisen (Fig. 21a und b) der Gesamtleistungsfaktor durch das Kupfer wieder etwas verschlechtert; denn das Kupfer bedeutet als magnetischer Nichtleiter eine Vergrösserung des Luftspaltes. Trotzdem ergaben die praktisch ausgeführten geschichteten Rotoren eine beträchtliche Erhöhung des Gesamtleistungsfaktors gegenüber dem massiven homogenen Eisenrotor. Eine weitere Steigerung des Leistungsfaktors ist zudem durch Verwendung magnetisch leitender Materialien an Stelle von Kupfer, z. B. von Legierungen aus Kupfer und Eisen, möglich.

2. *Die Bestimmung der Sättigungsverteilung, der Wirbelströmung und des Drehmomentes in nutenlosen, homogenen und geschichteten Rotoren.*

Die genaue Sättigungsverteilung, auf deren Kenntnis die weitere Berechnung nutenloser Rotoren fusst, wird am einfachsten experimentell mit Prüfschleifen (auf der Oberfläche und im Innern des Rotors) bestimmt.

Fig. 22 zeigt die experimentell ermittelte Sättigungsverteilung in einer durch die Mitte der Welle gelegten Ebene in einem massiven homogenen Flusseisenrotor. In der B-Richtung sind die zeitlichen Maximalwerte der räumlichen Sättigungsverteilung aufgetragen, und zwar in *axialer* Richtung an der *Oberfläche* des Rotors über der *x-Axe* und an der *Stirnseite des Rotors* über der *y-Axe.* Die Figur zeigt, dass der Luftspalt eine ausgleichende Wirkung auf die Sättigungsverteilung an der Eisenoberfläche im Luftspalt ausübt. In der Figur dargestellt ist nur die Verteilung der Radialkomponente der Sättigung der Grundwelle; die (räumlich!) mittlere Luftspaltsättigung betrug bei einer Netzfrequenz

von 50/s etwa 5000 Gauss im Stillstand des Rotors. An der Rotoroberfläche im Luftspalt ändert sich die Verteilung der Sättigung dann von etwa 2500 bis 10 000 Gauss; im Innern des Rotors kommt der Skineffekt als Folge der Wirbelströmung voll zum Ausdruck, die Sättigung ändert dort von 0 bis etwa 20 000 Gauss. Die maximale Sättigung von 20 000

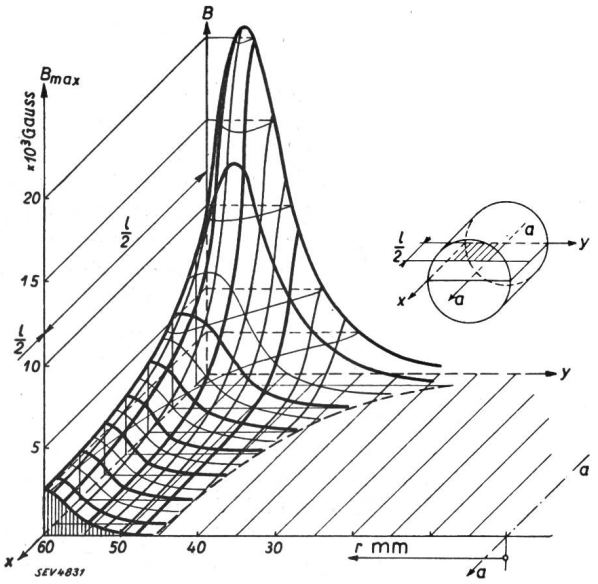

Fig. 22.

Darstellung der experimentell aufgenommenen Sättigungsverteilung in einer Ebene durch die Wellenmitte des nutenlosen Rotors.

4poliger Drehstromasynchronmotor mit nutenlosem, massivem Stahlrotor im Stillstand (Rotorfrequenz $f_2 = 50/s$). Aufnahme der Sättigung mit 36 Prüfschleifen im Innern des Rotors.
Rotorradius: $r = 60$ mm; Rotoreisenlänge: $l = 87$ mm; Luftspalt: $\delta = 0{,}3$ mm. Rotor aus weichem Stahl.
x Axialrichtung des Rotors (x-Axe liegt auf Rotormantelfläche).
y Radialrichtung des Rotors (y-Axe liegt auf der Rotorstirnfläche.
B Zeitlicher Maximalwert der Radialkomponente der Grundfeldsättigung in der x—y-Ebene (aufgetragen in der B-Axe).
a—a Wellenmitte des Rotors.

Gauss tritt, wie die Figur zeigt, nicht in der Nähe des Luftspaltes, sondern an den Stirnflächen des Rotors auf. Die «Eindringtiefe» des Flusses, radial gerechnet, beträgt an der Stirnseite etwa 30 mm, im Innern nur etwa 10 mm.

Die *räumliche* Verteilung der Sättigung (Amplitudenwerte der Grundwelle) in *axialer* Richtung bei einem homogenen und bei einem geschichteten nutenlosen Rotor im Anlauf (bei der Rotorfrequenz $f_2 = 50/s$) und im Lauf ($f_2 = 5/s$ entsprechend 10 % Schlupf) zeigen die Kurven Fig. 23.

Der *zeitliche* Verlauf der Sättigung auf der Oberfläche eines homogenen Stahlrotors bei 4 axial verschiedenen Stellen geht aus den Oszillogrammen Fig. 24 hervor. In der Nähe der Stirnseiten ist der Feldverlauf sinusförmig, im Innern (axial gerechnet) wird der Feldverlauf durch die Rotorwirbelströme verzerrt.

Für die genaue *Berechnung des Drehmomentes* massiver Rotoren muss nicht nur die Sättigungsverteilung, sondern auch die *Grösse* und die *Verteilung* der *Wirbelströme* bekannt sein. Da die Dichte und die Richtung der Wirbelströmung aber zeitlich und räumlich verschieden ist und zudem von der Frequenz, also von der Rotordrehzahl, abhängt, so ist die genaue Vorausberechnung der ohmschen und induktiven Widerstände der Wirbelstrombahnen

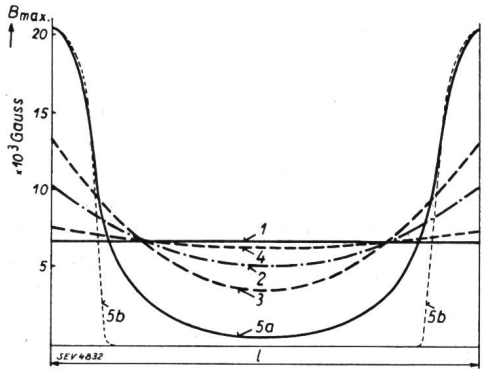

Fig. 23.

Experimentelle Aufnahme der räumlichen Sättigungverteilung in axialer Richtung

(B = zeitliche Maximalwerte der Radialkomponente der Grundfeldsättigung) beim nutenlosen, massiven Rotor, unter dem Einfluss des Luftspaltes. Aufnahme mit Prüfschleifen auf der Oberfläche und im Innern des Rotors. 4poliger Drehstromasynchronmotor, $f_1 = 50/s$, Rotorradius: $r = 60$ mm, Rotoreisenlänge: $l = 87$ mm. Rotor aus weichem Stahl. Luftspalt $\delta = 0{,}3$ mm.

Sättigungsverteilung in axialer Richtung an der Rotoroberfläche *im Luftspalt:*

1 beim normalen, genuteten Rotor mit lamelliertem Eisenkern,
2 beim nutenlosen, homogenen Stahlrotor im Stillstand,
3 beim nutenlosen, radial geschichteten Rotor im Stillstand,
4 beim Rotor nach 3 im Lauf (10 % Schlupf).

Sättigungsverteilung in axialer Richtung *im Innern* des Rotors (6 mm unter der Manteloberfläche des Rotors).

5a beim Rotor nach 2 im Stillstand. Gemessene Werte mit Einfluss des Luftspaltes.
5b Berechnete Werte *ohne* Einfluss des Luftspaltes (gleiches B_{max} angenommen).

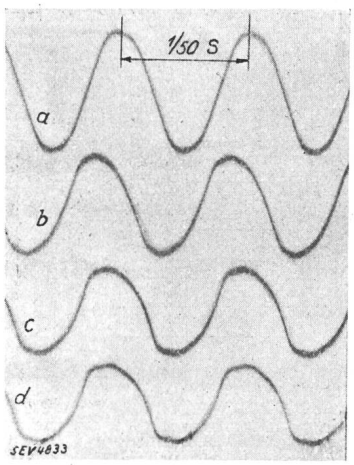

Fig. 24.

Zeitlicher Verlauf der Sättigung auf der Manteloberfläche eines nutenlosen massiven Rotors aus weichem Stahl.

4poliger Drehstromasynchronmotor im Stillstand ($f_1 = f_2 = 50/s$). Aufnahme des Sättigungsverlaufes mit 4 Prüfschleifen auf der Mantelfläche des Rotors, die an verschiedenen Stellen auf der halben Rotoreisenlänge gleichmässig verteilt (in axialer Richtung gemessen), angeordnet sind (Schleife a nächst der Stirnseite, Schleife d in der Mitte zwischen den beiden Stirnseiten, auf der Manteloberfläche).

und damit die Vorausberechnung des Drehmomentes sehr schwierig.

Bei einem einfachen Fall, einem massiven Eisenzylinder, der in *axialer* Richtung vom Fluss durch-

setzt wird, hat Rosenberg [45]) unter vereinfachenden Annahmen die Eindringtiefe des Flusses und die Wirbelstromverluste berechnet. Rosenbergs Formeln geben für jenen Fall erstaunlich genaue Resultate; leider aber sind diese Formeln bei *geschichteten* Rotoren kaum anwendbar und gestatten auch nicht die Berechnung des Leistungsfaktors der Wirbelstromtransformation.

Dagegen gelingt es, zum Teil empirisch, zum Teil mit Hilfe von drei Spiraldiagrammen [46]) in massiven Körpern den Verlauf der Sättigung, der Wirbelstromdichte, der Leistungsfaktoren und der Verluste zu bestimmen, wobei stetige oder sprunghafte Aenderungen der Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit berücksichtigt werden können [47]). Unter vereinfachenden Annahmen kann so beim massiven Rotor der Einfluss der *Schichtungen* auf den Leistungsfaktor und das Drehmoment verfolgt werden. Auch der Einfluss des Luftspaltes auf die Sättigungsverteilung kann annähernd erfasst werden. Man kann weiter zeigen, dass die Form und die Grösse des Drehmoment-Drehzahl-Verlaufes und der Verlauf der Garantiewerte durch die Dimensionierung und die Formgebung der verschiedenen Schichten des Rotors sowie durch die Wahl geeigneter Materialien für die Schichten, beeinflusst werden kann. Dabei spielen die elektrische Leitfähigkeit und der Verlauf der Magnetisierungskurve des Materials eine grosse Rolle.

3. *Praktische Ausführungen von nutenlosen geschichteten Rotoren.*

a) Der radial (konzentrisch) geschichtete Rotor (Fig. 21a und b). Alle im folgenden angegebenen Betriebskurven nutenloser Rotoren beziehen sich

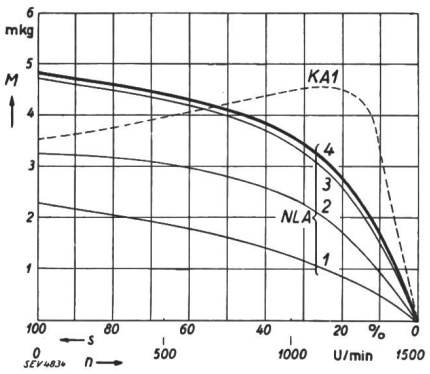

Fig. 25.

Entwicklung des nutenlosen, *radial* geschichteten Rotors nach Fig. 21 a.

Vergleich mit einem normalen Käfiganker von gleichem $D^2\ l_i$ (1255 cm³) bei Verwendung des gleichen Stators bei gleichen Betriebsbedingungen. 4poliger Drehstrommotor 3,5 PS int. mitt., 50 Per./s., $U_1 = 550$ V, $B_{\delta_0} = 7700$ Gauss.

Verlauf des Drehmomentes M mit der Drehzahl n.

NLA 1 = massiver, homogener Rotor aus weichem Stahl.
NLA 2 = *NLA 1* mit stirnseitigem Kupferbelag.
NLA 3 = *NLA 2* mit Kupfermantel.
NLA 4 = *NLA 3* mit gespritzter «Schutzschicht» aus Eisen.
KA 1 = normaler, genuteter Käfiganker.

[45]) ETZ 1923, S. 513.

[46]) Ausgehend von dem Wirbelstrom-Vektordiagramm, das von Krämer entwickelt wurde. S. ETZ 1931, S. 75, und Arch. Elektrotechn. 1933, S. 405.

[47]) Genauere Angaben werden in einer Spezialarbeit über dieses Gebiet veröffentlicht werden.

auf die einfachste Ausführung nutenloser Rotoren, auf die *radiale* Schichtung aus Eisen-Kupfer-Eisen.

Den Aufbau eines radial geschichteten Rotors zeigen Fig. 21a und b: Auf die Welle wird ein *massiver* Kern aus Flusseisen aufgekeilt (Pos. 1). Stirnseitig erhält dieser Kern eine Kupferschicht (Pos. 2). Praktisch wurde diese Schicht galvanisch oder durch Spritzen oder Giessen hergestellt. Bei den neueren Ausführungen wurden Kupferringe an

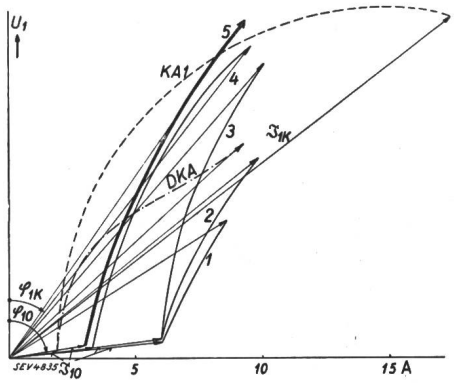

Fig. 26.

Entwicklung des nutenlosen, radial geschichteten Rotors nach Fig. 21 a und b.

Vergleich mit einem normalen Käfiganker und einem Doppelkäfiganker von gleichem $D^2\ l_i$ (1255 cm³) bei Verwendung des gleichen Stators bei gleichen Betriebsbedingungen. 4poliger Drehstrommotor 3,5 PS int. mitt., 50 Per./s., $U_1 = 550$ V, $B_{\delta_0} = 7700$ Gauss.

Stromvektordiagramme.

NLA 1 = massiver, homogener Rotor aus weichem Stahl.
NLA 2 = *1* mit stirnseitigem Kupferbelag nach Fig. 21a.
NLA 3 = *2* mit Kupfermantel nach Fig. 21a.
NLA 4 = *3* mit gespritzter Schutzschicht aus Eisen.
} Entwicklung des Rotors nach Fig. 25.
NLA 5 = nutenloser, radial geschichteter Rotor nach Fig. 21b.
KA 1 = normaler, genuteter Käfiganker.

geeigneter Stelle hart eingelötet (Fig. 21b). Diese Ringe dienen ausser elektrischen Zwecken auch der Wärmeabfuhr. Auf den Eisenkern wurde ein dünnes Kupferrohr (Pos. 3 und 2′) warm aufgezogen. Dann wurde auf den Rotor nach Fig. 21a nach dem Schoopschen Verfahren eine dünne Eisenschicht aufgespritzt (Pos. 4). Durch das Spritzen erhält das Eisen einigermassen die gewünschten elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Diese äusserste Schicht kann nach Fig. 21b ersetzt werden durch einen dünnwandigen Nickelstahlzylinder. Ein geeignetes Material steht heute auf dem Markt zur Verfügung. Die Rotoren enthalten kein Weichlot; es zeigte sich, dass sie thermisch, selbst unter schweren Anlaufbedingungen, unverwüstlich sind.

Fig. 25 und 26 zeigen den Einfluss der verschiedenen Schichten auf den Verlauf des Drehmomentes, des Stromes und des Leistungsfaktors eines vierpoligen Drehstrom-Asynchronmotors von 3,5 PS für intermittierenden Betrieb.

b) Der axial geschichtete Rotor (Fig. 21c). Die im Abschnitt III, 1 aufgestellten Forderungen zur Verbesserung der Laufeigenschaften — grössere Eindringtiefe des Flusses und bessere elektrische Leitfähigkeit des massiven Rotors in axialer Richtung — werden durch eine axiale Schichtung aus

(nutenlosen) Kupfer- und Eisenblechringen weitgehend erfüllt (Pos. 3 der Fig. 21c). Bei den praktischen Ausführungen wurden die Bleche verzinnt und in der Löthitze zusammengepresst. Drei auf diese Weise hergestellte Rotoren eines vierpoligen 3-PS-Motors und eines sechspoligen 5-PS-Motors ergaben wie die radial geschichteten Rotoren geräuschlosen Betrieb. Auch die elektrischen Daten konnten gegenüber dem massiven Eisenrotor sehr stark verbessert werden. Diese weich gelöteten Rotoren sind jedoch den hohen thermischen Beanspruchungen des praktischen Betriebes nicht gewachsen.

c) Der Hochnutrotor (tangential geschichteter Rotor) (Fig. 21d und e). Bei einem Rotor mit der Nutenzahl unendlich erhält man die gleiche flächenhafte Verteilung des Rotorstromes wie bei einem nutenlosen Rotor. Die von der Nutenzahl unendlich erzeugten Pendelmomente, Rüttelkräfte und Töne [s. Teil B, Gl. (12), (13a), (14a), (17), (18)] haben die Frequenz unendlich. Der Motor muss hinsichtlich dieser Töne ruhig sein; denn bekanntlich empfindet das menschliche Ohr nur Töne der Frequenzen unterhalb etwa 10 000/s. Die Töne höherer Frequenzen, die in das Gebiet des sog. Ultraschalles gehören, werden nicht mehr wahrgenommen. Daher muss ein Rotor, der diese Tatsache ausnützt, nicht die Nutenzahl unendlich haben, sondern es genügt eine so hohe Nutenzahl, dass Pendelmoment-, Rüttelkraft- und Schallfrequenzen höher als 10 000/s liegen. Bei Motoren, die mit einer Netzfrequenz von 50/s betrieben werden, ist gleichungsgemäss die Anwendung einer Rotornutenzahl von mindestens 100 Nuten/Pol notwendig.

Die Verwendung von Rotoren derart hoher Nutenzahlen hat prinzipiell zunächst den Nachteil, dass (wie bei den nutenlosen Rotoren) die Statoroberfelder der Wicklung und der Nutung im Rotor zusätzliche Verluste erzeugen. Bei beiden Rotorarten gelingt aber eine weitgehende Reduktion der Wirkung dieser Oberfelder, bei den nutenlosen Rotoren hauptsächlich durch die Anordnung einer Schutzschicht, ferner teilweise durch eine schrittverkürzte Statorwicklung; bei den Hochnutrotoren wirkt ausser diesen Massnahmen eine geeignete Nutenschrägung des Stators oder des Rotors günstig.

Praktische Ausführungen von Hochnutrotoren sind in Fig. 21d und e dargestellt. Die drehmomentbildende Schicht des Hochnutrotors besteht aus einem kollektorähnlich aufgebauten Ringkörper (Pos. 3), der von einem massiven Eisenkern (Pos. 1) getragen wird. Die Segmente des Kollektorringes bestehen abwechselnd aus dünnen (im allgemeinen nicht konischen) Kupfer- (oder Aluminium-) und Eisenblechstreifen. Die Streifen erhalten eine Zwischenlage aus Mikanit. Der ganze Ring wird entweder gepresst wie bei der üblichen Kollektorarbeit (Fig. d) oder er wird stirnseitig hart verlötet oder verschweisst, so dass er freitragend wird (Fig. e).

Messungen an Hochnutrotoren haben gezeigt, dass sich die elektrischen Daten normaler genuteter Rotoren in allen Punkten fast restlos erreichen lassen. Dagegen sind von vier untersuchten Rotoren drei in akutischer Hinsicht noch nicht einwandfrei. Es scheint, dass hier besonders die *Stator*oberfelder der Wicklung und der Nutung stören.

4. Vergleich der elektrischen Daten des radial geschichteten Nutenlosen Ankers (NLA) mit dem normalen Käfiganker (KA) und Doppelkäfiganker (DKA).

a) Drehstrommotoren. Die Kurven Fig. 27 bis 32 zeigen die elektrischen Daten des homogenen Graugussrotors (Kurve NLA 1′), der zwei radial ge-

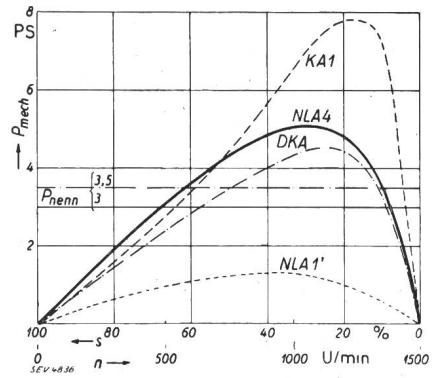

Fig. 27.
4 poliger Drehstromasynchronmotor
3/3,5 PS int. mitt., 50 Per./s, $U_1 = 550$ V Δ, $B_{\delta_0} = 7700$ Gauss.
Verlauf der abgegebenen Leistung $P_{mech.}$ mit der Drehzahl n bei verschiedenen Rotoren.
NLA 1′ = Nutenloser, massiver Graugussrotor
NLA 4 = Nutenloser Anker nach Fig. 21a
KA 1 = Käfiganker
DKA = Doppelkäfiganker.
$D_r = 120$ mm ⌀, $l_i = 87$ mm

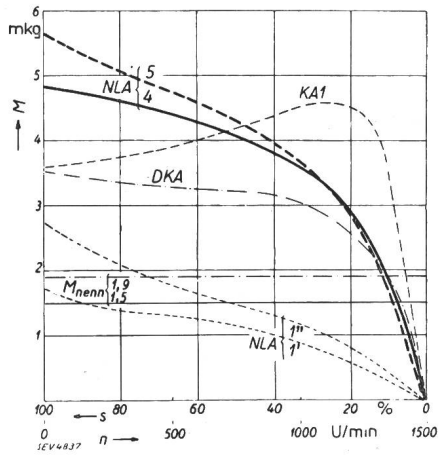

Fig. 28.
Motor nach Fig. 27.
Verlauf von Drehmoment M mit der Drehzahl n bei verschiedenen Rotoren.
NLA 1′ = Nutenloser, massiver Graugussrotor
NLA 1″ = Nutenloser, massiver Flusseisenrotor
NLA 4 = Nutenloser Anker nach Fig. 21a
NLA 5 = Nutenloser Anker nach Fig. 21b
KA 1 = Käfiganker
DKA = Doppelkäfiganker.

schichteten, nutenlosen Rotoren NLA 4 und NLA 5 (nach Fig. 21a und b), ferner eines DKA für kleinen Anlaufstrom und endlich eines normalen Industrie-KA. Alle Rotoren haben gleiches $D^2 \cdot l_i$ ($12^2 \cdot 8{,}7 = 1255$ cm³) und wurden bei gleichen Be-

triebsbedingungen in dem gleichen Stator, einem normalen, vierpoligen Industrie-Drehstromstator mit 36 Nuten und symmetrischer, unverkürzter Wicklung ausgemessen. Die Nennleistung für Dauerbetrieb beträgt 3 PS bei 50 Per./s beim KA, die Luftspaltsättigung im Leerlauf $B_{\delta_0} \cong 7000$ Gauss bei $U_1 \overline{\underset{\Delta}{=}} 500$ Volt. Die Messungen wurden stets bei einer um 10 % höheren Betriebsspannung, bei 550

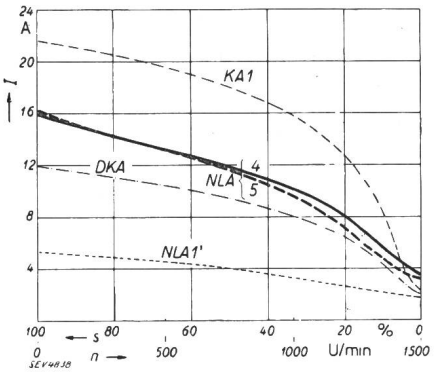

Fig. 29.
Motor nach Fig. 27.
Verlauf des Statorstromes I mit der Drehzahl n bei verschiedenen Rotoren.
NLA 1' = Nutenloser, massiver Graugussrotor
NLA 4 = Nutenloser Anker nach Fig. 21a
NLA 5 = Nutenloser Anker nach Fig. 21b
KA 1 = Käfiganker
DKA = Doppelkäfiganker.

Volt, entsprechend einer Sättigung von 7700 Gauss, durchgeführt. Bei dieser Sättigung wurde die Nennleistung auf 3,5, bzw. 4 PS für intermittierenden Betrieb erhöht.

Die Kurven zeigen, dass der massive Graugussrotor beim Lauf in jeder Beziehung unbrauchbar ist. Sie zeigen ferner, dass die geschichteten NLA dagegen sehr gute Anlaufeigenschaften und mindestens für intermittierenden Betrieb genügend gute Laufeigenschaften haben. In der Anlaufgüte sind sie dem normalen KA wesentlich überlegen; sie zeigen einen dem DKA ähnlichen Drehmoment-Drehzahl-Verlauf (Fig. 28). Wirkungsgrad und

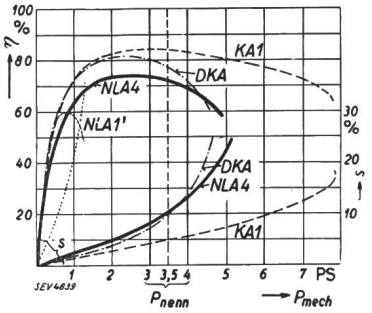

Fig. 30.
Motor nach Fig. 27.
Verlauf des Wirkungsgrades η und des Schlupfes s mit der mechanisch abgegebenen Leistung P_{mech} bei verschiedenen Rotoren.
NLA 1' = Nutenloser, massiver Graugussrotor
NLA 4 = Nutenloser Anker nach Fig. 21a
KA 1 = Käfiganker
DKA = Doppelkäfiganker.

Leistungsfaktor im Lauf sind kleiner als bei den normalen genuteten Rotoren, dagegen ganz wesentlich höher als bei den massiven, homogenen Rotoren (Fig. 30 und 31). Der Verlauf von Wirkungsgrad, Leistungsfaktor, Schlupf und der Anlaufgütezahlen des NLA 4 bei der Nennleistung 3 PS ist in Funktion der Klemmenspannung in Fig. 32 dargestellt. Bei einer Spannung von 550 Volt ($B_{\delta_0} =$

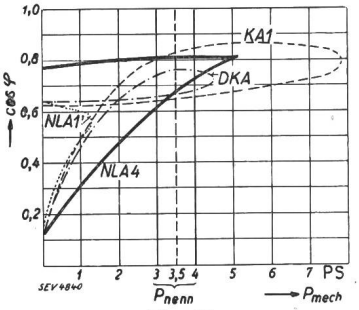

Fig. 31.
Motor nach Fig. 27.
Verlauf des Leistungsfaktors cos φ in Funktion der mechanisch abgegebenen Leistung $P_{mech.}$ bei verschiedenen Rotoren.
NLA 1' = Nutenloser, massiver Graugussrotor
NLA 4 = Nutenloser Anker nach Fig. 21a
KA 1 = Käfiganker
DKA = Doppelkäfiganker.

7700 Gauss) und bei den Nennleistungen 3, bzw. 3,5 PS beträgt das Verhältnis von Anzugsmoment zu Nennmoment: $M_k/M_n = 3{,}1$, bzw. 2,6 bei einem Verhältnis von Anlaufstrom zu Nennstrom: $I_k/I_n = 3{,}2$, bzw. 2,95.

Beim NLA 5, einer Ausführung nach Fig. 21b, ist bei $U_1 = 570$ Volt ($B_{\delta_0} = 8000$ Gauss) und bei einer abgegebenen Leistung von 2,9, bzw. 3,7 PS das Verhältnis von Anzugsmoment zu Nennmoment: $M_k/M_n = 3{,}8$, bzw. 2,85 bei einem Verhältnis von Anlaufstrom zu Nennstrom: $I_k/I_n = 3{,}3$, bzw. 2,78.

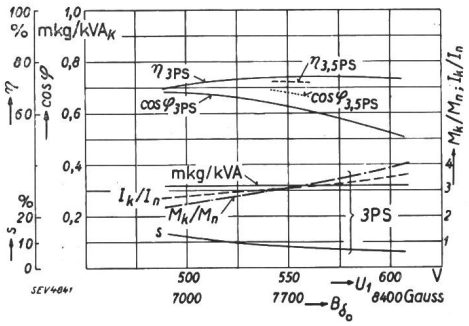

Fig. 32.
Motor nach Fig. 27, mit nutenlosem Anker nach Fig. 21a (NLA 4),
Verlauf des Wirkungsgrades η, des Schlupfes s, des Leistungsfaktors cos φ und der Anlaufgütezahlen: mkg/kVA$_k$, M_k/M_n I_k/I_n in Funktion der Klemmenspannung U_1 bei 3 resp. 3,5 PS abgegebener Leistung.

Diese Werte beziehen sich auf kalten bis mittelwarmen Zustand des Motors. Bei sehr warmem Motor (Rotortemperatur etwa 120° C) ist bei 3,6 PS und 550 Volt das Verhältnis von $M_k/M_n = 2{,}5$ und $I_k/I_n = 2{,}48$.

Für eine richtigere Angabe der Anlaufgüte sollten aber nicht diese Zahlen, sondern das Verhältnis von Anzugsmoment zu aufgenommener Scheinlei-

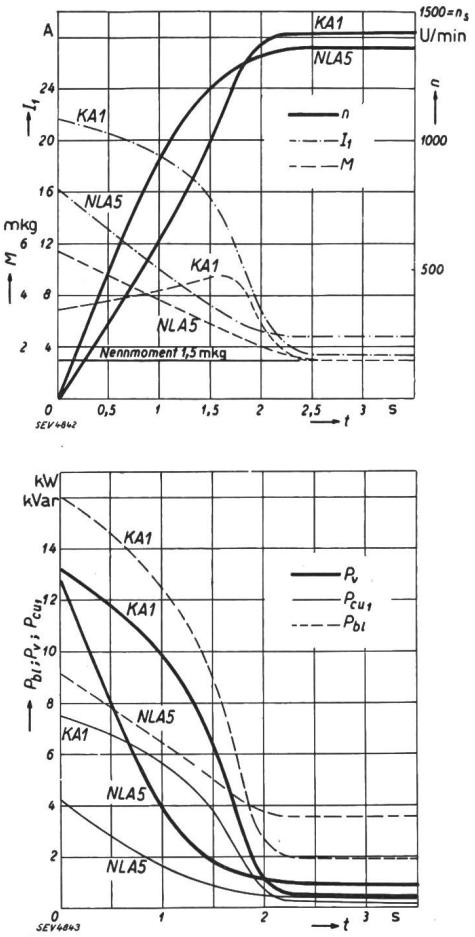

Fig. 33.
Antrieb eines Liftes mit einem 4 poligen 3 PS Drehstrom-Asynchronmotor mit nutenlosem Anker (N LA 5) oder mit normalem Käfiganker (K A 1).
$f = 50/s$, $U_1 \simeq 550$ V Δ, $B_{\delta_0} \simeq 7700$ Gauss, Anlaufzeit des Liftes: $t_a \simeq 2$ s angenommen.
Verlauf der Motordrehzahl n, des Statorstromes I_1, des Drehmomentes M, der totalen Motorverlustleistung P_v, des Statorkupferverlustes P_{Cu1}, der totalen Motorblindleistung $P_{bl.}$, in Funktion der Anlauf- und der Laufzeit t des Liftes.

stung im Kurzschluss (mkg/kVA) massgebend sein [48]). Diese Güteziffer beträgt beim KA1 = 0,17, beim DKA = 0,305, beim NLA1′ (Grauguss) =

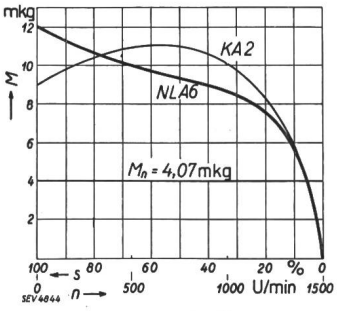

Fig. 34.
4 poliger Drehstrom-Asynchronmotor, 8 PS, mit nutenlosem, radial geschichtetem Anker (N LA 6) nach Fig. 21 a und mit Käfiganker (KA 2) von gleichem Nennschlupf
50 Per./s, $U_1 \simeq 330$ V Y
Verlauf des Drehmomentes M mit der Drehzahl n.
$D_r = 199{,}2$ mm ⌀,
$l_i = 85$ mm.

0,33, beim NLA1″ (weicher Stahl) = 0,32, beim NLA4 = 0,315, beim NLA5 = 0,35 (kalt) und 0,36 (warm). (Alle Rotoren im gleichen vierpoligen Stator gemessen.) Ein Vergleich mit andern genuteten Rotoren der Industrie zeigt, dass der nutenlose, geschichtete Rotor NLA5 hinsichtlich der Anlaufgüte selbst von Doppelnutrotoren für besonders guten Anlauf nicht übertroffen wird.

Fig. 34 bis 36 zeigen die elektrischen Daten eines vierpoligen 8 PS-Drehstrom-Asynchronmotors. Es wurden zwei Rotoren derselben Abmessungen ($D^2 \cdot l_i = 19{,}92^2 \cdot 8{,}5 = 3360$ cm³) untersucht:

1. ein radial aus Eisen-Kupfer-Eisen geschichteter NLA nach Fig. 21a (NLA 6). Luftspalt: $\delta = 0{,}4$ mm.
2. Ein KA mit geschlossenen, um eine Statornutteilung geschrägten Rotornuten (KA 2). Stegdicke 0,5 mm, Luftspalt: $\delta = 0{,}4$ mm, Rotornutenzahl: $Z_2 = 36$.

Beide Rotoren wurden bei gleichen Betriebsbedingungen in einem Stator mit 48 Nuten und einer Wicklung mit Schrittverkürzung ($y = 10/12$) gemessen.

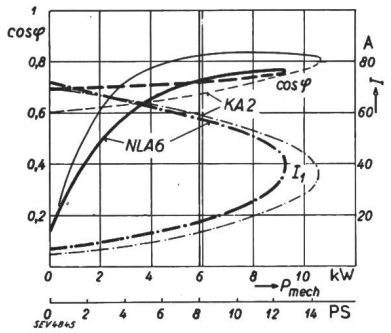

Fig. 35.
Motor nach Fig. 34.
Verlauf v. Leistungsfaktor cos φ und Statorstrom I_1, mit der abgegebenen Leistung $P_{mech.}$

Bei der Nennleistung 8 PS haben beide Rotoren den gleichen Schlupf: $s = 6{,}5$ %. Der Vergleich der Wirkungsgrade (bei Vollast: $\eta = 83{,}5$ % beim KA, $\eta = 79{,}8$ % beim NLA) gibt ein Bild, wie weit ein NLA dieser Leistung und Polzahl bei gün-

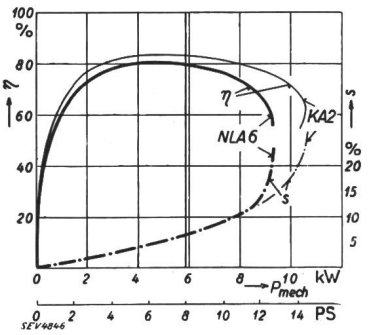

Fig. 36.
Motor nach Fig. 34.
Verlauf v. Wirkungsgrad η und Schlupf s mit der abgegebenen Leistung $P_{mech.}$

stiger Dimensionierung, aber ohne Verwendung von Speziallegierungen, zur Zeit hinsichtlich Verlust und Erwärmung bei Lauf ungünstiger ist als ein entsprechender KA mit gleichem Vollastschlupf. Die *Absolutwerte* der Wirkungsgrade *beider* Rotoren lassen sich durch eine Dimensionierung für kleineren Schlupf natürlich noch um einige Prozent steigern.

Nutenlose, radial geschichtete Rotoren nach Fig. 21a und b wurden auch in 2-, 6- und 12poligen Drehstrom-Statoren ausgemessen. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor nehmen dabei wie bei der Ver-

[48]) Siehe Dünner, Bull. SEV 1934, S. 531.

Drehstromasynchronmotoren

mit nutenlosen (radial geschichteten) und genuteten Rotoren. $f_1 = 50/s$.

Messwerte aus Bremsung mit Prony-Zaun. Index n bedeutet Nennpunkt (Vollast).

Tabelle III.

Typ	$P_{mech.}$ PS	$2p$ Polzahl	U_1 Volt	B_{δ_0} Gauss	M_n mkg	s_n %	I_{1n} A	η_n %	η_{max} %	$\cos\varphi_n$	$\cos\varphi_K$	$\frac{P_{max}}{P_n}$	$\frac{M_K}{M_n}$	$\frac{I_K}{I_n}$	mkg/kVA$_K$	D_r/l_i mm	Rotor-Temp. °C
NLA 4	3 int.	4	550 △	7700	1,55	8,5	5,05	74	74	0,625	0,785	1,7	3,1	3,2	0,315	120/87	30÷70
	3 int.	4	500 △	7000	1,6	12	5,2	71,5	74	0,68	0,77	1,43	2,53	2,8	0,32		
	4 int.	4	550 △	7700	2,21	13,5	6,1	69	74	0,735	0,785	1,28	2,16	2,52	0,315		
NLA 5	3,7 int.	4	570 △	8000	2	12	5,78	69	72	0,67	0,81	1,36	2,85	2,78	0,36	120/87	~ 40
	3,6 int.	4	570 △	8000	2	14,5	5,85	65	70	0,71	0,81	1,39	2,5	2,48	0,355		~120
DKA	3 d.	4	550 △	7700	1,54	7	3,85	80,5	81,5	0,74	0,64	1,5	2,3	3,15	0,305	120/87	30÷70
	4 int.	4	550 △	7700	2,22	14	5,6	73	81,5	0,76	0,64	1,13	1,56	2,16	0,305		
KA 1	3 d.	4	550 △	7700	1,46	4,2	3,4	84	84	0,8	0,62	2,6	2,45	6,4	0,17	120/87	
	4 int.	4	550 △	7700	2,04	6	4,45	83	84	0,84	0,62	1,95	1,75	4,9	0,17		
NLA 6	8	4	328 ⅄	6600	4,07	6,5	17,6	79,8	80,5	0,723	0,69	1,58	2,98	4,08	0,295	199,2/85	~ 50
	15 int.	4	412 ⅄	8300	7,78	7,6	27,9	75,5	78	0,734	0,68	1,36	2,31	3,26	0,28		
KA 2	8	4	338 ⅄	6800	4,07	6,5	14,5	83,7	84	0,827	0,61	1,81	2,39	4,7	0,225	199,2/85	~ 50
	15 int.	4	415 ⅄	8300	7,9	9,1	23,1	81	83	0,815	0,6	1,43	1,68	3,7	0,215		
NLA 6	5,1 d.	6	495 ⅄	7200	4	8,7	8,9	73	76	0,69	0,76	1,55	2,8	3,3	0,445	199,2/85	~ 50
	6,25 int.	6	495 ⅄	7200	5	12	10,7	70,5	76	0,715	0,76	1,26	2,24	2,66	0,445		
NLA 7	4,4 d.	2	550 △	6700	1,11	5,6	5,95	75	76	0,76	0,78	1,86	3,4	4,44	0,15	110/85	~ 50
	5,7 int.	2	550 △	6700	1,5	9	7,7	72,5	76	0,79	0,78	1,43	2,5	3,42	0,15		

wendung genuteter Rotoren mit kleinerer Polzahl zu, mit grösserer Polzahl ab (s. Tab. III).

b) Einphasen-Wechselstrommotoren. Versuche an Einphasenasynchronmotoren mit nutenlosen, geschichteten Rotoren zeigen, dass das durch die Nutung verursachte magnetische Geräusch und damit der grösste und unangenehmste Anteil des Luftschalles praktisch vollständig vermieden werden kann. Dagegen bleibt im allgemeinen, selbst bei den nutenlosen Rotoren, noch ein mehr oder weniger stark brummendes Geräusch bestehen. Es ist bekannt, dass *einphasige* Induktionsmotoren infolge des pulsierenden Drehmomentes *prinzipiell* keinen absolut ruhigen Betrieb geben können.

Für einen wirklich geräuschlosen Lauf muss ein möglichst reines Drehfeld angestrebt werden. Dieser Forderung genügen bekanntlich Einphasen-Kondensator-Motoren. Bei richtiger Dimensionierung des Kondensators und der Hilfsphase ist, wenigstens für ein begrenztes Drehzahlgebiet, ein gut «ausgeglichener Betriebszustand» erreichbar. Für ausgeglichenen Lauf bei Vollast ist bei Verwendung normaler Käfiganker allerdings das Anzugsmoment für die meisten praktischen Anwendungen zu klein. Für kräftigen Anzug muss daher die Kapazität in der Hilfsphase erhöht werden.

Versuche an einem einphasigen C-Motor mit nutenlosem Rotor haben nun gezeigt, dass ein fast ausgeglichener Betriebszustand bei Vollast *und* ein hohes Anzugsmoment erreicht werden können, und zwar *ohne* Umschaltung des Kondensators oder der Wicklung für den Anlauf. In Fig. 37 und 38 und in Tabelle IV werden die elektrischen Daten eines solchen einphasigen Motors, eines Oelfeuerungsmotors von 140 Watt (ca. $^1/_5$ PS) mit nutenlosem, geschichtetem Rotor (NLA 8) und mit normalem Käfiganker (KA 3) verglichen. Der Kondensator

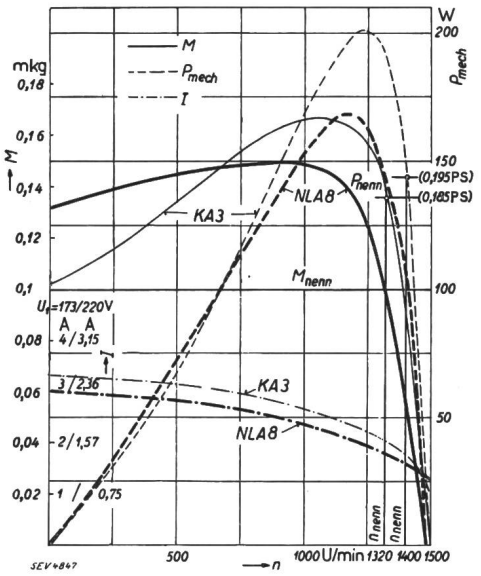

Fig. 37.

4 poliger Einphasen-Asynchronmotor mit dauernd eingeschalteter Hilfsphase und Kondensator für Oelfeuerungsantrieb.

$P_{mech.} \simeq 140$ W (ca. $^1/_5$ PS), $f_1 = 50/s$,
$D_r = 74{,}5$ mm, $l_i = 75$ mm.

Vergleich eines nutenlosen, radial geschichteten Rotors (*NLA 8*) mit einem normalen Industrie-Käfiganker (*KA3*) für Oelfeuerungsantrieb, bei gleichen Betriebsbedingungen.

Verlauf des Drehmomentes M, der mechanisch abgegebenen Leistung $P_{mech.}$ und des resultierenden Motorstromes I_1 in Funktion der Drehzahl n bei dauernd eingeschaltetem Kondensator. ($C = 10\ \mu$F bei $U_1 = 173$ V, resp. 6,1 μF bei $U_1 = 220$ V und bei abgeänderter Statorwicklung.

Einphasenasynchronmotoren

mit dauernd (für Anlauf *und* Lauf) in die Hilfsphase eingeschaltetem Kondensator. Vergleich eines radial aus Eisen-Kupfer-Eisen geschichteten, nutenlosen Rotors (NLA 8) mit einem normalen, genuteten Käfiganker (KA 3). Messwerte aus direkter Bremsung in betriebswarmem Zustande des Motors ($\sim 65°$ C). $f_1 = 50/s$, Polzahl: $2p = 4$. Luftspalt: $\delta = 0{,}25$ mm. Index n bedeutet Nennpunkt (Vollast).

Tabelle IV.

Type	M_n mkg	$P_{mech.}$ Watt	s_n %	B_δ Gauss	U_1 Volt	I_{1n} res. A	η_n %	η_{max} (ca. 5/4 Last) %	$\cos\varphi_n$	$\cos\varphi_K$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_K}{M_n}$	$\frac{I_K}{I_n}$	mkg/kVA$_K$	P_v Watt	C μF	D_r/l_1 mm
KA 3	0,1	144 d.	6,5	5670	173	1,8	50	56	0,94	0,88	1,66	1,02	1,84	0,18	146	10	74,5/75
NLA 8	0,1	136 d.	12	4750	173	1,8	50	51	0,87	0,92	1,5	1,32	1,7	0,25	138	10	74,5/75
NLA 8	0,1	136 d.	12	4750	220	1,41	50	51	0,87	0,92	1,5	1,32	1,7	0,25	138	6,1	74,5/75

wird vom Anlauf auf den Lauf *nicht* umgeschaltet; seine Grösse beträgt bei 173 Volt Nennspannung (entsprechend einer Luftspaltsättigung von $B_\delta =$ 4750 Gauss bei Vollast): $C = 10$ μF und bei 220 Volt Nennspannung (*gleiche* Sättigung, *abgeänderte*

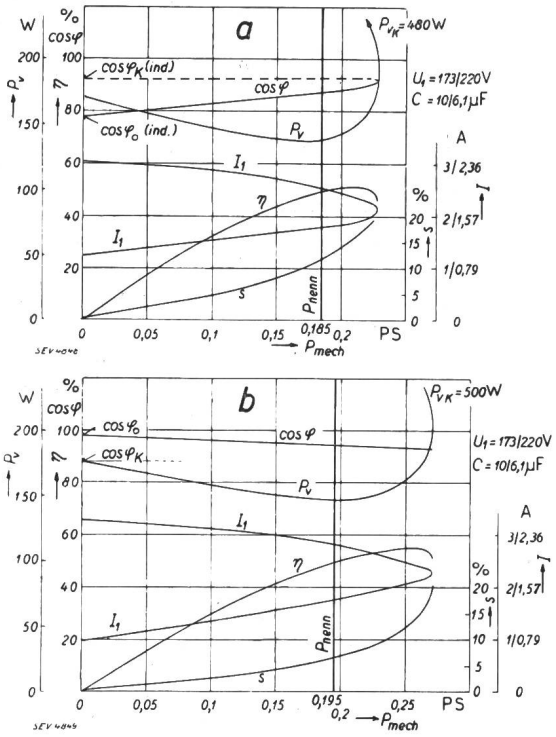

Fig. 38.

4poliger Einphasen-Asynchronmotor mit dauernd eingeschaltetem Kondensator und Hilfsphase für Oelfeuerungsantrieb, $P_{mech.} \simeq 140$ W (ca. 1/5 PS), $f_1 = 50/s$.

Vergleich eines nutenlosen, radial geschichteten Rotors (*NLA 8*) mit einem normalen Industrie-Käfiganker (*KA 3*) für Oelfeuerungsantrieb, bei gleichen Betriebsbedingungen.

Verlauf der Verlustleistung P_v, des Wirkungsgrades η, des Leistungsfaktors $\cos\varphi$, des resultierenden Motorstromes I_1 und des Schlupfes s in Funktion der abgegebenen Leistung $P_{mech.}$ bei dauernd eingeschaltetem Kondensator ($C = 10$ μ F bei $U_1 = 173$ V, bzw. $C = 6{,}1$ μF bei $U_1 = 220$ Volt und bei abgeänderter Statorwicklung).

Fig. 38a: Nutenloser Anker (*NLA 8*).
Fig. 38b: Käfiganker (*KA 3*).

Wicklung): $C = 6{,}1$ μF. Das Verhältnis von Anzugsmoment zu Nennmoment ist $\frac{M_k}{M_n} = 1{,}32$ bei einem Verhältnis von Anlaufstrom zu Nennstrom von $\frac{I_k}{I_n} = 1{,}7$. Der Anlaufstrom bei $U_1 = 220$ Volt beträgt $I_k = 2{,}4$ A. Die Erwärmung des Motors nach dreistündigem Vollast-Dauerlauf betrug ohne Anwendung eines Ventilators $\Delta\vartheta \cong 45°$ C. Der Motor ist bezüglich Luft- und Bodenschall absolut geräuschlos.

Der Aufbau eines solchen nutenlosen Rotors für einen kleinen einphasigen C-Motor ist äusserst einfach. Im Prinzip ist er aufgebaut nach Fig. 21b. Der dort angegebene Stirnring (Pos. 2) konnte jedoch weggelassen werden. Daher besteht ein solcher Rotor nur aus einem massiven Kern aus weichem Eisen, einem Kupferzylinder und aus einem Zylinder aus gespritztem Eisen oder Nickeleisen.

Der Vergleichsrotor, ein normaler Käfiganker mit schrägen, geschlossenen Nuten (Nutenzahl $Z_2 =$ 25), ist weder bei rein einphasigem, noch bei ausgeglichenem Betrieb als C-Motor in demselben Stator geräuschlos. Sein Nutungsgeräusch wurde im praktischen Betrieb als Oelfeuerungsmotor als zu lästig empfunden.

Hinsichtlich der Garantiewerte (Wirkungsgrad, Leistungsfaktor) sind beide Rotoren, der NLA und der KA, ungefähr gleichwertig (s. Tab. IV). Der Vollastwirkungsgrad beider Motoren beträgt 50 %, der Leistungsfaktor nahezu 1. Der Motor mit KA zeigt zwar einen um wenige Prozent höheren Maximalwirkungsgrad bei 5/4 Last [49]). Ein Nennbetrieb bei dieser Ueberlast (bei der sich ausgeglichener Betriebszustand ergibt) ist aber deshalb nicht zulässig, weil dann das relative Anzugsmoment für einen Oelfeuerungsantrieb zu klein würde.

Die Kurven der Fig. 37 zeigen, dass der NLA in der Anlaufgüte dem KA überlegen ist. Das Anzugsmoment des NLA lässt sich ohne Umschaltung des Kondensators noch weiter steigern bis auf etwa zweifaches Anzugsmoment. Oberhalb etwa 1,5-fachem Anzugsmoment muss allerdings eine Wirkungsgradverkleinerung bei Vollast in Kauf genommen werden. Es können auch bis vierfache Anzugsmomente bei kleinem Anlaufstrom erreicht werden, sofern eine Umschaltung von Kondensator und Wicklung zugelassen wird.

IV. Anwendungsgebiete des Asynchronmotors mit nutenlosem Rotor.

Das grösste Anwendungsgebiet für den Asynchronmotor mit nutenlosem Rotor dürften beson-

[49]) Der Maximalwirkungsgrad dieses KA beträgt bei *rein einphasigem* Betrieb 48 % bei 6,5 % Schlupf.

ders die nicht industriellen Antriebe in Privathäusern, Hotels, Krankenhäusern usw. sein. Die Anwendung dieses Motors scheint überall dort günstig, wo ein geräuschloser Betrieb bei häufigem Anlauf gefordert wird; denn er ist nicht nur hinsichtlich Anlaufgeräusch und Laufgeräusch absolut einwandfrei, sondern er kommt auch dem Wunsch nach hohem Anzugsmoment bei kleinem Anlaufstrom sehr entgegen.

1. Drehstrommotoren.

Dass der Drehstrommotor mit nutenlosem Rotor für intermittierenden Betrieb auch in elektrischer Beziehung praktisch brauchbar ist, geht aus Fig. 33 hervor. Es wird hier beispielsweise für einen *Liftantrieb* der Verlauf der elektrischen Daten eines NLA- und eines normalen KA-Motors in Funktion der Anlaufzeit untersucht. Es soll vorausgesetzt werden, dass eine bestimmte Last durch einen 3-PS-Motor in 2 bis 2½ s auf die stationäre Geschwindigkeit gebracht werden soll. Der Vergleich der in Fig. 27 bis 32 besprochenen vierpoligen Motoren mit den Rotoren NLA 5 und KA 1 ergibt, dass beide Motoren ungefähr das gleiche mittlere Drehmoment in der Anlaufperiode entwickeln und dass daher die angenommene Last von beiden Motoren in der gleichen Zeit (in etwa 2,3 s) auf die stationäre Geschwindigkeit beschleunigt wird (Kurven M und n). Unter dieser Voraussetzung ist ein Vergleich der von den Motoren in der Anlaufperiode aufgenommenen Wirk- und Blindarbeit zulässig. Es zeigt sich, dass die totale Verlustarbeit, der Statorkupferverlust und die Blindarbeit beim NLA 5 in der Anlaufperiode kleiner ist als beim KA 1 (Werte der Kurven P_v, P_{Cu1}, P_{bl} über die Anlaufperiode integriert). Im Lauf sind die Verhältnisse umgekehrt. Nimmt man bei einer stationären Liftgeschwindigkeit von 0,5 bis 0,6 m/s eine mittlere Laufzeit des Liftes von 10 bis 15 s an, so wird die totale Verlustarbeit über die gesamte Reisezeit des Liftes, einschliesslich Anlaufzeit, beim NLA 5 kleiner als beim KA 1. Entsprechend wird beim NLA der «Totalwirkungsgrad» höher und die Erwärmung des Motors geringer. Bei höheren Leistungen als etwa 2½ bis 3 PS werden von den Aufzugsfirmen üblicherweise DKA-Motoren verwendet. Bei diesen kann, infolge des besseren Vollastwirkungsgrades, der «Totalwirkungsgrad» u. U. noch etwas, allerdings unbedeutend, höher werden als beim NLA. Der in den Fig. 27 bis 31 dargestellte DKA konnte für die Fig. 33 nicht zum Vergleich herangezogen werden, denn das mittlere Drehmoment dieses DKA während der Anlaufperiode ist zu klein, um die angenommene Last in 2,3 s auf die stationäre Geschwindigkeit zu bringen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet des Motors mit nutenlosem Rotor dürften die *Oelfeuerungs-* und *Kühlschrankantriebe* sein. Auch hier wird geräuschloser Lauf bei gutem Anlauf und intermittierendem Betrieb gefordert.

Für *Dauerbetrieb* eignet sich der Drehstrommotor mit nutenlosem Rotor zur Zeit nur, wenn keine sehr hohen Ansprüche an den Wirkungsgrad und an den Leistungsfaktor gestellt werden. Zudem muss für Dauerbetrieb aus Gründen der Erwärmung eine gewisse Leistungsreduktion in Kauf genommen werden. An diesen Uebeln leiden relativ weniger die niedrigpoligen Motoren, z. B. Motoren für *raschlaufende Ventilationsantriebe*, oder Motoren, die mit höheren Frequenzen als 50/s betrieben werden.

Dagegen ist der Asynchronmotor mit nutenlosem Rotor seiner stetig abfallenden Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik wegen (Fig. 28 und 34) günstig für die *Drehzahlregulierung mit dreiphasigem Widerstand im Statorkreis.* Diese Reguliermethode eignet sich bekanntlich für kleine Leistungen dank ihrer Einfachheit und Billigkeit. Es zeigt sich, dass für eine stabile Drehzahlregulierung von Null bis zur Nenndrehzahl ein normaler KA überhaupt nicht in Betracht kommt. Für diesen Zweck ist eine «weiche» Drehmoment-Charakteristik erforderlich. Eine solche wird nur bei geeignet dimensionierten Stromverdrängungsankern oder beim NLA erreicht. Der letztere scheint hierfür besonders günstig, weil bei ihm keine synchronen Parasitärmomente und damit kein «Haken» auftreten kann. Eine weiche, hakfreie Charakteristik wird auch bei gewissen *Antrieben in der Textilindustrie* geschätzt.

2. Einphasenmotoren.

Wie früher dargelegt wurde, eignet sich der *kleine* Einphasen-Kondensatormotor mit nutenlosem Rotor nicht nur für intermittierenden Betrieb, sondern auch dank der relativ hohen Garantiewerte für Dauerbetrieb. Seine Anwendung scheint daher bei verschiedenen Antrieben in Haushalt und Gewerbe, z. B. *Oelfeuerungs-, Pumpen-, Ventilatorantrieben usw.* günstig zu sein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Motor mit nutenlosem, radial geschichtetem Rotor zur Zeit den Normalmotoren in der Geräuschlosigkeit und, für intermittierende Antriebe, in der Materialausnützung überlegen ist. Die dritte Forderung, gute Anlauf- und Laufdaten, erfüllt er besonders gut für die Anlaufdaten. In den Laufdaten steht er dagegen zur Zeit hinter den Normalrotoren zurück.

An dieser Stelle möchte ich noch meinem Lehrer, Herrn Professor E. Dünner, unter dessen Leitung diese Arbeit durchgeführt worden ist, und Herrn Dipl.-Ing. E. Schneebeli für seine wertvolle Mitarbeit herzlich danken.

Zu Dank verpflichtet sind wir dem Jubiläumsfonds der Eidg. Technischen Hochschule, welcher diese Untersuchungen durch finanzielle Beiträge ermöglichte, sowie den verschiedenen Industriefirmen, welche uns durch Materialforschung und den Bau von Versuchsrotoren unterstützten, besonders den Eisen- und Stahlwerken A.-G., vorm. G. Fischer, Schaffhausen, und der Aluminium Industrie A.-G., Neuhausen.