Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 26 (1935)

Heft: 12

Artikel: Geräuschuntersuchungen an elektrischen Maschinen

Autor: Moser, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060312

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: 08.08.2025

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

XXVI. Jahrgang | N° 12 | Mittwoch, 5. Juni 1935

Geräuschuntersuchungen an elektrischen Maschinen.*)

Von *Hans Moser*, Zürich.

534.41 : 621.313

In der vorliegenden Veröffentlichung soll über die im Laboratorium für Elektromaschinenbau an der Eidg. Techn. Hochschule unter der Leitung von Prof. E. Dünner durchgeführten Untersuchungen über das Geräusch elektrischer Maschinen orientiert werden. Die Mittel zur Ausführung dieser Forschungsarbeit wurden vom Jubiläumsfonds der ETH zur Verfügung gestellt. Mit der Durchführung der Untersuchungen wurde Dipl.-Ing. H. Moser beauftragt.

Die Arbeit behandelt im Teil A die Grundlagen der Messung des Maschinengeräusches, ergänzt durch Angaben der für den vorliegenden Zweck entwickelten Messapparaturen.

Der Teil B enthält eine allgemeine Darstellung der Ursachen des magnetisch erzeugten Geräusches von Asynchronmotoren. Die Richtigkeit der Theorien über die Ursachen des Geräusches wird experimentell überprüft und diskutiert. Es zeigt sich, dass es mit Hilfe der verwendeten Schwachstromapparaturen möglich ist, aus dem Spektrum des Luft- und des Bodenschalles sowie aus dem Spektrum der Parasitärkräfte und der Oberfelder wertvolle Schlüsse über die Ursachen des magnetischen Geräusches zu ziehen. Ferner zeigt sich, dass zwar noch nicht in allen, aber doch in vielen wesentlichen Punkten eine wenigstens qualitative Richtigkeit der Theorie bestätigt werden konnte. Es ist daher heute möglich, sehr geräuschvolle Motoren durch Vorausberechnung zu vermeiden. Dagegen ist die Vorausberechnung und der Bau geräuschloser Motoren viel schwieriger, meist überhaupt nur möglich auf Kosten der Wirtschaftlichkeit und auf Kosten der elektrischen Daten und oft wegen mechanischen Resonanzen noch etwas vom Zufall abhängig.

Im Teil C wird über eine neue Rotorausführung der Asynchronmotoren mit Kurzschlussanker berichtet, welche geräuschfreien Betrieb ergibt. Auf der Suche nach einem Weg, der prinzipiell Geräuschfreiheit garantiert und aus der Erkenntnis heraus, dass die Nutung des Motors die Ursache der Oberfelder und damit des Geräusches ist, wurde auf den seit den Anfängen der Elektrotechnik bekannten nutenlosen, massiven Eisenrotor zurückgegriffen. Dieser ist bisher in der Praxis kaum angewendet worden, weil seine Laufeigenschaften in jeder Beziehung ausserordentlich schlecht sind.

Durch Verwendung von verschiedenen Schichten aus geeigneten Materialien ist es nun gelungen, ohne Beeinträchtigung der sehr guten Anlaufeigenschaften auch die Laufeigenschaften dieses nutenlosen Rotors sehr stark zu verbessern. Die beigefügten Kurven zeigen, dass der neue Rotor selbst bei einfachster Schichtung Eisen-Kupfer-Eisen für intermittierenden Betrieb (z. B. Liftantrieb) in elektrischer Beziehung praktisch brauchbar ist. Abgesehen von der absoluten Geräuschlosigkeit im Anlauf und bei Last liegt der Vorteil der neuen Konstruktion darin, dass der Motor — im Gegensatz zu den meisten übrigen geräuschlosen Motoren — magnetisch voll ausgenützt werden kann, also wirtschaftlicher ist. Die Anwendung neuer magnetischer Legierungen lässt zudem noch eine weitere Verbesserung der elektrischen Daten und damit eine ausgedehntere Verwendungsmöglichkeit erwarten.

La présente publication est consacrée aux recherches effectuées dans le laboratoire d'électrotechnique appliquée de l'Ecole Polytechnique Fédérale sous la direction de M. Dünner, professeur, sur le bruit des machines électriques. Les moyens financiers pour l'exécution de ces travaux ont été mis à disposition par le Fonds du Jubilé de l'EPF. Les recherches en question ont été confiée à M. H. Moser, ingénieur diplômé.

Le chapitre A, traitant les principes de la mesure du bruit des machines, est complété par une description de l'appareillage développé dans ce but.

Le chapitre B contient un exposé général des causes du bruit engendré dans le circuit magnétique des moteurs asynchrones. L'exactitude des théories sur les causes du bruit est discutée et contrôlée par voie expérimentale. A l'aide de l'appareillage à courant faible utilisé, il est possible de tirer des conclusions précieuses sur les origines du bruit magnétique en partant du spectre sonore de l'air et du sol ainsi que du spectre des forces parasites et des champs dus aux harmoniques. En outre, on constate que la théorie est confirmée au moins qualitativement, sinon sur toute la ligne, pour le moins sur la plupart des points principaux. Il est donc possible aujourd'hui d'éviter par le calcul la construction de moteurs très bruyants. Par contre, le calcul et la construction de moteurs silencieux sont bien plus difficiles, voire même souvent impossibles sinon aux dépens de l'économie et des qualités électriques, et quelquefois sujets au hasard des phénomènes de résonance mécanique.

Le chapitre C est consacré à un nouveau type de rotor pour moteurs asynchrones à induit en cage d'écureuil, garantissant une 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 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 au point de vue électrique pour un service intermittant (p. ex. ascenseur), lors même qu'il ne présente que trois couches fer-cuivre-fer. Outre le démarrage et la marche en charge absolument silencieux, l'avantage de la nouvelle construction réside dans le fait que le moteur — à l'encontre de la plupart des autres moteurs silencieux — permet de saturer fortement, ce qui le rend plus économique. L'utilisation de nouveaux alliages magnétiques fait en outre prévoir des améliorations des données électriques et, partant, une extension du domaine d'application.

*) Deckt sich im wesentlichen mit dem Vortrag, gehalten an der 12. Akademischen Diskussionsversammlung der Eidg. Techn. Hochschule, Zürich, am 1. März 1935, zum Thema: «Der geräuschlose Elektromotor».

A. Die Messung des Geräusches.

In Analogie zu dem bekannten Begriff des elektromechanischen Wirkungsgrades sei unter «Schallwirkungsgrad» elektrischer Maschinen das Verhältnis von abgegebener Schalleistung zu zugeführter Maschinenleistung verstanden. Der Schallwirkungsgrad liegt in der Grössenordnung von 10^{-7} bis 10^{-8}. Im allgemeinen wird also weniger als ein Millionstel der Maschinenleistung in Schall umgesetzt. Trotzdem kann die Schallwirkung erheblich sein, weil das menschliche Ohr für die Schallfrequenzen elektrischer Maschinen sehr empfindlich ist.

Schall wird erzeugt durch *magnetische* und *mechanische* Ursachen. Er pflanzt sich fort als *Luft-* und als *Boden-Schall.*

Die mechanischen Ursachen (Vibrationen durch schlecht ausgewuchtete Rotoren, Lager- und Ventilationsgeräusche etc.) sind relativ leicht zu beheben. Das Ventilationsgeräusch ist bei kleinen Maschinen meist von geringer Bedeutung, weil es praktisch nur aus Luftschall besteht.

Schwieriger zu beseitigen ist der magnetisch erzeugte Schall. Dieser ist deshalb lästig, weil seine Tonwirkung durchdringend und unangenehm sein kann und weil seine Ausbreitung, besonders in Eisenbetonbauten, durch Bodenschall begünstigt wird.

Bei der Schallwirkung auf das Ohr wird unterschieden zwischen *Reiz* und *Empfindung* [1]). Entsprechend zerfällt die Schallmessung in die Messung der «*Schallstärke*» — als Mass für den Reiz —, und in die Messung der «*Lautstärke*» — als Mass für die Empfindung —. Die Schallstärke ist demnach eine *physikalische* Grösse, die Lautstärke eine *Ohrempfindungsgrösse.*

Das ganze vom menschlichen Ohr verarbeitete Schallstärke- oder Schalleistungsintervall von etwa $1 : 10^{13}$ wird (willkürlich) in der neuen deutschen Phonskala in 130 Phon-(Lautheits-)stufen eingeteilt, wobei 0 Phon die untere Grenze, die Hörschwelle, und 130 Phon die obere Grenze, die Schmerzgrenze, bedeutet. *Definitionsgemäss* [2]) ist der Zusammenhang zwischen der Lautstärke L (in Phon) und den physikalischen Grössen: Schallstärke oder Schalleistung N (in erg/s·cm²) und Schalldruck P [in dyn/cm² ≡ Mikrobar (μ B)]:

$$L - L_o = 10 \cdot \log_{10} (N/N_o) = 20 \cdot \log_{10} (P/P_o). \quad (1)$$

Die Werte mit dem Index $_o$ bedeuten den Bezugspunkt.

Dieser logarithmische Zusammenhang, bekannt als Weber-Fechnersches Gesetz, gilt streng genommen nur für reine Töne in der Gegend von 1000 Per./s, nicht aber für Töne stark abweichender Frequenzen und auch nicht für zusammengesetzte Töne [3]). Definitionsgemäss entsprechen der Lautstärke 70 Phon des reinen Tones von 1000 Per./s, der Schalldruck 1 dyn/cm² und die Schallstärke $2{,}43 \cdot 10^{-2}$ erg/s · cm². Bei dieser Frequenz bedeutet ein Phon Lautstärkeunterschied ungefähr den kleinsten noch wahrnehmbaren Lautstärkeunterschied. Subjektiv wird eine Zunahme um etwa 9 Phon als Verdoppelung der Lautstärke empfunden. Die Frequenzabhängigkeit zwischen Reiz- und Empfindung wird durch die Kurven gleicher Lautstärke, die «Ohrkurven» nach Kingsbury und (neu aufgenommen) Fletcher-Munson angegeben [4]).

1. Die Messung des Schalldruckes.

Aus messtechnischen Gründen und weil das Ohr als Druckempfänger reagiert, wird praktisch nicht die Schallstärke, sondern der Schalldruck gemessen. Der meist verwendete *elektrische Schalldruckmesser* besteht aus Mikrophon, einem mehrstufigen Elektronenröhrenverstärker und einem in dyn/cm²$_{eff}$ geeichten Instrument. An Stelle des Instrumentes kann ein Oszillograph an den Verstärker angeschlossen werden, womit dann auch Momentanwerte zeitlich rasch ändernder Schalldrucke aufgezeichnet werden können.

Die Angaben des Schalldruckmessers sagen wenig über die Lautheitsempfindung und nichts über die Lästigkeit eines Geräusches aus.

2. Die Messung der Lautstärke.

Praktisch finden hauptsächlich zwei Methoden Anwendung:

a) der subjektive Hörvergleich,
b) die objektive Messung mit dem direkt zeigenden Phonmesser, dem «elektrischen Ohr».

Die *subjektive* Methode vergleicht akustisch die Lautstärke des Geräusches mit einem, in der Lautstärke regelbaren, in Phon geeichten Geräuschnormal. Die Lautstärke des Geräuschnormals wird solange geändert, bis das Ohr Lautstärkegleichheit wahrnimmt. Der Barkhausen-Lautstärkemesser verwendet als Geräuschnormal einen stark oberwelligen Summerton [5]), wogegen die Industrie speziell für die Messung von Motorengeräuschen schon seit langem einen Asynchronmotor braucht. Die Spannung dieses Asynchronmotors ist ein Mass für die Lautstärke des Geräusches [6]).

Die subjektive Methode ist einfach. Der Messfehler beträgt bei einiger Uebung und bei ähnlichem Klangcharakter (!) der beiden Geräusche etwa ±3 Phon. Der Fehler ist hauptsächlich bedingt durch Ermüdungserscheinungen des menschlichen Ohres.

Der *objektiv* direkt zeigende Phonmesser ist ähnlich gebaut wie der Schalldruckmesser. Er besteht aus Mikrophon, Röhrenverstärker und einem in Phon geeichten Instrument. Das Instrument misst logarithmisch, der Frequenzgang des Verstärkers ist für einige Phonstufen den «Ohrkurven» angepasst.

[1]) Näheres siehe Fischer, Bull. SEV 1935, S. 40.
[2]) AEF, ETZ 1932, S. 140.
[3]) Trage, ETZ 1934, S. 933.
[4]) Fletcher und Munson, Bell Syst. techn. J. 1933, S. 377, s. auch Trage, ETZ 1934, S. 933, und Fischer, Bull. SEV 1935, S. 40.
[5]) Arch. Techn. Messen (ATM), V 550—1.
[6]) Hildebrand, Amer. Inst. electr. Engr. 1930, S. 6, und Krondl, Bull. MFO 1931, S. 657.

Ein solches «elektrisches Ohr» ist imstande, die Lautstärke reiner Töne mit genügender Genauigkeit zu messen. Für komplizierte Geräusche hingegen darf eine richtige Messung nicht erwartet werden,

erstens weil das Weber-Fechnersche Gesetz nicht mehr genau gilt,

zweitens weil die Bewertung der Teiltöne des Spektrums und deren Summierung beim Ohr auf eine andere Art erfolgt,

drittens weil beim elektrischen Ohr z. Z. nicht oder nur mangelhaft berücksichtigt werden können: Verdeckungseffekte, nichtlineare Verzerrungen, Einschwingvorgänge und Phasenabhängigkeit der Lautstärke (infolge Bildung subjektiver Obertöne). Für den praktischen Wert einer Lautstärkeangabe sollte zudem die Lästigkeit eines Geräusches miteinbezogen werden.

Tatsächlich konnten wir an einem marktgängigen Phonmesser feststellen, dass im besondern unangenehme magnetische Geräusche nicht richtig gewürdigt werden. Es haben sich Fehler von mindestens ± 5 Phon gezeigt. Anderseits hat sich aber die gute Brauchbarkeit eines solchen Gerätes erwiesen, wenn es sich nur um laufende Vergleichsmessungen von Geräuschen ähnlichen Klangcharakters handelt.

Zusammenfassend muss gesagt werden, dass die bisher in der Praxis verwendeten Verfahren zur Messung der Lautstärke das Problem der physiologisch richtigen Angabe der Ohrempfindung noch nicht gelöst haben.

3. Die Schallanalyse.

Meistens genügen Schalldruck- und Lautstärkeangaben nicht für die Erkenntnis der Geräuschursachen elektrischer Maschinen. Dagegen gestattet die Kenntnis der einzelnen Teiltöne des Schallspektrums nach Frequenz und Druckamplitude Schlüsse über die Geräuschherkunft und über rationelle Dämpfungsmassnahmen.

Der *Ton*, die einfachste Schallschwingung von sinusförmigem Verlauf, ist durch eine einzige Linie im Spektrum gekennzeichnet.

Das Spektrum eines *Klanges* besteht aus Grund- und Obertonlinien, deren Frequenzen ganze Vielfache der Grundtonfrequenz sind.

Das Spektrum eines *regelmässigen Geräusches* setzt sich aus vielen, harmonischen und nicht harmonischen Teiltönen zusammen. Hierher gehören die magnetisch erzeugten Geräusche.

Im Gegensatz zu diesen «*Linienspektren*» haben die *unregelmässigen Geräusche* ein kontinuierliches oder «*Bandenspektrum*». In einem gewissen Bereich sind alle Frequenzen im Spektrum vorhanden. Als Beispiel eines unregelmässigen Geräusches seien das Wasserrauschen und Knalle angeführt.

Die praktisch verwendeten, elektrischen Verfahren der Frequenzanalyse lassen sich einteilen in

a) Oszillographisches Verfahren mit graphischer Auswertung.
b) Verfahren der statistischen Frequenzbandanalyse.
c) Resonanzverfahren.
d) Suchtonverfahren.

a) Die mathematisch-graphische Auswertung von *Schalldruckoszillogrammen* ist praktisch nur für Klänge, nicht aber für komplizierte Geräusche durchführbar.

b) Bei der *statistischen Frequenzbandanalyse* werden nicht die einzelnen Teiltöne des Spektrums, sondern die Gesamtheit der Teiltöne in einem grössern Frequenzbandintervall, z. B. innerhalb einer Oktave, gemessen. Es wird der Schalldruckeffektivwert pro Oktave Frequenzintervall über eine gewisse Zeit gemittelt. Eine praktische Ausführung stellt das «Oktavensieb» von Siemens & Halske dar [7]). Dieses Gerät leistet z. B. beim Entwurf von Schallisolationen gute Dienste; für die Erkenntnis der Ursachen des magnetischen Geräusches ist aber eine genauere Analyse der einzelnen Teiltöne erforderlich. Diese ist nur mit den Verfahren c und d durchführbar.

c) Das *Resonanzverfahren* siebt die einzelnen Teiltöne des Spektrums mit Hilfe von frequenzgeeichten Resonanzkreisen aus. Die Eigenfrequenz dieser Kreise kann feinstufig verändert werden [8]).

Die Analysierschärfe ist bei diesem Verfahren frequenzproportional. Trotzdem dies dem subjektiven Empfinden des Ohres entspricht, ist für Motorengeräuschforschung die frequenzkonstante Analysierschärfe der Suchtonverfahren unbedingt vorzuziehen. Denn die Analysen von Motorengeräuschen zeigen, dass der Frequenzabstand der einzelnen Teiltöne bei hohen und tiefen Frequenzen sehr oft gleich gross ist.

d) Das Suchtonverfahren. Unter den verschiedenen Suchtonverfahren [9]) haben wir eines derart ausgebildet, dass bei bescheidenem Apparateaufwand noch die Analyse von 25 Phon lauten Geräuschen durchführbar ist bei einem Auflösungsvermögen von etwa 10 Per./s Teiltonfrequenzabstand. Da das Verfahren, wie erwähnt, auf elektrischer Grundlage arbeitet, können ausser Schall auch Spannungen, Ströme, Feldkurven (mit Hilfe von Prüfschleifen) und mechanische Vibrationen [aufgenommen mit Tonaufnehmern (Pic up) oder Piezoquarzen] analysiert werden.

Fig. 1 zeigt die von uns verwendete Prinzipschaltung der Analysatoranlage.

Mit *1* und *2* wurde der Schalldruckmesser bezeichnet, wobei *1* das Bändchenmikrophon und *2* den geeichten Verstärker bedeutet. *3* ist der frequenzstabilisierte Schwebungstongenerator nach Meyer[10]). Dieser erzeugt eine in der Frequenz von 0 bis 5000 Per./s stetig variierbare «Suchspannung» e_s, die im

[7]) ATM, V 51—2.
[8]) Willms, ETZ 1935, S. 26.
[9]) ATM, V 51—2.
[10]) Bull. SEV 1934, S. 49.

ganzen Tonbereich weitgehend sinusförmig und von konstanter Amplitude ist.

4, *5* und *6* bilden die eigentliche Analysatoranlage, *4* den Gegentaktgleichrichter, dessen Gittern die Suchtonspannung e_s und die Geräuschspannung e_g zugeführt wird. *5* ist ein Gegentaktverstärker und *6* ein Kurzzeitgalvanometer der Firma Trüb, Täuber & Co., Zürich. Die Eigenfrequenz dieses Instrumentes liegt nahe bei 4 Per./s.

Eine Analyse der Spannung e_g gestaltet sich nun folgendermassen: Die Frequenz der Suchtonspan-

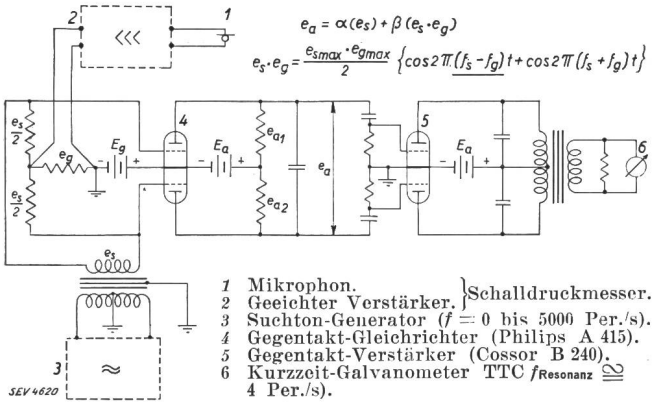

Fig. 1.
Prinzipschaltung der Analysatoranlage.

nung f_s wird langsam geändert. Nähert sie sich der Frequenz f_g eines beliebigen Teiltones von e_g, so treten Schwebungen von der Frequenz $f_s - f_g$ im Galvanometer auf. Bei 4 Per./s Schwebungsfrequez macht das Instrument seine maximalen Ausschläge. Die Anwesenheit von Teiltönen in e_g zeigt sich daher in Galvanometerausschlägen, die Frequenz des Teiltons geht aus der jeweiligen (bekannten) Suchtonfrequenz hervor und die Amplitude des Teiltons ist proportional dem Galvanometerausschlag, da die Suchspannung konstant ist. Die Empfindlichkeit des Analysators ist 2000 mm Bandbreite des Lichtzeigers pro 1 Volt eff. Teiltonspannung.

Prinzipiell hängt das Zustandekommen von Schwebungen von der Möglichkeit der Produktbildung $e_s \cdot e_g$ ab. Bei diesem Suchtonverfahren erfolgt die Produktbildung dadurch, dass die Mischung von Such- und Teiltonspannung auf dem quadratischen Teil der Gitterspannung-Anodenstrom-Kennlinie der Gleichrichterröhren vorgenommen wird. Zur Vermeidung von Fehlanalysen [11]) müssen die Kennlinien der beiden Gleichrichterröhren im Arbeitsbereich gleich und genau quadratisch sein. Es ist nicht leicht, geeignete Röhren zu finden.

Bei der Produktbildung entsteht nicht nur ein Glied mit der Differenzfrequenz $f_s - f_g$, sondern auch ein Glied mit der Summenfrequenz $f_s + f_g$. Daher kann nach einem andern Analysierverfahren [12]) das Summenfrequenzglied mit Hilfe hochabgestimmter Quarze ausgesiebt und ausgewertet werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass der Suchtongenerator nicht so weitgehend oberwellenfrei sein muss.

Ein weiterer Analysator ist das *menschliche Ohr*. Dank der Krümmung der Ohrempfindungskurve ist es ebenfalls zur Produktbildung und damit zur Schwebungstonbildung geeignet. Die Analyse wird so vorgenommen, dass man sich das Geräusch und gleichzeitig einen Suchton stetig ändernder Frequenz anhört und auf Schwebungen achtet.

Bei dieser Methode können aber auch subjektive Oktavschwebungen und damit mehr oder weniger starke Fehlanalysen entstehen. Ausserdem ist eine quantitative Analyse nicht möglich.

4. Raumakustik.

Damit Geräuschresultate verglichen werden können, müssen Distanz und Richtung des Mikrophons angegeben werden. Motoren haben wie andere akustische Strahler ausgesprochene Richtwirkungen für die verschiedenen Schallfrequenzen. Daher sollte bei der Schalldruck- und Lautstärkemessung stets der sphärische Mittelwert bestimmt werden. Fig. 2 zeigt den polaren Verlauf der Lautstärke und der Schalldrucke der stärksten Teiltöne eines leerlaufenden 3-PS-Drehstrom-KA-Asynchronmotors.

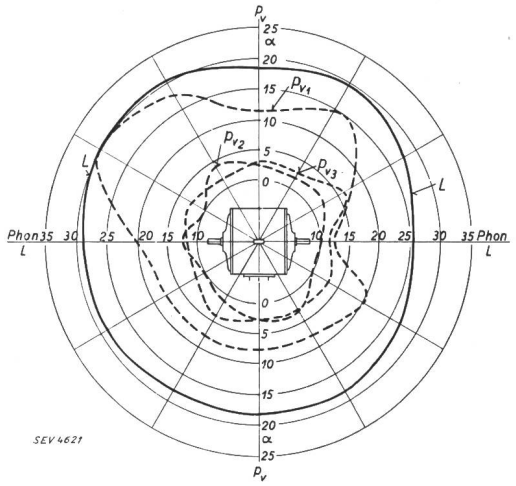

Fig. 2.
Polarer, ebener Verlauf der Lautstärke *L* (Phon) und des Schalldruckes der stark störenden Teiltöne des Luftschallspektrums P_v (Skalenteile α) des Analysatorinstrumentes eines leerlaufenden 3-PS-Drehstromasynchronmotors im stark gedämpften Raum.

Die Aufnahme erfolgte im stark gedämpften Raum; die Mikrophone waren fest, der Motor an einem Seil drehbar aufgehängt.

Weiterhin ist die Angabe der akustischen Daten des Messraumes nötig. In erster Linie muss entschieden werden, ob in einem sehr stark oder sehr schwach gedämpften Raum gemessen werden soll.

Wir unsererseits haben unsere akustischen Untersuchungen, im besonderen Schallanalysen, in einem sehr stark gedämpften Raum ausgeführt, weil hier der schädliche Einfluss stehender Wellen unwesent-

[11]) Trendelenburg, Fortschritte der Akustik, und Waetzmann, Technische Akustik I.

[12]) General Radio Co., Cambridge, Mass.

lich wird. Ein Motor mit der Schalleistung N ergibt in einem solchen Raum eine Energiedichte des Schalles E, die quadratisch mit der Entfernung r abnimmt.

$$E = N/4 \cdot \pi \cdot c \cdot r^2 \qquad (2)$$

c = Schallgeschwindigkeit.

Dem Weber-Fechnerschen Gesetz entsprechend nimmt die Lautstärke bei der Verdoppelung der Entfernung um 6 Phon ab. Eine experimentell aufgenommene Kurve [13]) des Zusammenhangs Lautstärke—Entfernung ist in Fig. 3, Kurve I, wiedergegeben.

In einem sehr schwach gedämpften Raum hingegen, einem «Hallraum», ist die Energiedichte und damit die Lautstärke fast im ganzen Raum konstant, von den Schwankungen durch stehende Wellen abgesehen. Die Schalldichte E nimmt in einem solchen Raum durch Reflexionen an den Wänden so lange zu, bis Gleichgewicht zwischen erzeugter und absorbierter Schalleistung vorhanden ist. Energiedichte und Lautstärke hängen also nur von der Motorschalleistung und der Absorption A des Raumes ab.

$$E = \frac{4 \cdot N}{c \cdot A} \qquad (3)$$

(Fig. 3, Kurve III) [14]).

Fig. 3, Kurve II, zeigt den Zusammenhang von Lautstärke und Entfernung in einem normalen Maschinenraum.

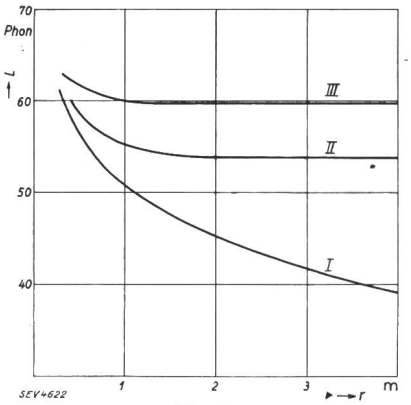

Fig. 3.
Lautstärke L eines Motors in Phon bei verschiedenen Entfernungen r, in Metern,

I im gedämpften Raum, im Freien: $E_I = \frac{N}{4 \cdot \pi \cdot c \cdot r^2}$

II in einem Raum normaler Absorption,

III im Hallraum, $E_{III} = \frac{4\,N}{c \cdot A}$

(nach Willms).

Aus den drei Kurven der Fig. 3 geht hervor, dass ein Motor von bestimmter Schalleistung in einem Hallraum wesentlich lauter ist als in einem gedämpften Raum, woraus sich für die Prüfung der Lautstärke bei der Fabrikation der praktische Schluss ergibt, dass der Motor sicherheitshalber nicht in einem gedämpften Raum, sondern in einem Hallraum gemessen werden soll. Es wird dann die Möglichkeit ausgeschaltet, dass der Motor am Aufstellungsort lauter ist als im Prüflokal.

5. *Trennung des mechanisch und des magnetisch erzeugten Schalles.*

Die folgenden Untersuchungen befassen sich nur mit dem magnetisch erzeugten Schall. Es war daher bei der Messung des Schalles nötig, alle Geräusche mechanischer Herkunft zu vermeiden. Bei kleineren Motoren mit Gleitlagern wurde dies fast immer

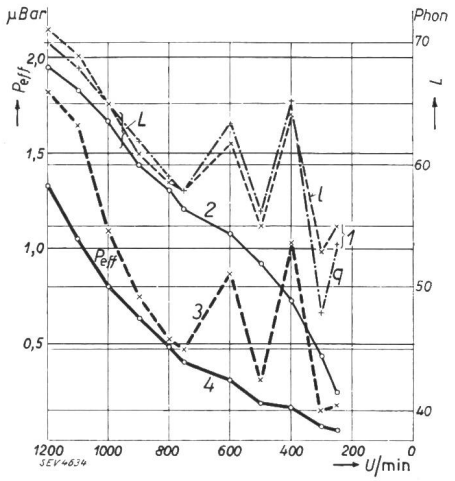

Fig. 4.
Trennung des mechanisch und des magnetisch erzeugten Schalles.

Auslaufversuch einer Gleichstrommaschine (80 kW, 1000 U/min) mit und ohne Erregung.

1 Phonverlauf *mit* Erregung bei zwei Mikrophonstellungen, längs (*l*) und quer (*q*) zur einfallenden Schallrichtung (mechanisches *und* magnetisches Geräusch).
2 Phonverlauf *ohne* Erregung (nur mechanisches Geräusch).
3 Schalldruckverlauf *mit* Erregung (mechanisches *und* magnetisches Geräusch).
4 Schalldruckverlauf *ohne* Erregung (nur mechanisches Geräusch).

Aufnahmen mit Siemens-Phon- und Schalldruckmesser im schwach gedämpften Maschinenraum. Mikrophone 1 m axial vom Wellenende entfernt.

durch sorgfältiges Auswuchten des Rotors und durch Entfernung des Ventilators erreicht. Genügen diese Massnahmen nicht, so müssen der mechanisch und der magnetisch erzeugte Schall getrennt werden. Dies wird folgendermassen erreicht:

Die Maschine wird einmal mit Spannung, einmal ohne Spannung (bei geräuschlosem Fremdantrieb) bei derselben Drehzahl gemessen. Aus der Differenz des Schalldruckes, der Lautstärke und des Spektrums lassen sich dann genügend Schlüsse über den magnetisch erzeugten Schall ziehen.

In Fig. 4 ist für eine Gleichstrommaschine (80 kW, 1000 U/min) der Verlauf der Lautstärke und des Schalldruckes mit der Drehzahl dargestellt. Die Maschine wurde auf Drehzahl gebracht und dann dem Auslauf überlassen. Während der Auslaufperiode wurden Schalldruck und Lautstärke mit und ohne Erregung dauernd gemessen. Da die Aufnahme in einem schwach gedämpften Maschinenraum erfolgte und der magnetische Schall im wesentlichen

[13]) Willms, ETZ 1935, S. 55.

[14]) Ueber die Bestimmung der Absorption eines Raumes s. z. B. ATM V 54—2.

aus einem einzigen starken Teilton bestand, geben die Kurven 1 und 3 stark die Schwankungen des Schallfeldes infolge stehender Wellen an. Noch stärkern Einfluss auf die Spitzen der Kurven 1 und 3 als diese Schallfeldschwankungen üben aber mechanische Resonanzen, angeregt durch magnetische Kräfte (s. Teil B, Abschn. VI), aus.

6. Der Begriff «Geräuschlos».

Unter «geräuschlos» wird in der Praxis mancherlei verstanden.

Auf Grund der Eigenschaften des menschlichen Ohres kann folgendermassen definiert werden [15]:

Ein Motor ist

a) *geräuschvoll, wenn er nur um wenige Phon lauter ist als das Grundgeräusch.* Hat z. B. das Grundgeräusch oder der Lärmpegel in einem Raum die Lautstärke 50 Phon, und der Motor in diesem Raum, an sich, 55 Phon, so dominiert beim Zusammenwirken beider Geräusche das Motorgeräusch stark. Der Motor ist also geräuschvoll.

b) *geräuscharm, wenn er die Lautstärke des Grundgeräusches nicht mehr merklich, d. h. messbar, erhöht.* Dies ist der Fall, wenn im obigen Beispiel die Motorschalleistnug auf $^1/_{10}$ reduziert wird, wobei nach Weber-Fechner die Lautstärke von 55 und 45 Phon fallen muss. Das Grundgeräusch von 50 Phon verdeckt dann den Motorschall so weit, dass dieser vom Ohr nur noch schwach wahrgenommen wird.

c) *praktisch geräuschlos, wenn er 10 bis 20 Phon leiser ist als das Grundgeräusch.* Der Verdekkungseffekt des Ohres bewirkt, dass man ihn dann praktisch nicht mehr hört. In einem stillen Wohnraum von 20 Phon darf daher ein geräuschloser Motor 10 Phon Eigenlautstärke nicht übersteigen. Die Schalleistung eines solchen Motors muss also (nach Weber-Fechner) 10 000 Mal kleiner sein als diejenige eines Motors mit 50 Phon.

B. Die Ursachen des magnetisch erzeugten Geräusches bei Asynchronmaschinen.

In elektrischen Maschinen treten neben dem Grundfeld auch Oberfelder auf. Das Zusammenwirken der Oberfelder hat «parasitäre» Kräfte zur Folge, welche sich nicht oder nur in schädlicher Weise an der Drehmomentbildung beteiligen. Die parasitären Kräfte verursachen Vibrationen des Motors und damit Schall. Es ist eine bekannte Tatsache, dass der magnetisch erzeugte Schall auf das menschliche Ohr besonders lästig wirkt.

Der Zusammenhang zwischen Oberfeld und Ohrempfindung ist sehr kompliziert, weil auf dem langen Wege: Oberfelder — Kräfte — Vibrationen — Schall — Empfindung mehrere nichtlineare Verzerrungen auftreten. Die Erkenntnis des Zusammenhanges ist auch durch die Tatsache erschwert, dass die Frequenzen der Töne meist nicht mit den Frequenzen der erzeugenden Oberfelder zusammenfallen.

Es sind schon viele Arbeiten und Theorien über die Oberfelder, die parasitären Kräfte und das Geräusch veröffentlicht worden [16]. Die neueren Theorien erfassen einen grossen Teil der Geräuscherscheinungen qualitativ richtig. Dagegen tritt quantitativ oft eine grosse Streuung auf zwischen Theorie und Versuch. Häufig finden sich Teiltöne im Schallspektrum von einer Stärke, welche die Theorie nicht erwarten lässt. Aber auch der umgekehrte Fall ist möglich. Man wird oft vergeblich das Schallspektrum nach Teiltönen absuchen, die theoretisch vorhanden sein sollten.

Im folgenden wird versucht, die Richtigkeit und Anwendbarkeit der bisherigen Theorien auf den Asynchronmotor mit Käfiganker experimentell zu überprüfen.

I. Die Oberfelder.

Bei Asynchronmaschinen entstehen im wesentlichen:

1. Oberwellen der *Wicklung* (oder Ampèrewindungs- oder MMK-Oberwellen).
2. Oberwellen der *Nutung* (oder Leitfähigkeitsoberwellen).
3. Oberwellen der *Sättigung.*
4. Oberwellen der *Luftspaltexzentrizität.*
5. Oberwellen als Folge der *Harmonischen* und der *Unsymmetrien der Netzspannung.*

1. Die *Oberwellen der Wicklung* [17] sind bedingt durch die räumlich nicht sinusförmige Verteilung des Strombelages am Luftspaltumfang. Bei Mehrphasenwicklungen lassen sie sich in zwei Teile zerlegen:

a) AW-Oberwellen infolge der *Verteilung der Wicklung in einzelne Nuten.* Es entsteht die bekannte treppenförmige Feldkurve.

b) AW-Oberwellen durch die *Verteilung der Wicklung in einzelne Phasen.* Dadurch entstehen bei Dreiphasenwicklungen in verschiedenen Zeitmomenten die bekannten Schwankungen der Drehfeldamplitude mit der 6fachen Frequenz des Stromes.

Beide Einflüsse verursachen eine Abweichung des Grundfeldes von der Sinusform, selbst wenn konstante Permeabilität der Eisenwege und zeitlich sinusförmiger Spannungsverlauf vorausgesetzt werden.

Jedes dieser Oberwechselfelder lässt sich zerlegen in je ein gleichsinnig (+) und ein gegensinnig (—) zum Grundfeld rotierendes Drehfeld. Der Verlauf dieser Ersatzdrehfelder ist räumlich und zeitlich sinusförmig. Bei *symmetrischen Wicklungen* treten nur die Oberfelder mit den ungeraden Ordnungszahlen ν_W auf:

$$\nu_W = (2 \cdot m \cdot x + 1); \; m = \text{Phasenzahl}; \qquad (4)$$

[15]) Definitionen z. T. nach Wagner, ZVDJ 1933, S. 1, z. T. nach Willms, ETZ 1935, S. 56.

[16]) Literaturzusammenstellungen: Sequenz, E. u. M. 1932, S. 433, und Krondl, Bericht für die «Conférence des grands réseaux» 1933.

[17]) Arnold WT. V, 1 und WT. III; s. auch Rüdenberg, ETZ 1924, S. 37, und Linckh, Arch. Elektrotechn. 1929, S. 19.

$$x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3,$$

bei Dreiphasenwicklungen $m = 3$:

$\nu_W = +1$ (Grundfeld); -5; $+7$; -11; $+13$; -17; $+19$

bei Einphasenwicklungen $m = 1$:

$\nu_W = \pm 1$; ± 3; ± 5; ± 7; ± 11; ± 13; ± 15

bei Käfigwicklungen ist hier für die Phasenzahl zu setzen:

$m = Z/2p$, Z = Nutenzahl, p = Polpaarzahl.

Bei *unsymmetrischen Wicklungen* treten ausserdem noch Oberwellen mit geraden und evtl. gebrochenen Ordnungzahlen auf [18]). Sogar «Unterwellen» sind möglich, d. h. Oberwellen mit Ordnungszahlen kleiner als 1. Unsymmetrische Wicklungen sind daher beim Bau geräuschloser Motoren unbedingt zu vermeiden.

Die *Sättigung des ν-Wicklungsoberfeldes* im Luftspalt B_W kann unter vereinfachenden Annahmen berechnet werden:

$$B_{W\nu} \cong \frac{F_{W\nu}}{0{,}8 \cdot 1{,}3 \cdot \delta}; \qquad (5)$$

$$F_{W\nu} = 0{,}45 \cdot k_{W\nu} \cdot \frac{m \cdot I \cdot w}{p \cdot \nu}$$ [19])

Sie ist also proportional dem Wicklungsstrome I, und umgekehrt proportional der Ordnungszahl ν und dem Luftspalt δ. Die Wicklungsoberfelder sind im Anlauf und bei Last im allgemeinen die stärksten aller auftretenden Oberfelder. Bei Leerlauf (I = klein) dagegen sind sie schwach.

2. *Die Oberwellen der Nutung* [20]). Die beidseitige Nutung von Stator und Rotor verursacht bei der Drehung des Rotors:

a) *Schwankungen der magnetischen Leitfähigkeit des Luftraumes,*
   α) für den *Hauptfluss,* weil sich der Nutenschlitze wegen die Breite des sich gegenüberstehenden Stator- und Rotoreisens ändert. Diese Leitfähigkeitsänderungen zeigen sich in Schwankungen des Magnetisierungsstromes, z. B. im Ampèremeter bei langsamer Drehung des Rotors;
   β) für den *Zahnkopfstreufluss,* aus dem gleichen Grund.

b) *Schwankungen in der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Hauptfeldes.* Diese Schwankungen sind durch *Nuten-Grund-* und *-Oberfelder* darstellbar, welche sich dem Grundfeld überlagern. Sie lassen sich wie die Wicklungsoberfelder zerlegen in gleich und invers rotierende Ersatzdrehfelder der Ordnungszahlen

$$\nu_N = \frac{Z}{p} \cdot x + 1. \qquad (6)$$

Z = Nutenzahl, p = Polpaarzahl,

$$x = \pm 1, \pm 2, \pm 3$$

Die Sättigung des Nutengrundfeldes ($x = 1$) ist angenähert:

$$B_N \cong B_1 (k_\delta - 1)$$ [21]) (7)

B_1 = Grundfeldsättigung im Luftspalt.

k_δ = Carterscher Nutenkontraktionskoeffizient; er berücksichtigt Nutenform und Luftspaltgrösse.

Die Nutenfelder sind demnach unabhängig vom Wicklungsstrome I; sie haben gleichungsgemäss gleiche Grösse bei Leerlauf und bei Belastung des Motors. Dagegen sind sie abhängig von der Klemmenspannung, von der Nutenform und vom Luftspalt. Sie lassen sich verringern durch Reduktion der Klemmenspannung, durch Anwendung geschlossener Nuten und durch Vergrösserung des Luftspaltes.

Die Nutenfelder setzen sich vektoriell zusammen mit den Wicklungsfeldern gleicher Ordnungszahl und gleichen Drehsinnes. Bei Leerlauf des Motors überwiegen die Nutenfelder; bei Anlauf und Last überwiegen stark, wie erwähnt, die Wicklungsfelder. Letztere bewirken das gefürchtete Anlaufgeheul gewisser Asynchronmotoren; das Leerlaufgeräusch dagegen hängt in erster Linie von den Nutenfeldern ab. Daher wird durch Anwendung geschlossener Nuten nur das Leerlaufgeräusch, das Anlaufgeräusch aber kaum vermindert. Sehr bedeutend ist die Reduktion allerdings nicht. Die Oszillogramme Fig. 5 zeigen die Abnahme der Rotoroberfelder bei ge-

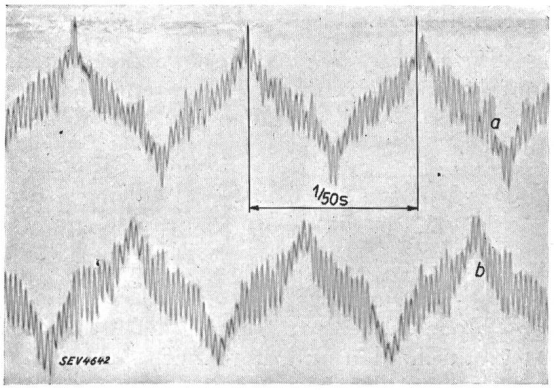

Fig. 5.
Oberfelder der Rotornutung eines Drehstromasynchronmotors
5 PS, 6 Pole, 54/102 Nuten, $f_1 = 50$ Per./s.
Oszillogramm der Flusspulsationen infolge der Rotornutung. Aufnahme im Leerlauf mit einer Prüfschleife um einen Statorzahn bei
a) geschlossenen Rotornunten (Stegdicke 0,5 mm);
b) offenen Rotornuten (Schlitzbreite 1,2 mm).

schlossenen (Kurve a) gegenüber offenen (Kurve b) Rotornuten. Die Motordaten sind: 5 PS, 6 Pole, 54/102 Nuten. Nuten unverschrägt. Rotornuten 4 mm ⌀ rund, Luftspalt 0,4 mm, Luftspaltsättigung 7000 Gauss. Die Stegdicke der geschlossenen Rotornuten war 0,5 mm, die Schlitzbreite der geöffneten Rotornuten 1,2 mm. Beide Kurven wurden im Leerlauf unter denselben Bedingungen aufgenommen. Die Aufnahme erfolgte mit einer Prüfschleife um einen Statorzahn.

[18]) Siehe Fritze, Arch. Elektrotechn. 1921, S. 73, und 1922, S. 377.

[19]) Arnold, WT. III, S. 269; Fritze, Arch. Elektrotechn. 1921, S. 83.

[20]) Fritze, Arch. Elektrotechn. 1922, S. 382.

[21]) Krondl, Bull. MFO 1931, S. 658.

Durch die Oeffnung der Nuten stieg die Lautstärke nur um etwa 3 Phon. Dieser geringe Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass die Stegpartie geschlossener Nuten durch die hohe Uebersättigung beinahe unwirksam wird. Eine grössere Verminderung der Nutenfelder und des entsprechenden Schalles wird nur erzielt, wenn zusätzlich der Luftspalt vergrössert und die Nuten verschrägt werden.

3. *Die Oberwellen der Sättigung* [22]). Bei der Untersuchung der Wicklungs- und der Nutenfelder wurde konstante Permeabilität der Eisenwege angenommen. Berücksichtigt man die wirklichen Verhältnisse, die Krümmung der Magnetisierungskurve, so muss man eine weitere Klasse von Feldern, die «Sättigungsoberfelder», einführen. Es entstehen Oberwellen durch die

a) *Abflachung der Grundfeldkurve.* Das symmetrisch abgeflachte Grundfeld kann in die Grundwelle und in Sättigungsoberwellen der Ordnungszahlen

$$\mu = 1, \text{ und } 3, 5, 7, 9$$

zerlegt werden. Da die Form des abgeflachten Grundfeldes im grossen ganzen nicht ändert (abgesehen von den Schwankungen durch die Nuten- und Wicklungsoberfelder), so müssen die Sättigungsoberfelder die Drehrichtung und die Drehzahl des Grundfeldes haben. Sie induzieren in der Statorwicklung die Frequenzen $\mu \cdot f_1$ (f_1 = Frequenz des Grundfeldes).

b) *Abflachung der Nutenfeldkurve.* Auch die Nutenfelder im Maximum des Grundfeldes werden abgeflacht. Es entstehen neue Nutenoberfelder der Ordnungen

$$\nu_N = \frac{Z}{p} \cdot x + \mu \qquad (8)$$

4. *Oberwellen der Luftspaltexzentrizität.* Ein exzentrisch laufender Rotor erzeugt Felderpaare, deren Polpaarzahlen pro Umfang der Maschine sich um 1 unterscheiden und die daher (s. Abschnitt II, 2) radiale «Rüttelkräfte» und Schall hervorrufen [23]).

Die gegenseitige Rückwirkung zwischen Stator und Rotor.

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde angenommen, es handle sich entweder ausschliesslich um Oberfelder des Stators oder ausschliesslich um solche des Rotors. Ein Stator(Rotor)oberfeld kann sich aber nur allein auswirken, wenn der Rotor (Stator) rückwirkungsfrei ist. Das Statoroberfeld wird normalerweise einen Rotoroberstrom, dieser ein Rotorgrundfeld und Rotoroberfelder erzeugen; die Ordnungszahl der letzteren hängt ab von der Phasenzahl der induzierten Wicklung. Alle Rotoroberfelder wirken auf den Stator zurück, und zwar mit Frequenzen, die von der Rotordrehzahl abhängen. Sie induzieren Statoroberströme und damit eine neue Reihe von Statoroberfeldern.

Massgebend für die parasitären Kräfte und das Geräusch sind also in Praxis stets die aus der gegenseitigen Rückwirkung resultierenden Felder.

Analytische und experimentelle Bestimmung der Frequenzen, der Ordnungszahlen und der Umlaufsgeschwindigkeiten der Oberfelder [24]).

a) *Statoroberfelder.*

Trennung der Oberfelder der Wicklung und der Nutung (ν_1) und der Sättigung (μ_1).

Mit Hilfe von Prüfschleifen im Stator und Rotor können die Oberfelder der Wicklung, der Nutung und der Sättigung getrennt aufgenommen werden. Handelt es sich um das Studium der Statoroberfelder allein, so soll zur Ausschaltung von Rotoroberfeldern der Rotor ungenutet und rückwirkungsfrei sein. Amplitude und Frequenz der einzelnen Felder werden aus dem Oszillogramm oder aus dem Spektrogramm der Prüfschleifenspannung bestimmt.

Die Statoroberfelder der Wicklung und der Nutung ν_1 haben die $\nu_1$fache Polpaarzahl des Grundfeldes, also $p \cdot \nu_1$ Polpaare. Da sie vom Grundfeld erregt werden, muss ihre Drehzahl/s relativ zur Statorwicklung

$$n_{\nu_1} = \frac{f_1}{p \cdot \nu_1} = \frac{n_s}{\nu_1} \qquad (9)$$

sein, also $\nu_1$mal kleiner als die synchrone Drehzahl n_s des Grundfeldes.

Legt man eine Prüfschleife um einen Statorzahn und oszillographiert die dem Feldverlauf entsprechende Spannung, so zeigen sich die Wicklungs- und Nutenoberfelder des Stators *nicht* als Oberwellen der Grundfeldkurve. Sie vergrössern in diesem Fall lediglich die Amplitude des Grundfeldes, denn sie wirken auf den Stator mit der Frequenz des Grundfeldes f_1 zurück.

Dagegen zeigen sich in solchen Oszillogrammen die *Statoroberfelder der Sättigung.* Diese bilden sich deshalb als Oberwellen über der Grundwellenkurve ab, weil ihre Drehzahl gleich derjenigen der Grundwelle ist und weil sie deshalb auf den Stator mit der Frequenz $\mu_1 \cdot f_1$ wirken. Fig. 19, Kurve g, zeigt z. B. eine geringe Verzerrung des sinusförmigen Grundfeldverlaufes infolge der Sättigungsoberfelder des Stators.

Für die Abbildung der *Wicklungs- und Nutungsoberfelder des Stators* muss man eine Prüfschleife auf dem drehenden *Rotor* zu Hilfe nehmen. Das Statoroberfeld ν_1 induziert im Rotor und damit in dieser Prüfschleife eine Spannung der Frequenz f_{12}

$$f_{12} = f_1 \cdot [1 - (1 - s) \cdot \nu_1] \qquad (10)$$

[22]) Fritze, Arch. Elektrotechn. 1922, S. 377.

[23]) Hildebrand, J. Amer. Inst. Electr. Engr. 1930, S. 6; Heller, Arch. Elektrotechn. Bd. 28, S. 455.

[24]) Linckh, Arch. Elektrotechn. 1929, S. 19.

In einem 4poligen Drehstromstator mit 36 Nuten treten z. B. starke Oberfelder der Ordnungszahlen $\nu_1 = -17$ und $+19$ auf (Gleichungen 4 und 6). Diese induzieren nach Gl. (10) in der Rotorprüfschleife bei Synchronismus ($s = 0$) die Frequenzen $f_{12} = 900$ Per./s bei $f_1 = 50$ Per./s (Fig. 6a und 7a).

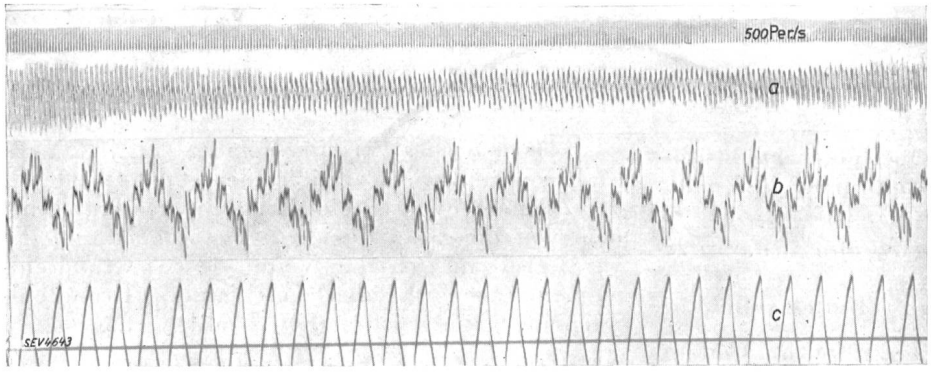

Fig. 6.
Wicklungs- und Nutenoberfelder des Stators eines Drehstromasynchronmotors
(3 PS, 4 Pole, 36 Statornuten, $f_1 = 50$ Per./s).
Oszillogramm der Oberfelder bei $n \cong n_s$ (Kurve a).
bei $n = n_s/2$ (Kurve b).
bei $n = 0$ (Kurve c).
Aufgenommen mit einer Prüfschleife auf dem (nutenlosen) drehenden Rotor.
Umfasste Fläche der Prüfschleife: Rotorlänge × Statornutteilung.
Relativer Nuten-Schrägungswinkel $\psi = 0$.

Bei der halben synchronen Drehzahl ($s = 0{,}5$) entstehen die Frequenzen $f_{12} = 475$ und 425 Per./s (Fig. 6b und 7b). Die Amplituden der beiden Oberfelder sind nicht gleich (Fig. 7), weil sich das Nutenfeld zum Wicklungsfeld gleicher Ordnungszahl vektoriell verschieden addiert.

Die Spektrogramme Fig. 7 zeigen, dass das 17. und das 19. Oberfeld bei optimaler Nutschrägung stark abnimmt. Der optimale Verschrägungswinkel ψ_{opt} für ein bestimmtes Oberfeld ν, mechanisch gezählt, ist: $\psi_{opt} = \left(g \cdot \frac{2\pi}{p\nu}\right)$, $g =$ ganze Zahl: 1, 2, ..

Im vorliegenden Fall wurde das 17. Statoroberfeld durch eine Ausschrägung von etwas mehr als 1, bzw. 2 Statornutteilungen besonders stark reduziert. Gleichzeitig werden auch die Harmonischen dieser Oberfelder, also die 35. und 37., 53. und 55. Oberfelder stark vermindert. Weniger beeinflusst wird das 5. und 7. Oberfeld; für diese müsste eine Schrittverkürzung in der Statorwicklung um $^1/_6$ der Polteilung vorgesehen werden.

b) *Rotoroberfelder* [25]).

Das Statorfeld ν_1 erzeugt in jedem m_2-phasigen Rotor die Rotoroberfelder der Ordnungszahlen:

$$\nu_2 = 2 \cdot m_2 \cdot y + \nu_1, \qquad (11)$$
$$y = 0;\ \pm 1;\ \pm 2;\ \pm 3$$

Für den Käfiganker kann gesetzt werden: $m_2 = \frac{Z_2}{2 \cdot p}$, dann ist

$$\nu_2 = \frac{Z_2}{p} \cdot y + \nu_1 \qquad (12)$$

Diese Rotoroberfelder wirken auf den Stator und den Rotor zurück und induzieren Spannungen der Frequenzen:

$$f_{21} = f_1 \cdot [(1-s)\nu_2 + s] \quad \text{im Stator} \qquad (13)$$

und

$$f_{22} = f_1 \cdot [(1-s)\nu_2 - 1] \quad \text{im Rotor} \qquad (14)$$

$s =$ Schlupf des Rotors gegen das Grundfeld.

Das Statorgrundfeld $\nu_1 = 1$ erzeugt die stärksten Rotoroberfelder ν_2:

$$\nu_2 = \frac{Z_2}{p} \cdot y + 1 \qquad (12a)$$

und diese im Stator die Frequenzen:

$$f_{21} = f_1\left[\frac{Z_2}{p} \cdot y(1-s) + 1\right] \qquad (13a)$$

(s. Beispiel Fig. 5)

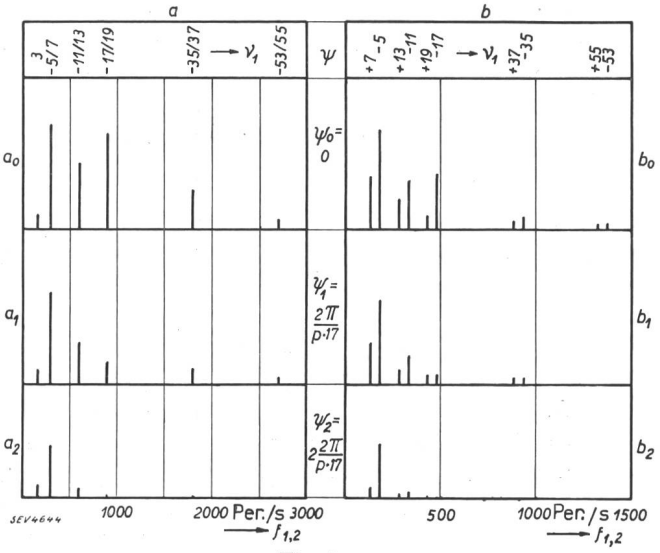

Fig. 7.
Wicklungs- und Nutenoberfelder des Stators eines Drehstromasynchronmotors
(3 PS, 4 Pole, 36 Statornuten, $f_1 = 50$ Per./s).
Spektrogramm der Statoroberfelder der Ordnungszahlen ν_1 bei $n = n_s$ (a), und bei $n = n_s/2$ (b) bei verschiedenen Nutenschrägungen, aufgenommen mit einer Prüfschleife auf dem (nutenlosen) drehenden Rotor und mit dem Analysator.
Relative Nutenschrägung: $\psi_0 = 0$ (Fig. a_0 und b_0).
$\psi_1 = 1 \cdot \frac{2\pi}{2 \cdot 17} \sim 1$ Statornutteilung (Fig. a_1 und b_1).
$\psi_2 = 2 \cdot \frac{2\pi}{2 \cdot 17} \sim 2$ Statornutteilungen (Fig. a_2 u. b_2).

und im Rotor die Frequenzen:

$$f_{22} = f_1\left[\frac{Z_2}{p} \cdot y(1-s) - s\right] \qquad (14a)$$

Die Rotoroberfelder ν_2 laufen relativ zur Statorwicklung mit der Drehzahl n_{ν_2} um:

[25]) Kade, ETZ 1931, S. 1135 und 1163; Krondl, Bull. MFO 1931, S. 658; Lund, Arch. Elektrotechn. 1932, S. 811.

$$n_{\nu_2} = \frac{f_{21}}{p \cdot \nu_2} = \frac{n_s}{\nu_2} [(1-s)\,\nu_2 + s] \qquad (15)$$

n_s = synchrone Drehzahl des Grundfeldes.

und die Rotoroberfelder ν_2, welche durch das Statorgrundfeld $\nu_1 = 1$ erzeugt werden, mit

$$n_{\nu_2} = \frac{n_s}{\nu_2} \left[\frac{Z_2}{p} \cdot y\,(1-s) + 1 \right] \qquad (15a)$$

II. Die parasitären Kräfte.

Das *Zusammenwirken* der Oberfelder, hauptsächlich im Luftspalt, ergibt *konstante* und *pulsierende* Kräfte. Die wichtigsten sind:

1. Die *tangentialen Parasitärkräfte* (Parasitärmomente, «Pendelmomente»).
2. Die *radialen Parasitärkräfte* («Rüttelkräfte»).

Die Verteilung der Parasitärkräfte am Umfang im Luftspalt kann so sein, dass die einzelnen Kräfte zusammen eine *resultierende Kraftwirkung* auf den Stator und den Rotor als Ganzes verursachen. Es treten dann resultierende Momente und resultierende Radialkräfte auf.

Die Verteilung der einzelnen Parasitärkräfte am Umfang kann aber auch so sein, dass die Summe aller Kräfte längs des Umfangs null wird. Dann entsteht keine resultierende Kraftwirkung. Die einzelnen Parasitärkräfte wirken dann rein *lokal*, z. B. auf die Zähne.

Resultierende Kraftwirkungen.

1. *Die tangentialen Parasitärkräfte* [26].

Nach Biot-Savart tritt an jeder Stelle im Luftspalt eine tangentiale Kraftwirkung p_t zwischen Stator und Rotor auf.

$$p_t = b \cdot \frac{a}{10} \text{ dyn/cm}^2 \qquad (16)$$

b = Momentanwert der Induktion in Gauss
a = Momentanwert des Strombelages in A/cm

Nach diesem Gesetz entstehen das Grundfeldmoment und die Oberfeldmomente. Die zweiten können zeitlich konstant oder variabel sein. Die variabeln Momente werden auch Pendelmomente genannt (Lund).

Parasitärmomente, Schleichdrehzahlen. Man kann sich bekanntlich den Asynchronmotor vorstellen als eine Serieschaltung von «Grundfeldmotor» und einer Reihe von «Oberfeldmotoren». Die synchronen Drehzahlen der «Oberfeldmotoren» fallen meist nicht mit der synchronen Drehzahl des «Grundfeldmotors» zusammen. Daher kann beim Anlauf des Asynchronmotors der Fall eintreten, dass der Rotor nicht dem Grundfeldmotor, sondern einem starken Oberfeldmotor gehorcht, d. h. nur die synchrone Drehzahl des Oberfeldmotors erreicht. Statt bis zum Grundfeldsynchronismus hochzulaufen, bleibt er bei einer «Schleichdrehzahl» (in der Nähe der synchronen Drehzahl eines Oberfeldmotors) hängen. Je nachdem es sich um einen Asynchron- oder Synchron-Oberfeldmotor handelt, spricht man von Parasitärmomenten und Schleichdrehzahlen asynchroner oder synchroner Art.

a) *Asynchrones Parasitärmoment* (Fig. 8, Kurve a). Ein asynchrones Parasitärmoment entsteht durch das Zusammenwirken eines Statoroberfeldes ν_1 mit dem von diesem induzierten Rotoroberstrom. Es wird also auf gleiche Weise wie das Grundfeldmoment erzeugt. Es überlagert sich dem Grundfeldmoment. Seine synchrone Drehzahl liegt bei $n_{s\nu} = \frac{n_s}{\nu_1}$. Unterhalb dieser Drehzahl beschleunigt es, oberhalb bremst es den anlaufenden Rotor. Wenn das Lastmoment und die Amplitude des Parasitärmomentes gross sind, so bleibt der Rotor bei einer Drehzahl nahe $n_{s\nu}$ hängen.

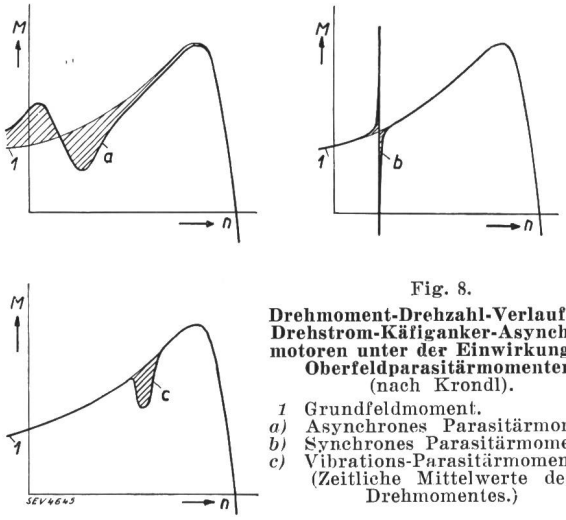

Fig. 8.
Drehmoment-Drehzahl-Verlauf von Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotoren unter der Einwirkung von Oberfeldparasitärmomenten.
(nach Krondl).

1 Grundfeldmoment.
a) Asynchrones Parasitärmoment.
b) Synchrones Parasitärmoment.
c) Vibrations-Parasitärmoment.
(Zeitliche Mittelwerte des Drehmomentes.)

Starke asynchrone Parasitärmomente werden durch die Statoroberfelder niedriger Ordnungszahlen verursacht, z. B. bei Drehstrommotoren durch die Felder $\nu_1 = -5, +7$ und $\left[\frac{Z_1}{p}(\pm 1) + 1\right]$. Hohe Rotornutenzahlen und kleiner Rotorwiderstand begünstigen die Ausbildung dieser Momente.

b) *Synchrones Parasitärmoment* (Fig. 8, Kurve b). Ein synchrones Parasitärmoment entsteht, wenn zwei beliebige, unabhängig erzeugte Oberfelder in Rotor und Stator erstens die *gleiche Polzahl* und zweitens die *gleiche Umlaufgeschwindigkeit* haben. Die zweite Bedingung kann nur bei einer bestimmten Rotordrehzahl erfüllt sein. Es tritt dann wie bei einer Synchronmaschine ein «synchronisierendes Moment» auf, das den Oberfeldmotor (der durch die beiden Oberfelder entsteht), in «Tritt» zu halten versucht. Ob der Rotor bei dieser synchronen

[26]) Punga, E. u. M. 1912, S. 1017; Stiel, ETZ 1921, S. 1397; Andronescu, Arch. Elektrotechn. 1923, S. 453 und ETZ 1924, S. 371; Möller, Arch. Elektrotechn. 1930, S. 401; Hildebrand, J. Amer. Inst. Electr. Engr. 1930, S. 6; Dreese, J. Amer. Inst. Electr. Engr. 1930, S. 938; Kade, ETZ 1931, S. 1135 und 1163; Krondl, Bull. MFO 1931, S. 670; Lund, Arch. Elektrotechn. 1932, S. 811; Riggenbach, Brown, Boveri Mitt. 1933, S. 138.

Schleichdrehzahl hängen bleibt, oder hochläuft, bestimmen wieder das Lastmoment und die Amplitude des Parasitärmomentes. Bei gewissen Rotornutenzahlen wurden schon Amplituden des Parasitärmomentes gemessen, die das dreifache Grundfeldkippmoment erreicht haben. Unbedingt zu vermeiden sind die Nutenzahlen, die der Bedingung genügen: $Z_2 - Z_1 = 0$ oder $\pm 2p$. Die entsprechenden Schleichdrehzahlen sind $n_{schleich} = 0$, bzw. $\frac{\pm n_s}{Z_2/2p}$ (Bei den Nutenzahlen $Z_2 = Z_1$ läuft der Rotor unter Umständen überhaupt nicht an, er «klebt».)

Ausser den asynchronen und synchronen Parasitärmomenten treten noch weitere Parasitärmomente auf, die Einsattelungen in der Drehmoment-Drehzahl-Kurve bewirken:

c) *Vibrationsparasitärmomente* [27]. Im Zusammenhang mit radialen Parasitärkräften (s. Abschnitt II, 2) und den dadurch bewirkten Vibrationen bei den kritischen Rotordrehzahlen entsteht eine Einsattelung im Drehmomentverlauf (s. Fig. 8, Kurve c). Diese Erscheinung ist besonders ausgeprägt bei den ungeraden Rotornutenzahlen, die der Gleichung gehorchen: $Z_2 - Z_1 = \pm 1, \pm (2p \pm 1)$.

d) *Weitere Parasitärmomente* [28]. Zwei Statoroberfelder, die bei bestimmten Drehzahlen mit der gleichen Frequenz auf den Rotor einwirken, können zusammen ebenfalls Einsattelungen hervorrufen. Ferner sind schon Sättel durch die Wirkung von Sättigungsoberfeldern festgestellt worden.

Pendelmomente, Torsionsvibrationen, Schall.

Mit der Bildung von Einsattelungen in der Drehmoment-Drehzahl-Kurve und der Bildung von Schleichdrehzahlen sind die Wirkungen der tangentialen Parasitärkräfte aber noch nicht erledigt.

Die Werte der Drehmomente nach Fig. 8 sind zeitliche Mittelwerte; man erhält den dargestellten Verlauf bei einer statischen Messung. In Wirklichkeit ist das Drehmoment bei konstanter Drehzahl in den meisten Fällen zeitlich nicht konstant, sondern es ist Schwankungen um den dargestellten statischen Mittelwert unterworfen. Diese pendelnde Momentschwankung ist physikalisch an das Vorhandensein einer endlichen Rotornutenzahl gebunden. Man kann zeigen, dass bei einem *nutenlosen Rotor keine Pendelmomente* auftreten können. Die noch vorhandenen (und zudem schwachen) Parasitärmomente sind *rein* asynchroner Art und als solche zeitlich konstant.

Die Frequenz der Momentschwankung, also die Pendelmomentfrequenz, hängt von der Rotordrehzahl ab. Sie ist um so grösser, je mehr die Rotordrehzahl von der synchronen Drehzahl des Oberfeldmotors abweicht. Die gleiche Erscheinung zeigt sich bei jeder normalen Synchronmaschine. Ausser Tritt, pendelt deren Moment bekanntlich auch.

Die Frequenz des Pendelmomentes f_{PM} ist [29])

$$f'_{PM} = \left[\frac{Z_2}{p} \cdot y\,(1-s)\right] f_1 \quad \text{für } \nu_1 = \nu_2 \qquad (17)$$

$$f''_{PM} = \left[\frac{Z_2}{p} \cdot y\,(1-s) + 2\right] f_1 \quad \text{für } \nu_1 = -\nu_2 \qquad (18)$$

wenn ν_1 und ν_2 die beiden momentbildenden Oberfelder und

$$y = \pm 1, \pm 2, \pm 3$$

Fig. 11 d zeigt, dass die Pendelmomente Torsionsvibrationen und pulsierende Bodendrucke verursachen und damit zu Bodenschall Anlass geben. Die Richtigkeit dieser Annahme konnte am Beispiel eines 5-PS-Drehstrom-KA-Asynchronmotors mit 6 Polen und 54/102 Nuten, Nuten offen und ungeschrägt, experimentell nachgewiesen werden (Fig. 9, 13, 14, 15, 16).

Die Oszillogramme der Fig. 9 zeigen den zeitlichen Verlauf des Pendelmomentes bzw. des Bodendruckes (Kurve a) und des Schalldruckes (Kurve b). Der Motor läuft leer bei einer Netzfrequenz von ca. 70 Per./s. Der *Bodendruck* wurde durch Zwischenschaltung von *piezoelektrischen Kristallen zwischen Motorfüssen und Fundament* aufgenommen, die Ladungs- bzw. Spannungsschwankungen der Kristalle wurden in bekannter Weise

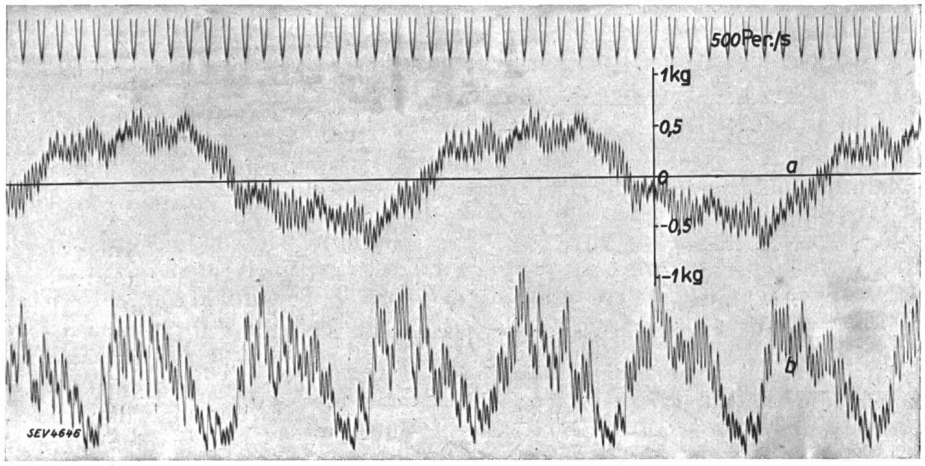

Fig. 9.
Wirkung der tangentialen Parasitärkräfte:
Auftreten eines Pendelmomentes. Zeitlicher Verlauf des *Bodendrucks* (*a*) und des *Schalldruckes* (*b*) eines leerlaufenden Drehstrom-KA-Asynchromotors 5 PS, 6 Pole, 70 Per./s, 54/102 Nuten. Bodendruck aufgenommen mit Piezoquarzen.

[27]) Fritze, Arch. Elektrotechn. 1922, S. 84.
[28]) Kade, ETZ 1931, S. 1137.
[29]) Lund, Arch. Elektrotechn. 1932, S. 823.

durch einen Gleichstromverstärker verstärkt und dem Oszillographen oder dem Analysator zugeführt.

Die langsamen Schwankungen in Kurve a haben die Frequenz der Rotordrehzahl (schlechte Auswuchtung des Rotors!), die raschen Pulsationen haben die Frequenz eines *synchronen Parasitärmomentes*. Denn die Untersuchung der Oberfelder ergibt, dass das Statorgrundfeld im Rotor ein sehr starkes Rotoroberfeld, Gl. (12a), der Ordnungszahl $\nu_2 = +35$ verursacht. Der Stator selbst erzeugt ein Wicklungs- und ein Nutenfeld, Gl. (4) und (6), der Ordnungszahl $\nu_1 = -35$. Daher muss ein starkes Pendelmoment entstehen, das bei synchronem Lauf mit einer Frequez Gl. (18)

$$f''_{PM} = \left[\frac{102}{3} \cdot 1\,(1-0) + 2\right] \cdot f_1$$

$= 2520$ Per./s bei $f_1 = 70$ Per./s
und $= 1800$ Per./s bei $f_1 = 50$ Per./s pulsiert.

Die Analyse des Oszillogrammes *a*, Fig. 9, und das Spektrogramm c der Fig. 15 ergeben in Uebereinstimmung mit obiger Rechnung dieselben Frequenzen.

Auch die Analyse des Schalldruckes des Luftschalles (Fig. 9, Kurve b) liefert bei $f_1 = 50$ Per./s als stärksten Teilton des Spektrums (Fig. 13a) den der Frequenz 1800 Per./s. Die Vermutung liegt daher nahe, dass der starke Schall dieses Motors von dem Pendelmoment verursacht wird. Fig. 16 zeigt aber, dass der starke Teilton 1800 Per./s des Luftschalles *nicht* vom Pendelmoment der Frequenz 1800, sondern von einer gleichzeitig auftretenden *radialen* «Rüttelkraft» derselben Frequenz verursacht wird! Dagegen ist das Pendelmoment fähig, Bodenschall und daher u. U. beträchtliche Fernwirkung des Schalles zu erzielen.

2. *Die radialen Parasitärkräfte* [30]).

Nach Maxwell tritt an jeder Stelle des Luftspaltes eine radiale Kraftwirkung p_r zwischen Stator und Rotor auf.

$$p_r = \frac{b^2}{8 \cdot \pi} \text{ dyn/cm}^2, \qquad (19)$$

b = Momentanwert der Induktion in Gauss.

Fritze hat zuerst gefunden, dass zwei Oberfelder ν_1 und ν_2 zusammen eine solche radiale Kräfteverteilung am Luftspaltumfang ergeben können, dass eine starke *radiale Resultante* der Kräfte p_r entsteht. Diese Resultante verursacht starke radiale Deformationen, hauptsächlich des Stators.

Ueber die Entstehung einer einseitigen Kraftverteilung orientiert Fig. 10. Ein Statoroberfeld mit $p \cdot \nu_1$ Polpaaren, und ein Rotoroberfeld mit $p \cdot \nu_2$ Polpaaren pro Luftspaltumfang der Maschine ergeben eine resultierende Feldverteilung nach Kurve 3. Diese an jeder Stelle quadriert, führt zu der Kraftverteilung nach Kurve 4 (in einem andern Massstab). Es entsteht somit eine *resultierende Kraftverteilung laut Hüllkurve 4a, bestehend aus* $p\nu_1 + p\nu_2$ Einzelwellen der radialen Zugkraft (Kurve 4).

Die resultierende Kraft nach Hüllkurve 4a bleibt räumlich nicht stehen, sondern *rotiert*, und zwar im allgemeinen bedeutend rascher als der Rotor selbst. Man erkennt dies leicht aus dem Bild: Das Kraftmaximum fällt räumlich an die Stelle des Zusammentreffens der Maxima der beiden Oberfelder. Daher muss bei jeder Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Oberfeldern (Berechnung der Relativgeschwindigkeit aus den Gleichungen 9 und 15) die Kraftverteilung am Umfang wandern. Form und Grösse der Hüllkurve bleiben dabei erhalten.

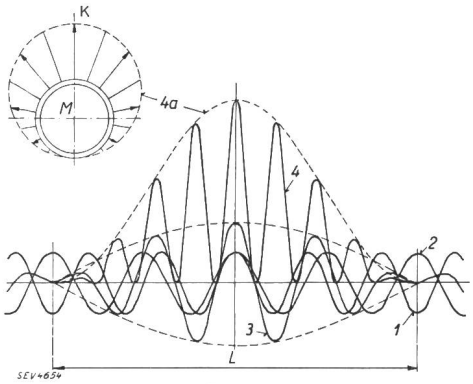

Fig. 10.
Entstehung einer einseitigen, radialen Zugkraft durch 2 Oberfelder der Polpaardifferenz 1 (schematisch).

1 Sättigung eines Statoroberfeldes mit beispielsweise 5 Polpaaren ($p\nu_2 = 5$).
2 Sättigung eines Rotoroberfeldes mit beispielsweise 4 Polpaaren ($p\nu_1 = 4$).
3 Sättigung des resultierenden Feldes.
4 Einzelkraftverteilung mit $p\nu_1 + p\nu_2 = 5 + 4 = 9$ Polpaaren pro Luftspaltumfang.
4a Hüllkurve der Kraftverteilung mit $\Delta\, p\nu = p\nu_1 - p\nu_2 = 5 - 4 = 1$ Polpaar pro Luftspaltumfang.
M Motor, *K* Kraftverteilung im Luftspalt, *L* Luftspaltumfang.

Rüttelkräfte, radiale Vibrationen, Schall.

Die einseitige, rotierende Kraft («einseitige Rüttelkraft») verursacht radiale Vibrationen. Da ihre Umlaufszahl pro Sekunde und damit die Frequenz der Vibrationen, im allgemeinen viel grösser ist als die Rotordrehzahl, so ist die akustische Wirkung der Vibrationen ganz beträchtlich. Zudem zeigt die Rechnung, dass die einseitige Kraft bedeutende Werte erreichen kann. Fritze fand z. B., dass sie bei einem 4poligen Drehstrom-Käfigankermotor mit dem ungünstigen Nutenzahlverhältnis 24/19, siebenmal grösser als das Rotorgewicht werden kann! Entsprechend stark war auch das Geheul dieses Motors. Ganz allgemein sind die stärksten aller beobachteten Heultöne auf die Wirkung dieser umlaufenden, einseitigen Zugkräfte zurückzuführen.

In Bild b der Fig. 11 ist die mechanische Wirkung einer einseitigen Rüttelkraft auf Stator und Rotor nochmals dargestellt. Die Rüttelkraft läuft um mit einer Drehzahl n_{RK}. Die Polpaarzahldiffe-

[30]) S. auch Fritze, Arch. Elektrotechn. 1921, S. 79. Chapman, J. Instn. Electr. Engr. 1922, S. 313. Hildebrand, J. Amer. Inst. electr. Engr. 1930, S. 7. Krondl, Bull. MFO 1931, S. 658. Kade, ETZ 1931, S. 1135. Kron, Electr. Engng. 1931, S. 194. Carter, Engineering 1932, S. 548 und S. 579. Riggenbach, BBC-Mitt. 1933, S. 136.

renz der rüttelkraftbildenden Oberfelder $\Delta p\nu$, also die Wellenzahl der Hüllkurve pro Maschinenumfang, sei wieder 1.

Kleinere Deformationen des Stators und des Rotors, und daher weniger Geräusch, verursachen Oberfelder mit der Polpaarzahldifferenz $\Delta p\nu = 0$ (Bild a) oder $\Delta p\nu > 1$ (Bild c). Bei $\Delta p\nu = 0$ schwingt der Stator als Nullstrahler, d. h. er vibriert wie ein Rohr mit pulsierendem Innendruck (s. Beispiele Fig. 13, 14, 15, 16). Mit wachsender Polpaarzahldifferenz

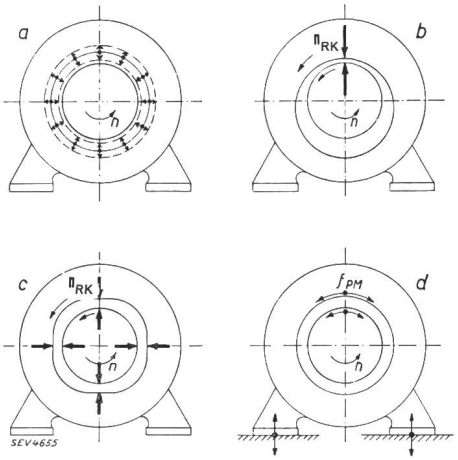

Fig. 11.
Schwingungsformen des Motors durch die Wirkung der Luftspaltkräfte.

1. *Radiale Vibration von Stator und Rotor als Folge von «Rüttelkräften»:*
   a) Radiale Kraft ($\Delta p\nu = 0$): Am Umfang gleichmässig verteilte Kraft zwischen Stator und Rotor, welche zeitlich pulsiert.
   b) Radiale Kraft ($\Delta p\nu = 1$): Einseitige Zugkraft konstanter Grösse («Rüttelkraft»), die mit der Drehzahl n_{RK} umläuft.
   c) Radiale Kraft ($\Delta p\nu = 4$): Aehnlich wie 2. 4 einseitige, umlaufende «Rüttelkräfte».
2. *Torsionsvibrationen von Stator und Rotor.*
   d) Tangentiale Kraft ($\Delta p\nu = 0$): Pulsierende Bodendrucke infolge parasitärer Drehmomente («Pendelmomente»).

nehmen Vibrationen und Geräusch ausserordentlich rasch ab. Immerhin soll bei einer grossen 24poligen Maschine selbst bei $\Delta p\nu = 6$ noch starkes Geräusch festgestellt worden sein (Krondl).

Beispiel einer einseitigen Rüttelkraft. Welche der 4 Schwingungsformen der Fig. 11 auftritt, hängt allein von dem Nutenzahlverhältnis ab. Der heutige Stand der Theorie gestattet eine sichere Vorausberechnung der Schwingungsform und daher auch die Wahl relativ günstiger Nutenzahlen. Als Beispiel einer Vorausberechnung der Schwingungsform sei in Tab. I eine Untersuchung auf rüttelkraftbildende Oberwellen der Polpaarzahldifferenz 1 durchgeführt. Die Bestimmung der Ordnungszahlen der Stator- und der Rotoroberfelder eines 4poligen Drehstrom-KA-Motors mit 36/45 Nuten zeigt, dass hier tatsächlich Rüttelkräfte der gefährlichsten Schwingungsform b der Fig. 11 auftreten. Es ist zu erwarten, dass im Leerlauf hauptsächlich die Oberfelder $p\nu = -34/+35$ und bei Belastung besonders die Oberfelder $p\nu = -46/+47$ rüttelkraft- und schallbildend wirken. Die Drehzahl der Rüttelkraft n_{RK} der ersten beiden Felder berechnet sich nach Fritze [31]) bei Leerlauf des Motors:

Das Statornutenfeld ν_{1N} und das Statorwicklungsfeld ν_{1W} derselben Ordnungszahl -17 ($p\nu_1 = -34$) dreht, bezogen auf den Stator, mit der Drehzahl:

$$n_{\nu_1} = \frac{n_s}{\nu_1} = \frac{1500}{-17} \cong -88 \text{ U/min.}$$

Das Rotoroberfeld $\nu_2 = +35/2 = +17\,{}^1/_2$ dreht relativ zu ν_1 mit der Drehzahl

$$n_{\nu_2} = -\frac{n_s}{\nu_1} + \frac{n_s - n}{\nu_2} + n. \quad n = \text{Rotordrehzahl.}$$

$$n_{\nu_2} \cong 1588 \text{ U/min bei Leerlauf: } n = n_s$$

Die Rüttelkraft läuft mit konstanter Grösse im Sinne des Feldes höherer Ordnungszahl um. Ihre Umlaufzahl n_{RK} ist gleich der Relativdrehzahl der Felder multipliziert mit der Polpaarzahl des Feldes höherer Ordnung.

Bestimmung der Rüttelkraft-bildenden Oberwellen der Wicklung und der Nutung

im Stator und im Rotor eines Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotors 3 PS, 4 Pole, 50 Per./s, 36/45 Nuten. Statorwicklung symmetrisch. Untersuchung auf Stator- und Rotoroberfelder mit der Polpaarzahldifferenz: $\Delta p\nu = 1$.

——— ergibt im Schallspektrum einen starken Teilton.
——— » » » » schwachen »
- - - - - » » » keinen Teilton.

Tabelle I.

1. Statoroberfelder.

1a. Wicklungsgrund- und Oberfelder.

$p\nu_{1W} = (2mx + 1)p \qquad x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots$

= 2	−10	14	−22	26	−34	38
−46	50	−58	62	−70	74	−82
86	−94	98	−106	110	−118	122
−130	134	−142	146	−154	158	−166

1b. Nutungsgrund- und Oberfelder.

$p\nu_{1N} = \left(\frac{z_1}{p}x + 1\right)p \qquad x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots$

= 2	−34	38	−70	74	−106	110
−142	146	−178	182			

2. Rotoroberfelder durch das Statorgrundfeld und die Statoroberfelder.

$p\nu_2 = \left(\frac{z_2}{p}y + \nu_1\right)p \qquad \nu_1 = +1, -5, +7, -11, +13, \ldots$
$y = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots$

$p\nu_{2_{+1}}$ =	2	−43	47	−88	92	−133	137
$p\nu_{2_{-5}}$ =	−10	35	−55	80	−100	125	−145
$p\nu_{2_{+7}}$ =	14	−31	59	−76	104	−121	149
$p\nu_{2_{-11}}$ =	−22	23	−67	68	−112	113	−157
$p\nu_{2_{+13}}$ =	26	−19	71	−64	116	−109	161

[31]) Arch. Elektrotechn. 1921, S. 84.

Bei Leerlauf ist $n_{RK} = 1588 \cdot 2 \cdot 17\,^1/_2 = +55\,700$ U/min, bezogen auf ν_1,
und $n_{RK} = 55\,700 - 88 = 55\,612$ U/min, bezogen auf den Stator.

Die Frequenz der einseitigen Rüttelkraft, der Vibrationen und des Schalles ist somit

$$f_{RK} = 55\,612/60 = \underline{930\ Per./s.}$$

Analog berechnet sich die Rüttelkraftfrequenz der Felder $\nu_1 = -46/2$, $\nu_2 = +47/2$ bei Leerlauf zu

$$f_{RK} = \underline{1225\ Per./s.}$$

In Uebereinstimmung mit dieser Rechnung ergibt das experimentell aufgenommene Spektrogramm des Schalles (Fig. 12) tatsächlich starke Teiltöne dieser Frequenzen (Ton 930 : Ton 1225 :). Die Spektrogramme zeigen auch, dass man zur Bestimmung eines Motorgeräusches nicht nur das Leerlaufgeräusch, sondern auch das Vollastgeräusch messen muss. Denn das Leerlaufgeräusch lässt noch keineswegs Schlüsse über die Stärke des Last- und Anlaufgeräuch zu [32]).

Beispiel einer gleichmässig verteilten Rüttelkraft. Die *ungeraden* Rotornutenzahlen verursachen mit wenigen Ausnahmen einseitige Rüttelkräfte, also

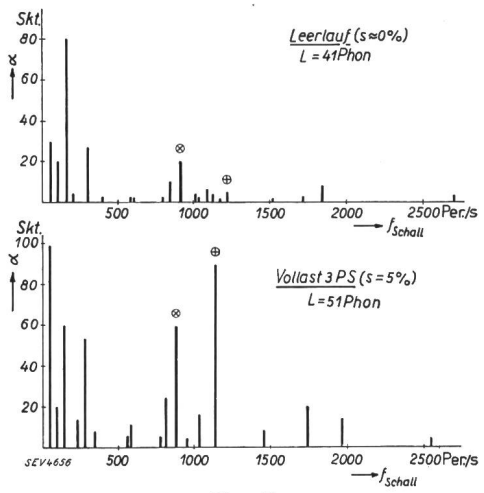

Fig. 12.
Analyse des Spektrums des magnetisch erzeugten Luftschalles eines Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotors
(3 PS, 4 Pole, 50 Per./s, 36/45 Nuten, 10 % übersättigt, bei Leerlauf und bei Vollast (5 % Schlupf). Schallwirkung der radialen Rüttelkräfte der Wicklungs- und Nutenoberfelder und Schallwirkung der Ummagnetisierung.
Aufnahme im stark gedämpften Raum mit dem Suchtonanalysator (Abschnitt A, 3).

die Schwingungsform b der Fig. 11. Ausnahmen bilden nur diejenigen Rotornutenzahlen, die, geteilt durch die Polpaarzahl des Grundfeldes p, eine ganze ungerade Zahl ergeben (z. B. bei $p = 3$; $Z_2 = 33$).

[32]) Für eine ungefähre Beurteilung des Lastgeräusches genügt in der Praxis meist die Feststellung des Anlaufgeräusches, wenn die Anlaufperiode des Motors durch eine aufgesetzte, möglichst schwere Riemenscheibe oder dgl. zeitlich verlängert wird.

Die *geraden* Rotornutenzahlen haben bei symmetrischen Statorwicklungen andere Schwingungsformen zur Folge, die im allgemeinen weniger stark geräuschbildend sind (Bilder a, c, d, Fig. 11). Trotzdem gibt es auch unter diesen sehr ungünstige Nutenzahlen. In den Beispielen Fig. 13 bis 16 wird die Rotornutenzahl 102 eines 6poligen 5-PS-KA-Motors mit 54 Statornuten untersucht. Gleichzeitig

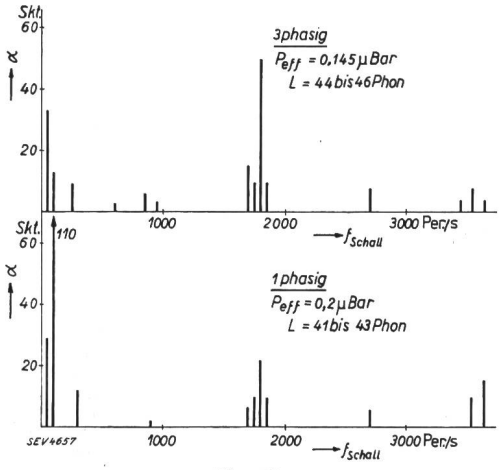

Fig. 13.
Spektrum des magnetisch erzeugten Luftschalles eines leerlaufenden Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotors
(5 PS, 6 Pole, 50 Per./s, 54/102 Nuten) bei dreiphasigem- und einphasigem Betrieb (ohne Hilfsphase und bei gleicher Luftspaltsättigung)
Aufnahme im stark gedämpften Raum.
Mikrophone: 50 cm vom Motor entfernt.

mit einem Pendelmoment (s. Abschnitt II, 1b) treten radiale Vibrationen der Schwingungsform a der Fig. 11 auf. Der so erzeugte Luftschall ist selbst bei Leerlauf beträchtlich (s. Fig. 13). Die Analyse des Luftschalles ergibt einen starken Teilton der Frequenz 1800 Per./s bei $f_1 = 50$. Dieser wird erzeugt durch die Oberfelder der Ordnungszahlen $\nu_1 = -35$ und $\nu_2 = +35$ (s. Fig. 15a und 15d), welche die Rüttelkraft der Frequenz 1800 verursachen. Die Rüttelkraft ist im Oszillogramm Fig. 14a und b und im Teilspektrogramm Fig. 15b sichtbar. Sie wurde mit Hilfe von Piezoquarzen aufgenommen. Der Versuchsaufbau wurde so getroffen, dass die Quarze zwischen Statorrücken und ein starres Fundament geschaltet wurden, so dass das gesamte Motorgewicht im wesentlichen von den Quarzen getragen wurde. In Fig. 14 kommen ausser dieser Rüttelkraft auch noch langsame Schwankungen der Frequenz $16\,^2/_3$ (Frequenz der Rotordrehzahl bei $f_1 = 50$), ferner noch Schwankungen der Frequenz 100, besonders bei einphasigem Betrieb, zur Geltung.

Dass der Luftschall in der Hauptsache durch die *radialen* und *nicht* durch die *tangentialen* Vibrationen erzeugt wird, kann mit Fig. 16 bewiesen werden: Es wurden Schalldruck, Lautstärke, radiale und tangentiale Parasitärkräfte des leerlaufenden Motors bei variabler Netzfrequenz gemessen. Der unregelmässige Verlauf der Kurven mit der Rotordrehzahl entsteht durch die Wirkung mechanischer

Resonanzen. Mit deren Hilfe gelang es, die Einflüsse der radialen und der tangentialen Kräfte auf den Luftschall zu trennen.

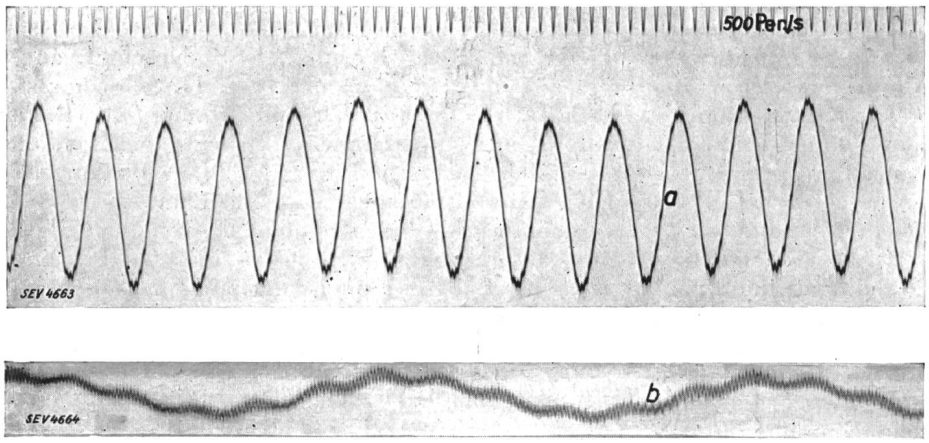

Fig. 14.
Wirkung der radialen Parasitärkräfte:
Auftreten einer gleichmässig verteilten Rüttelkraft (Figur 11a) infolge zweier Felder gleicher Polpaarzahl ($p_{\nu 1} = 3 \cdot (-35)$, $p_{\nu 2} = 3 \cdot (+35)$ im Zusammenhang mit dem Auftreten eines Pendelmomentes. Leerlaufender Drehstorm-Käfiganker-Asynchronmotor 5 PS, 6 Pole, 50 Per./s, 54/102 Nuten.
a) einphasiger Betrieb, Druckmasstab: 1 cm = 1 kg.
b) dreiphasiger Betrieb, Druckmasstab: 1 cm = 0,6 kg.
Aufnahme mit Piezoquarzen, die zwischen Statorrücken und *starres* Fundament geschaltet wurden. Motorfüsse auf *elastisches* Fundament aufgestellt.

Der störendste Teilton des Schallspektrums (s. Fig. 13), der starke Ton der Frequenz 1800 hat laut Kurve 2 der Fig. 16 bei der Rotordrehzahl 1000 U/min eine Spitze. Auch die Kurve der gesamten Lautstärke (Kurve 3) hat bei dieser Rotordrehzahl eine Spitze. Diese Spitze in der Lautstärkenkurve rührt von der starken Ohrempfindungsbewertung des Teiltons 1800 her. Nun stellt sich die Frage, ob dieser Teilton 1800 — und damit der grösste Teil des

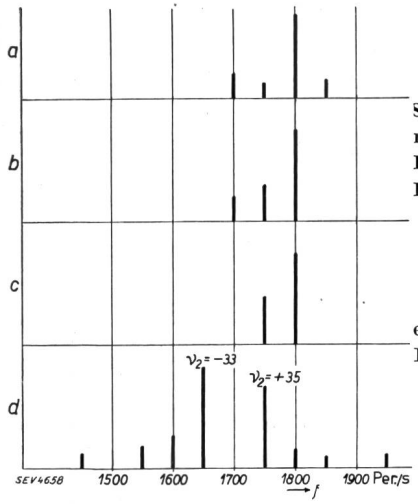

Fig. 15.
Spektren der dominierenden Teiltöne des Luftschalles (*a*) der Rüttelkräfte (*b*) der Pendelmomente (*c*) und der Rotoroberfelder (*d*),
aufgenommen an einem leerlaufenden Drehstrom-KA-Asynchronmotor 5 PS, 6 Pole, 50 Per./s, 54/102 Nuten.

Luftschalles überhaupt — von den radialen Vibrationen der Frequenz 1800 (Fig. 15b) oder von den tangentialen Vibrationen der Frequenz 1800 (Fig. 15c) herrührt.

[33]) Aufnahme der tangentialen und der radialen Parasitärkräfte mit Hilfe von Piezoquarzen.

Fig. 16 [33]) zeigt nun, dass bei der Rotordrehzahl 1000 U/min die *radialen* Vibrationen (Kurve 5) eine ausgeprägte Spitze haben, nicht aber die tangentialen Vibrationen (Kurve 7). Daraus muss der Schluss gezogen werden, dass die *radialen* Vibrationen und damit in erster Linie die *Rüttelkräfte* den Luftschall erzeugen. Die tangentialen Vibrationen sind zwar in beteutender Stärke vorhanden (s. Fig. 9a), der Bodenschall, den sie hervorrufen könnten, wurde aber durch geeignete elastische Aufstellung des Motors vermieden.

Die in Fig. 16 so stark auffallende Spitze des totalen Bodendruckverlaufes (Kurve 6) hat keinen nennenswerten Einfluss auf den Luftschall. Denn es handelt sich dabei im wesentlichen nur um eine Schwankung der Frequenz 16 2/3 Per./s (Frequenz der Rotordrehzahl). Diese Frequenz wurde vom Ohr nur als schwaches Rütteln wahrgenommen.

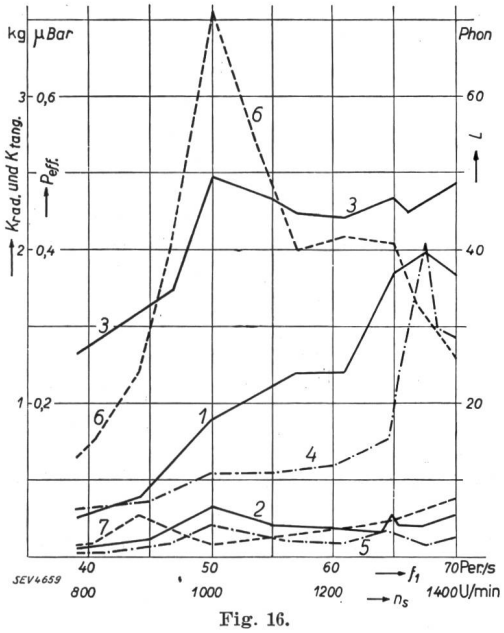

Fig. 16.
Verlauf des Schalldruckes, der Lautstärke, der radialen und tangentialen Parasitärkräfte in Funktion der Netzfrequenz f_1.
Aufnahme der radialen und tangentialen Kräfte mit Piezoquarzen und mit dem Analysator. Leerlaufender Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotor: 5 PS, 6 Pole, 54/102 Nuten.
1 Gesamtschalldruck des Luftschalles P_{eff} (μ Bar).
2 Schalldruck des Luftschallteiltons $f = 1800$ Per./s bei $f_1 = 50$ Per./s.
3 Lautstärke des Luftschalles L (Phon).
4 Totale radiale (Rüttel-) Kraft an einer Stelle des Statorrückens (K_{rad} in kg maximaler Schwankung).
5 Rüttelkraft der Frequenz: $f_{R.K.} = 1800$ Per./s bei $f_1 = 50$ Per./s (K_{rad} in kg).
6 Totaler Bodendruck auf zwei Motorfüsse (kg maximaler Schwankung) als Folge tangentialer Kräfte (K_{tang}).
7 Pendelmoment der Frequenz $f_{P.M.} = 1800$ Per./s bei $f_1 = 50$ Per./s, aus der Bodendruckschwankung analysiert K_{tang}).

3. *Lokale parasitäre Kraftwirkungen.*

Die bisherigen Untersuchungen behandelten die *resultierenden* Kraftwirkungen zwischen Stator und Rotor. Es zeigte sich dabei, dass die resultierenden Kraftwirkungen bei gewissen (ungünstigen) Nutenzahlen entstehen. Wählt man günstige Nutenzahlen, so lassen sich die stärksten *resultierenden* Kraftwirkungen vermeiden, die *lokalen* Kraftwirkungen bleiben aber bestehen. Daher können z. B. die Zähne auch bei günstigen Nutenzahlen starken tangentialen und radialen Kräften ausgesetzt sein.

Einzelwirkungen eines Oberfeldes, Magnetostriktion, Ummagnetisierungstöne. Bei der Analyse des Schallspektrums elektrischer Maschinen findet man oft starke, magnetisch erzeugte Teiltöne, die sich frequenzgemäss weder unter die besprochenen Pendelmoment- noch Rüttelkrafttöne einordnen lassen.

a) Bekannt sind die elektrodynamisch und magnetisch erzeugten Kräfte, welche Töne der *doppelten* Feldfrequenz ergeben, z. B. den starken Ton 100 Per./s bei der Grundfrequenz 50 Per./s.

b) Ausserdem findet man in den Schallspektren Teiltöne, deren Frequenzen mit den Frequenzen der Oberfelder zusammenfallen, die also nur *einfache* Feldfrequenz haben (s. Gleichungen 10, 13, 14; s. auch Fritze, Arch. Elektrotechn. 1921, S. 87). Ferner findet man Kombinationstöne und Modulationstöne (Töne von Oberfeldern, die z. B. durch die Grundfeldfrequenz moduliert sind). Die Entstehung der Töne nach b) kann z. B. als elektrodynamische oder magnetische Einzelkraftwirkung eines Oberfeldes mit dem Grundstrom, bzw. dem Grundfeld erklärt werden.

c) Zu den Einzelkraftwirkungen eines Oberfeldes gehören auch die «*Ummagnetisierungstöne*» durch *Magnetostriktion.* Die Frequenzen dieser Töne sind gleich der *doppelten* Feldfrequenz. Zudem treten noch höhere Harmonische auf. Ueber die Schallwirkung magnetostriktiver Kräfte im Zusammenhang mit Maschinengeräusch ist quantitativ aber noch nichts bekannt.

III. Vibrationen.

Alle parasitären Kräfte ergeben Vibrationen der *Einzelteile* der Maschine, besonders der Zähne.

Wenn die Kräfte sich am Umfang der Maschine radial oder tangential zu einer resultierenden Kraft (Rüttelkraft oder Pendelmoment) zusammensetzen, dann schwingen Stator und Rotor auch als *Ganzes.*

Die Vibrationen sind besonders stark, wenn die Frequenz der anregenden Kräfte gleich der Frequenz der als Reaktion wirkenden elastischen Kräfte und Massenkräfte ist, d. h, wenn mechanische Resonanzen auftreten. Diese Tatsache bringt grosse Unsicherheit in die Vorausberechnung des magnetisch erzeugten Schalles.

IV. Schall.

1. *Luftschall.*

Die elektrischen Maschinen sind gute Schallstrahler. Sie strahlen um so besser, je grösser das Verhältnis Maschinenumfang zu Schallwellenlänge ist und je niedriger die Ordnungszahl des akustischen Strahlers ist [34]). Daher sind die Rüttelkraft-Schwingungsformen a und b der Fig. 11 besonders strahlungsfähig.

2. *Bodenschall.*

Die Schallfortpflanzung als Bodenschall, angeregt durch Pendelmomente (Fig. 11, Schwingungsform d), und durch pulsierende Momente (z. B. der Einphasen-Asynchronmotoren) hängt ab von der elastischen Aufstellung der Maschine. Für gute Bodenschallisolation muss die Elastizität zo gewählt werden, dass die Eigenfrequenz des Systems: Elastizität-Motormasse mindestens 5- bis 10mal kleiner ist als die tiefste Frequenz der zu isolierenden aufgedrückten Kräfte [35]).

V. Massnahmen für die Schallminderung in der Praxis.

Die rein akustischen Massnahmen der Schallisolation sind meist teuer und oft nicht ausreichend. Der Schall wird daher besser schon auf der elektrischen Seite bekämpft. Es werden in der Praxis folgende Massnahmen ergriffen:

1. *Anwendung geeigneter Nutenzahlen in Stator und Rotor.* Es ist bekannt, dass es günstige und ungünstige Nutenzahlen gibt. Man weiss heute, dass bei Käfigankermotoren die meisten ungeraden Ro-

Die 3 Regeln für die Wahl der Nutenzahlen zur Vermeidung der stärksten Rüttelkräfte und Pendelmomente bei Käfigankermotoren
(nach Sequenz). Tabelle II.

1. $z_2 \leqq \frac{5}{4}\,[z_1 + y \cdot p]$ $\quad y = 1$ und für Umkehrbetrieb $y = 0$,

2. $\frac{z_2}{2p} \neq \left[3g \text{ od.} (3g+1) \text{ od.} \left(g + 1 \pm \frac{1}{2p}\right)\right] \quad g = 1, 2, 3 \ldots$

3. $x_1 \cdot z_1 - x_2 \cdot z_2 \neq [0 \text{ oder } \pm 2p] \mp y$

$y_{(x_1,\, x_2 = 1 \text{ oder } 2)} = 0;$

$y_{(x_1 = x_2 = 1)} = 1;$

$y_{(x_1 = x_2 = 0{,}5)} = 0.$

p	z_1	z_2 (Rotornutenzahlen)										
1	18	10	16	22								
1	24	10	16	22	28							
1	36	10	16	22	28	46						
2	24	14	18	30								
2	36	10	14	22	26	30	42	46				
2	48	10	14	18	20	30	32	34	38	42	54	58
3	36	14	16	20	22	26	27	28	32	34	38	40
		44	45	46								
3	54	14	15	16	20	21	22	26	27	28	32	33
		34	38	39	40	44	45	46	50	52	56	58
		62	63	64	68	69						
3	72	14	15	16	20	21	22	26	27	28	30	32
		34	38	40	44	45	46	48	50	51	52	56
		57	58	62	63	64	68	70	74	76	80	81
		82	86	87	88	92	93					

[34]) S. Krondl, Bericht für die «Conférence des grands réseaux» 1933.

[35]) S. auch Electr. Engng. Bd. 50 (1931), S. 347.

tornutenzahlen sehr stark geräuschbildend sind. Man weiss auch, dass die geraden Rotornutenzahlen im allgemeinen einen ruhigeren Betrieb ergeben, dass sie aber im Anlauf mehr oder weniger stark von parasitären Drehmomenten heimgesucht werden. Vom prinzipiellen Standpunkt aus ist daher jede Nutenzahl schlecht.

Die Literatur über die Wahl der Nutenzahlen ist sehr gross. Die Vorschriften der verschiedenen Autoren weichen zum Teil voneinander ab. Eine Zusammenfassung aller, auch der neuesten Arbeiten, ergibt [36]) 3 Regeln für die Wahl der günstigsten Nutenzahlen. In Tabelle II sind diejenigen Rotornutenzahlen zusammengestellt, bei denen wenigstens die stärksten Rüttelkräfte und Pendelmomente nicht in Erscheinung treten. Auf einen Teil der Regel 3 konnte bei zweipoligen Maschinen keine Rücksicht genommen werden, sonst hätten sich überhaupt keine Rotornutenzahlen ergeben.

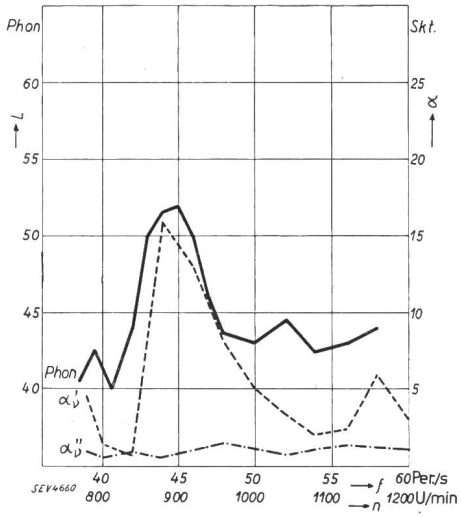

Fig. 17.

Wirkung mechanischer Resonanzen auf den Verlauf der Lautstärke L (Phon) und des Schalldruckes einzelner, stark störender Teiltöne des Spektrums.

(α Skalenteile des Analysatorinstrumentes) eines Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotors 5 PS, 6 Pole, 54/33 Nuten. Aufnahmen bei Leerlauf und bei variabler Netzfrequenz im stark gedämpften Raum mit dem Siemens-Phonmesser, dem Siemens-Schalldruckmesser und mit dem Suchtonanalysator (Abschnitt A, 3).

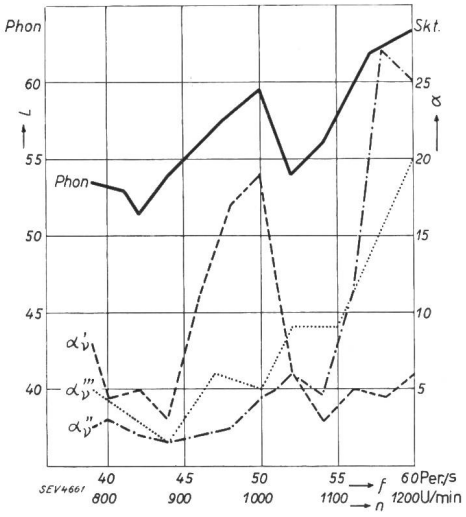

Fig. 18.

Wirkung mechanischer Resonanzen auf den Verlauf der Lautstärke L (Phon) und des Schalldruckes einzelner, stark störender Teiltöne des Spektrums.

(α Skalenteile des Analysatorinstrumentes) eines Drehstrom-Käfiganker-Asynchronmotors 5 PS, 6 Pole, 54/32 Nuten. Aufnahmen bei Leerlauf und bei variabler Netzfrequenz im stark gedämpften Raum mit dem Siemens-Phonmesser, dem Siemens-Schalldruckmesser und mit dem Suchtonanalysator (Abschnitt A, 3).

Die in der Tabelle II angegebenen Nutenzahlen sind keineswegs gleichwertig. Wir haben z. Beispiel festgestellt, dass bei 6poligen Maschinen ($p = 3$) mit 54 Statornuten die Rotornutenzahl 33 der Zahl 32 überlegen ist. Im weitern fällt auf, dass die bei 4poligen Maschinen mit 36 Statornuten von der schweizerischen Praxis bevorzugte Rotornutenzahl 44 in der Tabelle nicht angeführt ist.

2. *Symmetrische Wicklungen, keine Fehlstäbe.*

3. *Reduktion der Luftspaltsättigung.* Diese Massnahme geht sehr auf Kosten der Materialausnützung.

4. *Grosser Luftspalt.* Diese Massnahme erhöht den Blindstrom.

5. *Geschlossene Rotornuten.* Nur die Nutenoberfelder, nicht aber die Wicklungsoberfelder werden nennenswert reduziert (s. Fig. 5). Zudem wird der Leistungsfaktor verringert.

6. *Optimale Nutenverschrägung.* Diese Massnahme ergibt eine starke Reduktion der induzierten Spannung *einer* Oberwelle und deren Harmonischen (Fig. 7). Daher wird auch die resultierende Kraftwirkung dieser Oberwelle auf Stator und Rotor vermindert. Lokale Kraftwirkungen sind aber trotzdem möglich, besonders bei grosser axialer Eisenlänge. Die Schwingungsform ist dann ähnlich wie bei einem Rotor, der zwei nicht ausgewuchtete Gewichte mit verschiedenen axialen und verschiedenen Winkelpositionen trägt [37]).. In diesem Sinne wirkt eine Pfeilformschrägung besser [38]).

Wir haben festgestellt, dass die optimale Schrägung genau eingehalten werden muss und dass gleichzeitig die Bleche stark gepresst werden müssen. Die Stäbe der Käfiganker sollten ferner vom Blechkörper isoliert werden [39]).

Die Nachteile der Nutenschrägung bestehen darin, dass das Kippmoment der Maschine herabgesetzt wird und dass nicht alle Oberfelder reduziert werden.

7. *Doppelrotor nach Lund* [40]) wirkt ähnlich wie die unter 6) aufgeführte Massnahme.

8. *Schrittverkürzung der Statorwicklung* reduziert gewisse Statoroberfelder, verkleinert aber auch den Wicklungsfaktor.

9. *Mechanische Massnahmen:* starres Gehäuse um den Statorblechrücken, starke Welle, gut ausgewuchteter Rotor, Verwendung von Gleitlagern etc. (s. Lit.).

Durch die Kombination dieser Massnahmen erzielt man heute «praktisch geräuschlosen» Gang, besonders bei kleinen Maschinen im Leerlauf und

[36]) Sequenz, E. u. M. 1932, S. 428, und ETZ 1934, S. 269.

[37]) S. Hildebrand, J. Amer. Instn. electr. Engr. 1930, S. 7.

[38]) «Herringbone-skewing», Den Hartog, Mechanical Vibrations, S. 267.

[39]) Krondl, Bull. MFO 1931, S. 675.

[40]) Arch. Elektrotechn. 1932, S. 826.

mehr oder weniger auch im Anlauf und bei Belastung. Gleichzeitig werden aber die Wirtschaftlichkeit und zum Teil auch die elektrischen Daten des Motors ungünstig beeinflusst. Zudem kann der Zufall noch etwas mitspielen. Es kann durch irgendeine scheinbar harmlose Oberwelle eine zufällige mechanische Resonanz des Stators, des Rotors oder eines Einzelteiles angeregt werden, so dass trotzdem Schall entsteht.

VI. Wirkung mechanischer Resonanzen.

Bei der Untersuchung der Lautstärke einer grössern Zahl von Motoren hat sich gezeigt, dass bei Leerlauf der Verlauf der Kurve Lautstärke-Drehzahl (Netzfrequenz) meist keine sehr grossen Unregelmässigkeiten aufweist. Ausnahmen sind aber durchaus möglich. Fig. 17 und 18 zeigen z. B., dass zufällige mechanische Resonanzen der Maschinenteile eine erhebliche Störung in der Lautstärke-Drehzahl-Verlauf bringen können. Gemessen wurde ein 6poliger 5-PS-Drehstromasynchronmotor mit 54 Nuten im Stator. Es wurden in demselben Stator bei den gleichen elektrischen und akustischen Bedingungen zwei gleichgebaute Käfiganker untersucht, ein Rotor mit 33 Nuten (Fig. 17), Nuten geschlossen, ein anderer Rotor mit 32 Nuten (Fig. 18), Nuten offen. Die Bilder zeigen Lautstärke und Schalldrucke der am stärksten störenden Teiltöne des Spektrums bei verschiedenen Drehzahlen (Netzfrequenzen) im Leerlauf. Die Messungen wurden bei um 30 % erhöhter Netzspannung durchgeführt. Zum Vergleich der Güte der Nutenzahlen 33 und 32 wurden später die Nuten des Rotors 33 geöffnet, wobei die Lautstärke im Durchschnitt um etwa 5 Phon stieg. Messfehler durch die Wirkung stehender Wellen konnten bei diesen Aufnahmen klein gehalten werden.

Die Lautstärkekurve Fig. 17 zeigt, dass ein glücklicher Zufall bei der Normalfrequenz 50 Per./s einen relativ ruhigen Betrieb bringt. Dagegen ergibt die Netzfrequenz 50 beim Motor nach Fig. 18 eine Spitze in der Lautstärkenkurve. Für diesen Motor wäre eine Normalfrequenz von 52 oder 42 Per./s. offensichtlich günstiger.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es beim Bau absolut geräuschloser Motoren nicht genügt, nur die stärksten elektrischen Schallursachen zu beseitigen. Man ist gezwungen, entweder die Zufälligkeiten mechanischer Resonanzen zu beseitigen, oder neben den starken elektrischen Schallursachen auch die schwachen, d. h. auch die schwächsten der pulsierenden Parasitärkräfte zu unterdrücken. Der erste Weg scheint nicht gut gangbar zu sein, weil das mechanische Schwingungsgebilde elektrischer Maschinen zu kompliziert ist. Der zweite Weg indessen führt leichter zum Ziel. Im nächsten Abschnitt wird eine Lösung besprochen werden, die auf diesem Weg Geräuschfreiheit bringt. *(Fortsetzung folgt.)*

Ueber Strommessung mit Braunschen Kathodenstrahlröhren.

Von *Wolfgang Holzer*, Wien.

621.317.31:621.317.754

Der Autor empfiehlt zur Messung von zeitlich veränderlichen Strömen die Verwendung von Kathodenstrahlröhren, deren Strahl durch das magnetische Feld des Leiters abgelenkt wird. Die Stromempfindlichkeit des Verfahrens wird angegeben. Es zeigt sich, dass handelsübliche gasgefüllte Kathodenstrahlrohre (abgeschmolzene Glastype) gut geeignet sind. Vorteile des Verfahrens: In die Leitung muss kein Nebenschluss gelegt werden. Das Verfahren ist billig. Während man beim Schleifenoszillographen die Ueberlastungsgefahr oft befürchtet, ist diese hier völlig vermieden.

Pour la mesure des courants d'intensité variable dans le temps, l'auteur recommande d'utiliser des tubes à rayons cathodiques, dont le faisceau est dévié par le champ magnétique du conducteur. L'étude de la sensibilité de cette méthode montre que les tubes courants à remplissage gazeux en vente dans le commerce (tubes en verre fermés) se prêtent très bien à ces mesures. Avantages de cette méthode: aucune dérivation ne doit être insérée dans le conducteur; les frais sont peu élevés; le danger d'une surcharge, que l'on craint avec l'oscillographe à boucle, est complètement banni.

Schon Braun [1]) benützte den Kathodenstrahloszillographen als Messgerät für veränderliche Ströme. Ebert [2]) ging zur Spannungsmessung über; seither wurde dieses Verfahren [3]) fast ausschliesslich benutzt. Matthias [4]), Borries und Ruska gaben eine Strommeßschleife an, welche im Vakuum von Hochleistungskathodenstrahloszillographen liegt. Da nun die Bedienung, der Preis, das Transportgewicht und der Raumbedarf bei Hochleistungskathodenstrahloszillographen (Metalltype mit dauernd laufender Hochvakuumpumpe und hoher Erregerspannung) einer verbreiteten Anwendung in Prüffeld und Anlage hinderlich sind, schien es von Interesse, die Eignung von Braunschen Kathodenstrahlröhren [5]) (Glastype, abgeschmolzen, niedere Erregerspannung) für diese Zwecke zu untersuchen. Durch die Wahl dieser speziellen Oszillographentype fallen die oben genannten Hindernisse weg, da deren Preis, Transportgewicht und Raumbedarf klein, die Bedienung einfach ist.

Oft hat man in Prüffeld oder bei Netzuntersuchungen Ströme der Grösse 25 bis 10 000 A zu oszillographieren. Es wurde versucht, die Ablenkung eines Elektronenstrahlers durch das magnetische Feld des Leiters für diese Messzwecke auszunutzen [6]). Insbesonders wurde angestrebt, Oszillo-

[1]) F. Braun, Wied. Ann. Bd. 60 (1897), S. 552.
[2]) H. Ebert, Wied. Ann. Bd. 64 (1898), S. 240.
[3]) E. Alberti, Braunsche Kathodenstrahlröhren. Berlin, Springer, 1932.
[4]) A. Matthias, B. v. Borries u. E. Ruska, Z. Physik, Bd. 85 (1933), S. 336.
[5]) M. v. Ardenne, Die Kathodenstrahlröhre. Berlin, Springer, 1933.
[6]) E. Brüche, Z. techn. Phys. Bd. 12 (1931), S. 94; Z. Astrophysik, Bd. 2 (1931), S. 30.