**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
**Band:** 54 (1963)
**Heft:** 12

**Artikel:** Entwicklungstendenzen im Bau grosser Drehstrom-Motoren
**Autor:** Abegg, K.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-916491

**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:** 02.07.2025

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

# Entwicklungstendenzen im Bau grosser Drehstrom-Motoren

Von *K. Abegg*, Zürich

621.313.333.025.3

*Die allgemeine Tendenz steigender Einheitsleistungen im Bau elektrischer Maschinen führte auch bei den grossen Drehstrommotoren zu Fortschritten, welche es gestatten, die Nachfrage nach betriebssicheren Motoren grosser Leistung zu decken. Nach einer kurzen Einleitung über Einsatzbereich und Motorarten wird ein Teil der beim Bau grosser Motoren auftretenden Konstruktions- und Fabrikations-Probleme behandelt. Es wird darauf hingewiesen, dass sich im untersuchten Leistungsbereich über 500 kW die Schweisskonstruktionen immer mehr durchsetzen und die Möglichkeit schaffen, den vielfältigen Anforderungen bezüglich Betrieb, Bauformen und Schutzarten Rechnung zu tragen.*

*In einem besonderen Abschnitt wird versucht, den gegenwärtigen Stand und die Entwicklungsmöglichkeiten auf dem wichtigen Gebiet der Wicklungstechnik darzulegen. Aufbau und Isolation der Wicklungen in Statoren und Rotoren bestimmen massgebend die Betriebssicherheit und Lebensdauer grosser Motoren. Mit Nachdruck wird auf das Problem der Serieleiterisolationen hingewiesen, deren Qualität bei Spulenwicklungen, wie sie bei grossen Hochspannungsmotoren vorherrschen, besondere Bedeutung zukommt.*

*La tendance générale de réaliser des puissances unitaires de plus en plus élevées a conduit également à des progrès sensibles dans la construction des grands moteurs triphasés, permettant ainsi de satisfaire aux demandes de puissants moteurs d'un fonctionnement sûr. Après une brève introduction sur le domaine d'utilisation et les genres de moteurs, l'auteur traite d'une partie des problèmes que soulèvent la construction et la fabrication de moteurs de grande puissance. Pour des puissances considérées de plus de 500 kW, ce sont les constructions soudées qui sont généralement adoptées, car elles permettent de tenir compte des multiples exigences relatives au service, aux formes de construction et aux modes de protection.*

*L'auteur indique ensuite l'état actuel et les possibilités de développement dans l'important domaine du bobinage. La disposition et l'isolement des enroulements statoriques et rotoriques ont une grande importance pour la sécurité de fonctionnement et la durée de vie des grands moteurs. L'auteur insiste notamment sur le problème des isolations de conducteurs en série, dont la qualité est essentielle pour les enroulements bobinés, qui sont les plus employés pour les moteurs de grande puissance à haute tension.*

Die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der grossen Drehstrom-Motoren wurden in den letzten Jahren massgebend durch den steigenden Leistungsbedarf der elektrischen Antriebe beeinflusst. Die Forderung nach grösseren Einheitsleistungen führte dazu, dass Neuentwicklungen im elektrischen Grossmaschinenbau laufend auch für die Herstellung grosser Motoren ausgewertet werden mussten. Im folgenden wird ein Überblick über einen Teil der dabei auftretenden Probleme gegeben und versucht, die allgemeinen Entwicklungstendenzen herauszuschälen.

## 1. Einsatzbereich und Motor-Arten

Drehstrom-Motoren grosser Leistung werden heute vor allem für die Hilfsbetriebe in thermischen Kraftwerken, für den Einsatz im Bergbau, in Pumpspeicherwerken und Trinkwasserversorgungen sowie in immer grösserem Ausmass für Antriebe in der chemischen, Zement- und Metall-Industrie verwendet. Seit einigen Jahren nimmt auch der Bedarf an grossen Motoren für Pumpwerke zur Erdölverteilung (Pipelines) und für die Hilfsbetriebe in Atomkraftwerken ständig zu.

Neben industriellen Antrieben werden die Motoren vorwiegend für Gebläse, Kompressoren und Pumpen eingesetzt. Dabei sind grundsätzlich zu unterscheiden:

a) Antriebe mit konstanter, angenähert konstanter oder stufenweise einstellbarer Drehzahl;
b) Antriebe mit stetig regulierbarer Drehzahl.

Für Antriebe grösster Leistung verwendet man meistens Synchron-Motoren.

Asynchron-Motoren mit Käfigankern werden dort eingesetzt, wo billige, robuste und betriebssichere Antriebe gewünscht werden. Käfigankermotoren mit polumschaltbaren Statorwicklungen eignen sich für stufenweise einstellbare Antriebe mit 2, seltener 3 Drehzahlstufen. Im Gegensatz zum Schleifringankermotor mit stetiger Drehzahlregulierung durch variable Widerstände im Rotorkreis erfolgt die stufenweise Einstellung beim polumschaltbaren Käfigankermotor praktisch verlustlos. Die Polumschaltung kann durch eine entsprechende Zahl einzelner Statorwicklungen oder durch eine polumschaltbare Wicklung erreicht werden. Polumschaltbare Wicklungen können nur für bestimmte Drehzahlstufen ausgelegt werden. Sie haben jedoch den Vorteil besserer Maschinenausnützung und grösserer Kurzschlussfestigkeit, was besonders bei schnellaufenden Motoren wesentlich ist. Motoren mit Drehzahlverhältnis 1,5 : 1 oder kleiner eignen sich besonders für Antriebe von Radialgebläsen und Pumpen, deren Last mit der dritten Potenz der Drehzahl variiert [1] [1]).

Für Antriebe mit stetig regulierbarer Drehzahl sowie in Fällen mit stark begrenzten Anlaufströmen eignet sich besonders der Schleifringankermotor. Neuerdings wird vermehrt versucht, einen Teil der Schlupfenergie zurückzugewinnen, z. B. bei Schleifringankermotoren grosser Leistung für den Antrieb von Kesselspeisepumpen in grossen thermischen Kraftwerken. Dies kann elektrisch (Fig. 1) oder einfacher thermisch (Fig. 2) erfolgen. Für grosse Drehzahlbereiche haben sich auch polumschaltbare Käfigankermotoren in Verbindung mit hydraulischen oder elektromagnetischen Drehzahlwandlern bewährt.

Synchron-Induktions-Motoren werden heute nur noch ausnahmsweise für Sonderzwecke eingesetzt und werden im folgenden nicht berücksichtigt, ebenso wie die Drehstrom-Kollektor-Motoren für stetige Drehzahlregulierung mit Leistungen bis ca. 500 kW.

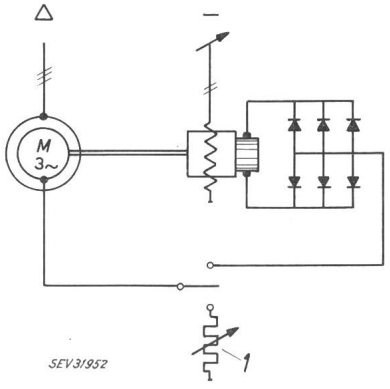
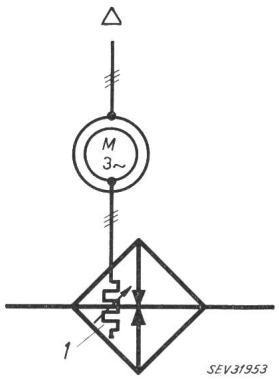



Fig. 1
**Schleifringankermotor mit elektrischer Rückgewinnung der Schlupfenergie**
*1* Anlasser

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Fig. 2
**Wie Fig. 1, aber mit thermischer Rückgewinnung**
*1* Regulierwiderstand im Speisewasser-Vorwärmer




Ein Einsatzgebiet für grosse Motoren, das auch in der Schweiz mit zunehmendem Ausbau der Wasserkräfte immer wichtiger wird, sind die thermischen Kraftwerke. Fig. 3 zeigt den angenäherten Leistungsbedarf für Kesselspeisepumpen in Prozent der Generatorleistung [2] und beweist, dass für die Hilfsbetriebe in thermischen Kraftwerken beachtliche Leistungen aufgewendet werden müssen. Bei Kraftwerken mit Generatorleistungen bis ca. 200 MW und Pumpenleistungen bis ca. 4500 kW haben sich die einfachen Käfigankermotoren bewährt. Bei grösseren Leistungen wird die wasserseitige Regulierung unrationell, so dass sich Antriebe mit variabler Drehzahl lohnen. Für den Antrieb der Hauptspeisepumpe kommen dann drehzahlregulierbare Schleifringankermotoren, für Booster- und Reserve-Pumpen Käfigankermotoren in Frage.

Tabelle I gibt den angenäherten Leistungsbedarf der übrigen wichtigsten Hilfsbetriebe in thermischen Kraftwerken in Prozent der Generatorleistung an.

*Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe in thermischen Kraftwerken in Prozent der Generatorleistung*

Tabelle I

| Antrieb | Leistungsbedarf in Prozent der Generatorleistung |
|---|---|
| Kesselventilatoren . . . . . | 0,5...0,8 |
| Wasserumwälzpumpen | |
| Flusswasserpumpen . . . . . | 0,3...0,6 |
| Kühlturmpumpen . . . . . | 0,5...1,0 |
| Kohlemühlen . . . . . | ca. 0,5 |

Für Kesselventilatoren werden üblicherweise polumschaltbare Käfigankermotoren gewählt, wobei die kleinere Drehzahl für den Normalbetrieb vorgesehen ist, während die höhere Drehzahl für Überlastbetrieb, für den Betrieb mit verschmutztem Kessel oder mit Brennstoffen mit kleinem Heizwert gebraucht wird. Für Kesselventilatoren, insbesondere aber für Kohlemühlen, sind geschlossene Motoren mit Luft-Luft-Röhrenkühlern gebräuchlich.

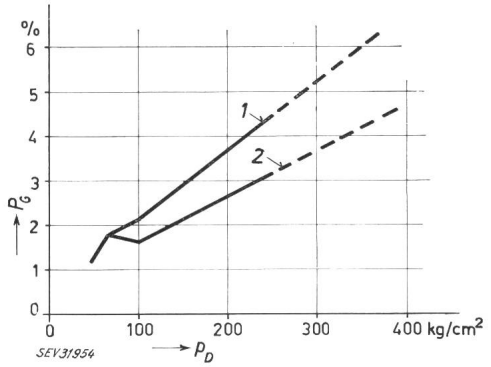



Fig. 3
**Leistungsbedarf für den Antrieb der Kesselspeisepumpen thermischer Kraftwerke in Prozent der totalen Generatorleistung $P_G$**
*1* totale Speisepumpenleistung; *2* Hauptpumpenleistung; $P_D$ Dampfdruck

Der gesamte Leistungsaufwand für die Hilfsbetriebe in thermischen Kraftwerken erreicht damit 4...7 % der Generatorleistung; bei Atomkraftwerken ist er noch grösser und liegt im Falle von 2 Turbosätzen zu je 250 MW bei ca. 9 % für Schwerwasserreaktoren und bei ca. 13 % für gasgekühlte Reaktoren.

Eine kürzlich in den USA durchgeführte Untersuchung über den industriellen Einsatz grosser Drehstrom-Motoren, 32 Kompressoren- und 3 Gebläse-Antriebe im Leistungsbereich von 2000...11 000 kW, hat gezeigt, dass sich Synchron- und Asynchronmotoren angenähert die Waage halten [3]. Asynchronmotoren wurden im Leistungsbereich bis ca. 7000 kW eingesetzt; bei den grösseren Leistungen sind Synchronmotoren vorherrschend.

## 2. Ziel der Entwicklungsarbeiten

Unter Berücksichtigung der Einsatzmöglichkeiten grosser Drehstrom-Motoren, wie sie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben wurden, kann das Entwicklungsziel für diese Maschinen wie folgt zusammengefasst werden:

Realisierung der gewünschten grösseren Einheitsleistungen bei gleichzeitiger Steigerung der Betriebssicherheit und Reduktion des spezifischen Motorpreises.

Die Verkleinerung des spezifischen Motorpreises (Preis pro kW) bietet bei Maschinen mit zunehmenden Einheitsleistungen im allgemeinen kein Problem. Diese Preisreduktion ist eine der Hauptgründe für die heutige Tendenz zu steigenden Einheitsleistungen, und lässt sich immer dann verwirklichen, wenn nicht zunehmende technische oder fabrikatorische Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Leistungssteigerung zu wesentlichen Mehrkosten führen.

Grössere Anforderungen stellt die Steigerung der Betriebssicherheit bei gleichzeitiger Reduktion des spezifischen Motorpreises. Grösste Betriebssicherheit ist jedoch erste Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz von Motoren grosser Leistung, wenn ihr preislicher Vorteil nicht durch die Notwendigkeit von Reserveeinheiten wieder zunichte gemacht werden soll. Grössere Betriebssicherheit bedeutet zunächst grösseren Aufwand in der Herstellung der Motoren, und hat daher eine Preissteigerung zur Folge. Kleine Motorpreise können daher nur erreicht werden, wenn der Mehraufwand zur Verbesserung der Betriebssicherheit durch Einsparungen, die keinen Einfluss auf die Qualität der Maschine haben, wettgemacht werden kann. Beschränkung auf das Wesentliche unter bewusstem Verzicht auf betrieblich Nebensächliches ist daher erstes Gebot für den Konstrukteur grosser Motoren. Mehraufwände in der Entwicklungsphase müssen laufend überprüft werden und stets ist danach zu trachten, die Konstruktionen zu vereinfachen und fabrikationsgerecht zu gestalten. Durch bessere Materialausnützung, Vereinfachung der Konstruktionselemente sowie durch Rationalisierung in Konstruktion und Fabrikation kann das Entwicklungsziel erreicht werden. Tabelle II zeigt die Auswirkungen der Entwicklungsarbeiten auf das Gewicht und den spezifischen Motorpreis in Fr./kW an einem 1000-kW-Schleifringanker-Motor.

*Entwicklung von Gewicht und Preis eines 1000-kW-Schreifring-anker-Motors in den Jahren 1950...1960*

Tabelle II

| | Ausführung | |
|---|---|---|
| | 1950 | 1960 |
| Gewicht | 100 % | 75 % |
| Preise (umgerechnet auf Preisniveau 1960) | | |
| — bei gleichem technischen Standard (1960) | 100 % | 75 % |
| — mit modernsten Isolationen | — | 95 % |
| — bei Ausnützung der vollen Überlastbarkeit | — | 80 % |

### 3. Dimensionierung der Motoren

Für die elektrische Berechnung und Dimensionierung der Motoren stehen keine grundsätzlich neuen Berechnungsverfahren zur Verfügung, die in der Herstellung wesentliche Einsparungen bringen könnten. Obwohl die Anwendung neuer Berechnungsmethoden mit digitalen und Analogie-Rechenmaschinen die Berechnungszeiten verkürzen und umfangreiche Berechnungen zur optimalen Dimensionierung auch bei Einzelmaschinen zulassen, liegen die grössten Gewinnchancen für die Dimensionierung heute, und vermutlich auch in Zukunft, in der vollen Ausnützung des technologischen Fortschrittes und den zunehmend umfassenderen Kenntnissen über Wirkungsweise und gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Bauelemente.

Moderne Schweisskonstruktionen gestatten eine einfache Anpassung der Motorkonstruktionen an die mannigfaltigen Bauformen und Kundenwünsche.

Für die aktiven Blechkörper werden in grösserem Umfang Magnetbleche mit kleinen Verlustziffern von 1,5 und 1,3 W/kg bei 10 kG verwendet. Die hervorragend glatte Oberfläche dieser Bleche sowie moderne Verfahren für ihre Isolation führen zu hohen Füllfaktoren. Dadurch lassen sich die Eisenverluste reduzieren und der Wirkungsgrad, besonders bei Teillast, wesentlich verbessern. Anderseits können die Induktionen und damit die Ausnützung der Maschinen ohne Gefahr lokaler Überhitzungen gesteigert werden. Es sind heute im Elektromaschinenbau Induktionen zwischen 14 und 20 kG — bei Kleinmotoren zum Teil noch höher — üblich. Die Klassierung der Magnetbleche nach ihren Verlusten bei 10 kG ist daher schon seit Jahrzehnten überholt und trägt dem Fortschritt im Bau elektrischer Maschinen keine Rechnung. Bei Motoren mit hohen Polzahlen können hoch legierte Bleche mit kleinen Verlustziffern nicht vollständig ausgenützt werden, da gewisse Jochhöhen aus mechanischen Gründen (magnetische Geräusche, Wicklungsschäden) eingehalten werden müssen.

Wesentliche Einsparungen bei der Dimensionierung der Motoren gestatten vor allem auch die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiete der Wicklungsisolationen. Moderne Kunstharzisolationen zeichnen sich durch vorzügliche Homogenität und ausgeglichene Qualität aus, so dass auf übertriebene Forderungen bezüglich Durchschlagfestigkeit verzichtet werden kann. Es ist heute üblich, für hochwertige Isolationen bei Spannungen über 5 kV für einen Durchschlag von 1-Minuten-Niveau von mindestens viermal Nennspannung zu garantieren; bei kleineren Spannungen liegt das Niveau aus mechanischen Gründen höher. Dadurch ist es möglich, die Isolationsdicken zu reduzieren, die Nutenausnützung zu vergrössern und damit einen Teil des bedeutenden Mehraufwandes, den moderne,hochwertige Isolationen verlangen, zu kompensieren. Dünne, homogene Isolationen bringen ausserdem eine wesentlich bessere Wärmeabfuhr und kleinere Erwärmungen. Die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Statorwicklungsisolationen für elektrische Grossmaschinen führten zu Isolationssystemen hoher Wärmefestigkeit, welche in die Wärmeklassen F (155 °C) und H (180 °C) eingereiht werden können. Obwohl die heute üblichen Grenztemperaturen der Wärmeklasse B (130 °C) für Grossmaschinen die Ausnützung dieser Entwicklungsarbeiten noch nicht in vollem Umfang zulassen, weisen Motoren mit Isolationen hoher Wärmeklasse den Vorteil grosser Überlastbarkeit auf. Überdimensionieren aus Gründen der Betriebssicherheit oder im Hinblick auf spätere Leistungssteigerungen ist bei solchen Motoren nicht mehr notwendig, so dass in vielen Fällen der Mehrpreis gegenüber konventionell isolierten Motoren der Wärmeklasse B in Kauf genommen werden kann.

Trotz der Entwicklung moderner Isolationen für hohe elektrische und thermische Beanspruchungen ist dem Kühlproblem in den vergangenen Jahren allgemein grosse Beachtung geschenkt worden. Ventilationsuntersuchungen haben es gestattet, die Kühlluft mit minimalen Ventilationsverlusten an Orte grösster Wärmeerzeugung zu führen und die Motoren wirksam zu kühlen. Ausgeglichener Temperaturverlauf und bessere Ausnützung sind die Resultate solcher Erwärmungsuntersuchungen. Sie lassen sich bei der Dimensionierung grosser Motoren mit Erfolg zur Reduktion des spezifischen Motorpreises auswerten.

Während bei Motoren mittlerer Grösse (deren Schleuderdrehzahlen das 1,2fache der Betriebsdrehzahl betragen) im allgemeinen die Probleme der Fliehkraftbeanspruchungen ohne besondere Schwierigkeiten gelöst werden können, ändern sich die Verhältnisse bei Grenzleistungsmotoren sehr rasch. Solche Maschinen weisen in der Regel höhere Durchgangsdrehzahlen bei Leistungen auf, die noch vor wenigen Jahren als technisch nicht ausführbar beurteilt wurden. Der Bau von Grenzleistungsmotoren — meistens Synchronmaschinen — ist nur dank dem Fortschritt in der Herstellung grosser Stahlguss- und Schmiedestücke hoher Festigkeit möglich, die heute in ausgezeichneter Qualität für den Turbomaschinenbau geliefert werden. Parallel dazu gehen Untersuchungen über das Arbeitsvermögen hoch beanspruchter Materialien, wobei den komplexen Verhältnissen beim Übergang vom elastischen ins plastische Gebiet besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss [4].

### 4. Der allgemeine Aufbau

Obwohl beim Bau grosser Drehstrom-Motoren die verwendeten Konstruktionselemente grundsätzlich gleich sind, können drei verschiedene Ausführungsarten unterschieden werden, die bezüglich Dimensionierung und Fabrikationsablauf besondere Anforderungen stellen:

a) genormte Ausführungen;
b) typisierte Ausführungen;
c) Spezialausführungen.

Diese Aufteilung drängt sich vor allem aus fabrikatorischen Gründen auf und wirkt sich wesentlich auf Preis und Lieferfristen aus.

Bei genormten Konstruktionen sind sämtliche vorfabrikatorischen Arbeiten in Konstruktion und Arbeitsvorbe-

reitung ausgeführt und das Material mit langen Lieferfristen liegt am Lager. Dadurch ist es möglich, Motoren, ähnlich Seriefabrikaten, in kürzester Zeit herzustellen und zu liefern. Voraussetzung dazu ist, dass die Kundenwünsche den Normalkonstruktionen angepasst werden können und mit einem Minimum an konstruktivem Aufwand (Wicklungszeichnungen) gearbeitet werden kann. Normalkonstruktionen gehören zu den bevorzugten Ausführungsformen moderner industrieller Betriebe. Die Leistungsgrenze zwischen genormten Motoren und Spezialmaschinen liegt umso höher, je grösser der Umsatz der betreffenden Motorarten ist.

Dem Wunsche weitgehender Normung stehen heute noch vielfach besondere Kundenwünsche bezüglich Aufstellungsart, Schutzart und Motorspannung im Wege. In extremen Fällen, besonders bei Motoren mit grossen Einheitsleistungen müssen daher Spezialkonstruktionen verwendet werden, bei denen die Bemessung und konstruktive Gestaltung vollständig den Wünschen des Kunden angepasst werden können. Umfangreiche Konstruktionsarbeiten, sowie die heute zum Teil extrem langen Lieferfristen für das Rohmaterial, beeinflussen Preis und Liefertermin bei Einzelausführungen in ungünstigem Sinne. Als Zwischenlösung haben sich daher, besonders im Bau grosser Motoren typisierte Ausführungen bewährt, für welche die Hauptdimensionen und der konstruktive Aufbau festgelegt sind. Die Detailkonstruktionen müssen von Fall zu Fall ausgeführt werden, wobei die Möglichkeit besteht, ähnliche Bauelemente früherer Ausführungen zu verwenden und damit den Konstruktionsaufwand zu reduzieren. Typisierte Ausführungen verkleinern auch den Aufwand in der Arbeitsvorbereitung, da Arbeitspläne und Vorrichtungen ähnlicher Ausführungen wieder verwendet werden können.

Eine scharfe Abgrenzung zwischen den Ausführungsarten ist nicht möglich; sie hängt weitgehend vom Fabrikationsprogramm und Umsatz der betreffenden Firmen ab. Als Richtwerte können bei vierpoligen Motoren Leistungen bis 2 MW für genormte, bis 10 MW für typisierte und Leistungen über 10 MW für Spezialausführungen angenommen werden.

### *4.1 Bauformen*

Die Bauform grosser Drehstrommotoren wird vor allem durch die Art ihres Einsatzes, d. h. durch die Betriebsbedingungen, festgelegt. Die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten dieser Maschinen haben zu einer entsprechend grossen Zahl von Bauformen geführt, die in ihrer Vielfalt heute sogar die Wasserkraftgeneratoren übertreffen. Dies gilt besonders dann, wenn der Begriff Bauform auch die verschiedenen Schutzarten und Kühlverfahren einschliesst.

Nach Art der Achslage ist zwischen Motoren für horizontale und vertikale Aufstellung zu unterscheiden.

Während bei Motoren mit Einheitsleistungen über 10 MW die teilweise oder vollständig im Fundament versenkte Aufstellung überwiegt, hat sich bei mittleren und kleinen Leistungen die Überfluraufstellung, welche keine komplizierten Fundamentarbeiten notwendig macht, durchgesetzt. Durch die Anordnung der Kühleinrichtungen (Zu- und Abluftkanäle, Wasserkühler usw.) über oder auf beiden Seiten des Motors wird die Maschine unabhängig vom Fundament und lässt sich universell verwenden. Aus den gleichen Gründen ist bei mittleren und grossen Motoren die Ausführung mit Fundamentrahmen an Stelle einzelner Fundamentplatten vorherrschend. Die Maschine bildet dadurch mit der Lagerung eine Einheit und stellt kleinere Anforderungen an die Montage. Nur bei Spezialmotoren mit grossen Einheitsleistungen werden die Fundamente, und zum Teil auch Bauelemente der angetriebenen Maschinen, den besonderen Bedingungen des Motors angepasst, wie es im elektrischen Grossmaschinenbau mit Rücksicht auf die Beherrschung der Betriebs- und Kurzschlusskräfte üblich ist.

Die Kühlarten (Durchzugkühlung in offener Bauart oder mit Kanalanschluss, Kreislaufkühlung mit Luft-Luft-Rippen- oder Röhren-Kühlern sowie mit Luft-Wasser-Kühlern, direkte Gas- oder Flüssigkeitskühlung usw.), die Schutzarten (tropfwassergeschützt, spritzwassergeschützt; wettergeschützte Ausführungen für die Aufstellung im Freien; Ausführungen mit erhöhter Sicherheit gegen Explosion oder in explosions- und schlagwetter-geschützter Bauart) sowie die elektrischen Ausführungsarten (Asynchronmotoren mit Käfig- oder Schleifring-Ankern; Synchronmotoren) vervielfachen die Zahl der Bauformen in einer Weise, dass Normungsbestrebungen vorerst aussichtslos erscheinen. Glücklicherweise ist es jedoch bei Motoren kleiner und mittlerer Leistung möglich, die einzelnen Bauelemente derart zu gestalten, dass sie in verschiedenen Bauformen verwendet werden können. Dadurch lässt sich eine Normung nach dem Baukastenprinzip durchführen, sofern der erforderliche Umsatz für die betreffenden Motorgrössen vorhanden ist.

Die grossen Drehstrommotoren bilden den Übergang von den meistens in grösseren Serien hergestellten Kleinmotoren zu den in Einzelfertigung fabrizierten elektrischen Grossmaschinen. Sie führen damit von einem Gebiet, das heute noch von Gusskonstruktionen beherrscht wird, zu den bekannten Schweisskonstruktionen des Grossmaschinenbaues. Noch vor wenigen Jahren war die Trennung Gusskonstruktion — Schweisskonstruktion durch die Art des Magnetblechkörpers gegeben: für Statorblechkörper aus einteiligen Magnetblech-Ringschnitten wurden Gehäuse aus Grauguss bevorzugt; für Blechkörper aus Magnetblech-Segmenten waren geschweisste Gehäuse üblich. Da sich Schweisskonstruktionen für die verhältnismässig kleinen Stückzahlen und die Vielfalt an Bauformen grosser Motoren besser eignen als Ausführungen in Grauguss, sind heute die Gusskonstruktionen auch bei Motoren grösserer Leistung mit einteiligen Ringschnitten der Stator-Magnetbleche praktisch verschwunden. Moderne Schweisskonstruktionen, die schon vor Jahrzehnten den Grauguss im elektrischen Grossmaschinenbau verdrängt haben, setzen damit ihren Siegeszug in immer grösserem Ausmass auch bei den mittleren und kleinen Maschinen fort.

Fig. 4 zeigt Gehäusekonstruktionen für Motoren mit horizontaler Welle und einteiligen Ringschnitten, die heute meistens bis zur vollen Ausnützung der normalen Magnetblechrollen von einem Meter Breite verwendet werden. Motoren dieser Grösse gehören üblicherweise zu den vollständig genormten Ausführungen. In Europa haben sich in den letzten Jahren zwei Arten von Schildlager-Schweisskonstruktionen eingebürgert, die sich vor allem in der Übertragung der Rotorreaktionen auf das Fundament unterscheiden. Bei der konventionellen Ausführung, einer Weiterentwicklung der alten Gusskonstruktionen, übertragen die angeflanschten Lagerschilde die Rotorreaktionen zuerst auf das Gehäuse und anschliessend von dort auf das Fundament. Der Vorteil

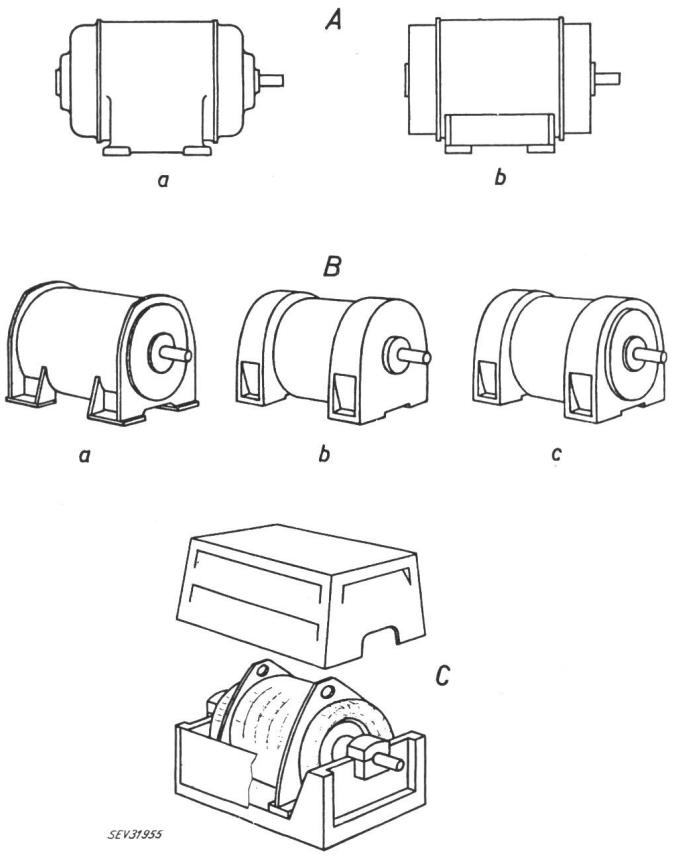



Fig. 4
**Gehäusekonstruktion für Motoren mittlerer Leistung**

*A* Motoren mit Flansch-Schildlagern in Gusskonstruktion (*a*), bzw. in Schweisskonstruktion (*b*)

*B* Motoren in Schweisskonstruktion mit Steh-Schildlagern: *a* einteiliges Gehäuse mit Schildlager-Deckeln; *b*, *c* dreiteiliges Gehäuse, bestehend aus dem Gehäuse für den aktiven Teil und zwei Schildlager-Gehäusen (*b* ohne und *c* mit Schildlager-Deckeln)

*C* Motoren in Schweisskonstruktion mit Bocklagern (voll zugängliche Typen)

dieser Flansch-Schildlager-Konstruktion, gut zugängliche Wickelköpfe für Revisionen, wird dabei durch eine relativ elastische, der Rechnung schlecht zugängliche Lagerung erkauft, die besonders bei schnellaufenden Motoren Schwierigkeiten bereiten kann. Die Steh-Schildlager-Konstruktionen übertragen die Rotorreaktionen direkt auf das Fundament. Der Rotor ist nur lose mit dem Gehäuse gekoppelt, so dass bei Maschinen mit hoher Drehzahl bei dieser Bauart die Vibrationsprobleme besser beherrscht werden.

Die einfachste Lösung mit einteiligem Gehäuse und Schildlager-Deckeln verlangt das Einschieben des aktiven Statorteiles nach dem Wickeln und beeinträchtigt die Zugänglichkeit zu den Wicklungsköpfen zu Revisionszwecken im Betrieb. Bei der teureren Ausführung mit Stehschildlagern, welche vom Gehäuse getrennt sind, hängt der aktive Stator zwischen den zwei Lagergehäusen. Dadurch sind die Wickelköpfe der Maschine auch nach der Fabrikation im Betrieb besser zugänglich. Den Schwierigkeiten beim Ein- und Ausbau des Rotors kann begegnet werden, indem die beiden Lagergehäuse, ähnlich wie bei der einteiligen Ausführung, mit Schildlagerdeckeln ausgerüstet werden, welche gestatten, den Rotor ohne Gehäusedemontage leicht ein- und auszubauen.

Motoren mit Bocklagern in Schweisskonstruktion stellen in ihrem grundsätzlichen Aufbau nichts anderes als die Übertragung der bei elektrischen Grossmaschinen üblichen Bauweise auf Maschinen des mittleren Leistungsbereiches dar. Diese Konstruktion wird auch bei kleineren Motoren vor allem in den USA bevorzugt und gelangt dort unter dem Namen «Voll zugänglicher Typ» (F/A-Motor = Fully Accessible Motor) auf den Markt [5]. Der Motor steht auf einer Grundplatte mit zwei Bocklagern, welche die Lage des Rotors relativ zur Grundplatte festlegen. Der aktive Teil des Stators besteht aus dem Blechkörper, welcher durch eine leichte Schweisskonstruktion (Gehäuse) zusammengehalten wird, und der Wicklung, deren Wicklungsköpfe und Ableitungen zu den Maschinenklemmen leicht zugänglich sind. Der Stator, gleichzeitig mit dem Rotor montiert, wird derart auf der Grundplatte justiert, dass seine Lage relativ zum Rotor sowohl in radialer (Luftspalt) als auch axialer Richtung mit der notwendigen Genauigkeit festgelegt wird. Der Motor wird mit Verschalungen gedeckt, welche die Maschine vollständig umschliessen und im Betrieb, ohne den Motor abkuppeln zu müssen, zu Revisionszwecken leicht entfernt werden können. Ein weiterer Vorteil dieser Ausführung besteht darin, dass die verschiedenen Schutzarten bei gleichbleibendem Aktivteil einfach durch entsprechende Modifikation der Verschalung (Haube) ausgeführt werden können.

Trotz den erwähnten Vorteilen der voll zugänglichen Typen konnte sich diese Konstruktion bisher in Europa für Motoren kleiner und mittlerer Leistung nicht durchsetzen. Die Ausführung ist auch bei sorgfältiger Schweissplanung und bei Verwendung entsprechender Vorrichtungen teurer als der Schildlagertyp. Die Möglichkeit, Schildlagertypen durch einfaches Auswechseln der Lagerschilde sowohl für horizontal- als auch für vertikalachsige Antriebe verwenden zu können, dürfte der Hauptgrund für die Beibehaltung dieser Bauweise für genormte Motoren in Europa gewesen sein.

Früher war es üblich bei der Fabrikation grosser Motoren nur Stator, Rotor und Lagerung in parallelen Arbeitsgängen herzustellen. Die Fabrikationsdauer wurde bei den alten Gusskonstruktionen durch den Stator bestimmt. In seriegeschalteten Operationen wurden die Gehäuse gegossen und bearbeitet, die Statorbleche eingelegt und gepresst und anschliessend die gesamte Wickelarbeit in Form eingezogener Wicklungen am Stator ausgeführt. Dieser Fabrikationsablauf führte zu Lieferfristen, die heute untragbar sind. Ähnlich wie im Kleinmotorenbau mussten daher Verfahren eingeführt werden, die durch gleichzeitige Ausführung ver-

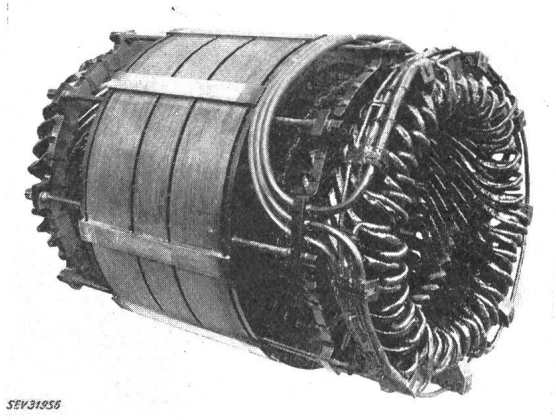



Fig. 5
**Aktiver Stator (Blechkörper mit Statorwicklung) eines Käfigankermotors**
430 kW, 2960 U./min, 6,3 kV, 50 Hz, zum Einbau in ein einteiliges Gehäuse

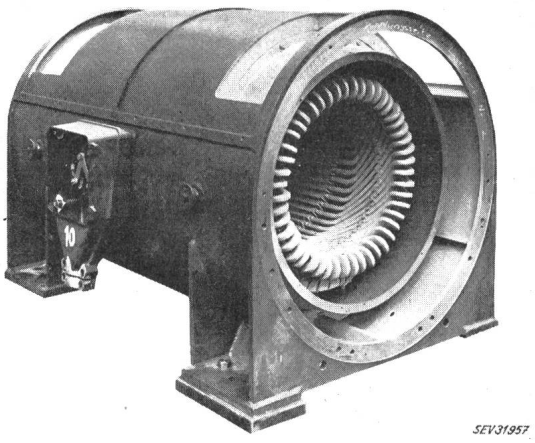



Fig. 6
**Einteiliges Gehäuse in Schweisskonstruktion für einen 1800-kW-Motor mit Steh-Schildlagern**

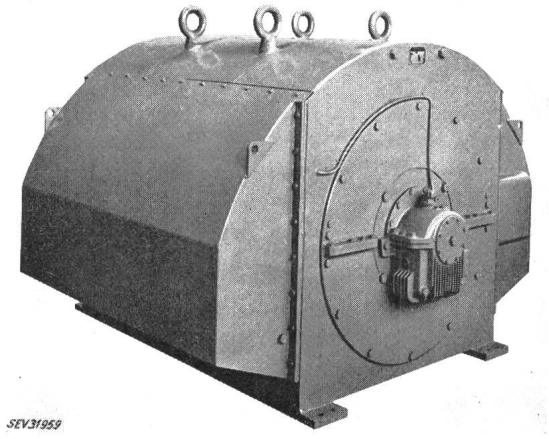



Fig. 8
**Wettergeschützter Motor für Freiluftaufstellung**
800 kW, 2970 U./min, 3,2 kV, 50 Hz

schiedener Operationen gestatten, den Durchfluss in der Werkstatt zu beschleunigen. Eine Lösung besteht beispielsweise darin, Gehäuse, Blechkörper und Wicklung gleichzeitig herzustellen. Während der Wicklungsfabrikation ist es ohne weiteres möglich, das Gehäuse zu schweissen und zu bearbeiten sowie den Blechkörper zu pressen, zu schweissen und für das Einlegen der Wicklung bereitzustellen. Die Wicklung, meistens bestehend aus geschlossenen Spulen in offenen Statornuten, lässt sich einfach und rasch in den Blechkörper einlegen und bandagieren (Fig. 5). Da sich der gesamte Aktivteil des Stators mit leichtem Schrumpfsitz im Gehäuse befestigen lässt, kann die Konstruktion ohne Schwierigkeiten beim Wickeln zur Herstellung von Steh-Schildlagertypen mit einteiligen Gehäusen verwendet werden (Fig. 6). Bei unverändertem Fabrikationsablauf für den aktiven Teil des Stators (Blechkörper und Wicklung) können durch einfache Anpassung der geschweissten Gehäuse beliebige Schutz- und Kühlarten ausgeführt werden (Fig. 7 und 8).

Bei grösseren Motoren mit Statorblechkörpern aus Magnetblech-Segmenten, die vorwiegend in typisierter oder Spezial-Ausführung hergestellt werden, ist der Fabrikationsablauf grundsätzlich gleich. Bei diesen Konstruktionen sind die Anforderungen bei horizontaler oder vertikaler Aufstellung meistens derart verschieden, dass eine Einheitskonstruktion für das Gehäuse nicht mehr möglich ist. Man muss daher bei diesen Motoren, wie im elektrischen Grossmaschinenbau allgemein üblich, zwischen horizontal- und vertikalachsigen Konstruktionen unterscheiden.

Horizontalachsige Motoren werden bis zu Leistungen, welche diese Bauart mit Rücksicht auf die Achshöhe noch zulassen, ähnlich den Steh-Schildlager-Typen für Überflur-Aufstellung konstruiert. Fig. 9 zeigt einen zweipoligen Schleifringankermotor von 3700 kW mit stetiger Drehzahlregulierung zwischen 2300 und 2980 U./min für den Antrieb von Kesselspeisepumpen. Der Rotor liegt in Bocklagern, die mit der geschweissten Grundplatte verschraubt sind. Da bei Maschinen dieser Grössenordnung der Wicklungseinbau in den fertig geblechten Stator keine Schwierigkeiten bietet, können die Magnetblech-Segmente mit Rundbolzen oder Trapezprofilen an den geschweissten Gehäusen befestigt werden.

Bei Motoren mit grossen Einheitsleistungen (Spezialtypen) oder mit kleinen Achshöhen ist die teilweise versenkte Aufstellung üblich. Fig. 10 zeigt einen Synchronmotor von 3600 kW bei 1500 U./min mit Bocklagern und Luft-Wasser-Kühlern, welche in horizontaler Lage unter dem Stator im Fundament versenkt sind. Bei mittleren Leistungen genügt in der Regel ein Kühlerelement, das direkt am Gehäuse befestigt werden kann; bei grossen Leistungen sind mehrere Elemente erforderlich, die an besonderen Rahmen im Fundament aufgehängt werden und zu Revisionszwecken mit Hilfe

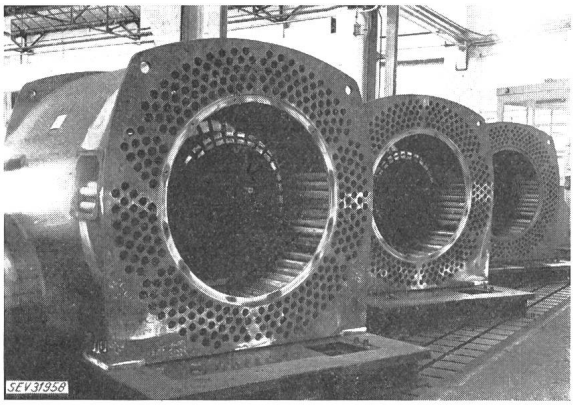



Fig. 7
**Geschweisste Gehäuse mit Luft-Luft-Röhrenkühlern für Schleifringanker-Motoren**
1500 kW, 2250...2980 U./min, 3,15 kV, 50 Hz

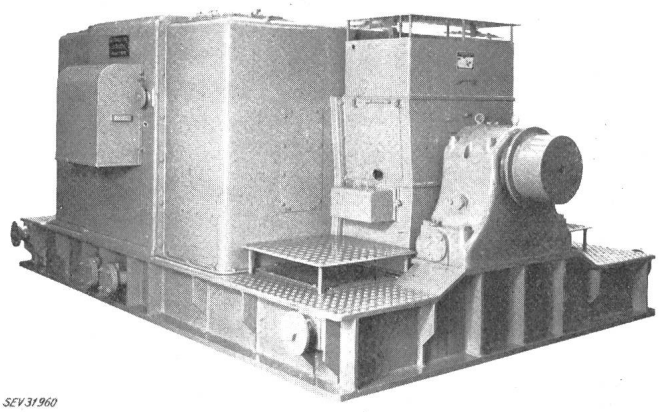



Fig. 9
**Schleifringankermotor mit Luft-Wasser-Kühlern für den Antrieb von Kesselspeisepumpen**
3700 kW, 2300...2980 U./min, 10 kV, 50 Hz

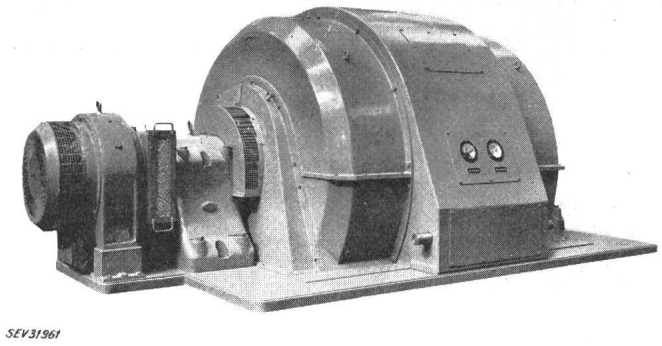



Fig. 10
**Synchronmotor mit Luft-Wasser-Kühlern für den Antrieb eines Radialkompressors**
3600 kW, 1500 U./min, 6,45 kV, 50 Hz

eingebauter Seilzüge in die Kühlergrube gesenkt werden können.

Vertikalachsige Motoren mit sehr grossen Einheitsleistungen sind relativ selten und werden vorwiegend in Pumpspeicherwerken eingesetzt, bei denen die hydraulischen Gegebenheiten zur vertikalen Bauweise führen. Der grundsätzliche Aufbau entspricht demjenigen vertikaler Wasserkraftgeneratoren und erreicht damit den bei diesen Maschinen üblichen technischen Aufwand. Fig. 11 zeigt einen Asynchronmotor mit Doppelkäfiganker (3300 kW, 370 U./min, 3,2 kV) mit eingebautem Schwungrad von dreifachem Schwungmoment des aktiven Rotors. Einer der bisher grössten vierpoligen Synchronmotoren in vertikaler Aufstellung ist in Fig. 12 dargestellt; es handelt sich um die Pumpenmotoren für die Pumpstation Z'Mutt der Grande Dixence: 30 MW, 1500 U./min (Rücklaufdrehzahl 2000 U./min), 10 kV.

### *4.2 Die Schweisstechnik im Grossmotorenbau*

Die Beispiele im vorangehenden Abschnitt haben gezeigt, dass der Schweisstechnik im Grossmotorenbau grösste Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Es scheint daher gerechtfertigt, einige Probleme im Zusammenhang mit dieser heute allgemein üblichen Fertigungsart kurz zu streifen.

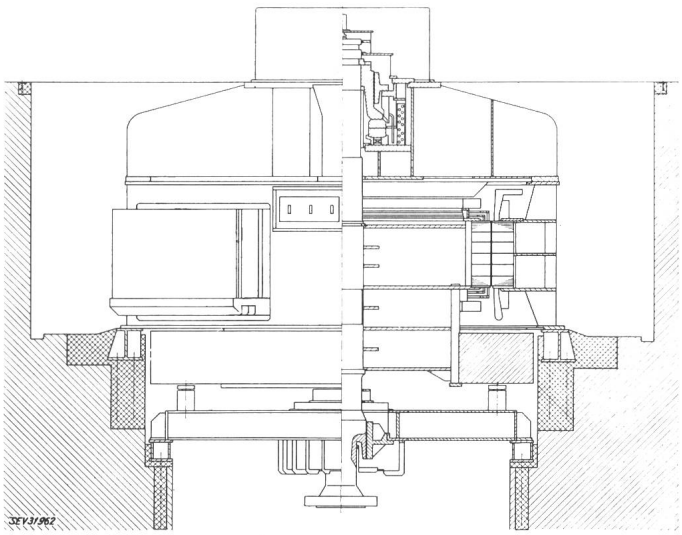



Fig. 11
**Asynchronmotor mit Doppelkäfiganker und eingebautem Schwungrad zum Antrieb einer Pumpe für Bewässerungszwecke**
3300 kW, 370 U./min, 3,2 kV, 50 Hz

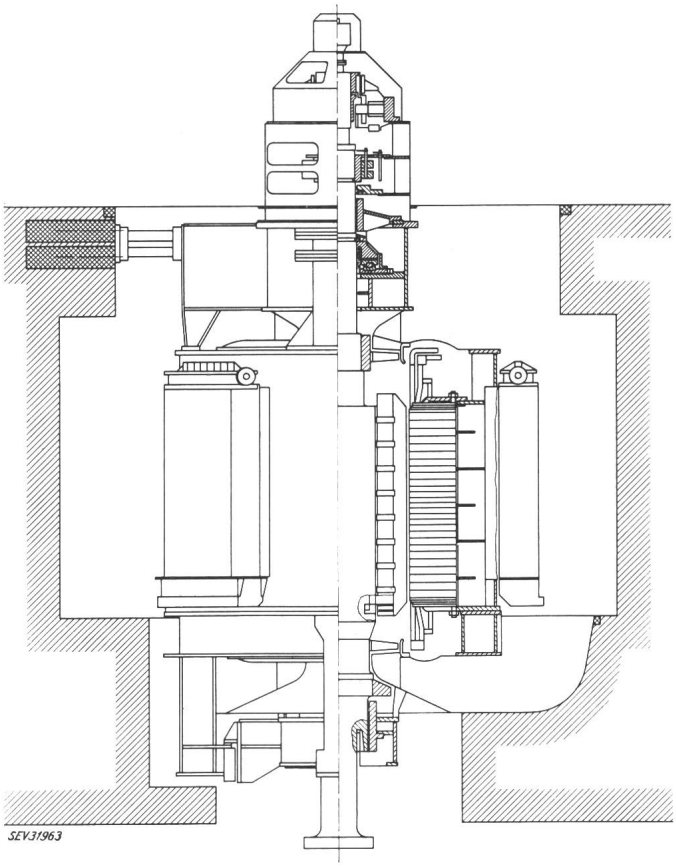



Fig. 12
**Synchronmotor für die Pumpstation Z'Mutt der Grande Dixence**
30 000 kW, 1500 U./min, 10 kV, 50 Hz

Als wohl bekanntestes Argument zu Gunsten der Schweisskonstruktion gilt nach wie vor die *Gewichtsreduktion*. Es ist ohne weiteres möglich, die bei Gusseisen üblichen und notwendigen Wandstärken bei Schweisskonstruktionen auf die Hälfte und mit den Methoden des Stahl-Leichtbaues noch weiter zu verkleinern. Die Folge davon sind kleinere Werkstoffkosten und Einsparungen bei den Bau- und Transport-Kosten, besonders von Exportprodukten. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die schweizerische Elektroindustrie, welche ihr Rohmaterial zum grössten Teil importieren und ihre Produkte exportieren muss, der Schweisstechnik volle Aufmerksamkeit schenkt und seit Jahren versucht, Schweisskonstruktionen mit minimalem Gewichtsaufwand herzustellen. Dieser Tendenz sind jedoch im elektrischen Grossmaschinenbau aus technischen und Rationalisierungs-Gründen deutlich Grenzen gesetzt. Jede elektrische Maschine und damit jeder Grossmotor ist ein Schwingungserzeuger von ausserordentlich grosser Vielfalt. Kleine Wandstärken und geringe Gewichte (Massen) führen zu Konstruktionen geringer Dämpfung, welche unzulässige Schwingungen (Vibrationen) und Geräusche begünstigen. Störungen dieser Art sind bei Gusskonstruktionen dank grosser Steifigkeit und hohem Dämpfungsvermögen eher selten. Es kann daher immer wieder festgestellt werden, dass moderne Schweisskonstruktionen grosser elektrischer Maschinen die Möglichkeiten maximaler Gewichtsreduktion nicht voll ausnützen, da es in den meisten Fällen zweckmässiger ist, die Verlagerung unzulässiger Eigenfrequenzen durch Wahl grösserer Blechdicken zu erreichen als komplizierte Versteifungen vorzusehen, für welche ausserdem aus elektrischen Gründen meistens kein Platz zur Verfügung steht. Da es sich bei diesen

Konstruktionen vorwiegend um komplizierte Schwingungsgebilde handelt, die der Berechnung schlecht zugänglich sind, versucht man in kritischen Fällen durch Einführung elastischer Zwischenelemente, welche schwingungstechnisch genau berechnet werden können, Schwierigkeiten zu vermeiden. Der zweite Grund, welcher im Grossmaschinenbau dafür sorgt, dass der Ruf nach Gewichtsreduktion nicht zum Selbstzweck wird, liegt in der modernen Fertigungstechnik selbst. Während man noch vor wenigen Jahren wie bei den Gusskonstruktionen Löcher in den Gehäusen der elektrischen Maschinen ausbrannte, um Gewicht einsparen zu können, hat man inzwischen eingesehen, dass sich dieses Vorgehen nicht mehr lohnt, da der Aufwand für die Arbeit in den letzten 10 Jahren viel stärker als die Materialpreise angestiegen ist. Man hat erkannt, dass es zweckmässiger ist, wenige Blechdicken zu verwenden und damit die Materialbeschaffung zu erleichtern und die Lagerspesen zu senken, als das Gewicht durch gleichmässig maximale Ausnützung zu reduzieren. Der Grundsatz: leichteste Maschine = billigste Maschine muss heute sehr sorgfältig überprüft werden und gilt nur noch in Ausnahmefällen. Neben der guten Ausnützung der verwendeten Blechtafeln, was wiederum zu wenigen genormten Blechdicken führt, muss heute der Gewinn in schweissgerechten Konstruktionen, das heisst in Ausführungen mit minimalem Schweissaufwand gesucht werden. Dieses Ziel kann erreicht werden durch:

a) Anwendung von Abkantprofilen, Abkantkonstruktionen, zweckmässig ergänzt durch Walzprofile (Träger, Winkeleisen usw.);

b) Minimale Querschnitte der Schweissnähte für die zu übertragenden Kräfte zur Reduktion der Schweisskosten und Schrumpfverformungen (Schweiss-Spannungen).

Wichtiger als die Möglichkeit, Gewicht zu sparen ist für den Konstrukteur grosser Motoren die Tatsache, dass ihn Schweisskonstruktionen in der *Formgebung* praktisch nicht einschränken. Die Konstruktion hat sich nur an die Bedingung guter Blechausnützung und schweissgerechter Anordnung zu halten, so dass Schweisskonstruktionen geradezu für die Bewältigung der Vielfalt im Bau grosser elektrischer Motoren prädestiniert sind. Einmal mehr muss aber auch hier wieder der Grundsatz wiederholt werden, dass immer die einfachste Ausführung angestrebt werden muss. Sog. «schöne» Ausführungen sind meistens technisch wie fabrikatorisch mangelhaft und viel zu teuer. Als schönste Schweisskonstruktion gilt mehr denn je diejenige, welche mit dem kleinsten Arbeitsaufwand ihren Zweck erfüllt. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass heute auch von Seiten der Motoren-Verbraucher diesen Forderungen der modernen Fertigungstechnik Verständnis entgegengebracht wird. Es werden Vorschriften vermieden, welche die Formgebung betreffen und bestenfalls den Preis erhöhen, ohne die Qualität des Produktes zu verbessern.

Das dritte wesentliche Argument zu Gunsten der Schweisstechnik betrifft die *Lieferfristen,* ganz besonders bei typisierten oder Spezial-Ausführungen. Es steht heute eindeutig fest, dass die Fabrikationszeiten bei Schweisskonstruktionen kleiner als bei Gussausführungen sind. Die Gründe dafür sind folgende:

a) Bleche und Profile können rascher beschafft werden als Modelle und Giessformen;

b) Kleinere Materialzugaben bringen kürzere Bearbeitungszeiten und damit kleinere Bearbeitungskosten;

c) Fehler sind seltener, können frühzeitig erkannt und rasch qualitativ einwandfrei behoben werden.

Diese Tatsache führte dazu, dass heute auch genormte Maschinenelemente, wie Lager usw., die früher ausschliesslich in Guss ausgeführt wurden, geschweisst werden. In bestimmten Fällen haben sich Stahlguss-Schweisskonstruktionen als vorteilhaft erwiesen, wobei komplizierte Teile in Stahlguss ausgeführt und in geschweisste Teile eingeschweisst werden.

Während Schweisskonstruktionen bei den stationären Teilen der Motoren (Gehäuse, Verschalungen, Lager, Grundplatten usw.) keine besonderen Probleme stellen, wenn durch Wahl zäher, gut schweissbarer Werkstoffe die Voraussetzungen für einwandfreie Schweissqualität geschaffen werden, ist bei hoch beanspruchten, rotierenden Teilen Vorsicht am Platz. Meistens ist es bei diesen Bauteilen (Sternwellen, Naben usw.) durch konstruktive Massnahmen nicht möglich, die beim Schweissen entstehenden inneren Spannungen infolge Schrumpfverformung zu verhindern, so dass unbekannte Vorspannungen auftreten, die zusammen mit den Betriebsbeanspruchungen zu Ermüdungsbrüchen führen können. Zur Vermeidung oder Verkleinerung solcher Schweiss-Spannungen stehen zwei Verfahren zur Verfügung: das Spannungsfreiglühen [6] und das Entspannungswärmen [7].

Beim Spannungsfreiglühen werden die zu entspannenden Schweissteile auf Temperaturen von 600...650 °C erwärmt, und sorgfältig wieder abgekühlt Das Verfahren beseitigt praktisch sämtliche Schrumpfspannungen, erfordert aber kostspielige Glüheinrichtungen. Die Arbeitsweise des Entspannungswärmens ist noch nicht allgemein bekannt, hat jedoch in den letzten Jahren, besonders für Schweissarbeiten an Orten, wo keine Öfen zur Verfügung stehen, immer mehr an Bedeutung gewonnen. Es handelt sich um eine Art thermische Verformung bei niedriger Temperatur, welche einen wesentlichen Abbau der Schweiss-Spannungen zur Folge hat. Mit Autogenbrennern wird neben der Naht auf 160...200 °C aufgewärmt und anschliessend durch Wasserbrausen sofort wieder abgekühlt. Das Verfahren eignet sich besonders für unlegierte Stähle mit kleinem Kohlenstoffgehalt.

## 5. Wicklungen

Die Wicklungen gehören zu den wichtigsten Bauelementen grosser Motoren und sind für die Lebensdauer dieser Maschinen von ausschlaggebender Bedeutung. Konstruktion und Technologie richten sich sowohl für die Stator- als auch für die Rotor-Wicklungen hauptsächlich nach elektrischen, thermischen und mechanischen Einflüssen, wobei — je nach Betriebsbedingungen — dem einen oder anderen Parameter vermehrte Bedeutung beigemessen werden muss.

### *5.1 Statorwicklungen*

Die Wicklungen in den Statoren grosser Motoren bilden den Übergang von den bei Kleinmotoren üblichen Träufelwicklungen für Niederspannung (bis 1000 V) zu den im elektrischen Grossgeneratorenbau üblichen Stabwicklungen. Für den unteren Leistungsbereich (genormte und typisierte Ausführungen) sind Spannungen von 2...7 kV, seltener 7...12 kV, üblich, wobei leider die heute noch ungenügende Normung der Betriebsspannungen die Wicklungsnormung erschwert. Spannungen über 12 kV haben im unteren und mittleren

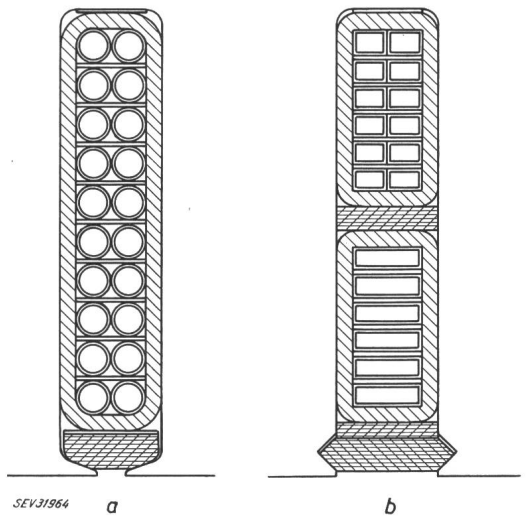



Fig. 13
**6-kV-Spulenwicklungen**
(Nutenschnitt 13 × 60)

*a* Durchziehwicklung mit 22 Leitern, 3,6/4,1 Durchmesser, lackiert und 3 mal mit Baumwolle umsponnen. Kupferquerschnitt 28,6 % des Nutenquerschnittes

*b* Formspulenwicklung; *oben:* mit 2 × 12 vorisolierten Profilkupferleitern 3,6 × 2,7/4,15 × 3,25, lackiert, glasfadenumklöppelt und lackiert. Kupferquerschnitt 28,3 % des Nutenquerschnittes; *unten:* mit 2 × 6 Kupferband-Leitern 7,8 × 2,7/8,3 × 3,2 mit Mika-Glasseidenband halb überlappt eingebunden. Kupferquerschnitt 33,2 % des Nutenquerschnittes

Leistungsbereich schlechte Ausnützung der Motoren und unverhältnismässig hohen Fabrikationsaufwand zur Folge, so dass sie üblicherweise nur für Spezialausführungen mit grossen Einheitsleistungen angewandt werden.

Während man früher versucht hat, die im Kleinmotorenbau übliche Wicklungstechnik (Träufelwicklungen bzw. Durchziehwicklungen) auch im mittleren Leistungsbereich der Motoren zu verwenden, werden heute immer mehr Wicklungen im Grossmotorenbau eingesetzt, welche die typischen Merkmale der Ausführungen für elektrische Grossgeneratoren aufweisen. Diese Entwicklung, welche durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Wicklungsisolationen für Grossgeneratoren mit hohen Betriebsspannungen gefördert wurde, hat dazu geführt, dass Träufelwicklungen heute auf Motoren kleiner Leistungen mit Spannungen unter 1000 V beschränkt sind und die früher beliebten eingezogenen oder eingesteckten Wicklungen für Spannungen über 1000 V durch moderne Formspulen-Wicklungen ersetzt wurden. Fig. 13 zeigt die Nutenschnitte einer alten eingezogenen Wicklung mit konzentrischen Wicklungsköpfen in zwei oder drei Etagen aus lack/baumwoll-isoliertem Runddraht der Wärmeklasse A für einen Motor von 6 kV und einer modernen Formspulen-Wicklung aus lack/glas- bzw. mika/glasisolierten Profil-Kupferdrähten in vakuumimprägnierter Ausführung für die gleiche Betriebsspannung. Durch die bessere Platzausnützung der Profildrähte ist es möglich, trotz grösseren Aufwandes an Isolation gegen Masse sowie der Zwischenlage zwischen Ober- und Unterschicht, bei den modernen Zweischichtwicklungen eine Nutenfüllung an Kupfer zu erreichen, welche derjenigen der Durchzieh-Wicklung entspricht. Formspulen verlangen offene Nuten, eine Bedingung, die früher besonders bei Induktionsmaschinen hoher Polzahl Schwierigkeiten bereitete. Offene Nuten führen bei kleinen Luftspalten, die bei hohen Polzahlen unerlässlich sind, zu höheren Magnetisierungsströmen und damit zu schlechteren Leistungsfaktoren im Betrieb sowie zu hohen Zusatzverlusten durch die Nutenpulsationen im Eisen. Dieser Nachteil der Formspulen beim Entwurf gewisser Asynchronmotoren konnte durch die Entwicklung halbmagnetischer Nutenkeile beseitigt werden; sie gestatten, die besseren magnetischen Eigenschaften halbgeschlossener Statornuten auch bei Statoren mit offenen Nuten nachzuahmen, was deutlich aus den Messungen in Tabelle III hervorgeht.

*Messungen an Maschinen mit offenen Nuten und nichtmagnetischen bzw. halbmagnetischen Nutenkeilen*

Tabelle III

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Leistung | kW | 630 | | 430 | |
| Polzahl | | 8 | | 10 | |
| Spannung | kV | 6 | | 5,5 | |
| Luftspalt | mm | 1,6 | | 1,5 | |
| Nutöffnung Stator | mm | 14 | | 14 | |
| Nutöffnung Rotor | mm | 3,2 | | 3,8 | |
| Nutenkeile im Stator | | nicht magn. | halb magn. | nicht magn. | halb magn. |
| Leerlaufstrom | A | 26,5 | 28,5 | 20,2 | 18,3 |
| Kurzschlußstrom | A | 275 | 232 | 286 | 242 |
| Eisenverluste | kW | 10,7 | 7,2 | 13,1 | 7,0 |
| Wirkungsgrad | % | 94,25 | 94,55 | 92,3 | 93,5 |

Es gelingt heute, magnetische Nutenkeile herzustellen, die in ihren mechanischen Eigenschaften und ihrer thermischen Beständigkeit in keiner Weise den üblichen Nutenkeilen aus Harzholz, Hartgewebe oder Glas-Kunstharz nachstehen. Hingegen sind konstruktive und fabrikatorische Massnahmen notwendig, um unzulässige Vibrationen der Keile im Betrieb zu verhindern.

### 5.1.1 Qualitätsansprüche für Hochspannungs-Spulenwicklungen

Der Hauptmangel der eingezogenen Wicklungen liegt in ihrer ungenügenden mechanischen Festigkeit, verbunden mit ihrer Glimmempfindlichkeit. Damit die Runddrähte in die Nutenhülse eingezogen werden können, ist ein gewisses Spiel zwischen den Leitern unerlässlich. Ausserdem muss beim Einziehen der Spulenanfang entsprechend der Windungszahl mehrmals durch die Nutenhülsen gezogen werden, wobei die Isolation des Drahtes geschwächt wird. Es ist daher nicht zu verwundern, dass bei solchen Motoren häufig Serieleiterschlüsse, verursacht durch das Vibrieren der Drähte in der Hülse oder im Bereich des Wickelkopfes auftraten und die Wicklung zerstörten. Die Lebensdauer dieser Wicklungen wurde bei Betriebsspannungen über 2 kV ausserdem durch Glimmerscheinungen in der Nut, welche die Serieleiterisolation zerstörten, wesentlich verkleinert. Auch das Tränken in thermohärtenden Lacken oder das Ausgiessen der Nutenhülsen mit Kunstharzen auf Polyester- oder Epoxybasis nach dem Wickeln bringt bei grossen Motoren mit Spannungen über 2 kV keine genügende Qualitätssteigerung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei Wicklungen mit Serieleitern, wie sie bei Hochspannungsmotoren im mittleren Leistungsbereich vorwiegen, die Lebensdauer — im Gegensatz zu Stabwicklungen in Grossmaschinen — weniger durch die thermomechanische Festigkeit des Isolationsmaterials, sondern vielmehr durch das thermomechanische Verhalten des Serieleiterbündels und dessen Widerstandsfähigkeit gegen Glimmeinflüsse bestimmt wird. Umfangreiche Untersuchungen der südafrikanischen General Mining and Finance Corporation [8] an defekten Motorwicklungen haben gezeigt, dass mit steigender Betriebsspannung eine deutliche Zunahme der Wicklungs-

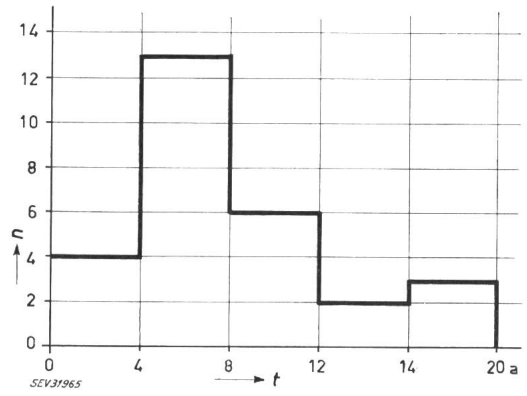



Fig. 14
**Ausfall von Motoren infolge Wicklungsschäden in Funktion der Betriebsdauer**
*n* Zahl der Motoren; *t* Betriebsdauer in Jahren

defekte beobachtet werden kann. Während bei Motoren mit Spannungen zwischen 2...4 kV die Zahl der Wicklungsschäden eher klein war, trat bei Motoren für 6,6 kV und Leistungen zwischen 400...3700 kW eine deutliche Häufung der Defekte auf. Fig. 14 zeigt die Lebensdauer von insgesamt 27 Motoren, welche in der Zeit von 1939 bis 1960 in Betrieb gesetzt wurden und infolge Wicklungsschäden wieder ausfielen. Dabei kann festgestellt werden, dass mehr als die Hälfte der Motoren innerhalb von 8 Betriebsjahren einen Defekt an der Statorwicklung erlitten, wobei ca. 50 % im Zeitraum von 4 bis 8 Jahren nach der Inbetriebsetzung. Nur 3 Motoren mit Leistungen zwischen 1700...3700, d. h. ca. 10 % erreichten eine Lebensdauer von 16 bis 20 Jahren, wie sie bei elektrischen Grossmaschinen erwartet werden kann. Die Untersuchungen haben ferner gezeigt, dass sämtliche Wicklungen infolge Serieleiterschlusses zu Grunde gingen, wobei Spulen in unmittelbarer Nähe der Klemmen zuerst ausfielen und deutliche Glimmspuren zwischen Serieleitern und Nutenisolation aufwiesen. Mit Recht wird daher festgehalten, dass der mechanischen Festigkeit und Hohlraumfreiheit des Nutenteiles bei Spulenwicklungen im Spannungsbereich 6 kV ausschlaggebende Bedeutung zukommt. Die gleiche Forderung muss auch für die Wicklungsköpfe gestellt werden, obwohl dort das Lockern des Serieleiterbündels durch Glimmschäden weniger in Betracht fällt. Es sind Fälle bekannt, wo lose Serieleiter im Wickelkopf ein ratterndes, last-, d. h. stromabhängiges Geräusch verursachten, das erst durch Kunstharz-Injektionen beseitigt werden konnte.

Die Anforderungen an qualitativ einwandfreie Spulenwicklungen sind daher nicht wesentlich geringer als bei Stabwicklungen für grosse elektrische Generatoren [9]. Während bei Maschinen mit grossen Eisenlängen thermomechanisch ungenügende, von Glimmeinflüssen geschwächte Isolationssysteme Kriecherscheinungen und damit Zerstörung der Nutenisolation zur Folge haben, gehen Spulenwicklungen mit ungenügender thermomechanischer Festigkeit des Serieleiterbündels an Windungsschluss mit anschliessender Zerstörung der Hauptisolation zu Grunde, wobei auch hier der Zerfall durch Glimmen beschleunigt wird.

Die Überlegungen zeigen, dass bei Spulenwicklungen der Qualität der Serieleiterisolation eine grosse Bedeutung beigemessen werden muss, die in keiner Weise hinter derjenigen der Nuten- bzw. Wickelkopf-Isolation zurücksteht. Es muss dabei besonders hervorgehoben werden, dass die Serieleiterisolation nicht nur die erwähnten Betriebsbedingungen einhalten, sondern derart beschaffen sein muss, dass sämtliche fabrikatorischen Operationen vom Schablonieren über das Isolieren bis zum Einbau in den Stator ohne Qualitätseinbusse durchgeführt werden können. Dabei handelt es sich zum Teil um Beanspruchungen, die — obwohl von kurzer Dauer — grösser als die Betriebsbeanspruchungen sein können.

### 5.1.2 Serieleiterisolationen

Als Serieleiter für Spulenwicklungen kommen heute grundsätzlich zwei Ausführungen in Frage:

a) isolierte Profilkupferdrähte,
b) blanke Kupferbänder.

Isolierte Profildrähte können nur bis zu bestimmten Grenzquerschnitten verarbeitet werden, so dass bei Spulenwicklungen mit grösseren Serieleiterquerschnitten entweder isolierte Profildrähte in Parallelschaltung oder blanke Kupferbänder verwendet werden, welche durch Zwischenlagen zur Reduktion der zusätzlichen Kupferverluste gegeneinander isoliert und anschliessend mit Isolierbändern umwickelt werden.

Bei den isolierten Profilkupferdrähten sind zwei grundsätzlich verschiedene Isolierverfahren zu unterscheiden: folienisolierte Drähte und faserisolierte Drähte. Folienisolierte Drähte eignen sich besonders für Wicklungen mit Betriebsspannungen unter 1000 V (s. Rotorwicklungen), da moderne Folien hoher Wärmebeständigkeit schwer imprägnierbar sind. Die früher häufig verwendeten Drähte mit Papierisolation für Wicklungen der Wärmeklasse A werden heute meistens durch Profildrähte mit Kunstharzfolienisolation (Polyesterfilme) ersetzt, die bezüglich Festigkeit und Wärmealterung bedeutend bessere Eigenschaften aufweisen.

Bei den faserisolierten Drähten wird meistens eine Kombination von Faserstoffen mit Isolier- und Bindelacken verwendet. Während noch vor wenigen Jahren Lackdrähte mit Baumwollumspinnung für Spulen der Wärmeklasse A (105 °C) die Regel waren, ist man heute allgemein auf Material der Wärmeklasse E (120 °C), B (130 °C) und neuerdings auch F (155 °C) übergegangen. Der Draht wird mit einem mechanisch und thermisch widerstandsfähigen Lackfilm überzogen, mit einer geeigneten Isolierfaser umsponnen oder umklöppelt und mit einem Decklack versehen. Kunstfasern sind bezüglich Festigkeit und Wärmealterungsbeständigkeit bedeutend besser als die konventionellen Baumwoll- oder Seiden-Fasern; zusammen mit geeigneten Imprägnierharzen können sie bis zu Betriebstemperaturen entsprechend der Wärmeklasse B verwendet werden. Ein wesentlicher Fortschritt in thermischer Hinsicht wurde durch die Entwicklung der Polyvinylazetal- und Terephtalsäureester-Lacke erzielt, die eine ausgezeichnete thermische Stabilität erreichen. Als Faserstoffe für diese Drähte kommen Glas oder Asbest in Frage. Die Glasqualität ist dabei sowohl für die Qualität der Serieleiterisolation als auch für die Güte der Imprägnierung mit Kunstharzen von grosser Bedeutung. Für Isolationszwecke werden daher heute fast ausschliesslich Gläser mit kleinem Alkaligehalt und speziellen Schlichten verwendet, welche schlechtes Benetzen (Abbinden) mit den Imprägnierharzen und die daraus folgenden ungenügenden elektrischen Eigenschaften verhindern. Glas ist neben Asbest, der in be-

sonderen Fällen dank besserer Abreibfestigkeit verwendet wird, die einzige Isolierfaser, welche bis zu höchsten Temperaturen [Klasse H (180 °C), Klasse C (>180 °C)] eingesetzt werden kann.

Bei Spulen, welche nicht vakuumimprägniert werden, ist dem mechanischen Zusammenhalt des Serieleiterbündels besondere Beachtung zu schenken, damit Betriebsstörungen infolge Leitervibrationen und Windungsschluss vermieden werden können. Es ist daher üblich, die Serieleiterbündel mindestens im Nutenteil zu verfestigen, indem selbstklebende Glas-Asbest-Zwischenlagen oder Epoxy-Decklacke verwendet werden, die bei den Verfestigungstemperaturen die Leiterbündel verkleben.

Zur Isolation blanker Kupferbänder oder von Serieleitern, die aus blanken Teilleitern aufgebaut sind, stehen sämtliche Isolierbänder zur Verfügung, die heute in verwirrender Vielfalt dem Konstrukteur angeboten werden. Es ist daher häufig nicht leicht, qualitative, fabrikatorische und preisliche Vor- und Nachteile richtig gegeneinander abzuwägen und für einen bestimmten Fall die beste Lösung zu finden. In den letzten Jahren haben sich jedoch gewisse Richtlinien für den Einsatz von Bandisolationen herauskristallisiert, nach denen die meisten Wicklereien arbeiten. Entsprechend den heutigen Fabrikationsverfahren sind Bänder für nicht imprägnierte Wicklungen (trocken oder nass gewickelte Isolationen; in Lack getränkte Wicklungen) und solche für vakuumimprägnierte Wicklungen zu unterscheiden.

Nichtimprägnierte Wicklungen verlangen Isolierbänder, die bei kleinstem Isolationsauftrag hohe elektrische und mechanische Festigkeit aufweisen. Die Imprägnierbarkeit spielt eine untergeordnete Rolle, obwohl auch nichtimprägnierte Wicklungen häufig getränkt werden. Ferner ist zu unterscheiden zwischen Bändern für Niederspannung bis 1 kV und glimmbeständigen Qualitäten für Spannungen über 1 kV. Bezüglich Glimmbeständigkeit der verschiedenen Isoliermaterialien gehen die Meinungen zum Teil noch stark auseinander. Als Isoliermaterial bester Glimmbeständigkeit wird jedoch allgemein der Glimmer anerkannt, sei er grossflächig (Schuppenglimmer) oder kleinflächig (Flockenglimmer, Glimmervlies, Glimmerpapier). Gute Glimmbeständigkeit weisen auch Materialien hoher thermischer Beständigkeit, wie Asbest und Glas auf, das heute auch in Flockenform erhältlich ist. Bei den Bindemitteln stehen die Kompounde auf Asphaltbasis an der Spitze, während Kunstharze noch unterschiedlich und praktisch sämtliche natürlichen Harze negativ beurteilt werden. Die Auswahl an glimmbeständigen Materialien ist sehr klein, weshalb viele Hersteller grosser Motoren es vorziehen, Hochspannungswicklungen — mindestens für Nennspannungen über 4 kV — unter Vakuum zu imprägnieren.

Bänder aus modernen Isolierfilmen und Film-Faserstoff-Kombinationen haben Papier im unteren Temperaturbereich bis zur Wärmeklasse B (130 °C) praktisch vollständig verdrängt.

Faserstoffe, Gewebe und Flocken-Faserstoff- oder Flokken-Gewebe-Kombinationen können ohne Bindemittel nicht verwendet werden, da die elektrische Durchschlagfestigkeit solcher Bänder nur der distanzierenden Luftdistanz des Isolationsauftrages entsprechen würde. Es sind zwei Bandqualitäten zu unterscheiden: Lackbänder und vorimprägnierte Bänder. Lackbänder sind Isolierfilmbänder, welche durch Faserstoffe oder Gewebe derart verstärkt sind, dass sie mechanisch den fabrikatorischen Anforderungen und den Betriebsbedingungen genügen. Dadurch ist es möglich, Lack- und Kunstharzfolien in Bandform zu verarbeiten, die gute elektrische Eigenschaften aufweisen, jedoch mechanisch ohne Armierung ungenügend wären. Die Lacke und Harze sind dabei — im Gegensatz zu vorimprägnierten Bändern — in ihrem chemischen Endzustand und besitzen ihre vollen elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften. Eine wesentliche Voraussetzung für das einwandfreie Verarbeiten solcher Bänder ist genügende Elastizität, wobei die Dehnungseigenschaften von Lackfilm und Armierung derart aufeinander abgestimmt werden müssen, dass sich die elektrischen Eigenschaften durch den Wickelprozess nicht verschlechtern.

Für geringe thermische Anforderungen [Wärmeklasse A (150 °C)] werden auch heute noch Öllacke verwendet, wobei als Bandarmierung Kunstfaser-Gewebe dank ihrer besseren Dehnbarkeit und mechanischen Festigkeit die früher üblichen Seide- und Baumwollbänder verdrängt haben. Bei glasarmierten Bändern für höhere thermische Ansprüche [Wärmeklasse E (120 °C) und B (130 °C)] ist der Lackqualität besondere Beachtung zu schenken, da besonders diagonal geschnittene Glasbänder sehr leicht die Dehnbarkeit des Lackfilmes überschreiten, so dass nach dem Wickeln ein starkes Sinken der Durchschlagfestigkeit beobachtet werden kann. Polyurethanharze haben sich sowohl zusammen mit Kunstfaser- als auch Glas-Armierung sehr gut bewährt. Neuerdings sind Entwicklungen im Gange, Siliconelastomere für höchste thermische Ansprüche [Wärmeklasse H (180 °C)] mit Glas zu armieren und damit die ungenügende mechanische Festigkeit von Siliconkautschukbändern zu verbessern. Gleichzeitig wird versucht, durch Verwendung von Glimmerflocken die elektrischen Eigenschaften der Siliconelastomerisolationen zu verbessern, die bisher die Qualität von Glimmerisolationen nicht erreichen konnten. Der grosse Vorteil der Siliconbänder für Spulenwicklungen liegt in ihrer ausgezeichneten Flexibilität bis zu höchsten Temperaturen sowie in ihrer guten Feuchtigkeitsbeständigkeit.

Während Isolationen aus trockenen Lackbändern — trotz Nasswickeln mit geeigneten Bindemitteln oder Tauchen in Tränklacken zur Verfestigung der Serieleiterbündel — immer Hohlräume aufweisen und damit glimmempfindlich sind, können diesbezüglich mit vorimprägnierten Bändern bessere Resultate erzielt werden. Die Serieleiterbündel lassen sich durch Pressen bei erhöhter Temperatur sehr leicht verfestigen, da das Bindemittel im Band enthalten ist. Entsprechend den verwendeten Bindemitteln sind thermoplastische, thermoelastische und thermofeste Bänder zu unterscheiden. Für Spulenwicklungen werden thermoplastische und thermoelastische Qualitäten bevorzugt, da man aus fabrikatorischen Gründen beim Spuleneinbau auf flexible Wicklungsköpfe angewiesen ist. Thermofeste Bänder können verwendet werden, wenn sie erst nach dem Einbau der Wicklung polymerisiert werden; solche Wicklungen weisen eine gute Kurzschlussfestigkeit auf, müssen jedoch bei Isolationsdefekten vollständig erneuert werden, da sie beim Ausbau infolge mangelhafter Flexibilität zerstört werden.

Die wohl bekanntesten Vertreter der thermoplastischen Bänder sind Kompound-Mica-Bänder mit Papier-, Seide-, Kunstfaser- oder Glas-Trägern. Die Banddicken schwanken

zwischen 0,1 bis 0,2 mm, so dass sie sich dank ihrer vorzüglichen Flexibilität sehr gut verarbeiten lassen. Die guten mechanischen (Druckfestigkeit) und elektrischen Eigenschaften (Glimmbeständigkeit) haben dazu geführt, dass Serieleiterisolationen dieser Art ohne Vakuumimprägnierung bis zu Betriebsspannungen von ca. 4 kV verwendet werden können. Als billigste Lösung können Bänder mit lagerfähigen Kompounden verwendet werden, welche in luftdicht schliessenden Büchsen aufbewahrt während Monaten gelagert werden können. Ihre Kriechfestigkeit ist jedoch ungenügend, so dass sie als Nutenisolation nicht in Frage kommen und für diesen Zweck durch Folienisolationen auf Asphalt (Asphalt-Micafolium), Schellack (Schellack-Micafolium) oder Kunstharz-Basis (Epoxy-Mica- oder Samica-Folien) ersetzt werden. Die Verwendung teurer, modifizierter Kompounde zur Vorimprägnierung solcher Bänder lohnt sich im allgemeinen aus preislichen Erwägungen und aus Gründen der Lagerfähigkeit nicht, weshalb man für Spulen mit durchgehend einheitlicher Kompound-Mica-Bandisolation in Nuten und Wicklungsköpfen auch bei Spannungen unter 4 kV das Vakuumimprägnieren mit modifizierten Asphalten (Kompounde) vorzieht.

Während bei thermoplastischen Bändern durch geeignete Wahl des Bindemittels schon bei Raumtemperatur ein weitgehendes Ausfüllen der Hohlräume eintritt, ist dies bei thermoelastischen und thermofesten Bändern meistens erst durch eine Wärmebehandlung (Vulcanisation, Polymerisation) möglich. Dazu sind Kalibrierformen notwendig, welche den Fabrikationsprozess derart verteuern, dass keine wesentlichen Einsparungen, verglichen mit Vakuumimprägnierprozessen mehr möglich sind. Als Bänder kommen in Frage:

a) Armierte Siliconelastomerbänder für elastische Isolationen hoher Wärmebeständigkeit;

b) Mit Kunstharzen (Polyester- oder Epoxy-Harze) vorimprägnierte Glas-Glimmer-Bänder für thermofeste Isolationen.

Allen Bandarten ist gemeinsam, dass die Isolier- bzw. Bindemittel chemisch noch nicht ihren Endzustand erreicht haben, sondern erst nach dem Wickeln durch Vulcanisation bzw. Polymerisation in diesen Zustand übergeführt werden müssen. Mit Kunstharz vorimprägnierte Bänder werden nach den Verfahren der Kunstharzfolien-Isolationen hergestellt [10]. Während sich bei der Verarbeitung vorimprägnierter Glimmerflocken- oder Faserstoff-Isolationen zu Nutumpressungen (Isolierhülsen) oder Nuteinlagen keinerlei Schwierigkeiten zeigen, macht sich bei Verwendung vorimprägnierter Bänder auf Glimmerflocken- oder Faserstoff (Asbest)-Basis für dünne Serieleiterisolationen die mangelhafte Druckbeständigkeit während des Kalibrier- und Polymerisationsvorganges störend bemerkbar. Beim Kalibrieren (Pressen) unter hohen Temperaturen durchläuft das Harz eine dünnflüssige Phase, wobei Glimmerflocken oder Faserstoffe ausgequetscht werden können. Die daraus resultierende ungenügende Durchschlagfestigkeit der Windungsisolation kann auch durch druckfeste Zwischenlagen nur unwesentlich verbessert werden, so dass als Serieleiterisolation Schuppenglimmer-Bänder vorgezogen werden.

### 5.1.3 Isolationssysteme für Hochspannungs-Spulenwicklungen

Für Betriebsspannungen über 4 kV werden heute fast ausnahmslos vakuumimprägnierte Wicklungen verwendet. Die Entwicklungsarbeiten für Hochspannungsisolationen grosser elektrischer Maschinen haben dabei auch die Isoliertechnik grosser Motoren wesentlich beeinflusst. Es stehen heute zwei Imprägnierverfahren zur Verfügung:

a) Das konventionelle Kompound-Verfahren (Asphaltisolationen);

b) Moderne Kunstharz-Imprägnier-Verfahren mit Polyester- oder Epoxy-Harzen.

Das Kompound-Verfahren eignet sich besonders für Spulenwicklungen, da durch nachträgliches Wärmen der Wickelköpfe mit Infrarotstrahlern die Flexibilität beim Spuleneinbau beliebig gesteigert werden kann. Modifizierte Asphalt-Kompounde, die allerdings unter Schutzgasatmosphäre verarbeitet werden müssen, gestatten das vollständig homogene Isolieren der Spulen bezüglich Serieleiter, Nutenteil und Wicklungsköpfe nach dem gleichen Verfahren, da bei den bei Spulenwicklungen üblichen Eisenlängen thermomechanische Störungen (Bandverschiebungen im Betrieb) nicht zu befürchten sind. Kompoundierte Spulen sind praktisch glimmfrei und die Serieleiter sind mechanisch derart gut verbunden, dass bis zu den höchsten Betriebsspannungen keine Windungsdefekte auftreten können. Kompoundierte Wicklungen sind ausserdem in hohem Grade feuchtigkeitsbeständig, eine Eigenschaft, die bei nicht vakuumimprägnierten Isolationen nur schwer erreichbar ist. Damit stellt sich das Kompound-Verfahren für grosse Motoren mit Betriebstemperaturen bis zur Wärmeklasse B (130 °C) qualitativ an die Spitze sämtlicher bisher beschriebenen Isolierverfahren für Spulenwicklungen.

Zusammen mit Nutumpressungen aus Isolierfolien können auch billige Kompounde verwendet werden, die nicht unter Schutzgasatmosphäre verarbeitet werden müssen. Solche Spulenwicklungen mit Kunstharzfolien-Umpressungen im Nutenteil zeichnen sich durch thermisch und mechanisch widerstandsfähige Nutenisolationen und sehr flexible Kopfisolationen aus, welche den Spuleneinbau auch bei Motoren kleiner Polzahl sowie eventuelle spätere Reparaturen erleichtern.

Durch die Anwendung der für Hochspannungswicklungen elektrischer Grossmaschinen entwickelten Kunstharzvakuumimprägnierverfahren für Statorspulen grosser Motoren wird versucht, die elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften der kompoundierten Wicklungen weiter zu verbessern und gleichzeitig ein einheitliches Isolierverfahren zu finden, welches aus der Vielfalt der heutigen Verfahren herausführt und eine rationelle Fabrikation sämtlicher Wicklungsarten im Elektromaschinenbau gestattet. Da die Ansprüche an die elektrischen und insbesondere thermomechanischen Qualitäten der Spulenisolation grosser Motoren in keiner Weise den Anforderungen an die Wicklungen von Grossgeneratoren entsprechen, ging die Entwicklung auf diesem Gebiet langsamer vorwärts und darf, trotz erfolgversprechenden Zwischenresultaten, noch keineswegs als abgeschlossen angesehen werden. Das Ziel der Entwicklung ist ein Isolierharz, welches sich leicht imprägnieren lässt und dauernd flexible, leicht ein- und ausbaubare Spulen liefert, deren Qualität den heute bekannten Hochspannungswicklungsisolationen entspricht. Die modernen Kunstharz-Imprägniermittel erfüllen diese Forderungen nur teilweise, wobei vor allem die Bedingung guter Flexibilität bei besten elektrischen und mechanischen Eigenschaften Schwierigkeiten bereitet.

Als Isolierbänder kommen praktisch nur Schuppenglimmer- oder Flockenglimmer-Bänder mit Glasgewebeträger in Frage, da sie allein die Voraussetzungen für höchste Wärmebeständigkeit bieten. Zur Isolation der Serieleiter werden aus mechanischen Gründen Schuppenglimmer-Bänder bevorzugt, da Bänder aus Flockenglimmer oder Faserstoffen (Asbest) — ähnlich wie die vorimprägnierten Bänder — nach dem Vakuumimprägnieren zu wenig druckfest sind und beim Pressen der Serieleiterbündel leicht durchgequetscht werden. Zur Isolation gegen Masse können in Nut und Wicklungskopf beide Bandqualitäten verwendet werden, wobei Schuppenglimmer den fabrikatorischen Vorteil guter Druckbeständigkeit aufweist, während sich Flockenglimmerbänder leichter imprägnieren lassen und nach abgeschlossener Polymerisation der Imprägnierharze homogene, elektrisch und mechanisch hochwertigere Isolationen liefern.

Das Problem flexibler Wicklungsköpfe wird heute auf verschiedene Art zu lösen versucht:

Die Spulen werden mit einem warmhärtenden Harz auf Polyester- oder Epoxy-Basis imprägniert, im Nutenteil kalibriert und vorgetrocknet. In diesem Zustand sind die Spulen noch flexibel und lassen sich ohne Schwierigkeiten in den Stator einbauen. Erst nach dem Spuleneinbau erfolgt die Polymerisation und damit Härtung des Harzes in Öfen oder während des Betriebes, wobei die Isolation ihre volle elektrische und mechanische Festigkeit erreicht. Das Verfahren weist den Nachteil auf, dass einzelne Spulen nach dem Polymerisieren nicht oder nur unter grossen Schwierigkeiten ausgebaut werden können, so dass bei Störungen anlässlich der Spannungsprüfung oder später im Betrieb mit dem Ersatz der ganzen Wicklung gerechnet werden muss.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Modifikation der Imprägnierharze durch geeignete Zusätze, Flexibilisatoren, so dass sie nach der Polymerisation flexible Spulen liefern. Leider geht durch Beimischung von Flexibilisatoren ein Teil der elektrischen und mechanischen Qualitäten des Ausgangsharzes verloren.

Eine weitere Lösung besteht darin, für Nutenteil und Wicklungsköpfe verschiedene Isolierverfahren, mindestens verschiedene Imprägnierharze zu verwenden. Auf diese Weise können hochwertige Nutenisolationen der Wärmeklassen F und H hergestellt und trotzdem flexible Wicklungsköpfe fabriziert werden (Beispiel: Kunstharz-Kompound-Kombinationen). Es ist auch möglich, nur den Nutenteil mit einem qualitativ hochwertigen Harz zu imprägnieren und im Wickelkopf flexible Bänder, zum Beispiel auf Siliconelastomer-Basis zu verwenden, die keinen Imprägnierprozess erfordern. Das Verfahren kann auch höchste Qualitätsansprüche erfüllen, ist aber teuer und daher auf Spezialausführungen für besondere Betriebsanforderungen (Überlastbetrieb, Betrieb bei hohen Umgebungstemperaturen, Wicklungen mit besonderen Anforderungen an die Lebensdauer usw.) beschränkt.

Die Beispiele zeigen, dass heute noch keine billige und gleichzeitig höchsten Ansprüchen genügende, flexible Spulenisolation auf Kunstharzbasis vorhanden ist. Die Entwicklungsarbeiten gehen jedoch weiter, und es besteht kein Zweifel, dass in naher Zukunft Imprägnierharze gefunden werden, die sich besonders für flexible Spulen eignen.

Für Motoren mit sehr grossen Einheitsleistungen werden ausschliesslich Kunststab-Wicklungen (Röbelstäbe) oder Serieleiter-Stab- und Spulen-Wicklungen mit wenigen Serieleitern pro Spulenseite verwendet. Es handelt sich dabei um Wicklungen, wie sie im elektrischen Grossmaschinenbau allgemein üblich sind und deren Isolierverfahren in der Literatur eingehend beschrieben wurden [9...14].

### *5.2 Rotorwicklungen*

Bei den Rotorwicklungen grosser Motoren ist zu unterscheiden zwischen:

a) Schleifringankerwicklungen für Asynchronmotoren;
b) Käfigwicklungen für Asynchronmotoren und Synchronmotoren;
c) Polspulen für Synchronmotoren.

#### 5.2.1 Schleifringanker-Wicklungen

Die Schleifringanker-Wicklungen entsprechen in ihrem grundsätzlichen Aufbau den Niederspannungs-Statorwicklungen, da die Anlaufspannungsspitzen der Schleifringanker mit Rücksicht auf die Schleifringe und den Anlasser auf etwa 2 kV beschränkt sind. Bei den grossen Motoren hat sich allgemein die Stabwicklung durchgesetzt, da sie trotz ihres Mehraufwandes beim Einbau mechanisch stabiler abgestützt werden kann als die bei Motoren kleiner Leistung üblichen Formspulen. Der mechanisch einwandfreien Abstützung der Rotorwicklungsköpfe muss besonders bei zwei- und vierpoligen Motoren grosse Beachtung geschenkt werden, da die mechanische Stabilität nicht nur zur Beherrschung der Betriebs- und Kurzschlusskräfte, sondern auch für die Laufruhe des Motors von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Die Umfanggeschwindigkeiten eines Schleifringankers von 1 m Durchmesser liegen bei zwei- bis zehnpoligen Motoren im Bereich von 160 bis 30 m/s. Die Kühlwirkung ist daher bei schnellaufenden Maschinen im Bereich der Wicklungsköpfe sehr gut, so dass die Wärmeabgabe an der Aussen- und Innenfläche der Wicklungszylinder genügt. Es ist daher üblich, die Schenkel der Wicklungsstäbe ohne Zwischenräume aneinanderzureihen und durch Zwischenlagen sorgfältig gegeneinander abzustützen. Dadurch werden Verlagerungen oder gar das Kippen der Wicklungsstäbe unter Einfluss der Fliehkräfte im Betrieb sicher vermieden. Bei mässigen Fliehkraftbeanspruchungen genügen zur Abstützung der Rotorwicklungsköpfe Stahlbandagen und neuerdings auch Bandagen aus kunstharzimprägnierten Glasbändern. Bei grossen zwei- und vierpoligen Motoren werden häufig Wicklungskappen aus nichtmagnetischen Metallen hoher Festigkeit verwendet, wie sie bei Turbogeneratoren üblich sind. Es ist heute möglich, auch für grosse Umfangsgeschwindigkeiten billige Kunstharz-Glas-Bandagen zu verwenden; sie weisen aber — verglichen mit metallischen Kappen — zwei Nachteile auf:

a) Die Wärmeabgabe an der Aussenfläche der Wicklungsköpfe ist kleiner als bei Konstruktionen mit metallischen Kappen;
b) Bei Störungen müssen die Glasbandagen erneuert werden, was nur in Werkstätten möglich ist, die über Öfen zum Aushärten der warmhärtenden Kunstharze verfügen.

Während Niederspannungswicklungen für Statoren mit grossen Strömen zur Reduktion der zusätzlichen Kupferverluste aus Teilleitern aufgebaut werden müssen, ist dies bei Schleifringankerwicklungen in der Regel nicht notwendig. Die Frequenzen sind im Betrieb mit Drehzahlen bis zu 30 % Schlupf so klein, dass massive Flachkupferbänder hochkant in die Nuten eingelegt werden können. Die Wicklungen werden dadurch im Aufbau einfach und mechanisch robust, so

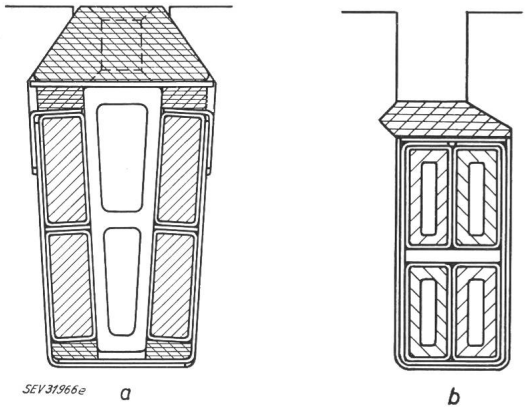



Fig. 15
**Nutenschnitte eines Schleifringankers mit direkter Leiterkühlung**
*a* Kühlkanal in der Nutenmitte; *b* Hohlleiter

dass Schleifringanker auch für grosse Leistungen von 5000 kW und mehr gebaut werden können.

Meistens genügt die normale Kühlung des Rotorblechkörpers, um die Rotornutenverluste ohne schädliche Erwärmungen abführen zu können. Bei hoch ausgenützten Rotoren werden auch direkte Kühlverfahren angewandt, wie sie sich bei Rotorwicklungen von Turbogeneratoren bewährt haben (Fig. 15).

Bei der Wahl des Isoliermaterials für Schleifringanker-Wicklungen muss das Hauptgewicht auf mechanische und thermische Eigenschaften gelegt werden; rein elektrische Qualitäten sind erst in zweiter Linie massgebend. Besondere Bedeutung wird der Druckfestigkeit beigemessen, eine Eigenschaft, die der Glimmer in hervorragender Weise erfüllt. Aus diesem Grunde wird auch heute noch Glimmer allein oder in Verbindung mit thermisch beständigen Faserstoffen verwendet. Der Glimmer hat jedoch eine unangenehme Eigenschaft, der besonders beim Einsatz in Rotorwicklungen Rechnung getragen werden muss: die Spaltbarkeit. Glimmerisolationen, die ohne geeignete Trägermaterialien in Rotoren verwendet werden, neigen unter dem Einfluss der Wärmedilatationen des Kupfers und der Fliehkraft zum Spalten, wobei einzelne Schuppen aus den Nuten herausgestossen werden können. Man verwendet daher Glimmerisolationen in Verbindung mit Isolierfilmen und Faserstoffen, welche die Schuppen einschliessen und das Kriechen des Glimmers verhindern.

Die Leiter selbst werden meistens mit Isolierfilmen oder Isolierfilm-Faserstoff-Kombinationen (imprägnierte Glasgewebe usw.) isoliert, wobei Folien-Asbest-Kombinationen aus Gründen der Druckfestigkeit bevorzugt werden.

Auch für Zwischenlagen und Nutauskleidungen wird der Glimmer vermehrt durch vorgepresste Kunstharz-Glas-Asbest-Produkte ersetzt, die sich durch Homogenität, Festigkeit und Wärmebeständigkeit auszeichnen.

Schleifringanker-Motoren eignen sich besonders für:

a) Antriebe mit grossem Anlaufmoment bei kleinsten Anlaufströmen;
b) Antriebe mit verhältnismässig lange dauerndem Anlauf, besonders dann, wenn der Anlauf gesteuert werden muss (Antrieb grosser Schwungmassen);
c) Antriebe mit Drehzahlregulierung.

### 5.2.2 Käfigwicklungen

Bei den Käfig-Wicklungen ist zu unterscheiden zwischen:

a) Ausführungen für Asynchronmotoren;
b) Anlaufwicklungen für Synchronmotoren.

Die Dimensionierung beider Wicklungsarten wird massgebend durch die Tatsache bestimmt, dass die Hälfte der Anlaufenergie in ihnen in Wärme umgesetzt wird, während der Rest zum Beschleunigen der Massen gebraucht wird. Käfigwicklungen stellen daher besondere Anforderungen an die thermomechanische Festigkeit und unterscheiden sich dadurch wesentlich von den Dämpferwicklungen in Drehstrom-Generatoren, die im Aufbau ähnlich sind, aber thermomechanisch bedeutend weniger beansprucht werden. Käfigankermotoren sind in den meisten Fällen verwendbar, wenn direktes Einschalten im betreffenden Netz zugelassen und praktisch konstante Drehzahl gewünscht wird. Sie zeichnen sich durch robuste Bauart aus und sind überall dort vorzuziehen, wo besonderes Gewicht auf Einfachheit und geringe Wartung im Betrieb gelegt wird.

Rotorkäfige bestehen vorwiegend aus Kupfer oder Kupferlegierungen und werden meistens in folgenden Ausführungen hergestellt:

| | |
|---|---|
| a) *Rundstabkäfig* | als einfachste, preislich vorteilhafteste Ausführung für Motoren mit kleinem Anzugsmoment; |
| b) *Hochstabkäfig* | für Motoren mit mittleren Anzugsmomenten oder Motoren mit kleinem Anzugsmoment und Anlasstransformatoren zur Reduktion der Anlaufströme; |
| c) *Keilstabkäfig* | als Spezialausführung für zwei- und vierpolige Motoren mit hohen Anforderungen bezüglich Anlauf und Laufruhe; |
| d) *Rundstab-Doppelkäfig* | für schwere Anlaufbedingungen mit hohem Anzugsmoment; für mittlere Anzugsmomente bei kleinen Anlaufströmen oder zum Antrieb grosser Schwungmassen. |

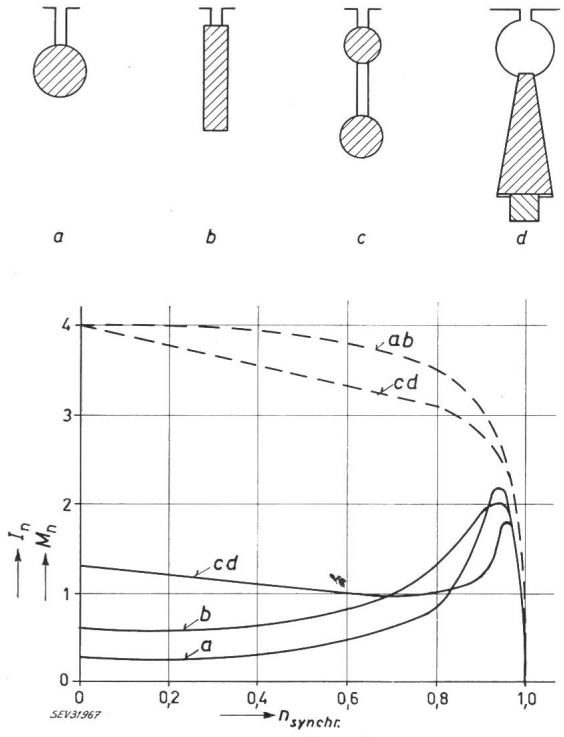



Fig. 16
**Ausführungsarten von Rotorkäfigen und ihr Einfluss auf Strom- und Drehmoment-Verlauf bei Asynchronmotoren im Leistungsbereich 500...2000 kW**
$I_n$ Nennstrom; $M_n$ Nennmoment; $n_{synchr.}$ Synchron-Drehzahl
———— Strom — — — — — Drehmoment
*a* Rundstab-Käfig; *b* Hochstab-Käfig; *c* Rundstab-Doppelkäfig; *d* Keilstab-Käfig

Fig. 16 zeigt die verschiedenen Käfigarten und den grundsätzlichen Verlauf des Drehmomentes und des Statorstromes während des Anlaufes bei Motoren im Leistungsbereich 500 bis 2000 kW.

Bei schnellaufenden Motoren hat sich der Keilstabkäfig bewährt, der sich durch guten Wärmeübergang an den Rotorblechkörper und festen Sitz in der Rotornut auszeichnet, was sich günstig auf die Laufruhe des Motors auswirkt. Die Käfigwicklungen werden elektrisch derart ausgelegt, dass der grösste Teil des Widerstandes in den Stäben, d. h. im Nutenteil des Käfigs liegt, während der äquivalente Widerstand der Kurzschlussringe nur einen Bruchteil des Stabwiderstandes erreicht. Die Wärmedilatationen erfolgen dadurch vor allem im Bereich der Nuten, während die thermische Ringaufweitung und die daraus resultierenden mechanischen Stabbeanspruchungen klein bleiben. Ausserdem wird bei Kurzschlussringen mit kleiner Streuung die Ringschrittspannung zwischen den Käfigstäben reduziert und das Funken des Käfigs am Nutaustritt beim Anlauf vermieden.

Bei Doppelkäfigen wird der äussere Käfig aus Material hohen Widerstandes (Messing, Bronze) hergestellt, so dass beim Anlauf ein grosses Anzugsmoment erzeugt wird. Der untere Käfig soll kleine Verluste bei kleinem Betriebsschlupf aufweisen; er wird daher meistens in Kupfer ausgeführt. Beim Anlauf dehnt sich der äussere Anlaufkäfig mehr als der innere Betriebskäfig, was bei Verwendung gemeinsamer Kurzschlussringe zu Stabbrüchen führen kann. Es ist daher üblich, bei Doppelkäfigen für Motoren grosser Leistung für beide Käfige getrennte Kurzschlussringe vorzusehen (Fig. 17), so dass jeder Käfig entsprechend seinen elektrischen und thermomechanischen Forderungen optimal ausgelegt werden kann.

Neben den thermomechanischen Betriebsbeanspruchungen ist bei der Konstruktion der Käfigwicklung auch den Beanspruchungen während der Fabrikation Rechnung zu tragen. Die Stäbe werden hart in die Kurzschlussringe eingelötet, wobei Temperaturen von 600 bis 700 °C auftreten. Ein Kupferring von 1 m Durchmesser dehnt sich dabei radial um 5 bis 6 mm. Beim Hartlöten wird daher versucht, die erforderliche Temperatur örtlich beschränkt in möglichst kurzer Zeit zu erreichen, damit die radiale Aufweitung des Ringes klein bleibt und unzulässige Biegebeanspruchungen in den Käfigstäben vermieden werden. Die freie Länge der Stäbe zwischen Ring und Einspannstelle im Rotoreisen wird, nötigenfalls durch Verlagerung der Einspannstelle ins Innere des Rotorblechkörpers (Fig. 18), derart gewählt, dass die resultierende Biegebeanspruchung in den Stäben die zulässige Grenze beim Hartlöten nicht überschreitet.

Die hohen Temperaturen beim Hartlöten wirken sich auch ungünstig auf die Festigkeitseigenschaften des normalen Kupfers aus. Bei schnellaufenden, zweipoligen Motoren grosser Leistung müssen daher die Ringe aus einer wärmebeständigen Legierung (z. B. Chromkupfer, Messing, Sonderbronzen) hergestellt oder durch aufgeschrumpfte Kappen aus antimagnetischem Stahl abgestützt werden (Fig. 18 und 19). Die Schrumpfkraft wird dabei zweckmässig so gewählt, dass bei betriebswarmer Käfigwicklung die Käfigstäbe keine Biegebeanspruchungen in radialer Richtung erleiden. Die freie Länge der Stäbe wird durch die zulässige Biegespannung bei kalter Maschine im Stillstand festgelegt. Ausserdem muss darauf geachtet werden, dass:

a) Die betriebswarme Wicklung eventuelle Durchgangsdrehzahlen aushält (Schleuderdrehzahl üblicherweise 1,2 × Nenndrehzahl, synchron);
b) Die Käfigbeanspruchungen nach der garantierten Anzahl aufeinanderfolgender Anläufe, d. h. bei der höchsten Betriebstemperatur, innerhalb der zulässigen Grenze liegen.

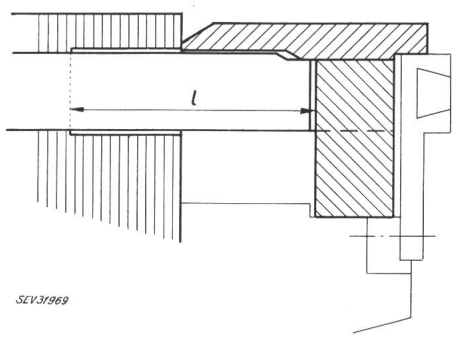



Fig. 18
**Verwendung aufgeschrumpfter Kappenringe für hochbeanspruchte Käfiganker in 2poligen Asynchronmotoren**
$l$ freie Länge

Bei den *Anlaufwicklungen für Synchronmotoren* mit ausgeprägten Polen sind zwei Ausführungsarten zu unterscheiden:

a) Polräder mit Käfig-Anlaufwicklungen;
b) Polräder mit massiven Polen.

Fig. 20 zeigt den Verlauf des Drehmomentes beim Anlauf, der im wesentlichen von den resultierenden Käfigwiderständen und Reaktanzen beeinflusst wird und daher für die beiden Ausführungen charakteristisch ist.

Käfiganlaufwicklungen entsprechen in ihrem Aufbau den Rundstabkäfigen der Asynchronmotoren, wobei die Käfigstäbe auf die Poloberfläche beschränkt sind und sog. Polverbinder die Ringsegmente im Bereich der Pollücken zu einem geschlossenen Ring verbinden. Die Anlaufcharakteristik weist eine ausgeprägte Drehmomentspitze (Kippmoment) kurz vor der synchronen Drehzahl auf. Synchronmotoren mit Anlaufkäfigen zeichnen sich daher durch sanften Anlauf mit stossfreiem Synchronisieren aus, d. h., der Stromstoss beim Zuschalten an die volle Netzspannung nach dem Hochlauf ist dank des kleinen Synchronisierschlupfes gering. Für Synchronmotoren mit Anlaufkäfig werden geblechte

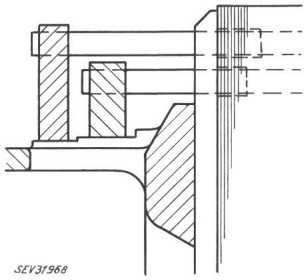



Fig. 17
**Anordnung der Kurzschlussringe bei Doppelkäfigankermotoren grosser Leistung**

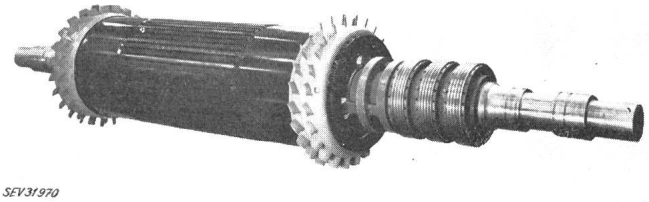



Fig. 19
**Schleifringanker mit doppelstufigen Axialventilatoren und Kappenringen aus antimagnetischem Stahl für den Kesselspeisepumpen-Motor in Fig. 9**

Pole verwendet, so dass besonders bei kleinen Luftspalten verglichen mit der Statornut-Öffnung minimale Zusatzverluste erreicht werden, vorausgesetzt, dass die Käfignutenteilung grösser als die Statornutenteilung gewählt wird. Die Wärmekapazität der Käfigwicklung ist im allgemeinen klein, wenn nicht grosse Stabquerschnitte einen ungebührend grossen Teil des aktiven Rotorvolumens beanspruchen. Ausserdem ist die Strombelastung der den Pollücken benachbarten Käfigstäbe in den Polhörnern ein Mehrfaches der mittleren Strombelastung, so dass mit verschiedenen Wärmedilatationen der Käfigstäbe gerechnet werden muss. Dies führt zu komplizierten konstruktiven Lösungen mit flexiblen Verbindungen zwischen den Käfigstäben und den Ringsegmenten, wenn nicht durch entsprechende Wahl der Stabquerschnitte und der Stabstreuung dafür gesorgt wird, dass sich jeder Stab angenähert gleich dehnt. Die Strombelastung der verschiedenen Käfigstäbe kann durch Massnahmen, wie sie bei Dämpferwicklungen von Einphasen-Synchrongeneratoren mit ausgeprägten Polen üblich sind, weiter ausgeglichen werden, nämlich durch:

a) Kräftige Stäbe an den Polhörnern, deren Querschnitte ein Mehrfaches der übrigen Käfigstäbe erreichen;
b) Vollständige Käfigwicklungen, die auch in den Pollücken Käfigstäbe aufweisen, welche durch einzelne, achsial gleichmässig verteilte Polbleche, deren Polhörner in die Pollücken hineinragen, abgestützt werden.

Vollständige Käfigwicklungen werden meistens bei zweipoligen Synchronmotoren in Turbobauart verwendet, wobei zwei Ausführungen zu unterscheiden sind:

a) Bei indirekt gekühlten Polspulen liegen die Käfigstäbe im oberen Teil der Wicklungsnuten und in entsprechenden Nuten im Bereich der Pole. Die Reduktion des Polspulenvolumens kann dabei in Kauf genommen werden, da der Leistungsfaktor 2poliger Turbomotoren in den wenigsten Fällen unter 0,95 sinkt.
b) Bei direkt gekühlten Polspulen können die Käfigstäbe in einfacher Weise in entsprechenden Nuten in den Zähnen und im Bereich der Pole eingelegt und mit Kurzschlussringen unter den Wicklungsköpfen verbunden werden.

Zweipolige Synchronmotoren in Turbobauart sind im allgemeinen teurer als vierpolige Schenkelpolmotoren und werden daher nur in Ausnahmefällen verwendet.

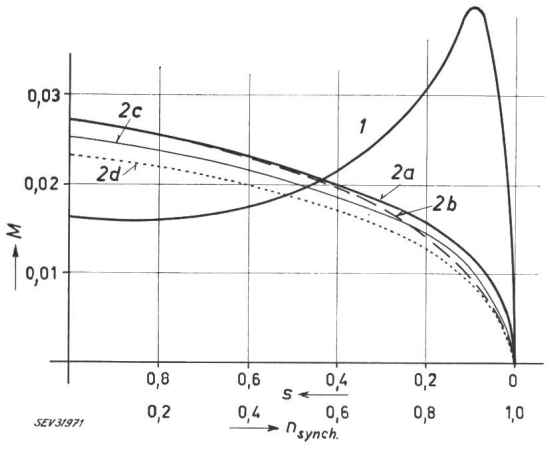



Fig. 20
**Anlaufcharakteristiken von Synchronmotoren mit Käfig-Anlaufwicklungen und massiven Polen bei 15 % Klemmenspannung**

*M* Drehmoment; *s* Schlupf; $n_{synchr.}$ Synchron-Drehzahl; *1* Käfig-Anlaufwicklung; *2* massive Pole: *2a* Rotor mit Polverbindern, Polradwicklung über 10fachen Rotorwiderstand kurzgeschlossen; *2b* Rotor mit Polverbindern, Polradwicklung offen; *2c* Rotor mit Polverbindern, Rotor über die Schleifringbürsten direkt kurzgeschlossen; *2d* Rotor ohne Polverbinder, Polradwicklung offen

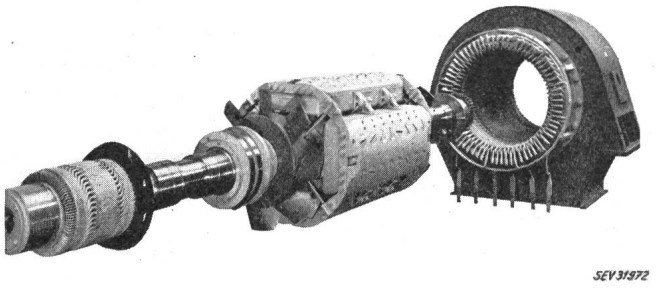



Fig. 21
**Stator und Rotor mit massiven, aufgeschraubten Polschuhen eines Synchronmotors für den Antrieb eines Radialkompressors**
3600 kW, 1500 U./min, 6,6 kV, 50 Hz

Allgemein kann festgehalten werden, dass mit schwerer werdenden Anlaufbedingungen die thermomechanischen Beanspruchungen der Käfiganlaufwicklungen derart zunehmen, dass die Grenze ihrer Betriebssicherheit rasch erreicht wird. Käfiganlaufwicklungen werden daher vorwiegend bei langsamlaufenden Synchronmotoren mit normalen Anlaufbedingungen verwendet.

Für schnellaufende Synchronmotoren werden Polräder mit massiven Polen vorgezogen, die sich durch einfachen, robusten und betriebssicheren Aufbau auszeichnen. Durch Polverbinder, welche die Stirnseiten der massiven Polschuhe im Bereich der Pollücken verbinden, werden die Drehmomentpulsationen, hervorgerufen durch die verschiedenen magnetischen Eigenschaften in Längs- (Pol) und Quer-Achse (Pollücke), verkleinert. Bei Motoren mittlerer Leistung können die Polschuhe aus Stahlguss oder Schmiedestahl dank mässiger Fliehkraftbeanspruchungen beim Schleudern mit 1,2-facher Nenndrehzahl in einfacher Weise mit dem Stahlgusspolkörper verschraubt werden (Fig. 21). Spezialmotoren mit grossen Einheitsleistungen oder Motoren mittlerer Leistung mit Schleuderdrehzahlen über 1,2 × Nenndrehzahl (z. B. Motoren für Pumpspeicheranlagen mit hohen Rücklaufdrehzahlen) erhalten massive Pole aus Stahlguss hoher Festigkeit oder Schmiedestahl, die mit den im elektrischen Grossmaschinenbau üblichen Klauen mit der Rotornabe verbunden sind. Synchronmotoren mit massiven Polen zeichnen sich durch eine hohe Anlaufwärmekapazität aus, so dass bei diesen Maschinen nicht die Wärmekapazität der Anlaufwicklung des Rotors, sondern diejenige der Statorwicklung oder des Anlauftransformators die maximal zulässige Zahl aufeinanderfolgender Anläufe festlegt.

### 5.2.3 Polspulen

Die Polspulen der Synchronmotoren mit ausgeprägten Polen entsprechen in ihrem Aufbau den bekannten Ausführungen bei den Schenkelpolmaschinen. Ähnlich wie bei den Statorwicklungen sind Spulen aus isoliertem Profilkupferdraht und solche aus blanken Kupferbändern zu unterscheiden.

Die Qualitätsansprüche an die isolierten Drähte entsprechen weitgehend den in Abschnitt 5.1.2 erwähnten Anforderungen für Serieleiter in Statorwicklungen. Auch bei den Polspulen haben bei hohen Betriebstemperaturen lack-kunstfaser- und lack-glas- bzw. lack-asbest-isolierte Drähte die früher üblichen Lack-Baumwoll-Drähte der Wärmeklasse A ersetzt. Während bis vor wenigen Jahren die Spulen vorwiegend in isolierte Blechkasten gewickelt wurden, verwendet

man heute in immer grösserem Ausmass Spulenkasten aus glasfaserverstärkten Kunstharzen (Fig. 22) oder verzichtet vollständig auf Spulenkasten (mit Kunstharz verfestigte oder gegossene Spulen). Polspulen in Spulenkasten aus Isoliermaterial (z. B. Glaspolyester) und verfestigte Polspulen lassen sich sehr einfach mit induktiven Prüfmethoden auf Windungsschluss kontrollieren, was bei den früheren Ausführungen mit Metall-Spulenkasten nicht möglich war. Die Fabrikation von Spulen, welche mit Kunstharzen verfestigt oder in Kunstharz gegossen werden (Integrated Coils), hat mit der Einführung der Kunstharz-Vakuumimprägnierung für die Statorwicklungen stark zugenommen. Für die Imprägnierung der Spulen kann Harz von Statorwicklungs-Imprägnierprozessen verwendet werden, so dass Spulen mit ausgezeichneten mechanischen und thermischen Eigenschaften hergestellt werden können, die ausserdem in hohem Grade feuchtigkeitsbeständig sind. Verfestigte Spulen lassen sich mit Hilfe von Spulenrahmen aus glasfasergestärkten Kunstharzen und warmfesten Polkernisolationen auf den Polen befestigen oder mit Hilfe geeigneter Distanzierungen und Fülleinlagen direkt mit den Polen zu einer Einheit vergiessen. Mit den Polen vergossene Spulen zeichnen sich durch vorzügliche mechanische Festigkeit und gute Wärmeabgabe an den Polkörper aus. Bei Betriebsstörungen, die bei Spulen dieser Art jedoch praktisch ausgeschlossen sind, muss der ganze schadhafte Pol ersetzt werden, da die Spulen allein nicht ausgewechselt werden können. Aus dem gleichen Grunde können diese Spulenkonstruktionen nicht für Synchronmotoren mit aufgeschraubten Polschuhen verwendet werden. Kunstharzverfestigte Spulen (deren Festigkeit derjenigen von Kunstharzguss-Spulen praktisch ebenbürtig ist), können distanziert derart auf dem Polkern verkeilt werden, dass auch Kühlluft zwischen Spule und Kern durchströmen kann. Dadurch wird die Wärmeabgabe der Spule wesentlich verbessert, so dass die Rotoren bei gleicher Erwärmung stärker ausgenützt werden können.

Polspulen aus blankem Kupferband werden bei relativ kleinen Kupferquerschnitten gewickelt; bei grossen Kupferquerschnitten oder extremen Werten von Bandbreite zu Banddicke ist es zweckmässiger, die Spulen aus einzelnen Stücken durch Hartlöten oder Schweissen in den Ecken zusammenzusetzen. Gelötete oder geschweisste Spulen können ohne Schwierigkeit mit Rippen zur Vergrösserung der wärmeabgebenden Oberfläche ausgeführt werden. Je nach Art der Montage unterscheidet man Polspulen, die direkt auf der Polkernisolation aufliegen und die Wärme vor allem an der Aussenfläche an die Kühlluft abgeben, und solche, die vom Polkern distanziert sind, so dass neben der Aussenfläche auch der grösste Teil der Spulen-Innenfläche Wärme abgibt. Die wärmeabgebende Oberfläche wird bei distanzierten, konzentrischen Spulen (z. B. Doppelspulen) weiter vergrössert. Dadurch ist es möglich, das Rotorkupfergewicht bei gleichbleibender Erwärmung zu verkleinern, d. h. die Ausnützung der Motoren zu vergrössern. Gleichzeitig müssen aber grössere Ventilations- und Erregungsverluste in Kauf genommen werden. Fig. 23 zeigt den grundsätzlichen Aufbau verschiedener Blankkupfer-Polspulen.

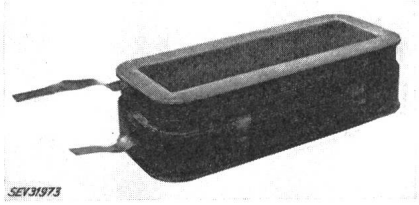



Fig. 22
**Polspule aus isoliertem Profilkupferdraht mit glasfaserverstärktem Kunstharzspulenkasten**

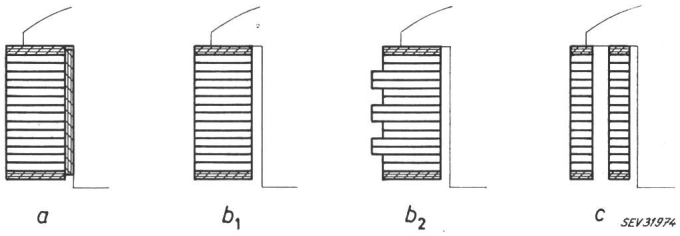



Fig. 23
**Polspulen aus blankem Kupferdraht**
*a* Einfachspule mit Polkernisolation; *b* distanzierte Einfachspulen ohne ($b_1$) und mit ($b_2$) Kühlrippen; *c* distanzierte Doppelspulen

Als Windungsisolation für Polspulen aus blankem Kupferband wurden früher meistens Zwischenlagen aus Presspan verwendet, die mit Schellack oder Bakelitlack mit den Windungen verklebt und unter Druck bei Temperaturen eingebrannt wurden, die genügend über der Betriebstemperatur liegen. Es handelt sich dabei um eine Isolation der Wärmeklasse A, die sich mechanisch sehr gut bewährte und vorübergehend, ohne Schaden zu nehmen, auch bis zu Temperaturen der Wärmeklasse B beansprucht werden konnte. Die neuen Vorschriften lassen Presspan als Hauptisolation für Polspulen der Wärmeklasse B nicht mehr zu, so dass heute vorwiegend mit Kunstharz imprägnierte oder lackierte Glas- oder Glas-Asbest-Zwischenlagen verwendet werden, deren Bindemittel (Phenol-, Polyester-, Epoxy-Harze) die Eigenschaft haben, die einzelnen Windungen unter Druck und hoher Temperatur zu einem warmfesten Spulenkörper zu verkleben.

Die früher üblichen Polspulenrahmen in Flacheisen-Schweisskonstruktion mit Presspan- oder Asbest-Phenolharz-Zwischenlagen sind heute praktisch verschwunden und haben Rahmen aus glasfaserverstärkten Kunstharzen Platz gemacht. Dadurch konnte der konstruktive Aufbau der Polspulen wesentlich vereinfacht und die Ausnützung des verfügbaren Polspulenraumes verbessert werden. Zur Distanzierung der Polspulen werden Materialien mit minimalsten Schwindmassen (Harzholz, Hartgewebe, glasfaserverstärkte Kunstharzprodukte) verwendet.

Moderne kunstharzverfestigte Polspulen behalten ihre mechanische Festigkeit bis zu den höchsten Betriebstemperaturen. Es ist daher möglich, die Zahl der Polspulenabstützungen zu reduzieren und damit die Kühlung der Polspulen wesentlich zu verbessern.

### Literatur


[1] —: Two Speed Induction Motors, Electrical Review, 170(1961), S. 863.

[2] *Sikora, W. K.:* Present Trends in Large Power Station Auxiliaries and their Electrical Equipment. GEC-Journal (1959).

[3] —: Very Large AC Motors Prove Dependable, Electrical World, 155(1961)14, S. 37.

[4] *Brandenberger, H.:* Vier Hauptsätze der Elastizitäts- und Festigkeitslehre von der elastischen Verformung bis zum Bruch, Schweizer Archiv, 27(1961), S. 473...486.

[5] *Cooper, A. L.* und *W. H. Morse:* Designing for Production Welding gives Industry a Fully Accessible Motor, Welding Journal, 39(1960)10, S. 1015...1021.

[6] *Rihm, F.:* Geschweisste Konstruktionen, technische und wirtschaftliche Grenzen, Konstruktion, 12(1960), S. 243...252.

[7] *Fuchs, C.:* Schweisstechnik im Maschinenbau, Konstruktion 13(1961), S. 155...163.

[8] *Roberts, S. C.:* Review of Motor Insulation with special reference to Breakdowns by Discharges encountered in the Mining Industry, Trans. of the African Institute of electrical Engineers, 52/7(1961), S. 166...210.

[9] *Abegg, K.:* Aus der Technologie der Wasserkraftgeneratoren: die Statorwicklungen, Bulletin SEV, 51(1960), S. 418...427.

[10] *Abegg, K., Ch. Caflisch, F. Knapp:* Isolationen hoher Festigkeit für Generatoren grosser Leistung, Bulletin Oerlikon, Nr. 332 (1959), S. 8...21.

[11] *Blinne, K., O. Mäder, J. Peter:* Orlitherm — eine moderne Hochspannungsisolation, Bulletin Oerlikon, Nr. 345 (1961), S. 37...60.

[12] *Doljak, B., M. Moravec, O. Wohlfahrt:* Micadur — eine neue Isolation für Statorwicklungen elektrischer Maschinen, BBC-Mitteilungen, 47(1960)5/6, S. 352...360.

[13] *Nowak, P.* und *F. Weber:* Epoxydharze und ihre Verwendung in der Elektrotechnik, ETZ — B, 10(1958), S. 101...107.

[14] *Laffoon, C. M., C. F. Hill, G. L. Moses, L. J. Berberich:* A new High-Voltage Insulation for Turbine Generator Stator Windings, AIEE Trans. 70(1951), S. 721...726.

**Adresse des Autors:**

*K. Abegg*, Ingenieur, Chef der Konstruktionsabteilung für Grossmaschinen, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 11/50.

# Über Atomkernstrahlungen und Strahlungsmessgeräte

Von *K. Bartneck*, Ulm

539.16 ; 539.1.07

*Es wird über die heute allgemein interessierenden Fragen der Atomkernstrahlungen und im besonderen über die für die Messungen dieser Strahlen hauptsächlich erforderlichen Geräte berichtet.*

*L'auteur traite des questions essentielles concernant les rayonnements des noyaux atomiques et des principaux appareils servant à leur mesure.*

Die stetig zunehmende Bedeutung der Atomkernstrahlen auf fast allen Gebieten der Wissenschaft hat in den letzten Jahren viele Forscher in der ganzen Welt angeregt, sich mit der atomaren Kernphysik und Kernchemie eingehender zu befassen. Durch diese Forschungen entstanden neben den Kernforschungszentren mit ihren Kernreaktoren und Teilchenbeschleunigern eine Vielzahl neuer Anwendungsgebiete der erwähnten Strahlen für einige Zweige der Technik, Chemie, Physik, Biologie, Medizin, Landwirtschaft, um einige zu nennen.

Die Voraussetzung für das Arbeiten mit Atomkernstrahlen ist das Vorhandensein einer Anzahl verschiedener Strahlungsmessgeräte für die vielseitigen Messaufgaben. Bevor die wichtigsten Strahlungsmessgeräte und ihre Anwendungen näher behandelt werden, soll einiges über die atomaren Strahlungen zum besseren Verständnis vorausgeschickt werden.

Atome sind bekanntlich die Bausteine der gesamten Materie. Gase (Luft), Flüssigkeiten (Wasser) und feste Stoffe (Erde) bestehen alle aus Atomen bzw. Atomgruppen (Moleküle). Das Atom enthält den Atomkern und die ihn in relativ grossem Abstand umgebende Atomhülle. Der Kern ist aus kleinsten Elementar-Teilchen zusammengesetzt, den elektrisch positiv geladenen Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen. Die einzige Ausnahme bildet der Wasserstoff-Atomkern, er besitzt nur 1 Proton und keine Neutronen. Die Hülle der Atome besteht aus elektrisch negativ geladenen Elektronen, die den Kern auf Planetenbahnen umkreisen.

Bisher hat man etwa 100 verschiedene Elemente (Grundstoffe) in der Natur entdeckt und viele andere künstlich dargestellt.

Die Elemente unterscheiden sich durch ihren Atomaufbau, d. h. durch die Anzahl der Protonen im Atomkern und der Elektronen in der Atomhülle. Alle Atome desselben Elementes verhalten sich chemisch gleich, sie können aber durch die Anzahl der Neutronen im Atomkern physikalisch voneinander abweichen und werden in diesen Fällen als Isotope des betreffenden Atoms bezeichnet. Es gibt nichtstrahlende und strahlende Isotope. Nichtstrahlende Isotope sind die sog. stabilen Isotope, die strahlenden dagegen heissen instabile oder radioaktive Isotope. Die Radioaktivität der instabilen Isotope beruht auf Kernumwandlungen, bei denen eine oder mehrere Strahlenarten emittiert werden.

Es gibt in der Natur vorkommende Isotope mit natürlicher und solche mit künstlicher Radioaktivität, die Produkte künstlicher Kernumwandlungen sind und z. B. durch Neutronenbeschuss entstehen. Die Zeit, in der die Hälfte eines radioaktiven Stoffes zerfällt bzw. sich in ein anderes Isotop umgewandelt hat, wird mit Halbwertzeit bezeichnet.

Ein Atom (oder eine Atomgruppe), das weniger oder mehr Elektronen in seiner Hülle besitzt als zur Neutralisierung des Atoms erforderlich sind, nennt man Ion. Ionen sind demnach, im Gegensatz zum neutralen Atom, positiv oder negativ geladen. Sie werden als positive oder negative Ionen bezeichnet. Ionen entstehen u. a. auch durch die ionisierende Wirkung von Atomkernstrahlungen. Hierbei werden den bestrahlten Atomen oder Molekülen Elektronen weggerissen, wodurch sich positive Ionen bilden. Die weggerissenen negativen Elektronen lagern sich neutralen Atomen oder Molekülen an; hierdurch entstehen negative Ionen. Wegen ihrer mittelbar oder unmittelbar ionisierenden Eigenschaft werden Atomkernstrahlen auch ionisierende Strahlen genannt und in einigen Strahlungsdetektoren zur Messung der Strahlenintensität ausgenützt.

Die bei der Kernumwandlung durch den radioaktiven Zerfall frei werdenden Strahlungen, unterscheiden sich in Korpuskularstrahlen (Teilchen) und in elektromagnetische Wellenstrahlen (Quanten). Zu den Korpuskularstrahlen gehören die Alpha- und Beta-Strahlen sowie die Neutronen. Gamma- und Röntgen-Strahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen. Die Eigenschaften dieser verschiedenen Strahlenarten sollen beschrieben werden.

## Korpuskularstrahlen

*Alpha-Strahlen* (Symbol $\alpha$) sind positiv geladene Teilchen mit der Masse eines Helium-Kernes, welcher aus 2 Protonen und 2 Neutronen besteht. Sie werden mit einer ihre Energie bestimmenden Geschwindigkeit von einem Atomkern ausgesandt. Trotz der grossen Energie ist die Reichweite der Alpha-Strahlen sehr gering. Sie beträgt in der Luft nur einige Zentimeter. Selbst die energiereichsten harten Alpha-Strahlen lassen sich wegen ihres geringen Durchdringungs-