

**WERKSTATTBÜCHER**  
**FÜR BETRIEBSBEAMTE, KONSTRUKTEURE UND FACH-**  
**ARBEITER. HERAUSGEBER DR.-ING. H. HAAKE VDI**

HEFT 84

# Hohe Drehzahlen

durch

## Schnellfrequenz-Antrieb

Von

**Fritz Beinert und Hans Birett**

Dipl.-Ing., Berlin

Dipl.-Ing., Berlin

Mit 104 Abbildungen  
und 8 Tabellen im Text



**Berlin**  
Verlag von Julius Springer  
1940

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort . . . . .	3
I. Schnellauf . . . . .	3
A. Schnittgeschwindigkeiten und Drehzahlen . . . . .	3
1. Oberflächengüte S. 4. — 2. Drehzahlschaubilder S. 4.	
B. Drehzahländerung und Schalthäufigkeit . . . . .	6
3. Drehzahländerung S. 6. — 4. Schalthäufigkeit S. 7.	
C. Mechanische Drehzahlerhöhung . . . . .	7
5. Prebluftantrieb S. 8. — 6. Riementrieb S. 8. — 7. Zahnradübertragung S. 9.	
II. Schnellaufende Elektromotoren . . . . .	10
A. Drehstrom-Käfigläufermotoren — elektrische Verhältnisse . . . . .	10
8. Asynchronmotor S. 10. — 9. Drehmomente, Belastungen S. 11. — 10. Spannungen und Ströme S. 13. — 11. Erwärmung S. 13. — 12. Hochdrehzahliger Asynchronmotor S. 14. — 13. Antrieb durch verschiedene Schnellfrequenzen S. 16.	
B. Mechanische Verhältnisse schnellaufender Motoren . . . . .	17
14. Aufbau des Läufers S. 17. — 15. Belüftung S. 18. — 16. Lagerung, Schmierung S. 18. — 17. Kritische Drehzahl S. 19. — 18. Einfluß der Fliehkräfte S. 20.	
C. Andere Lösungen des schnellaufenden Elektromotors . . . . .	21
19. Gleich- und Drehstrommotoren S. 21. — 20. Doppelläufermotoren S. 22.	
III. Erzeugung der Schnellfrequenz . . . . .	22
A. Umlaufende Wandler . . . . .	22
21. Erzeugungsarten S. 22. — 22. Bemessung des Wandlers S. 26. — 23. Mehrere Schnellfrequenzen S. 27. — 24. Schnellfrequenz ohne Primärdrehstrom S. 28.	
B. Ruhende Wandler . . . . .	28
C. Verteilung . . . . .	29
25. Einzelversorgung S. 29. — 26. Maschinennetz S. 30. — 27. Werkstattnetz S. 31.	
IV. Schalten und Bremsen . . . . .	33
A. Schaltgeräte . . . . .	33
28. Walzenschalter S. 34. — 29. Schütze S. 35. — 30. Motorschutzschalter S. 37. — 31. Betätigungsschalter S. 38.	
B. Verriegelungen . . . . .	39
32. Stern-Dreieck-Fernschalter S. 39. — 33. Stern-Dreieck-Netzumschaltung S. 40. — 34. Mehrmotorenantrieb S. 40. — 35. Einschaltung von Induktionsumformersätzen S. 42.	
C. Bremsen . . . . .	42
36. Verschiebeankermotoren S. 43. — 37. Magnetbremslüfter S. 44. — 38. Eldrolüfter S. 44. — 39. Gegenstrombremsung S. 45. — 40. Bremswächter S. 45. — 41. Gleichstrombremsung S. 47. — 42. Kondensatorbremsung S. 48.	
V. Beispiele ausgeführter Anlagen . . . . .	49
A. Sondermotor für hohe Drehzahlen . . . . .	49
B. Beispiele aus der Holzindustrie . . . . .	50
43. Hobelmaschinen S. 50. — 44. Oberfräsen S. 52.	
C. Beispiele aus der Metallindustrie . . . . .	53
45. Schnellfrequenz-Krafthandwerkzeuge S. 53. — 46. Schleifmaschinen S. 56.	
VI. Normung . . . . .	58
A. Grundlagen der Normung . . . . .	58
47. Normungszahlen und Reihen S. 58. — 48. Harmonische Reihe S. 59.	
B. Normung der Schnellfrequenzwerte . . . . .	61
49. Frequenznormung S. 61. — 50. Elektrische Verhältnisse und Lastdrehzahlen S. 62. — 51. Spannungsnormung S. 63.	

---

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

ISBN-13: 978-3-642-89014-7

e-ISBN-13: 978-3-642-90870-5

DOI: 10.1007/978-3-642-90870-5

## Vorwort.

Hohe Drehzahlen sind im Zeitalter der Feinstbearbeitung mit Hartmetall- und Diamantwerkzeugen und der Verwendung leicht zerspanbarer Werkstoffe eine dringende Notwendigkeit. Dem Betriebsmann sind gewöhnlich nur die rein mechanischen Mittel zur Erreichung hoher Drehzahlen bekannt. Allenfalls weiß er, daß Allstrom- und Gleichstrommotoren schneller laufen können als der übliche Drehstrommotor. In diesem Heft soll nun eine Antriebsart eingehend behandelt werden, die sich bisher hauptsächlich in der Holzindustrie bewährt hat und die die Erreichung höchster Drehzahlen gestattet.

Bei Drehstromasynchronmotoren ist die Drehzahl durch die Polzahl des Motors, den Schlupf des Motors und die Frequenz des zugeführten Drehstromes festgelegt. Bei der in Deutschland genormten Frequenz (50 Per/s) ist die höchste erreichbare Lastdrehzahl 2800 U/min. Erhöht man nun die Frequenz, so lassen sich entsprechende Drehzahlerhöhungen erzielen. Diese erhöhte Frequenz heißt Schnellfrequenz. Dieser Name ist noch ziemlich neu, so daß sich bisher auch noch die Bezeichnungen „Drehstromantrieb mit erhöhter Frequenz“ und „Hochfrequenzantrieb“ im Schrifttum finden. Die erste dieser beiden älteren Bezeichnungen ist zwar richtig, aber zu lang. Die Bezeichnung „Hochfrequenz“ dagegen ist bei Drehstrom für Arbeitszwecke falsch. Unter Hochfrequenz wird in der Fernmeldetechnik und in der Elektrowärmetechnik ein bestimmter, genau abgegrenzter Frequenzbereich verstanden, der wesentlich höhere Frequenzen umfaßt, als sie für den Antrieb von Arbeitsmotoren in Frage kommen. Daher ist die Benennung Schnellfrequenz entstanden, die eindeutig ist und sich ihrer Kürze wegen rasch durchsetzen wird.

Schnellfrequenz wird gewöhnlich aus dem allgemeinen Drehstromnetz mit Hilfe einfacher Frequenzwandler erzeugt. Sie läßt sich aber auch unmittelbar durch einen Generator erzeugen. Die mit Schnellfrequenz gespeisten Arbeitsmotoren haben dieselben guten Eigenschaften, wie die gewöhnlichen Käfigläufermotoren. Sie sind einfach und robust, und daher billig; sie haben ein geringes Gewicht bei hoher Leistung, die Drehzahl bleibt auch bei Belastung fast gleich, sie sind polumschaltbar und elektrisch einfach durch Gegenstrom zu bremsen.

Dieses Heft behandelt, um eingehend genug sein zu können, nur den Schnellfrequenzantrieb bei Werkzeugmaschinen. Die Abschnitte, die elektrische Fragen behandeln, setzen die Grundkenntnisse der Elektrotechnik voraus<sup>1</sup>. Es ist jedoch versucht worden, auch dem „elektrotechnischen Laien“ so viel zu bieten, daß er zusammen mit einer Fachfirma einwandfreie Anlagen planen kann.

Die Verfasser möchten auch an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Kienzle von der Technischen Hochschule Berlin für die Förderung dieser Arbeit danken; er gab die Anregung zur Veröffentlichung dieses Heftes, prägte die Bezeichnung Schnellfrequenz und hat die Verfasser bereitwilligst unterstützt.

## I. Schnellauf.

### A. Schnittgeschwindigkeiten und Drehzahlen.

Die Bearbeitungszeiten bei der spangebenden Formung hängen stark von der Schnittgeschwindigkeit ab. Je mehr die Nebenzeit durch selbsttätige Spannvor-

<sup>1</sup> Zur Auffrischung der Kenntnisse seien empfohlen: WEIDLING: Elektromotor zum Antrieb von Werkzeugmaschinen (Werkstattbuch 54). — BRÖDNER-WOLFF: Elektrotechnik im Betrieb. Berlin: VDI-Verlag. — MAECKER: Schaltungstechnik. Berlin: Julius Springer.

richtungen, das Arbeiten aus Magazinen, Eilzustell- und Eilrückgänge herabgesetzt wird, desto höher wird der Anteil der Hauptzeit an der Gesamtbearbeitungszeit. Dasselbe gilt für Stücke mit lange dauernder Bearbeitung und nur einmaligem Einspannen (Wellen drehen, Gewinde fräsen). Die Hauptzeit selbst ist abhängig von der Schnittgeschwindigkeit und vom Vorschub. Der Vorschub ist nach oben begrenzt durch die mit dem größeren Spanquerschnitt steigende Schnittkraft und durch die Anforderungen an die Oberflächengüte. Die Schnittkraft ist dabei durch die Maschinenausführung und den Antrieb festgelegt, die Oberflächengüte durch die Starrheit der Maschine und durch die Abnutzung. Zur Verkürzung der Hauptzeit ist also die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit das beste Mittel. Dabei erzielt die höhere Schnittgeschwindigkeit nicht nur den wirtschaftlichen Gewinn der kürzeren Gesamtbearbeitungszeit, sondern noch zwei weitere Vorteile: hohe Oberflächengüte und nur kleine Kräfte bei der Bearbeitung.

**1. Oberflächengüte.** Die Werkstückgüte wird durch Feinstbearbeitung wesentlich gesteigert (Abb. 1). Bei dieser Bearbeitung wird die geometrische Formgebung

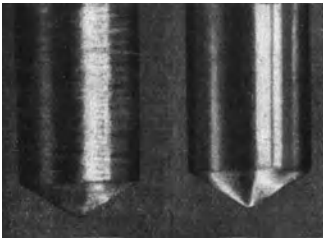


Abb. 1. Oberflächengüte bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten. Das linke Loch ist mit  $v = 5$  m/min, das rechte Loch  $v = 30$  m/min hergestellt.

verbessert (Makro-Geometrie) und die Oberflächengüte gleichzeitig erhöht (Mikro-Geometrie). Die Gütesteigerung wirkt sich durch verbesserte Lauf-, Trag- und Abnutzungseigenschaften des Werkstückes aus. Unter den Begriff „Feinstbearbeitet“ fallen nach den Richtlinien des Ausschusses für wirtschaftliche Fertigung (AWF) die innerhalb der Edelpassung oder der ISA-Qualität 4 liegenden Werkstücke. Alle Bearbeitungsverfahren, die mit elastischen Werkzeugen lediglich die Oberfläche verbessern (schwabbeln, trommeln, polieren), zählen nicht zu den Feinstbearbeitungen. Die Feinstbearbeitungsverfahren aber (z. B. Feindrehen, Feinbohren und alle Fertigschleifverfahren)

erfordern hohe Schnittgeschwindigkeit. Durch diese hohe Schnittgeschwindigkeit werden die Kristallkörner glatt durchgetrennt und damit wird eine gute Oberfläche erzielt. Wegen der großen Abnutzung kommen für Feinstbearbeitung fast ausschließlich Hartmetall- und Diamantwerkzeuge nebst Schleifwerkzeugen in Frage.

Bei höherer Schnittgeschwindigkeit nimmt außerdem der Hauptschnittdruck ab, so daß sich also außer der Oberflächenverbesserung auch eine Verminderung der Schnittkraft und damit eine bessere Maschinenausnutzung ergibt.

Der wesentlichste Fortschritt der letzten Jahre im Werkzeugmaschinenbau war die Umstellung auf Hartmetallwerkzeuge. Sie ermöglichen und bedingen die heutigen hohen Schnittgeschwindigkeiten. Nur bei hohen Schnittgeschwindigkeiten können sich die Vorteile der Hartmetallwerkzeuge, vor allem der Verschleißwiderstand, voll auswirken.

**2. Drehzahlschaubilder.** Einen Überblick über den Zusammenhang zwischen Drehzahl, Schnittgeschwindigkeit und Durchmesser geben am deutlichsten Drehzahlschaubilder. Sie veranschaulichen die Beziehung  $v = D\pi n$ . „Die Schnittgeschwindigkeit ist das Produkt aus Umfang und Drehzahl“, wobei  $v$  in m/min,  $D$  in m und  $n$  in Umdrehungen/min angegeben werden. Bei kleineren Durchmessern muß also die Drehzahl erhöht werden, um auf dieselbe Schnittgeschwindigkeit zu kommen.

Ein derartiges Schaubild ist für Drehen in Abb. 2 wiedergegeben. Es fängt erst bei der Drehzahl 2800 U/min an. Diese Drehzahl ist die Lastdrehzahl der

Kurzschlußläufermotoren, so daß also alle in diesem Schaubild aufgetragenen Drehzahlen durch den üblichen Drehstrommotorantrieb nicht mehr erreicht werden können. Die eingetragenen Drehzahlen sind Schnellfrequenz-Lastdrehzahl-Richtwerte, die in Kap. VI näher erklärt sind.

Um die Übersichtlichkeit des Schaubildes zu wahren, sind Schnittgeschwindigkeiten, die sich nicht sehr unterscheiden, zusammengezogen worden; somit sind die angegebenen Werte nur ungefähre Richtwerte.

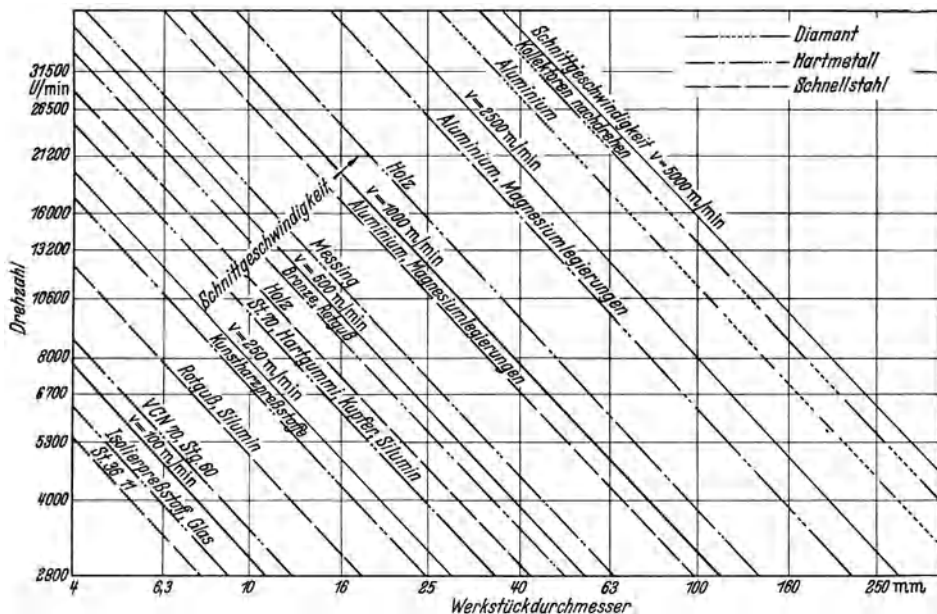


Abb. 2. Drehzahl-Schaubild für Drehen. Ungefähre Werte.

Aus dem Drehzahlschaubild ergeben sich für fast alle Werkstoffe, zumindest bei kleinen Durchmessern, hohe Drehzahlen. Außer beim Drehen sind noch hauptsächlich beim Bohren, Fräsen und Schleifen hohe Drehzahlen zu erwarten. In Tabelle 1 sind ungefähre Schnittgeschwindigkeitswerte für diese drei Bearbeitungs-

Tabelle 1. Schnittgeschwindigkeitsrichtwerte in m/min.

Werkstoff	Bohren		Fräsen		Schleifen
	Schnellstahl	Hartmetall	Schnellstahl	Hartmetall	
Aluminium . . . . .	200	400	400	1200	2000
Holz . . . . .	35	60	900	1000	3000
Kupfer . . . . .	80	120	200	400	1800
Bronze, Messing . . .	150	350	70	280	1800
Grauguß . . . . .	40	130	40	80	1100
Kunstharzpreßstoff .	20	100	40	80	1500
Glas . . . . .	—	30	—	40	1800

arten angegeben. Trägt man auch diese in Drehzahlschaubildern auf, so wird klar, daß hohe Drehzahlen nicht nur bei einigen wenigen Sonderfällen erforderlich sind, sondern daß das Anwendungsgebiet der hohen Drehzahlen sehr weit in das Gebiet der spangebenden Formung hineinreicht.

## B. Drehzahländerung und Schalzhäufigkeit.

**3. Drehzahländerung.** Drehzahländerungen bei Werkzeugmaschinen sind erforderlich, um bei verschiedenen Durchmessern die gleichen Schnittgeschwindigkeiten zu erreichen oder um die Schnittgeschwindigkeiten beim Übergehen auf das nächst feinere Arbeitsverfahren zu erhöhen. Bei der Angleichung der Schnittgeschwindigkeit an verschiedene Durchmesser kann entweder wie beim Drehen und Rundschleifen ein anderer Werkstückdurchmesser bearbeitet werden oder bei den anderen spangebenden Bearbeitungsverfahren das Werkzeug gewechselt worden sein.

**a) Umlaufendes Werkstück.** Der schwieriger zu beherrschende Fall hinsichtlich der möglichst genauen Einhaltung von günstigsten Schnittgeschwindigkeiten ist das Arbeiten mit feststehenden Werkzeugen und umlaufendem Werkstück. Hierbei können sehr viele verschiedene Durchmesser nacheinander auftreten. Das ist beim Drehen der Fall, während beim Schleifen noch mehr Schwierigkeiten auftreten können, weil auch noch der Schleifscheibendurchmesser geändert werden kann. Bei den Maschinen, die zu diesen Bearbeitungsarten nötig sind, hat man deshalb schon immer auf eine feine Stufung der Spindel- und damit Werkstückdrehzahlen gesehen, um die wirtschaftlich und bearbeitungsmäßig günstigsten Schnittgeschwindigkeiten möglichst genau einhalten zu können. Da die genaue Einhaltung einer erprobten Höchstgeschwindigkeit besonders bei Arbeiten, die eine lange Hauptzeit im Vergleich zur Nebenzeit benötigen, einen höheren Nutzen ermöglicht, sind auch für die beiden Arbeitsverfahren Drehen und Rundschleifen die stufenlos regelbaren Antriebe am meisten verbreitet.

**b) Umlaufendes Werkzeug.** Bei den Werkzeugmaschinen mit umlaufendem Werkzeug ist den vorher geschilderten Arbeitsverfahren am meisten das Bohren verwandt. Auch hier können nahezu alle Durchmesser vorkommen, so daß auch beim Bohren die Auswahl einer passenden Drehzahl eine feine Stufung der Bohrspindeldrehzahlen bedingen könnte. Beim Bohren ist aber gewöhnlich die Hauptzeit der Nebenzeit nicht wesentlich überlegen, da große Lochtiefen bei langsamer Drehzahl, bedingt durch großen Bohrerdurchmesser, nicht sehr häufig sind. Ausgesprochene Ausbohrarbeiten werden zudem auf Sondermaschinen ausgeführt, die sowieso dem besonderen Arbeitsgang weitgehend angepaßt werden. Da bei Bohrmaschinen also ein ganz genaues Einhalten der Schnittgeschwindigkeit keinen spürbaren wirtschaftlichen Vorteil bringt und auch bearbeitungsmäßig nicht erforderlich ist, kann die Stufung gröber sein. Die Schalzhäufigkeit ist trotzdem hoch, denn wenn die Bohrmaschine auch bei einem anderen Bohrerdurchmesser mit derselben Drehzahl laufen soll, so ist doch ein Anhalten der Maschine zum Werkzeugwechsel notwendig. Durch neuzeitliche Schnellwechselfutter läßt sich das Werkzeug allerdings auch bei laufender Spindel austauschen. Beim Bohren ist die Drehzahländerung also nicht besonders häufig, die Schalzhäufigkeit trotzdem hoch.

An das Bohren schließen sich Fräsen und Planschleifen an. Der Werkzeugdurchmesser ist nicht mehr an ein bestimmtes Maß gebunden, und so läßt sich hier durch Abstimmung des Werkzeugdurchmessers mit den verfügbaren Drehzahlen eine erwünschte Schnittgeschwindigkeit leichter erzielen. Häufige Drehzahländerungen werden also gewöhnlich nicht auftreten. Das Kleinerwerden der Werkzeugdurchmesser durch das Nachschleifen und Abziehen setzt zwar die Schnittgeschwindigkeit herab, aber die dadurch bedingte Umschaltung auf eine andere Drehzahl ist so selten, daß sie für diese Drehzahländerungsbetrachtung nicht beachtet zu werden braucht. Beim Fräsen und manchmal auch beim Schleifen ist trotzdem eine häufige

Drehzahländerung zu erwarten, wenn nur ein Motor vorhanden ist, der Spindel und Vorschub treibt und wenn auf dieser Maschine oft zwischen Eilgang und Arbeitsvorschub gewechselt wird.

Schließlich gibt es noch Werkzeugmaschinen, die nur einen einzigen festen Werkzeugdurchmesser haben. Dieser Werkzeugdurchmesser läßt sich bei der Planung der Maschine natürlich so mit der zur Verfügung stehenden Lastdrehzahl abstimmen, daß die günstigste Schnittgeschwindigkeit genau eingehalten wird. Als Beispiele seien die Dicktenhobelmaschine und die Diskusschleifmaschine mit austauschbaren Schleifsegmenten genannt. Bei der Dicktenhobelmaschine (Abb. 80) wird die Messerwellendrehzahl überhaupt nicht geändert, lediglich der Vorschub gestattet durch Änderung eine Anpassung an die jeweiligen Bearbeitungsanforderungen der verschiedenen Holzarten. Die Diskusschleifmaschine mit Segmentrad dient zum Rohschleifen gegossener Teile. Da der Schleifscheibendurchmesser praktisch immer gleich ist, braucht höchstens zur Bearbeitung eines anderen Werkstoffes die Drehzahl geändert zu werden.

**4. Schalthäufigkeit.** Jede Drehzahländerung bedingt eine Schaltung, außerdem aber jedes Ein-, Um- und Ausschalten. Zu der vorstehend aufgeführten Drehzahländerungshäufigkeit kommt noch die reine Schalthäufigkeit hinzu. Auch hierbei gibt es bei den Werkzeugmaschinen alle Möglichkeiten von der durchlaufenden Maschine bis zu fast ununterbrochen schaltenden Automaten. Dicktenhobelmaschinen, Form- und Gravierfräser, Schwabbelscheiben, Schleifscheiben bei vielen Schleifmaschinen und noch andere Werkzeugmaschinen laufen durch und werden nur zu den Pausen und beim Arbeitsschluß ausgeschaltet. Im Gegensatz dazu müssen Gewindebohrmaschinen beispielsweise bei jedem gebohrten Loch mindestens zweimal schalten und vollselbsttätige Drehbänke oft je Arbeitsstück mehrere Schaltungen machen.

Alle diese Angaben über Drehzahländerung und Schalthäufigkeit beziehen sich nur auf die Werkzeugspindel oder bei Schleifmaschinen und Drehbänken auf die Werkstückumdrehungen. Nur diese Drehzahlen haben bei Werkzeugmaschinen mit umlaufender Arbeitsbewegung Einfluß auf die Schnittgeschwindigkeit. Der Vorschub, der oft noch mehr Schaltungen machen muß als die Hauptspindel, ist hier nicht näher behandelt worden.

Die Schalthäufigkeiten der Werkzeugmaschinenarten, bei denen hohe Drehzahlen nötig sind, sind in Abb. 3 schaubildlich aufgetragen, wobei teilweise schon früher veröffentlichte Werte benutzt sind<sup>1</sup>. Da auch innerhalb einer bestimmten Maschinenart die Anforderungen an die Werkzeugmaschine und auch ihre Bauart außerordentlich verschiedenartig sind, kann das Schaubild nur einen ungefähren Anhalt geben.

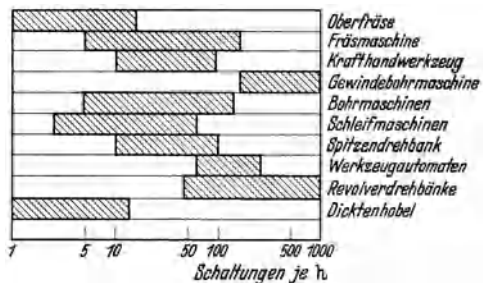


Abb. 3. Schalthäufigkeiten bei Werkzeugmaschinen. Angenäherte Werte für Werkzeugmaschinenarten. Einzelfälle können wesentlich anders liegen.

### C. Mechanische Drehzahlerhöhung.

Der Schnellfrequenzantrieb ist noch nicht sehr verbreitet. Trotzdem gibt es seit langer Zeit verschiedene Möglichkeiten, um hohe Drehzahlen zu erzielen. Die

<sup>1</sup> BRÖDNER-WOLF: Elektrotechnik im Betrieb.

Elektromotore, die auch ohne Schnellfrequenz hohe Drehzahlen erzielen, werden im Abschnitt Motoren behandelt. Die erreichbaren Drehzahlen liegen allerdings meistens wesentlich niedriger als die Schnellfrequenzdrehzahlen.

**5. Preßluftantrieb<sup>1</sup>.** Bevor die rein mechanischen Mittel zur Drehzahlerhöhung kurz geschildert werden, soll vorab der Preßluftantrieb erwähnt werden, der sehr hohe Drehzahlen ermöglicht. Der Hauptnachteil des Preßluftantriebes ist seine Unwirtschaftlichkeit. Es treten Verluste im Kompressor, in den Leitungen, besonders an undichten Stellen, und schließlich im Arbeitsmotor selbst auf. Obwohl



Abb. 4. Preßluftwerkzeug „Schleifhexe“. 60 000 U/min im Leerlauf. Für Schleifsteine bis 12 mm Durchm. (Rheinmetall-Borsig).

der Wirkungsgrad des Arbeitsmotors bei Krafthandwerkzeugen z. B. bei 50% liegt, wird der Gesamtwirkungsgrad einer Preßluftanlage nicht über 25% zu bringen sein. Da aber Preßluftwerkzeuge sehr leicht gebaut werden können, nimmt man hierbei den schlechten Wirkungsgrad und die Unbequemlichkeiten der großem Verschleiß ausgesetzten Druckluftleitungen in Kauf. Derartige Werkzeuge erreichen sehr hohe Drehzahlen, wenn auch der Drehzahlabfall zwischen Leerlauf und Vollast groß ist. Abb. 4 zeigt ein derartiges Werkzeug, die „Schleifhexe“, die 60 000 U/min im Leerlauf macht. Mit den Preßluftwerkzeugen ist das Haupt-

anwendungsgebiet der Preßluft, soweit hohe Drehzahlen in Frage kommen, erschöpft. Es sei abschließend noch erwähnt, daß die höchste auf der Welt bisher — versuchsmäßig — erzielte Drehzahl, 600 000 U/min, mit einem Preßluftantrieb erreicht wurde. Bei diesem Antrieb „schwimmt“ der Läufer frei auf einem Druckluftstrom.

Bei der rein mechanischen Drehzahlerhöhung gibt es zwei Hauptarten: den Riemenantrieb und die Zahnradübertragung.

**6. Riemenantrieb.** Hohe Drehzahlen sind nicht Selbstzweck, sondern dienen der Wirtschaftlichkeit und der Steigerung der Arbeitsgüte. Daher darf der Antrieb zur Erzielung dieser hohen Drehzahlen keinen hemmenden Einfluß auf die Arbeitsgüte haben. Es verbieten sich also zunächst alle Riemenarten, die durch eines der üblichen Riemenschlösser verbunden sind. Lederriemen müssen durch Leimung verbunden sein, Keilriemen und Geweberiemen müssen endlos hergestellt werden. Die Grenze der erreichbaren Drehzahlen liegt durch die Riemenhöchstgeschwindigkeit fest. Diese beträgt für Flachriemen an Werkzeugmaschinen beispielsweise 30 m/s und für Keilriemen 25 m/s. Bei dieser Geschwindigkeit liegt zwar bei Flachriemen auch der Höchstwert der übertragbaren Nutzleistung, aber nicht die höchste zulässige Nutzspannung. Der Riemen braucht eine Vorspannung von  $17 \dots 20 \text{ kg/cm}^2$ . Damit werden aber auch die Lager stark beansprucht. Da der Achsabstand außerdem mindestens  $3 \dots 4 \times$  Durchmesser der größeren Scheibe sein soll, baut der Riementrieb mit Flachriemen recht groß. Die erzielbare höchste Übersetzung ist 1 : 5.

<sup>1</sup> Vgl. W.-B. Heft 79 „Maschinelle Handwerkzeuge“.



Etwas besser ist der Keilriemen. Hier lassen sich die Achsen bedeutend dichter zusammenbauen. Es wird allerdings der Umschlingungswinkel kleiner und damit sinkt die übertragbare Leistung, wie Tabelle 2 zeigt.

Bei Keilriemen ist außerdem zu berücksichtigen, daß die Biegewechselzahl höchstens 40/s werden darf. Hiermit ist festgelegt, wie oft eine bestimmte Riemenstelle je Sekunde über der kleinen Rolle gebogen werden darf. Daraus ergibt sich dann der Mindestabstand der Riemetrieb-Achsen. Hieraus errechnet sich z. B., daß ein Antriebsmotor mit 2800 U/min eine Scheibe von 150 mm  $\varnothing$  haben müßte, um auf eine 30 mm  $\varnothing$  Scheibe (kleinste genormte Keilriemenscheibe) 0,5 PS bei 14000 U/min zu übertragen. Der Keilriemen müßte dabei wegen der Höchstbiegewechselzahl mindestens 630 mm lang sein. Da es diesen Keilriemen handelsüblich nicht gibt, muß der nächstgrößere mit 800 mm Länge genommen werden. Damit hat aber dieser Riemetrieb auch schon einen größeren Platzbedarf.

Tabelle 2. Leistungsübertragung mit Keilriemen bei verschiedenen Umschlingungswinkeln.

Umschlingungswinkel	Übertragbare Leistung
180°	100 %
150°	92 %
120°	81 %
90°	68 %

Mit den Lederriemen und den Keilriemen ist eine Drehzahlerhöhung über 15000 U/min nur sehr selten und mit großem Aufwand möglich. Wesentlich besser sind hier die Geweberiemen, die für kleine Scheibendurchmesser und hohe Riemen-geschwindigkeiten geschaffen worden sind. Hierzu gehören die Haarriemen, Baumwoll- und Seidenriemen und Hanfriemen und -gurte. Auch die Balata- und Gummiriemen gehören im weiteren Sinne dazu. Die zulässigen Spannungen für diese Riemen sind:

Tabelle 3. Riemenspannung.

Haarriemen . . . . .	22 ··· 50 kg/cm <sup>2</sup>	!	Balatariemen . . . . .	35 ··· 70 kg/cm <sup>2</sup>
Seidenriemen . . . . .	60 ··· 100 „	,	Gummiriemen . . . . .	30 ··· 60 „

Diese Riemen haben sich zur Erzielung höchster Drehzahlen recht gut eingeführt.

Allen Riemetrieben ist gemeinsam, daß sie mit einer gewissen Riemenspannung laufen müssen. Diese Riemenspannung versucht die Arbeitsspindel zu verbiegen. Diese dauernden Verbiegungen setzen vor allem die Lebensdauer und Genauigkeit der Lager stark herab. Deshalb ist man schon seit langem bestrebt, den schädlichen Riemenzug von den Arbeitsspindeln fernzuhalten. Dies geschieht beispielsweise bei Drehbänken durch eine Hülse, die im Spindelstock gelagert ist und die Riemenscheibe trägt. Diese Hülse überträgt dann die Drehbewegung auf die völlig entlastete Spindel. Derartige Konstruktionen sind aber für Innenschleifspindeln und ähnliche Bauteile nicht anwendbar, da sie zuviel Platz benötigen. Hier hat man sich durch stark überbemessene mehrfache Lager zu helfen gesucht. Es sind also immer erhebliche Schwierigkeiten zu beseitigen, wenn der Riemenzug unschädlich gemacht werden muß.

Riemetriebe haben einen großen Platzbedarf. Dieser Platzbedarf wird um so größer, je höher die Riemen-geschwindigkeit wird, da dann die Höchstbiegewechselzahl mitbestimmend wird. Trotzdem ist der Riemenverbrauch noch recht hoch; da die Riemenbeschaffung zu Zeiten mit Schwierigkeiten verknüpft ist, können somit beträchtliche Ausfälle entstehen.

**7. Zahnradübertragung.** Die Zahnradübertragung hat sich bisher sehr wenig zur Erreichung hoher Drehzahlen durchgesetzt (z. B. Antrieb von Zentrifugen). Für den Werkzeugmaschinenbau liegt die Schwierigkeit hauptsächlich darin, daß auch bestens bearbeitete Zahnräder beim Schliffbild Rattermarken ergeben würden. Das ergibt sich aus der Zahnradübertragung an sich, die nicht die bei Feinstbearbeitung erforderliche sehr genaue Gleichförmigkeit der Drehbewegung zu erzielen

gestattet. Da diese Gleichförmigkeit aber nicht überall so scharf eingehalten zu werden braucht, haben sich Zahnradgetriebe in anderen Zweigen des Maschinenbaues, wie z. B. im Arbeitsmaschinenbau, sehr gut eingeführt. Bei Werkzeugmaschinen, an die nicht höchste Ansprüche gestellt werden, ist selbstverständlich das übliche Zahnradgetriebe und -vorgelege vorhanden. Sogar bei den Feinstbearbeitungsmaschinen sind Getriebe vorhanden. Nur wird hier zwischen Getriebe und Arbeits spindle bei guten Maschinen ein elastisches Zwischenglied, z. B. ein endloser Riemen, eingeschaltet.

Alle oben angeführten Fälle gelten aber, soweit sie Werkzeugmaschinen betreffen, nicht für hohe Drehzahlen. Dafür liegen noch nicht genügend Erfahrungen vor. Es ist aber schon zu erkennen, daß derartige Drehzahlerhöhungs-Zahnradgetriebe sehr teuer werden. Ganz abgesehen von der genauen und sorgfältigen Lagerung der Achsen müßten die Zahnräder für Drehzahlen über 10 bis 15000 U/min geschliffen sein, und für eine sehr gute Schmierung müßte gesorgt werden, da derartige Getriebe auf Erwärmung berechnet werden müssen.

Aus dem vorliegenden Abschnitt ergibt sich, daß das meistverbreitetste Mittel zur mechanischen Erzeugung hoher Drehzahlen noch immer der Riemtrieb ist. Er ist verhältnismäßig billig in der Anschaffung — auch bei einer hochdrehzahligen Maschine — und er ist ein einfaches Maschinenbauteil.

## II. Schnellaufende Elektromotoren.

### A. Drehstrom-Käfigläufermotoren — elektrische Verhältnisse.

8. Asynchronmotor. Soweit irgend durchführbar, treibt man Arbeitsmaschinen durch Drehstrom-Asynchronmotoren an. Dabei wird die einfachste Form mit Käfigläufer (Abb. 5) vorgezogen. Wird die Ständerwicklung eines derartigen Motors

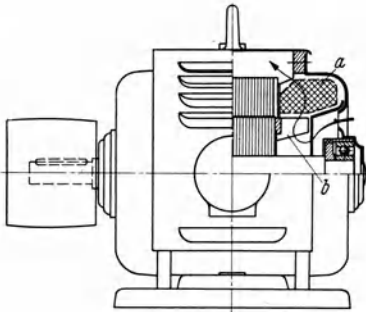


Abb. 5. Skizze eines Käfigläufermotors.  
a Ständerwicklung; b Lüfterfahne. Die Pfeile bezeichnen den Weg der Kühlluft.

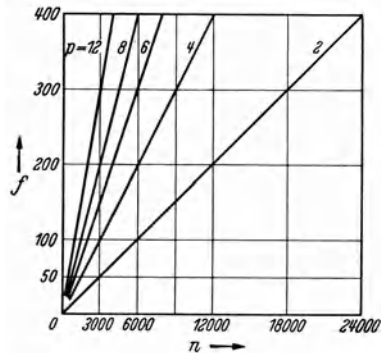


Abb. 6. Zusammenhang zwischen Frequenz  $f$ , Polzahl des betriebenen Motors  $p$  und Drehzahl  $n$ . Drehzahlwerte sind theoretische Werte, wirkliche Drehzahlen liegen niedriger (s. Abschnitt 50 „Normung“).

an ein Drehstromnetz angeschlossen, so entsteht ein umlaufendes magnetisches Feld (Drehfeld), das in der kurzgeschlossenen Läuferwicklung eine Spannung erzeugt, die ihrerseits wieder einen Strom und damit ein Magnetfeld im Läufer zur Folge hat. Das Drehfeld bildet so in Verbindung mit den induzierten Läuferströmen ein Drehmoment, das den Läufer im Sinne des umlaufenden Drehfeldes zu beschleunigen sucht. Ist die Umlaufgeschwindigkeit von Ständerdrehfeld und Läufer genau gleich, so spricht man von synchronem Lauf. Bezeichnet man die Frequenz des vorhandenen Stromes mit  $f$ , die Motorpolzahl mit  $p$  und die synchrone Drehzahl

mit  $n$ , so läßt sich der zwischen diesen Werten bestehende Zusammenhang durch die Gleichung:  $n = \frac{f \cdot 120}{p}$  ausdrücken (Tabelle 4 und Abb. 6). Bei dieser Drehzahl können die Kraftlinien des Ständerdrehfeldes die Stäbe der Läuferwicklung nicht mehr schneiden, wodurch in diesen keine Spannung induziert werden kann.

Dadurch wird der Läuferstrom und damit gleichzeitig das Drehmoment gleich Null. Die Aufgabe eines Motors besteht darin, daß er ein Drehmoment, d. h. also eine Leistung abgibt. Ein Drehmoment ist aber nur dann vorhanden, wenn die Kraftlinien des Ständerdrehfeldes die

Tabelle 4. Theoretische Nenn Drehzahlen bei verschiedenen Polzahlen und Frequenzen.

Polzahl	Frequenz					
	50	100	150	200	300	400
2	3000	6000	9000	12000	18000	24000
4	1500	3000	4500	6000	9000	12000
6	1000	2000	3000	4000	6000	8000
8	750	1500	2250	3000	4500	6000
12	500	1000	1500	2000	3000	4000

Läuferwicklung schneiden, d. h. der Motor muß mit einer von der Synchron Drehzahl abweichenden Drehzahl — also asynchron — umlaufen. Diese Eigenart hat auch zu der Bezeichnung „Asynchronmotor“ geführt. Das Zurückbleiben der Drehzahl hinter der synchronen Drehzahl — der sog. Schlupf — ändert sich mit der Motorbelastung, und zwar zwischen Halb- und  $\frac{5}{4}$ -Last etwa verhältnismäßig mit der Belastungsänderung. Bei Vollast beträgt der Schlupf handelsüblicher Motoren je nach Motorgröße ungefähr 3...6% der synchronen Drehzahl. Durch Änderung des Läuferwiderstandes kann der Schlupf in kleinen Grenzen den Betriebserfordernissen angepaßt werden.

**9. Drehmomente, Belastungen.** Je nach dem Betriebszustand des Motors fallen dem vorhandenen Drehmoment verschiedene Aufgaben zu. Beim Anlauf muß das Drehmoment die Reibung der Ruhe und etwa vorhandene Gegenmomente überwinden, sowie die Massen beschleunigen, während beim Hochlauf zur Lagerreibung noch die mit der Drehzahl stark wachsende Luftreibung, sowie vielfach Gegenmomente hinzukommen. Das darüber hinaus verfügbare Drehmoment dient zur Beschleunigung der sich drehenden Teile. Ist die Nenn Drehzahl erreicht, so hängt die Größe des Drehmoments, das der Motor aufbringen muß, abgesehen vom erforderlichen Leerlaufkraftbedarf, von den durch die Betriebsbedingungen festgelegten Gegenmomenten ab. In den „Regeln für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen“ — REM — sind die Grenztemperaturen festgelegt, welche ein Motor im Dauerbetrieb erreichen darf. Das Drehmoment, das der Motor dabei ebenfalls im Dauerbetrieb abgeben kann, wird als Nennmoment bezeichnet, wobei die übrigen Momente als Vielfache dieses Momentes ausgedrückt werden. Außer dem Anlauf- ( $M_a$ ), dem Hochlauf- und dem Nennmoment unterscheidet man noch das Kippmoment. Wird dieses Moment im Betrieb überschritten, so bleibt der Motor stehen, er „kippt“.

Für den Hochlauf spielt der Verlauf der Drehmomentenkurve (Abb. 7 u. 8) eine große Rolle, besonders wenn bei Zwischendrehzahlen die Gefahr besteht, daß z. B. durch eine Unwucht Schwingungen auftreten. Diese Eigenschwingungen können bei den sog. kritischen Drehzahlen so groß werden, daß infolge der Durchbiegung der Welle Störungen, häufig sogar Zerstörungen auftreten. Besitzt die Hochlaufkurve eines Motors bei der kritischen Drehzahl eine Einsattelung und ist das für die Beschleunigung verfügbare Moment dabei sehr klein, so können die durch die Schwingungen bedingten Leistungsverluste so groß werden, daß das zum Hochlauf erforderliche Überschußmoment nur sehr klein ist und damit nur ein schleicher Hochlauf zustande kommt. Ist dieses Überschußmoment sehr klein, so

ist kein Hochlauf mehr möglich, und der Motor bleibt bei einer niedrigen Drehzahl stecken. In beiden Fällen ist der mechanische Teil sehr stark gefährdet. Sorgsame

Ausbildung des mechanischen und richtige Wahl des elektrischen Teiles sind daher die Vorbedingungen für einen störungsfreien Betrieb. Je höher die Frequenz wird, um so mehr müssen die mit der Planung des mechanischen und des elektrischen Teiles beauftragten Ingenieure Hand in Hand arbeiten und die einzeln gemachten Erfahrungen austauschen. Die manchmal geäußerte Ansicht, daß ein zu schneller Hochlauf nachteilig sei, dürfte wenigstens für Werkzeugmaschinen nicht zutreffen. Der Sonderfall, daß bei Schleifscheiben durch ungleichmäßig aufgenommene Feuchtigkeit eine zusätzliche Unwucht festgestellt wird, dürfte auch bei Schnellfrequenzmotoren ein außerordentlich seltener Sonderfall sein. Bei den hoch-

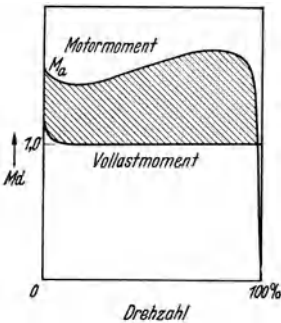


Abb. 7. Momentenverlauf beim unmittelbaren Einschalten eines Käfigläufermotors. Anlaufmoment ( $M_a$ ) liegt höher als Volllastmoment. Schraffierte Fläche zeigt Überschuß des Motormomentes gegenüber dem verlangten Volllastmoment. Anlauf hier unter Vollast.

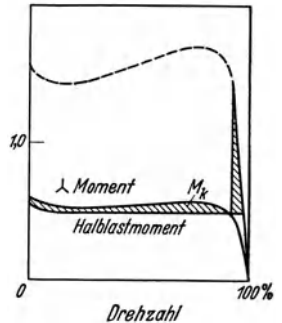


Abb. 8. Momentenverlauf beim  $\lambda$ - $\Delta$ -Einschalten eines Käfigläufermotors. Anlauf im Leerlauf benötigt kleineres Anlauf- und Hochlaufmoment. Nur das Halblastmoment ist zu überwinden. Motor wegen kleineren Anlaufstromes zunächst in  $\lambda$  an Netz. Wenn Motormoment  $M_k$  bis auf Gegenmoment absinkt, umschalten auf  $\Delta$ .

drehzahligen Werkzeugmaschinenantrieben kann fast immer mit Leeranlauf gerechnet werden, wobei zu beachten ist, daß mit steigender Drehzahl auch die Luftreibungsverluste sehr schnell anwachsen.

Ist die Betriebsdrehzahl erreicht, so können je nach der Eigenart der Werkzeugmaschine und je nach der jeweiligen Bearbeitungsaufgabe die verschiedensten Belastungsspiele auftreten. Der Motor kann dauernd unter Vollast laufen, es kann aber auch Vollast mit Teillast oder Leerlauf wechseln, oder Überlast mit Leerlauf,

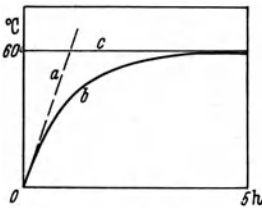


Abb. 9. Dauerbetrieb.

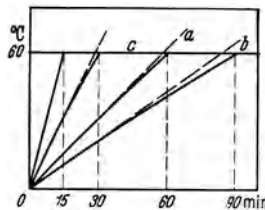


Abb. 10. Kurzzeitbetrieb.

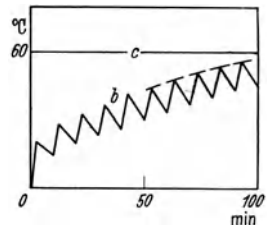


Abb. 11. Aussetzbetrieb.

Abb. 9...11. Motorerwärmung bei verschiedenen Betriebsarten.

a Motorerwärmung ohne Wärmeabfuhr; b Motorerwärmung mit Wärmeabfuhr; c Grenzübertemperatur nach REM.

wobei der zeitliche Anteil des einzelnen Belastungszustandes die verschiedensten Werte annehmen kann. Jeder Belastung entspricht ein bestimmter Strom und damit eine bestimmte Motorerwärmung (Abb. 9...11). Aufgabe der Planung ist es, dafür zu sorgen, daß die nach REM vorgeschriebenen Erwärmungsgrenzen nicht überschritten werden. Bei Drehstrommotoren hängt die Stromaufnahme sehr stark vom Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  und vom Wirkungsgrad  $\eta$  ab, wobei diese Werte sich ihrerseits wieder mit der Belastung ändern (Abb. 12). Drückt man die Spannung an den Motorklemmen mit  $E$  und den Strom je Phase mit  $I$  aus, so ergibt sich die Motorleistung zu:  $N = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta$ . Besonders bei kleinen Motoren ist der Leerlaufstrom schon verhältnismäßig groß, so daß bis zur Vollast kaum eine

Zunahme zu bemerken ist. Als weitere Betriebsmöglichkeiten sind noch der Wechsel zwischen irgendeinem Belastungszustand und Stillstand, sowie häufiger Drehrichtungswechsel zu erwähnen.

**10. Spannungen und Ströme.** Bei der Angabe der Motorspannung ist stets auch die Frequenz  $f$  zu beachten. Die Frequenz und die Spannung hängen zusammen nach der Gleichung:  $E = c \cdot \varphi \cdot f$ . Dabei ist  $c$  eine Motorkonstante und  $\varphi$  die Sättigung, mit deren Änderung sich auch die Motoreigenschaften ändern. Weiterhin ist zu unterscheiden, ob die Spannung sich auf eine Stern- oder eine Dreieckschaltung der Motorwicklung bezieht (Abb. 13 u. 14). Bei Dreieckschaltung steht jede Spule unter der Spannung einer Phase; z. B. 380 Volt. Bei Sternschaltung sind je zwei Spulen hintereinander geschaltet, dadurch verringert sich die Spannung je Spule auf  $380/\sqrt{3} = 220$  Volt. Zugleich damit werden auch die Sättigung und die Stromstärke je auf  $1/\sqrt{3}$  ihres vorherigen Wertes verkleinert, so daß Drehmoment und Leistung auf  $\frac{1}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}} = 1/3$  ihres vorherigen Wertes sinken.

Gleichzeitig verringert sich der Ständerstrom im selben Ausmaß. Die Stern-Dreieckschaltung ist demnach zur Herabsetzung der Stromaufnahme — verringerte Netzbelastung im Augenblick der Motoreinschaltung — und zur Herabsetzung des An- und Hochlaufmomentes, also Langsamanlauf (Schleifscheiben) von größter Wichtigkeit. Weiterhin ergibt sich daraus, daß jeder Änderung der Sättigung eine entsprechende quadratische Änderung der Momente entspricht. Wird bei einem Motor die zugeführte Spannung im gleichen Maße wie die Frequenz geändert, so bleiben die Sättigung und damit auch der Strom je Phase ebenso wie die Momente gleich. Die Motorleistung und die Drehzahl ändern sich dagegen im selben Maße wie die Frequenz.

**11. Erwärmung.** Bei der Erklärung des Begriffes Nennmoment ist die Grenztemperatur nach REM erwähnt worden. Die Motorerwärmung hängt hauptsächlich von den Kupfer- oder OHMSchen Verlusten in Ständer und Läufer ab, welche sich quadratisch mit den Strömen, und von den Eisen- oder magnetischen Verlusten, die sich quadratisch mit der Sättigung ändern. Die Läuferverluste sind ferner dem Motorschlupf verhältnismäßig, d. h. bei Stillstand wird die gesamte dem Läufer zugeführte Energie in Wärme umgesetzt, während im synchronen Lauf die Verluste Null sind. Beim Hochlauf wird also etwa die Hälfte der dem Läufer zugeführten Energie in Wärme umgesetzt. Beim unmittelbaren Drehrichtungswechsel muß der Drehzahlenunterschied zwischen den beiden Drehrichtungen als Schlupf betrachtet werden. Er wird damit doppelt so

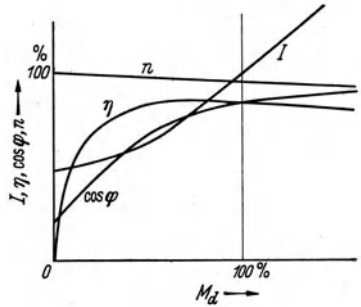


Abb. 12. Abhängigkeit des Motorstromes  $I$ , der Drehzahl  $n$ , des Leistungsfaktors  $\cos \varphi$  und des Wirkungsgrades  $\eta$  von der Belastung (Drehmoment  $M_d$ ) bei Drehstrom-Asynchronmotoren.

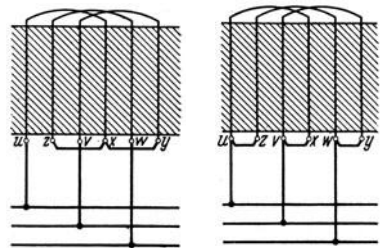


Abb. 13. Sternschaltung der Ständerwicklungen.  $\lambda$  - Wickelschema und Schaltskizze.

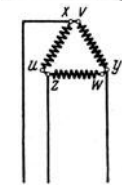


Abb. 14. Dreieckschaltung der Ständerwicklung.  $\nabla$  - Wickelschema und Schaltskizze.

groß wie beim Anlauf, die Zeit wird also auch doppelt so lang. Beim unmittelbaren Umschalten wird demnach die im Läufer entstehende Wärmemenge viermal so groß wie beim gewöhnlichen Anlauf. Dabei ist zu beachten, daß die erzeugte Wärme von der Anlaufzeit und diese wieder vom verfügbaren Beschleunigungsmoment, den Gegenmomenten und der zu errechnenden Enddrehzahl abhängig ist, und daß diese Wärmemengen bei jedem Anlauf und jedem Drehrichtungswechsel wieder neu auftreten. Die Stromaufnahme eines Motors ist einerseits von seiner Sättigung, andererseits von seiner Belastung abhängig. In der Nähe der Nenn-drehzahl ändert sich der Strom ungefähr im gleichen Verhältnis wie die Belastung, während in der Nähe des Kippunktes einer geringen Belastungsänderung große Stromschwankungen entsprechen. Größere Ströme bedingen die Entstehung größerer Wärmemenge. Zur Vermeidung einer unnötigen Erwärmung soll man deshalb nicht im Kippbereich arbeiten. Dies ist besonders zu beachten, wenn häufige Überlastungen auftreten. Eine Herabsetzung der Sättigung zwecks Verringerung der Stromaufnahme ist nur dann möglich, wenn die gleichzeitig mitherabgesetzten Momente für einen einwandfreien Betrieb noch ausreichen. Zur Motorerwärmung tragen ferner die sich zum Teil quadratisch mit der Frequenz ändernden Wirbelstrom- und Magnetisierungsverluste bei. Durch Sonderausführungen des Ständer- und gegebenenfalls auch des Läuferblechpaketes können diese Verluste in geringem Ausmaß herabgesetzt werden. Außer den elektrischen Verlusten sind auch mechanische Verluste zu berücksichtigen, von denen bei schnellaufenden Motoren besonders die mit der Drehzahl stark anwachsenden Luftreibungsverluste wichtig sind. Jeder mechanische Verlust tritt als eine Erhöhung der Stromaufnahme in Erscheinung. Er muß also vorher bei der Beurteilung der elektrischen Verhältnisse mit berücksichtigt werden. Auf die mechanischen Verhältnisse wird auf S. 17 näher eingegangen.

**12. Hochdrehzahliger Asynchronmotor.** Zieht man aus diesen allgemein gültigen Bedingungen die Folgerungen für hochdrehzahlige Motore, so zeigt sich, daß man bei der Planung und im Betrieb eine ganze Reihe von Einzelheiten beachten muß, um trotz bester Ausnützung der Motoren einen einwandfreien Betrieb sicherzustellen. Es wird sich in jedem Falle darum handeln, alle Maßnahmen zu treffen, um die Motorerwärmung in den zulässigen Grenzen zu halten, ohne daß dabei die Motormomente zu klein werden. Ist einmal ein Motor für eine bestimmte Spannung und Frequenz für Dauerbetrieb und Vollast ausgelegt, so bedeutet jede Abweichung von dieser Auslegung im späteren Betrieb auch eine Änderung der Erwärmung. Bei geringerer Belastung, gleichgültig ob es sich dabei um Aussetzbetrieb oder um dauernde Unterbelastung handelt, wird die Motorerwärmung geringer. Das bedeutet, daß der Motor unwirtschaftlich arbeitet, da ein kleinerer Motor den gestellten Anforderungen auch genügen würde. Schlimmer ist die stärkere Belastung als vorgesehen. Durch die Überlastung, sei es dauernd, sei es durch häufige Überlastungen, Anlaufvorgänge oder Drehrichtungswechsel, wird die Erwärmung zu hoch; also ist ein größerer Motor vorzusehen oder die mechanische Belastung soweit zu senken, daß die Grenztemperatur nicht mehr überschritten wird. Dies läßt sich beispielsweise durch ein Getriebe erreichen. Bei sehr hoher Schalthäufigkeit kann der Fall eintreten, daß besonders beim Vorhandensein großer Schwungmassen und einer hohen Enddrehzahl die mechanische Belastbarkeit nur noch einem Bruchteil der Nennleistung des Motors entspricht. Wird nun ein für 220 Volt 50 Per/s gewickelter Motor an ein 100 periodisches Netz angeschlossen, so müßte nach der Gleichung:  $E = c \cdot \varphi \cdot f$  die Spannung auf 440 Volt heraufgesetzt werden, wie es auch bei den ersten Anlagen gemacht wurde. Mit Rücksicht auf die höheren Eisenverluste infolge der erhöhten Frequenz müßte nun

die Nennleistung soweit herabgesetzt werden, daß die Grenztemperatur nicht überschritten wird, oder es müßte die Sättigung und damit der Strom im entsprechenden Ausmaß verringert werden. Ein Vergleich dieser beiden Lösungen ergab in Verbindung mit der wirtschaftlichen Überlegung, daß eine anormale Motorwicklung unter allen Umständen unwirtschaftlich ist, als günstigste Spannung für diesen Fall 380 Volt. Ein für 220/380 Volt 50 Per/s ausgelegter Motor (also für Stern-Dreieckschaltung gewickelt) kann demnach ohne weiteres an 380 Volt 100 Per/s angeschlossen werden, wobei auch hier die Stern-Dreieckschaltung möglich ist. Voraussetzung ist dabei, daß der Motor rein mechanisch eine erhöhte Drehzahl vertragen kann. Der Motor kann auch weiterhin in Sternschaltung an 380 Volt 50 Per/s gelegt werden.

Um auch bei den Induktionsumformern (Frequenzwandler) eine Vereinfachung zu bekommen, wurde für 75 Per/s eine Spannung von 285 Volt festgelegt, womit

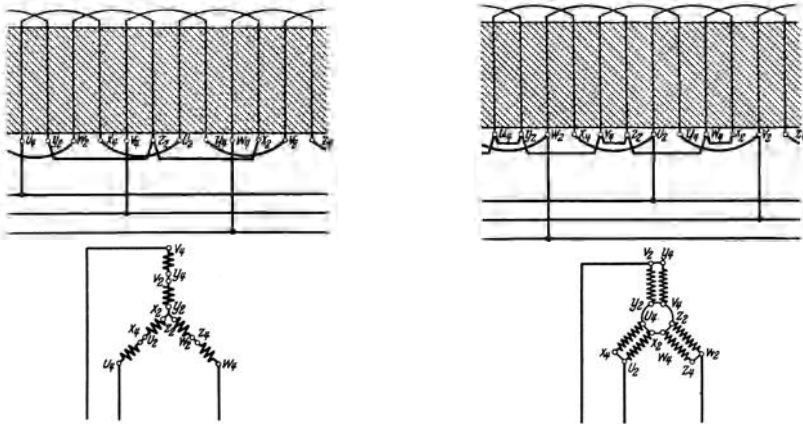


Abb. 15. 4polig geschaltet (niedrige Drehzahl).

Abb. 16. 2polig geschaltet (hohe Drehzahl).

Abb. 15 u. 16. Polumschaltbare Ständerwicklung. Wickelschema und Schaltskizze.

der schon erwähnte 220/380-Volt-Motor auch an die Frequenz von 75 Per/s ohne weiteres angeschlossen werden kann. Bei einer weiteren Frequenzerhöhung ist zu beachten, daß die Spannung mit Rücksicht auf die Vorschriften der REM nicht beliebig gesteigert werden darf. Im übrigen sei mit Rücksicht auf die Wichtigkeit nochmals darauf hingewiesen, daß jeder Spannungsherabsetzung d. h. Verringerung der Sättigung eine entsprechende quadratische Momentherabsetzung entspricht.

Aus der Gleichung:  $n = \frac{f \cdot 120}{p}$  ergibt sich, daß bei Drehstromkäfigläufermotoren eine Änderung der Drehzahl nur durch eine Änderung der Polzahl oder der Frequenz oder beider gleichzeitig möglich ist. Bei 50periodigem Strom sind unter Verwendung der für Werkzeugmaschinenantriebe im allgemeinen üblichen Motorpolzahlen ohne Benutzung von Getrieben die in Tabelle 4 angegebenen Nenndrehzahlen möglich. Diese Drehzahlen sind theoretisch Leerlaufdrehzahlen, die in der Praxis nicht erreicht werden können, da der Schlupf in diesen theoretischen Zahlen nicht berücksichtigt ist. Genaueres über die tatsächlich zu errechnenden Drehzahlen beim Schnellfrequenzantrieb findet sich im Kapitel VI „Normung“. Für Drehzahlen über 2800/min oder für Zwischendrehzahlen zwischen 1400 und 2800/min muß von der Frequenzumformung Gebrauch gemacht werden. Soll ein Motor in der Lage sein, mit verschiedenen Drehzahlen zu laufen, so wird er polumschaltbar ausgeführt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den Motoren mit nur einer um-

schaltbaren Wicklung und den Motoren mit mehreren gesonderten Wicklungen (Abb. 15...18), wobei für jede Drehzahl eine eigene Wicklung vorhanden sein kann, oder aber jede Wicklung wieder umschaltbar ist. Die elektrischen und wirtschaftlichen Verhältnisse setzen die Grenze bei 4 Drehzahlen, die auf zwei umschaltbare Wicklungen verteilt sind. Der Vorteil einer umschaltbaren Wicklung besteht darin, daß aus einem Motor von gegebener Größe ein Höchstmaß an Leistung herausgeholt werden kann, der Nachteil darin, daß die Wicklung im allgemeinen nur für Anschluß an eine Spannung geeignet ist und die Hochlaufkurve gewöhnlich nicht bei beiden Drehzahlen gleichmäßig sein kann. Der Vorteil der getrennten Wicklung liegt daher in der Möglichkeit, diese für zwei Spannungen auszulegen und für jede Drehzahl eine günstige Momentenkurve zu erzielen, ihr Nachteil in der niedrigen Motorleistung bezogen auf eine gegebene Motorgröße, in der sog. schlechten „Modellausnutzung“. Wird außer der Polumschaltung auch die Frequenzänderung zur

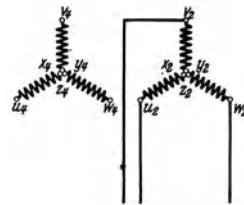
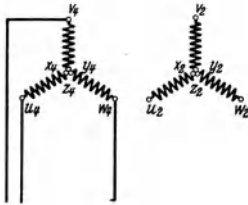
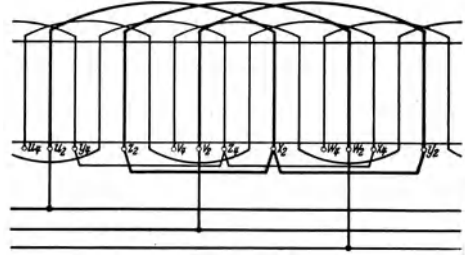
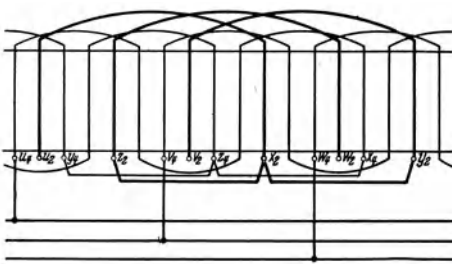


Abb. 17. 4-polig geschaltet.

Abb. 18. 2-polig geschaltet.

Abb. 17 u. 18. Polumschaltung mit zwei getrennten Ständerwicklungen. Wickelschema und Schaltskizze.

Drehzahlregelung herangezogen, so spielt die Möglichkeit, getrennte Wicklungen für ganz unterschiedliche Spannungen und Frequenzen auslegen zu können, eine große Rolle in der Planung drehzahlveränderlicher Motoren.

**13. Antrieb durch verschiedene Schnellfrequenzen.** Genau wie bei der Polumschaltung nur eine stufenweise Drehzahländerung erreicht werden kann, ist dies gewöhnlich auch bei der Frequenzänderung der Fall, da die erzeugte Frequenz von der Polzahl des Induktionsumformers und des dazu gehörigen Antriebsmotors abhängt. Die Erzeugung beliebiger Frequenzen durch Antrieb des Induktionsumformers mittels eines stufenlos regelbaren Motors ist ein ausgesprochener Sonderfall. Während nun bei der Polumschaltung der höchstmögliche Stufensprung davon abhängt, welche Nutenzahl im Ständer Platz hat und wieviel Nuten je Pol mit Rücksicht auf die Feldkurve erforderlich sind, spielt beim Anschluß eines Motors an Netze verschiedener Frequenz die Spannung und die Größe der Momente die ausschlaggebende Rolle. Für jeden Motor gibt es im Hinblick auf den verfügbaren Nutenquerschnitt, den Drahtquerschnitt und die erforderliche Drahtzahl je Nut eine untere und besonders bei kleineren Motoren eine obere Spannungsgrenze. Die Höchstspannung für Motoren ist im übrigen durch die Vorschriften für Niederspannungsanlagen auf 550 Volt festgesetzt. Wird ein Motor mit verschiedenen-



periodigem Strom gespeist, so muß bei der höchsten Frequenz die Sättigung und damit die Spannung noch so hoch sein, daß die verschiedenen Momente, besonders das Anzugs- und Hochlaufmoment ausreichend groß werden, während bei der untersten Frequenz die Sättigung so klein sein muß, daß die Stromaufnahme und damit die Erwärmung nicht zu hoch wird. In der praktischen Erprobung hat sich gezeigt, daß über ein Frequenzverhältnis von 1 : 3 nicht hinausgegangen werden soll, falls die Motorspannung — Stern-Dreieckschaltung — nicht geändert werden kann. Bei einem Frequenzverhältnis von mehr als 1 : 2 muß außerdem für jede Frequenz die Spannung gesondert errechnet werden, um für die elektrischen Größen möglichst günstige Werte zu erhalten. Diese Bedingung läßt sich nicht erfüllen, wenn für die Erzeugung der Frequenzen nur ein Umformer zur Verfügung steht, da bei einer Maschine zwischen Spannung und Frequenz ein starres Verhältnis besteht. In diesem Falle müssen also die verschiedenen höheren Frequenzen durch mehrere Umformer erzeugt werden. Es ergibt sich dann also die Notwendigkeit, an Stelle eines Netzes, das mit verschiedenen Frequenzen gespeist wird, mehrere Netze, für jede Frequenz ein gesondertes, anzulegen. Dabei gewinnt man den Vorteil, daß gleichzeitig an verschiedenen Maschinen mit verschiedenen Drehzahlen gearbeitet werden kann und bei den Antriebsmotoren kein Ausgleich durch verschiedene Polzahl nötig ist. Man kann also zweipolige Motoren überall verwenden.

Solange ein Motor nur an ein Netz und eine Frequenz angeschlossen wird, liegen die Betriebsbedingungen recht einfach. Wird jedoch die Forderung erhoben, daß derselbe Motor an Netze verschiedener Frequenz wahlweise anschließbar sein muß, wobei entweder die Spannung ein Umschalten der Motorwicklung oder die mechanischen Verhältnisse eine Polumschaltung bedingen, so muß durch eine entsprechende Ausbildung des Schaltgerätes durch Verriegelung eine Fehlschaltung vermieden werden. Dabei ist noch zu beachten, daß während des Umschaltvorganges kein Netzkurzschluß entstehen darf. Soweit möglich empfiehlt sich daher die Benutzung verschiedener Motoren, da diese Anordnung sehr oft einfacher und übersichtlicher wird, als die verhältnismäßig verwickelte Sicherheitsschaltung.

### B. Mechanische Verhältnisse schnellaufender Motore.

**14. Aufbau des Läufers.** Bei den Drehstrom-Käfigläufermotoren besteht der Läufer aus einem Blechpaket und der Läuferwicklung. Das Blechpaket ist aus vielen dünnen Blechscheiben zusammengesetzt, welche einseitig mit Papier oder einem anderen nichtleitenden Stoff beklebt oder auch lackiert sind und am Rande Nuten zur Aufnahme der Läuferwicklung besitzen.

Unter Läuferwicklung versteht man sämtliche Läuferstäbe, die in diesen Nuten liegen, einschließlich der an den Läuferstirnseiten befindlichen sog. Kurzschlußbringe. Die Läuferwicklung kann entweder aus einem Stück gegossen sein oder aber aus Einzelteilen bestehen, welche miteinander verlötet sind (Abb. 19 u. 20). In jeder Nut befindet sich dabei nur ein einziger Läuferstab. Die Läuferwicklung, bestehend aus den verhältnismäßig dicken Stäben und den zwei starken Kurzschlußbringen, hat auch den Namen

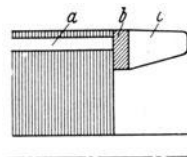


Abb. 19. Läufer mit gegossener Wicklung.  
*a* Wicklungsstäbe;  
*b* Kurzschlußbringe;  
*c* Lüfterfahne. *a, b, c* aus einem Stück gegossen (Leichtmetall)

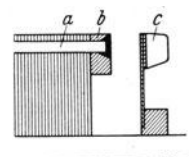


Abb 20. Gebauter Läufer.  
*a* Wicklungsstäbe;  
*b* Kurzschlußbringe;  
*c* Lüfterfahnen. *a* mit *b* verschweißt oder verlötet; *c* sitzen an einem besonderen Ring.

„Käfigläufermotor“ zur Folge gehabt. Der außerdem erforderliche Lüfter wird bei gegossenen Läuferwicklungen gleich mit angegossen oder aber bei gebauten Wicklungen gesondert auf der Welle befestigt. Auf der Welle sitzen dann weiterhin

noch die Kugellager und bei sehr schnellaufenden Motoren häufig auch der Werkzeugträger oder das Werkzeug selbst. Selbst unter der Voraussetzung der völligen elektrischen Eignung eines Motors für Schnellaufbetrieb, ist sogar der scheinbar unverwüsthliche Käfigläufermotor nicht ohne weiteres für jede Drehzahl geeignet. Die Gründe hierfür liegen auf zwei ganz verschiedenen Gebieten. Einmal handelt es sich um die drehzahlabhängigen mechanischen Verluste und zum anderen um die mechanische Eignung sämtlicher sich drehender Teile, wobei insbesondere die höchstzulässige Umfangsgeschwindigkeit, die sog. kritische Drehzahl, die Genauigkeit der Auswuchtung und nicht zuletzt die Eignung der Lager hinsichtlich Ausführung, Einbau und Schmierung eine entscheidende Rolle spielen.

**15. Belüftung.** Zu den drehzahlabhängigen Verlusten gehören die Luft- und Lagerreibungsverluste. Alle Verluste eines Motors setzen sich, wie im vorhergehenden Abschnitt ausführlich dargestellt, in Wärme um. Deshalb ist die Belüftung, die zur Abführung dieser Wärme dient, außerordentlich wichtig. Im allgemeinen besitzen die Motoren Eigenbelüftung, wobei als Kühlmittel Luft verwendet wird. Den Luftumlauf rufen ein oder zwei Lüfter hervor, die bei Motoren für nur eine Drehzahl so ausgelegt sein können, daß sie in Übereinstimmung mit dem bei diesem Motor vorhandenen Kühlluftweg den besten Wirkungsgrad erwarten lassen. Bei gegebener Lüfterabmessung und Verdoppelung der Drehzahl steigt die Kühlwirkung um 50%, der Kraftbedarf nimmt aber den achtfachen Wert an. Damit wird ersichtlich, daß für Motoren mit einem größeren Drehzahlbereich die gewöhnlichen Lüfter nicht übernommen werden können, wenn man wirtschaftlich antreiben will. Der übliche Verlust eines Motors durch den Lüfter beträgt bei nur einer Drehzahl 1,5...2,5% der Motorabgabeleistung je nach Motorgröße und Motordrehzahl. Bei sehr hohen Drehzahlen genügt für diese Belüftung häufig ein Ring mit ganz geringen kreisbogenförmigen Einfürungen. Tiefere Einfürungen würden keine Mehrleistung, sondern nur unzulässige Verluste und teilweise Überlastung des Motors zur Folge haben. Bei unzureichender Ausbildung des Lüfters kann ein störendes Lüftergeräusch auftreten. Es genügt dann meistens, die Zahl der Lüfterflügel resp. Lüftereinfürungen und die Luftein- und Austrittsöffnungen am Gehäuse zu ändern.

Soll ein Motor für einen größeren Drehzahlbereich Verwendung finden, so ergibt sich aus dem Vorhergesagten, daß die Eigenbelüftung unwirtschaftlich arbeiten muß. Sie hätte bei der höchsten Drehzahl zu große Verluste in der Motorabgabeleistung und bei der untersten Drehzahl keine ausreichende Kühlluftmenge. Daher ist die Fremdbelüftung der einzig vernünftige Ausweg. Ein kleiner Motor ( $\frac{1}{4}$  bis 1 PS), der eine in jedem Fall ausreichende Luftmenge fördert, besorgt in diesem Falle die Belüftung.

**16. Lagerung, Schmierung.** In den hochdrehzahligen Motoren sind fast ausschließlich Wälzlager mit Fettschmierung eingebaut. Die Ölumlaufschmierung wird nur sehr selten angewandt, da das Dichthalten der Lager und das Verhindern des Schäumens große Schwierigkeiten macht. Um eine möglichst geringe Lagerreibung zu erzielen, muß das entsprechende Wälzlager den Betriebsverhältnissen angepaßt und einwandfrei eingebaut sein<sup>1</sup>; das Schmiermittel soll in genügender Menge vorhanden sein, aber trotzdem die Kugeln oder Rollen des Lagers sowie den Käfig nicht in ihrer Beweglichkeit behindern. Vom Schmiermittel muß außerdem noch verlangt werden, daß es sich bei den höheren Drehzahlen nicht entmischen kann, da die dabei ausgeschiedenen festen Teile das Lager zerstören würden. Bezüglich der Lagerschmierung, der Wahl der Lager und des Einbaues empfiehlt es sich daher,

<sup>1</sup> Vgl. W.-B. Heft 29 „Einbau und Wartung der Wälzlager“.

mit den Kugellagerfirmen Hand in Hand zu arbeiten und die Einbau- und Schmiervorschriften genauestens zu beachten. Bei Werkzeugmaschinen, deren Werkzeug unmittelbar auf der Motorwelle sitzt, muß das radiale und das axiale Lagerspiel so klein wie möglich gehalten werden. Dies erreicht man durch die Vorspannung der Lager. Hierbei ist darauf zu achten, daß ein Teil der im Läufer entstehenden Wärme durch die Welle und die Lager abgeleitet wird. Die Vorspannung darf also nicht zu hoch sein, da bei der durch die Erwärmung bedingten Änderung der Abmessungen Verspannungen, unzulässige Lagererwärmungen oder Verklemmungen eintreten können. Je häufiger ein Motor angelassen wird oder je öfter seine Drehrichtung geändert werden muß, um so größere Sorgfalt muß der Lagerung derartiger Motoren gewidmet werden. Bei der Schmierung der Lager ist zu bedenken, daß das Schmiermittel, welches den im Lager umlaufenden Teilen im Wege steht, von diesen verdrängt werden muß. Hierbei ist eine Beschleunigungsarbeit zu leisten, die sich quadratisch mit der Drehzahl ändert. Je größer und je fester also die zu beschleunigende Schmiermittelmenge ist, um so mehr Arbeit ist im Anlauf aufzubringen und um so größer wird dadurch auch die Erwärmung. Da es hierdurch möglicherweise zu Überlastung des Motors kommen kann, empfiehlt es sich, die Lager nicht mehr als etwa zu  $\frac{2}{3}$  mit Fett zu füllen.

**17. Kritische Drehzahl.** Jeder Teil eines Motors, der sich dreht, ist Beschleunigungs- und Fliehkräften ausgesetzt. Bezeichnet man die Fliehkraft mit  $P$ , so ergibt sich für jedes Massenteilchen die anteilige Kraft zu:  $P = \frac{G}{g} \cdot r \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2$ , d. h. die Kraft ändert sich im gleichen Maße wie der Abstand  $r$  des Teilchens von der Drehachse und quadratisch mit der Drehzahl  $n$ . Für jedes Teilchen kann man sich die Kraft an der Drehachse angreifend denken. Solange nun jeder Kraft eine gleich große aber in entgegengesetzter Richtung wirkende zugeordnet werden kann, kann sich die Welle nicht durchbiegen und also nicht unruhig laufen. Sind die umlaufenden Kräfte nicht genau ausgeglichen, ungenügend ausgewuchtet, so bewirken diese Kräfte ein Ausbiegen der Welle in Richtung der Unwucht. Wenn diese Wellendurchbiegung zu groß wird, so können Lagerverklemmungen eintreten und schließlich die umlaufenden Teile an den ruhenden Teilen anstreifen. Beide Fehler haben mindestens eine unzulässige Erwärmung zur Folge, häufig jedoch die Zerstörung von Motorteilen. Eine an sich geringfügige Unwucht darf besonders bei schnellaufenden Motoren nicht vernachlässigt werden, wenn Gefahr besteht, daß durch äußere Einflüsse Schwingungserscheinungen der Welle eingeleitet oder verstärkt werden können. Das ist der Fall bei Werkzeugen mit mehreren Schneiden. Jeder Schneideneingriff in das Werkstück hat einen Stoß auf das Wellenende zur Folge und diese Stöße treten vollkommen regelmäßig auf. Bei 12000 U/min und 5 Schneiden sind dies z. B. 1000 Stöße je Sekunde. Liegt nun die Eigenschwingungszahl des umlaufenden Teiles in der gleichen Größenordnung, so besteht die Wahrscheinlichkeit, daß besonders beim Vorhandensein einer Unwucht die entstehenden Schwingungen zu gefährlichen Ausschlägen führen. Es spielt bei den äußeren Einwirkungen nicht nur die Kraft und die Zahl der Stöße, sondern auch der Angriffspunkt der Kraft an der Welle eine Rolle. Es genügt beispielsweise bei Holzfräsen mit in der Höhe verstellbarem Messerkopf, wenn bei einer einzigen Stellung dieses Kopfes die gefährlichen Schwingungen auftreten können, um die Verwendbarkeit der ganzen Maschine in Frage zu stellen. Bei Motoren für einen größeren Drehzahlbereich muß dafür gesorgt werden, daß entweder in allen Fällen eine Störungsmöglichkeit durch Schwingungen ausgeschaltet wird oder aber es muß eine Sicherheitseinrichtung geschaffen werden, die das Zusammentreffen der schädlichen Einflüsse verhindert. Es darf also nicht möglich sein, für eine bestimmte kritische

Drehzahl und ungünstige Werkzeugabmessungen bzw. -gewichte die Maschine zu gebrauchen. Als kritische Drehzahl bezeichnet man dabei die Drehzahlen, bei denen sich besonders leicht Eigenschwingungen des umlaufenden Teiles ausbilden. Bei gewöhnlichen Antrieben bleibt man unter der kritischen Drehzahl. Erst bei den schnellaufenden Antrieben, wie sie bei Feinstbohrwerken, Oberfräsen usw. üblich sind, kann die kritische Drehzahl im Drehzahlbereich liegen. Besteht die Gefahr, daß die kritische Drehzahl in den Drehzahlbereich fällt, so empfiehlt es sich, den Motor senkrecht anzuordnen. Bei waagerechter Anordnung würde das Gewicht der umlaufenden Teile als einseitig wirkende Kraft leicht eine Eigenschwingung hervorrufen. Ferner spielt der magnetische Zug, den der Motorständer auf den Läufer ausübt, besonders bei waagerechter Anordnung der Spindel eine beträchtliche Rolle. Beim Anlaufen des Motors wird sich oft ein Durchlaufen durch die kritische Drehzahl nicht vermeiden lassen. Dieses Durchlaufen ist ungefährlich, wenn sich während dieser Zeit keine nennenswerten Schwingungen ausbilden können, das Durchlaufen also schnell genug erfolgt. Bei guter Motorausführung und sorgsamer Auswuchtung ist eine Störung im Hochlauf nur dann zu erwarten, wenn der Motor im kritischen Drehzahlbereich keinen genügend großen Momentenüberschuß zur Verfügung hat, um sich zu beschleunigen. Dann können die Schwingungen so groß werden, daß die umlaufenden Teile anstreifen. In diesem Falle ist es sehr unwahrscheinlich, daß der Motor in der Lage ist, außer den Hochlaufmomenten auch noch die auftretende zusätzliche Reibungsarbeit aufzubringen und so den kritischen Drehzahlbereich zu überwinden.

**18. Einfluß der Fliehkräfte.** Auf die umlaufenden Teile des Läufers wirken im Betrieb Fliehkräfte ein, welche je nach der mechanischen Festigkeit der einzelnen Teile bei den hohen Drehzahlen so groß werden können, daß das Gefüge zerstört oder zumindestens so verändert wird, daß ein ordnungsmäßiger Betrieb nicht mehr möglich ist. Die Welle kann hierbei aus der Betrachtung ausscheiden. Beim Läuferkörper aber sind verschiedene Einzelheiten von Bedeutung. Der Läufer besteht bisher aus dünnen einzelnen Blechen, welche durch die Kurzschlußringe und die Läuferstäbe zusammengehalten werden. Die Bleche besitzen in der Mitte eine Bohrung zum Einsetzen der Welle und am Rande offene oder geschlossene Nuten. Die Stäbe haben nun unter dem Einfluß der Fliehkräfte das Bestreben, sich von der Drehachse zu entfernen. Sobald diese Kräfte groß genug sind, die erforderliche Durchbiegung oder Längendehnung der Stäbe zu erzwingen oder sie zu zerreißen, tritt die Gefahr ein, daß das ausgebeulte Blech oder Teile der Stäbe am Ständerblechpaket streifen und Zerstörungen bewirken. Verstärkt wird diese Gefahr bei einem Betrieb oberhalb der für den Motor zulässigen Grenzdrehzahlen dadurch, daß die Bleche selbst innerhalb gewisser Grenzen dehnbar sind und, da bei ihnen die Fliehkräfte im Sinne einer Dehnung senkrecht zur Achse wirken, eine Vergrößerung des Durchmessers und damit ein Ablösen von der Welle eintreten kann. Da die beschriebenen Auswirkungen jedoch nicht vollkommen symmetrisch auftreten, werden sich diese Störungen zunächst genau so bemerkbar machen, wie die im vorigen Abschnitt behandelten Unwuchten. Dabei kann dann bei sehr großem Wellendurchmesser und tiefen Läuferfurnen der restliche Blechquerschnitt so klein werden, daß er die Überbeanspruchung nicht aushält und zerreißt. Daher ist es auch nicht angebracht, bei Motoren für höhere Drehzahlen das Läuferpaket durch Keile auf der Welle zu befestigen, denn damit würde der Querschnitt an einigen Stellen besonders gefährdet sein. Außerdem wird die Schwierigkeit der richtigen Auswuchtung und die Gefahr, beim unachtsamen Ziehen der Nut das Blech zu verletzen, bei Keilbefestigung sehr groß. Die Welle soll also eingepreßt werden. Für ganz hohe Drehzahlen über 3000 U/min ist aus den vorgenannten Gründen

angeregt worden, Läufer und Welle einschließlich Lüfter aus einem Stück zu fertigen. Die Lüfter werden meist schon bei Drehzahlen über 9000 U/min aus einem Stück gefertigt, falls die Kurzschlußbringe der Motorläufer nicht bereits als Lüfter ausgebildet sind. Der Grund für diese Maßnahme ist darin zu suchen, daß die Grenzdrehzahlen für gebaute Lüfter niedriger liegen als für gegossene oder aus einem Stück gefertigte, und daß außerdem das Auswuchten zusammengesetzter Lüfter unverhältnismäßig schwieriger ist.

Für schnellaufende Motoren dürfen nur ausgesuchte Lager verwendet werden, deren Kugeln so genau hergestellt sind, daß durch sie keinerlei Störungen zu erwarten sind. Schwieriger ist die Auswahl der richtigen Käfige für hohe Drehzahlen. Gestanzte Käfige haben sich in den meisten Fällen schon bei Drehzahlen über 4500 U/min als den gestellten Forderungen nicht gewachsen erwiesen, so daß also massive Käfige gewählt werden mußten. Dabei haben die nichtmetallischen Käfige den Vorzug, daß sie leichter auszuwuchten sind und daß auch eine restliche Unwucht der kleinen Massen wegen nicht zu unzulässigen Kräfteauswirkungen führen kann.

### C. Andere Lösungen des schnellaufenden Elektromotors.

**19. Gleich- und Drehstrommotoren.** Das dringende Bedürfnis, mit Drehzahlen zu arbeiten, die über der üblichen Lastdrehzahl (2800 U/min) der Asynchronmotoren liegen, hat dazu geführt, die verschiedenartigsten Lösungen auch ohne Frequenzwandler zu finden. In allen Fällen ist ein gewickelter Läufer erforderlich, der dem Käfigläufer unterlegen ist. Abgesehen von der Schwierigkeit des sorgfältigen Auswuchtens, ist die Wicklung stets der Gefahr einer Verlagerung ausgesetzt, die durch die hohen Stromstöße oder durch die großen Verzögerungs- oder Beschleunigungsmomente auftreten kann. Auch die Auswirkungen der Fliehkräfte machen sich bei gewickelten Motoren schneller bemerkbar, so daß die höchstzulässigen Drehzahlen wesentlich niedriger liegen, als bei den starren Käfigläufermotoren. Außer diesen mechanischen Nachteilen haben derartige Motoren auch elektrische Nachteile. Allen diesen Motoren muß läuferseitig über Kollektoren oder Schleifringe Strom zugeführt werden. Eine einwandfreie Stromübertragung von den Bürsten zu den Schleifringen oder Kollektoren ist nur dann möglich, wenn die Umfangsgeschwindigkeit nicht zu hoch wird. Die Umfangsgeschwindigkeit ist auch begrenzt durch die Gefahr einer zu großen Bürstenerwärmung. Die Schleifringe oder Kollektoren mit Bürsten sind zudem außerordentlich empfindlich. Wenn mit der Kühlluft schmirgelnder oder leitender Staub ins Motorinnere eindringen kann, so muß zur Außenbelüftung des Motors übergegangen werden, womit zumindestens größere Motorabmessungen verbunden sind.

Gleichstromnebenschluß- und Drehstromnebenschlußkollektormotoren lassen sich überall da verwenden, wo Regelbarkeit bei Belastungsunabhängigkeit der Drehzahl verlangt wird, die obere Drehzahl nicht zu hoch liegt und die vorgenannten Nachteile vernachlässigt oder eingeschränkt werden können. Die oberste Drehzahlgrenze liegt bei Gleichstromnebenschlußmotoren bei etwa 9000 U/min, bei Drehstromnebenschlußmotoren bei etwa 4500 U/min. Durch Verwendung von Universal- oder Repulsionsmotoren kommt man auf Drehzahlen bis 20000 U/min im Leerlauf. Diese Motoren haben aber auch den großen Nachteil, daß sie ihre Drehzahl mit der Belastung ändern. Durch geeignete Maßnahmen wird zwar vermieden, daß der fast unbelastete Motor im Leerlauf durchgehen kann, doch ist der Drehzahlunterschied zwischen Leerlauf und Vollast sehr erheblich. Dieser Unterschied ist bei den Krafthandwerkzeugen beim Ansetzen des Werkzeuges deutlich an dem veränderten Motorgeräusch wahrnehmbar. Diese Eigenschaft erfordert beim

Arbeiten mit diesen Motoren große Vorsicht, da z. B. beim Ansetzen der Schleifscheibe von Schleifmotoren leicht eine Verbrennung am Werkstück eintreten kann.

**20. Doppelläufermotoren.** Zu den bekanntesten Versuchen, Drehzahlen zwischen 3000 und 6000 U/min ohne Verwendung von Schnellfrequenzstrom zu erzielen, gehören die Doppelmotoren. Wie Abb. 21 u. 22 zeigen, können diese Motoren entweder ineinander gebaut oder hintereinander angeordnet werden. Der Ständer eines solchen Motors ist fest angeordnet. Der sich in diesem Ständer drehende Läufer umschließt den Ständer des zweiten Motors und im Ständer des zweiten Motors läuft der eigentliche Läufer, der ein Käfigläufer ist. Die Drehzahl des Käfigläufers ergibt sich aus der Summe der beiden Teildrehzahlen. Sind beide Motoren zweipolig, so läuft die Endwelle mit 5600 U/min um, ist der eine zwei-, der andere vierpolig, mit

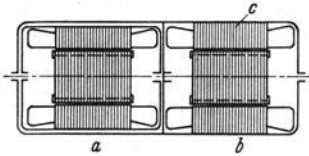


Abb. 21. Doppelläufermotor hintereinander gebaut.

Läufer des Motors *b* dreht sich im festen Ständer *c*. Treibt damit Ständer des Motors *a* an, der Strom über Schleifringe bekommt. Läufer des Motors *a* läuft mit doppelter Drehzahl.

4200 U/min. Bei diesen Motoren muß dem Außenständer Strom zugeführt werden und dem mit dem ersten Läufer zusammengebauten Ständer, der seinen Strom über Schleifringe zugeführt bekommt. Außer dem Nachteil der Schleifringe sind auch die großen Abmessungen derartiger Motoren unangenehm, da die Lagerung schwierig wird. Sieht man nur auf den Preis, so hat diese Behelfslösung eine Berechtigung, solange nur ein oder höchstens zwei Motoren im ganzen Betrieb mit hohen Drehzahlen laufen sollen. Aber schon von drei Motoren an ist der Betrieb schnelllaufender Käfigläufermotoren durch Schnellfrequenzstrom, der durch einen Umformer erzeugt wird, auch preislich vorzuziehen.

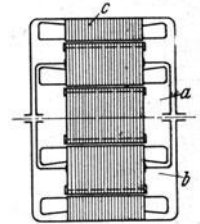


Abb. 22. Doppelläufer ineinander gebaut.

Ständer des Motors *a* ist gleichzeitig Läufer des Motors *b* und dreht sich im festen Gehäuse *c*. Läufer des Motors *a* läuft mit doppelter Drehzahl. Stromzufuhr zur Ständerwicklung des Motors *a* über Schleifringe.

### III. Erzeugung der Schnellfrequenz.

#### A. Umlaufende Wandler.

Schnellfrequenzen zur Speisung schnelllaufender Motoren erzeugt man, falls ein Drehstromnetz vorhanden ist, fast immer durch umlaufende Maschinensätze, die aus einem Induktionsumformer mit zugehörigem Antriebsmotor bestehen. Die Induktionsumformer entsprechen in ihrem grundsätzlichen Aufbau den Drehstrom-Schleifringläufermotoren. Mit Rücksicht auf die besonderen Betriebsbedingungen sind allerdings verstärkte Schleifringe und Bürstensätze erforderlich, ferner eine andere Auslegung der Wicklung. Bei höheren Frequenzen werden dabei Maßnahmen getroffen, um die elektrischen Verluste möglichst niedrig zu halten. Der Antriebsmotor wird mit dem Induktionsumformer meist unmittelbar gekuppelt, doch kann man auch in Sonderfällen ein Getriebe zwischenschalten. Das grundsätzliche Schaltbild einer solchen Umformung zeigt Abb. 23.

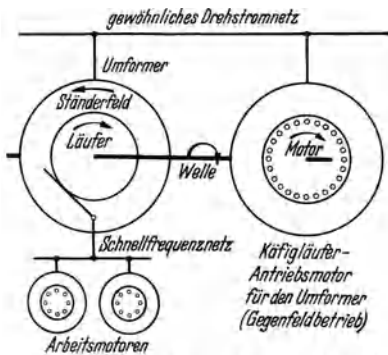


Abb. 23. Grundsätzlicher Aufbau des Schnellfrequenzantriebes.

**21. Erzeugungsarten.** Für die nun folgenden Betrachtungen wird der Einfachheit halber angenommen, daß der Induktionsumformer ständerseitig am Primär-

netz, d. h. am vorhandenen Drehstromnetz, angelegt ist und an den Läuferklemmen der Strom der erhöhten Frequenz  $f_2$  abgenommen werden kann. Für die Primärfrequenz  $f_1$  werden 50 Per/s zugrundegelegt. Diese Frequenz ist in Deutschland genormt und wird sehr genau eingehalten. Die Umlaufgeschwindigkeit des Ständerdrehfeldes ergibt sich bei einer Induktionsumformerpolezahl  $p_g$  zu:  $n_1 = \frac{f_1 \cdot 120}{p_g}$ .

Die Läuferdrehzahl des Induktionsumformers wird mit  $n_g$  bezeichnet und ist bei unmittelbarer Kupplung gleich der Läuferdrehzahl des Antriebmotors.

Ein Drehstrom-Schleifringläufermotor, dessen Läufer feststeht,  $n_g = 0$ , entspricht in seiner Wirkungsweise einem Spannungswandler. Das im Ständer mit der Drehzahl  $n_1$  umlaufende Drehfeld induziert im Läufer ein mit der gleichen Geschwindigkeit und im gleichen Drehsinn umlaufendes Feld. Die Spannungen verhalten sich dabei wie die Windungszahlen in den Windungszahlen im Läufer, während die Frequenz gleich bleibt.

Die an den Läuferklemmen entnommene Leistung  $N_{2g}$  wird transformatorisch vom Ständer auf den Läufer übertragen und ist, abgesehen von den vorläufig nicht berücksichtigten Verlusten, der vom Ständer aus dem Primärnetz entnommenen Leistung  $N_{1g}$  gleich. Abweichend von gewöhnlichen Spannungswandlern schwankt jedoch des größeren Luftspaltes wegen der Spannungsabfall zwischen Vollast und Leerlauf stärker. Diese Schwankung wird noch bei verschiedenen Fällen näher behandelt.

a) Gegenfeldbetrieb. Treibt man den Läufer im Sinne des umlaufenden Ständerdrehfeldes mit der synchronen Drehzahl  $n_g = n_1$  an, so können die Kraftlinien des Ständers die Läuferwicklung nicht schneiden, es wird keine Spannung induziert, keine Leistung transformatorisch übertragen, die Läuferfrequenz und -spannung ist damit Null. Die dem Läufer zugeführte Leistung  $N_m$  muß nur die mechanischen Verluste decken. Kehrt man nun die Drehrichtung des Läufers um (Abb. 24), so bleibt zwar die Drehzahl die gleiche, aber der Drehzahlunterschied zwischen Ständerdrehfeld und Läuferwicklung ist doppelt so groß wie beim Stillstand, da beide in entgegengesetzter Richtung mit der synchronen Drehzahl umlaufen. Diesem doppelt so großen Drehzahlunterschied entspricht auch eine doppelt so große Spannung und Frequenz an den Schleifringklemmen. Unter Vernachlässigung

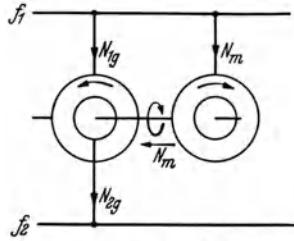


Abb. 24: Gegenfeldbetrieb (Frequenzerhöhung).

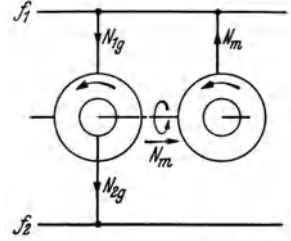


Abb. 25. Mittelfeldbetrieb unsynchron (Frequenzerniedrigung). Überschüssige Leistung an Primärnetz.

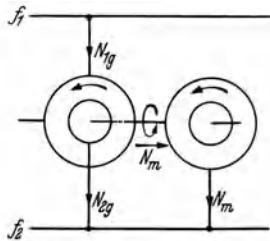


Abb. 26. Mittelfeldbetrieb untersynchron (Frequenzerniedrigung). Überschüssige Leistung an Sekundärnetz.

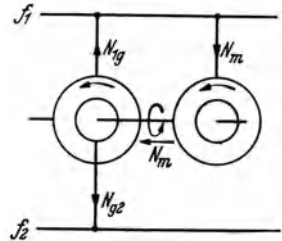


Abb. 27. Mittelfeldbetrieb übersynchron (Frequenzerhöhung).

Abb. 24...27. Verschiedene Arten der Frequenz-Umformung.

$f_1$  gegebene (primäre) Netzfrequenz;  $f_2$  umgeformte Frequenz;  $N_m$  Leistung des Antriebmotors für den Umformersatz;  $N_{1g}$  aus dem Primärnetz entnommene elektrische Leistung;  $N_{2g}$  an den Wandlerklemmen verfügbare sekundäre Leistung.

der Verluste kann auch die verfügbare Sekundärleistung  $N_{2g}$  doppelt so hoch angenommen werden. Diese Leistung wird dem Läufer teils elektrisch — transformatorisch — teils mechanisch zugeführt. Die elektrisch zugeführte Leistung  $N_{1g}$  verhält sich zur mechanisch zugeführten wie die Drehzahlen  $n_1$  zu  $n_g$ . Solange der Läufer entgegen dem Ständerdrehfeld angetrieben wird, muß dies eine Frequenzerhöhung zur Folge haben, da der Geschwindigkeitsunterschied größer als bei Stillstand ist. Bei Stillstand würde die Ständerfrequenz gleich der Läuferfrequenz sein.

b) Mitfeldbetrieb. Geht man von diesem sog. Gegenfeldbetrieb (der Läufer dreht sich entgegen dem umlaufenden Ständerfeld) zum Mitfeldbetrieb über, bei

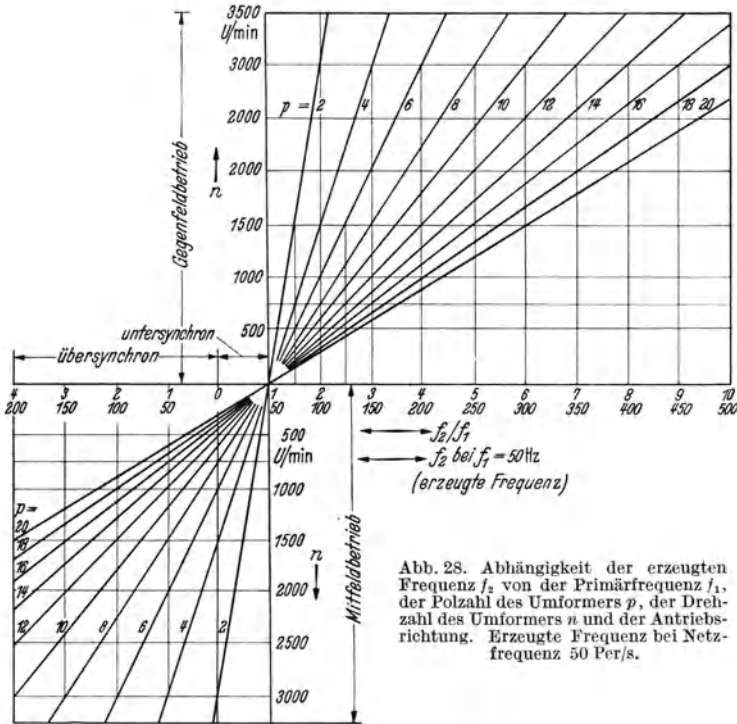


Abb. 28. Abhängigkeit der erzeugten Frequenz  $f_2$  von der Primärfrequenz  $f_1$ , der Polzahl des Umformers  $p$ , der Drehzahl des Umformers  $n$  und der Antriebsrichtung. Erzeugte Frequenz bei Netzfrequenz 50 Per/s.

welchem Ständerdrehfeld und Läuferwicklung im gleichen Dreh Sinn umlaufen, so lassen sich dabei zwei Betriebsarten unterscheiden. Vom Läuferstillstand bis zur synchronen Drehzahl sinkt die Läuferfrequenz mit zunehmender Drehzahl von der Ständerfrequenz  $f_1$  bis 0. Man hat es also bei diesem „untersynchronen“ Mitfeldbetrieb mit Frequenzverminderung zu tun (Abb. 25 u. 26). Steigert man die Drehzahl nun weiter, so wächst die abgenommene Frequenz  $f_2$  von 0 zu einem dem jeweiligen  $p_g$  und  $n_g$  entsprechenden Wert an. Man bezeichnet diesen Betriebszustand, durch welchen man an sich jede Frequenz erzeugen kann, als „übersynchronen“ Mitfeldbetrieb (Abb. 27). Während beim untersynchronen Mitfeldbetrieb die transformatorisch zugeführte Leistung  $N_{1g}$  nur zum Teil als elektrische Leistung der gewünschten Frequenz an den Schleifringen zur Verfügung steht, wird der restliche Teil als mechanische Leistung an der Welle abgegeben. Es ergibt sich dabei die Möglichkeit, diese mechanische Leistung durch Umformung in elektrische Leistung wieder zu gewinnen und dem Primär- oder Sekundärnetz wieder zuzuführen. Die Schaltung hierfür zeigen Abb. 25 u. 26. Die Leistung  $N_{1g}$  verhält



sich beim untersynchronen Mitfeldbetrieb zur Leistung  $N_m$  wie  $n_1$  zu  $n_g$ , während sich  $N_{1g}$  zu  $N_{2g}$  wie  $n_1$  zu  $n_1 - n_g$  verhält. Beim Mitfeldbetrieb wird demnach bei der synchronen Drehzahl die elektrisch zugeführte Leistung zunächst in mechanische und dann wieder in elektrische Leistung umgewandelt. Die elektrische Leistung, welche bei übersynchronen Drehzahlen an den Schleifringen abgenommen werden kann, ist aber nur durch Zuführen einer entsprechend hohen mechanischen Leistung zu gewinnen, wobei auch eine der Leistung  $N_{1g}$  entsprechende mechanische Leistung zusätzlich aufgebracht werden muß. In Abb. 28 ist die Abhängigkeit der für die Frequenz  $f_2$  wichtigen Werte eingetragen.

e) Gleichungen. Im allgemeinen kann man annehmen, daß bei Berechnungen eines Umformers die verlangte Sekundärleistung  $N_{2g}$  sowie die Netzfrequenz  $f_1$  und die verlangte Schnelfrequenz  $f_2$  festliegen. Es ist dann für die Wahl des Antriebsmotors die Kenntnis der erforderlichen Leistung  $N_m$ , für die Wahl der Ständer-schaltung des Induktionsumformers die Größe  $N_{1g}$  wichtig. Die Gleichungen für die einzelnen Betriebsarten lauten beim Antrieb mittels Riemens usw.:

$$\begin{aligned} \text{bei Gegenfeldbetrieb: } N_{1g} &= N_{2g} \frac{f_1}{f_2} = N_{2g} - N_m & N_m &= N_{2g} \frac{f_2 - f_1}{f_2} \\ \text{bei untersynchronem Mitfeldbetrieb: } N_{1g} &= N_{2g} \frac{f_1}{f_2} = N_{2g} + N_m & N_m &= N_{2g} \frac{f_1 - f_2}{f_2} \\ \text{bei übersynchronem Mitfeldbetrieb: } N_{1g} &= N_{2g} \frac{f_1}{f_2} = N_m - N_{2g} & N_m &= N_{2g} \frac{f_2 + f_1}{f_2} \end{aligned}$$

In Abb. 29 ist der Leistungsfluß eingetragen. Durch diese Darstellung werden die in den Abb. 24...26 gezeigten Leistungsverhältnisse sinnfälliger. Es zeigt sich, daß beim Gegenfeld- und beim übersynchronen Mitfeldbetrieb die Hintermaschine als Motor und beim untersynchronen Mitfeldbetrieb als Generator arbeitet. Der Induktionsumformer gibt beim Gegenfeldbetrieb die ständerseitig elektrisch und läuferseitig mechanisch aufgenommene Energie läuferseitig wieder als reine elektrische Energie ab. Beim untersynchronen Mitfeldbetrieb nimmt er überhaupt nur ständerseitig elektrische Energie auf und gibt diese läuferseitig teils als elektrische, teils als mechanische Energie wieder ab, während beim übersynchronen Mitfeldbetrieb nur läuferseitig mechanische Energie aufgenommen wird und diese dann ständerseitig ans Netz und läuferseitig als Schnelfrequenz als elektrische Energie wieder abgegeben wird.

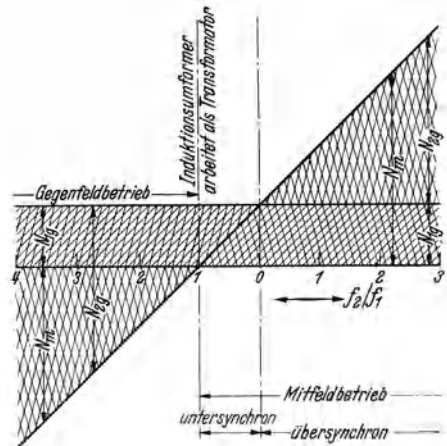


Abb. 29. Leistungsübersicht für die Umformungsarten Abb. 24...27.

Bei der Wahl des Antriebsmotors spielt nicht nur der errechnete Wert  $N_m$  und der Wirkungsgrad des Induktionsumformers eine Rolle, sondern auch der Drehzahlabfall, den man dem Motor zubilligen will oder kann. Hat der Antriebsmotor Schlupf, so bedingt das eine Herabsetzung der Sekundärfrequenz und damit der Drehzahl des Arbeitsmotors. Da der Arbeitsmotor selbst auch noch Schlupf hat, verringert sich die Drehzahl nochmals. Die Größe des Schlupfes ist jeweils von der Größe der Belastung abhängig und schwankt demnach zwischen Vollast und Leer-

lauf um mehrere Hundertteile. Bei der Aufstellung der Richtwerte für die Lastdrehzahlen von Werkzeugmaschinen ist dieser Drehzahlabfall berücksichtigt worden. Im Abschnitt „Normung“ auf den S. 58... 63 ist bei der Aufstellung der Richtwerte für Schnellfrequenzantriebe der doppelte Drehzahlabfall im Umformer und im Arbeitsmotor mit eingerechnet. Kommt es auf genaue Einhaltung der Schnellfrequenz an, so müßten Synchronmotoren für den Antrieb des Umformersatzes benutzt werden. Ist der Antriebsmotor mit dem Induktionsumformer nicht unmittelbar gekuppelt, so kommen zu den Schlupfverlusten selbstverständlich die Verluste der Zwischenglieder, wie Getriebe usw., mit hinzu. Diese müssen dann bei der Berechnung der erforderlichen Antriebsleistung eingesetzt werden.

**22. Bemessung des Wandlers.** Während man die vom Induktionsumformer aufgenommene oder abgegebene Leistung in PS oder kW angibt, empfiehlt es sich für die Schaltgeräte, die elektrischen Leistungen in kVA anzugeben, da diese Angabe die nachträgliche Berechnung der für die Schaltgeräte wichtigen Stromstärken erleichtert. Die Arbeitsmotoren nehmen ebenso wie der Induktionsumformer nicht nur Wirkstrom, sondern auch den zur Magnetisierung erforderlichen Blindstrom auf. Die Größe des vom Induktionsumformer an die Arbeitsmotoren abzugebenden Blindstromes hängt von der Ausführung und der Ausnutzung der Motoren ab. Ist ein Motor zu groß bemessen, so läuft er nur mit Teillast und nimmt damit einen unverhältnismäßig hohen Blindstrom auf. Da ein Induktionsumformer gegebener Größe nur mit einem bestimmten Strom belastet werden kann, steht einer Erhöhung des Blindstromes eine entsprechende Verringerung des Wirkstromes gegenüber. Der Blindstrom muß also, um die Umformeranlage ausnutzen zu können, möglichst klein gehalten sein. Läßt sich der Blindstrom nicht durch sorgfältige Auslegung der Motoren und Umformer niedrig halten, so kann er noch durch Verwendung von Kondensatoren in kleinen Grenzen ausgeglichen werden.

In der Einführung dieses Abschnittes ist darauf hingewiesen worden, daß der Spannungsabfall im Frequenzwandler zwischen Leerlauf und Vollast von großer Bedeutung sein kann. Jeder Arbeitsmotor ist für eine bestimmte Spannung ausgelegt, wobei eine Abweichung nach oben oder unten die bereits geschilderten Folgen hat. Je besser ein Motor mit Rücksicht auf geringes Gewicht oder kleine Abmessungen ausgenutzt ist, um so empfindlicher wird er gegen Spannungserhöhungen: je mehr er bei höheren Frequenzen zur Vermeidung unzulässiger Erwärmung geschwächt ist, um so gefährlicher werden hinsichtlich des Momentenverlaufes die Spannungsabfälle (vgl. Abschn. 12), und je kleiner ein Motor ist, um so mehr werden die angegebenen Auswirkungen der Spannungsänderung für diesen einen Motor ins Gewicht fallen. Ist nur ein Motor an einen Umformer angeschlossen, so lassen sich beide Maschinen aufeinander abstimmen. Werden aber viele Motoren an einen Wandler angeschlossen, so ist die Belastung desselben und damit die Klemmenspannung sehr unterschiedlich, wenn die Zahl der gleichzeitig laufenden Motoren oder deren Belastung stark schwankt. Durch die Arbeitsbedingungen sind für die Arbeitsmotoren bestimmte Eigenheiten vorgeschrieben, welche sich einer willkürlichen Umformerauslegung selten anpassen lassen. Je empfindlicher daher die einzelnen Motoren sind, um so unerläßlicher wird eine genaue Planung. Zunächst ist die Zahl der Motoren, ihr Leistungsbedarf, die Anlauf- und Betriebsverhältnisse — Belastungswechsel, Schalthäufigkeit, Drehrichtungswechsel —, die Zahl der gleichzeitig angeschlossenen Motoren und das dabei zu erwartende Belastungsspiel, die für den empfindlichsten Motor höchst und niedrigst zulässige Spannung, sowie der beim Einschalten des Motors mit dem höchsten Einschaltstrom zu erwartende Stromstoß anzugeben. Einen Anhalt für die Zahl der gleichzeitig laufenden Motoren gibt vielfach in kleineren Betrieben die Zahl der für die

Bedienung der mit Schnellfrequenz angetriebenen Maschinen vorhandenen Arbeitskräfte, während beispielsweise bei Fließarbeit die Kenntnis der jeweils zusammengehörigen Maschinengruppen und der dabei auftretenden Belastungen Anhalte für die Auslegung des Umformers geben kann.

Während kurzzeitige, nur selten auftretende Spannungserhöhungen meist unbedenklich in Kauf genommen werden können, liegen die Verhältnisse bei Spannungssenkungen, sogar bei kurzzeitigen, wesentlich ungünstiger. Eine gelegentliche stärkere Erwärmung, bedingt durch die Spannungserhöhung, gleicht sich im Laufe der Zeit wieder aus. Bringt dagegen ein Motor wegen der Spannungserniedrigung das erforderliche Moment nicht mehr auf und genügt die in den umlaufenden Teilen steckende kinetische Energie nicht, um einen Ausgleich zu schaffen, so kommt es oft zu Störungen. In diesem Zusammenhang muß auf die Auswirkung des Einschaltstromstoßes der Motoren auf den Induktionsumformer hingewiesen werden. Dieser Stromstoß übt einen merklichen Einfluß auf die Spannung aus, sobald sein Anteil am Umformernennstrom größer wird als der Hundertsatz, der als Spannungsschwankung bei der Auslegung zugelassen worden ist. In solchen Fällen muß durch Verwendung von Stern-Dreieckschaltern oder Sonderläufern ein Ausgleich geschaffen werden. Dabei sinkt nach dem im Abschn. 10 Gesagten das Anzugsmoment des Motors. Kann diese Senkung nicht gestattet werden und soll keine Vergrößerung des Umformers eintreten, so muß die Reihenfolge festgelegt werden, in der die Motoren eingeschaltet werden müssen. Die größten Motoren müssen zuerst eingeschaltet werden. Besonders ungünstig liegen die Verhältnisse, wenn nur ein einziger Motor an einen Umformer angeschlossen ist. Hier stehen zunächst die vorher erwähnten Hilfsmittel zur Verfügung. Außerdem kann bei geringen Ansprüchen an das Hochlaufmoment der Motor mit dem Induktionsumformer gleichzeitig eingeschaltet werden. Es reicht in diesem Falle ein Umformer aus, der größenordnungsmäßig für den ununterbrochenen Betrieb ausgelegt ist und den Einschaltstromstoß also nicht berücksichtigt. Weiterhin besteht bei diesem Anlaufverfahren der Vorteil, daß zum Motor nur drei Zuleitungen führen, was in Sonderfällen für die Verwendbarkeit eines Motors ausschlaggebend sein kann.

**23. Mehrere Schnellfrequenzen.** Vielfach setzt die Erfüllung aller Betriebsanforderungen das Vorhandensein mehrerer Frequenzen voraus. Je nachdem, ob diese Frequenzen gleichzeitig zur Verfügung stehen müssen oder nicht, ob eine stufenweise oder stufenlose Frequenzänderung verlangt wird, ob die verlangten Frequenzen und ihre zugehörigen Spannungen in Einklang zu bringen sind, wird man versuchen, mit einem Induktionsumformer auszukommen, oder aber zu Mehrmaschinensätzen oder zu Kaskaden greifen. Man wird einen gewöhnlichen, einen polumschaltbaren, einen stufenlos oder in Stufen regelbaren Motor verwenden. Eine betriebsmäßige Änderung der Umformerantriebsdrehzahl kommt nur dann in Frage, wenn nur ein schnellaufender Motor gespeist wird oder alle an den Umformer angeschlossenen Motoren gleichzeitig ihre Drehzahl ändern sollen. Ein Mehrmaschinensatz ist dann nötig, wenn mehrere Schnellfrequenzen unabhängig voneinander verlangt werden und die einzelnen Induktionsumformer mit der gleichen Drehzahl  $n_m$  angetrieben werden können. Von einer Kaskade macht man dann Gebrauch, wenn entweder nur immer eine Frequenz verfügbar sein soll und eine Änderung der Antriebszahl nicht den verlangten Frequenzwechsel ermöglicht, oder aber wenn eine Frequenz verlangt wird, deren Erzielung in einer Stufe Schwierigkeit macht oder eine unwirtschaftliche Ausführung bedingt. Soll beispielsweise 400 periodiger Drehstrom erzeugt werden, so ist ein 16 poliger Induktionsumformer bei einer Antriebsdrehzahl von 2800 U/min erforderlich. Rechnet man je Pol und Phase nur einen Leiter bzw. eine Nut, so muß diese Maschine mit min-

destens 48 Nuten im Läufer und Ständer ausgeführt sein. Aus elektrischen Gründen ist jedoch ein Vielfaches dieses Wertes erforderlich, so daß im Hinblick auf die durch die Nutenzahl bedingten großen Läuferabmessungen der Vorteil einer Verwendung zweier einfacher 8poliger Induktionsumformer in Kaskadenschaltung verständlich wird. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung besteht darin, daß die meisten Teile der zu verwendenden Maschine dem Reihenbau entnommen werden können.

Bei der Frequenzregelung durch Änderung der Umformerantriebsdrehzahl muß beachtet werden, daß dem Drehzahlverhältnis von 1 : 2 nicht ein gleich großes Frequenzverhältnis entspricht. Für Entwurfsarbeiten sei daher die Gleichung für den Fall des Gegenfeldbetriebes angegeben:

$$\frac{f_{2x}}{f_{2y}} = \frac{f_1 + \frac{120}{p_g} + n_x}{f_1 + \frac{120}{p_g} + n_y}$$

Weiterhin ist zu beachten, daß sich die Spannung im gleichen Verhältnis wie die Frequenz ändert, daß ihre Wahl daher mit Rücksicht auf die angeschlossenen Motoren ausschlaggebend für den zu erzielenden Regelbereich sein kann.

**24. Schnellfrequenz ohne Primärdrehstrom.** Ist in einem Betrieb kein Drehstrom vorhanden, und soll trotzdem Schnellfrequenzstrom erzeugt werden, so ist man gezwungen, Synchrongeneratoren (Abb. 30) aufzustellen. Der für die Erregung erforderliche Gleichstrom wird entweder in besonderen Erregermaschinen erzeugt oder er kann, falls ein Gleichstromnetz geeigneter Spannung zur Verfügung steht, diesem entnommen werden. Der große Nachteil der Synchrongeneratoren besteht darin, daß die gesamte Sekundärleistung  $N_{2g}$  mechanisch zugeführt werden muß und daß ferner bei der synchronen Drehzahl erst 50periodiger Strom zur Verfügung steht. Es muß besonders bei höheren Schnellfrequenzen die Drehzahl und

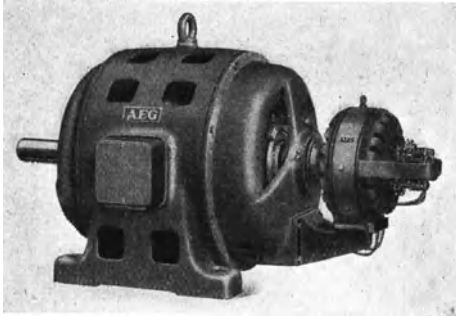


Abb. 30. Synchrongenerator zur Schnellfrequenz-  
erzeugung ohne Primärdrehstrom (AEG.).

damit die Läuferumfangsgeschwindigkeit gegenüber den Induktionsumformern (Asynchronmotoren) bedeutend höher sein. Da außerdem die Synchronmaschinen wesentlich teurer sind als die Asynchronmaschinen, kann es bei höherer Schnellfrequenz und größeren Leistungen billiger sein, wenn der Synchrongenerator nur so groß bemessen wird, daß er zur Speisung des eigentlichen Asynchronumformers dienen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Synchrongenerator gleichzeitig den gesamten Blindstrom decken muß, der sich durch die

Wahl geeigneter Arbeitsmotoren und durch Verwendung der Kondensatoren einschränken läßt. Als Vorteil der Synchronmotoren muß dagegen genannt werden, daß sie eine Änderung der Sekundärspannung, in geringem Ausmaß allerdings, zulassen.

## B. Ruhende Wandler.

Für Werkzeugmaschinenantriebe werden vorläufig ruhende Wandler, welche Drehstrom erhöhter Frequenz erzeugen, noch nicht verwendet, doch muß wegen ihrer vielfachen Vorteile damit gerechnet werden, daß sie in Sonderfällen noch Bedeutung gewinnen. Ihre Verwendung setzt zunächst das Vorhandensein irgend-

eines Stromes voraus. Weiterhin muß die Möglichkeit bestehen, den Gitterkreis dieser sog. „Stromrichter“ durch entsprechend ausgebildete Steuergeräte zu beeinflussen. Wird mittels eines Stromrichters Gleichstrom in Drehstrom umgewandelt, so spricht man von einem „Wechselrichter“, während zur Umformung von Drehstrom bzw. Wechselstrom einer bestimmten Frequenz in Dreh- oder Wechselstrom einer anderen Frequenz „Umrichter“ benutzt werden (Abb. 31). Bei den Umrichtern kann der gelieferte Drehstrom entweder durch Gleichrichter zunächst in Gleichstrom und dieser dann durch Wechselrichter in den gewünschten Drehstrom umgeformt werden, wobei man Spannung und Frequenz wählen kann, oder aber es wird Drehstrom durch eine entsprechende Aussteuerung der Stromrichtergefäße unmittelbar in andersperiodigen Drehstrom umgewandelt. Die für die Steuerung erforderlichen Geräte sind klein und einfach zu bedienen. Die Stromrichtergefäße bedürfen, da sie ruhende Wandler sind, keiner besonderen Wartung und besitzen außerdem einen hohen Wirkungsgrad. Ein weiterer großer Vorteil ist, daß nicht nur die Frequenz, sondern auch die Spannung beeinflußt werden kann. Aus Preisgründen haben jedoch Stromrichtergefäße in Umrichterschaltung bis jetzt nur für große Leistungen beim Bahnbetrieb und für Hochfrequenzöfen Anwendung gefunden. Da bei Bahnbetrieb eine sehr niedrige Frequenz ( $16\frac{2}{3}$  Per/s) und bei Hochfrequenzöfen eine Frequenz von mehreren 1000 Per/s benutzt wird, fehlen die Erfahrungen mit Stromrichtergefäßen für die Schnellfrequenzen. In den angegebenen Fällen haben sich diese Umrichter in jeder Weise bewährt.

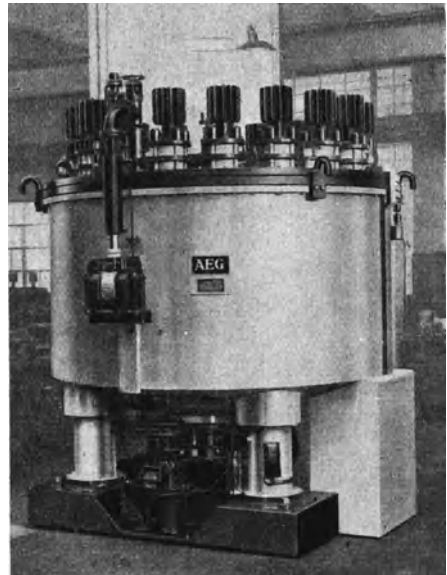


Abb. 31. Umrichter. Ruhender, röhrengesteuerter Frequenzwandler (AEG).

### C. Verteilung.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß es für die Wahl des Induktionsumformers ausschlaggebend ist, ob er nur einen Motor oder mehrere speisen soll. Als zu Anfang der Entwicklung die Vorteile der schnellaufenden Motoren noch nicht genügend bekannt waren und noch keine einheitliche Planung für Betriebswerkstätten sich durchgesetzt hatte, erhielt bei einer Neuanschaffung gewöhnlich jeder schnellaufende Motor seinen eigenen Umformer oder es wurden bestenfalls die Motoren einer größeren Werkzeugmaschine an einen besonderen Umformer angeschlossen. Als dann einzelne Werke, insbesondere der holzbearbeitenden Industrie und im Leichtmetallbau dazu übergingen, den ganzen Betrieb auf schnellaufenden Einzelantrieb umzustellen, wurde nicht nur die Aufstellung eines gemeinsamen Umformers erforderlich, sondern es tauchte auch oft die Frage einer Frequenz- und Spannungsnormung auf. Bei der Verteilung der Frequenz vom Umformer zur Maschine können die drei Fälle auftreten: Einzelversorgung, Maschinenetz und Werkstattnetz.

**25. Einzelversorgung** ist überall da notwendig, wo nur ein einziger Motor mit höherer Drehzahl laufen soll oder aber für einen Motor eine bestimmte Drehzahl

gefordert wird, die mit den Drehzahlen der anderen schnelllaufenden Motoren nicht in Einklang gebracht werden kann. Einzelversorgung ist auch nötig, wenn eine Drehzahlregelung während des Betriebes für diesen einen Motor verlangt wird.

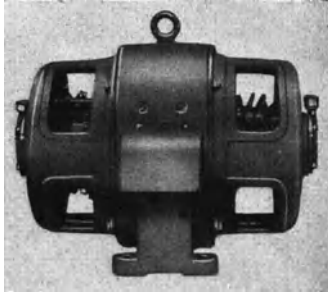


Abb. 32. Einachsumformer (AEG.).

Bei der Einzelversorgung versucht man, den Frequenzwandler mit der Werkzeugmaschine zusammenzubauen. Dabei läßt sich beste Raumnutzung mit kürzester Leitungsführung gut verbinden. Soweit es durchführbar ist, wird der Umformer in den Maschinenfuß oder Maschinenständer eingebaut. Bei kleineren Umformern besteht die Möglichkeit, in Fällen, bei denen es auf große Platzersparnis ankommt, einen Einachsumformer (Abb. 32) einzubauen. Eine andere Ausführung mit Zweimaschinensatz zeigt Abb. 33. Während es keine Verwunderung erregt, wenn eine Werkzeugmaschine zur Speisung eines Motors mit einem aus mehreren Motoren bestehenden

Leonardantrieb ausgerüstet und dann die hohe Drehzahl mittels Riemenübersetzung erzielt wird, hat man bisher Bedenken, zum Elektro-Einzelantrieb in Verbindung mit einem regelbaren Frequenzwandler (Abb. 34) überzugehen. Durch die gegenseitige Abhängigkeit von Spannung und Frequenz ist zwar der Leonardbetrieb dem Umformerbetrieb hinsichtlich des Regelbereichs überlegen, doch läßt sich dagegen durch Auswechseln der Arbeitsmotoren leicht ein Ausgleich schaffen. Diese Lösung findet schon heute Anwendung in Fällen, in denen eine stufenweise Drehzahlregelung genügt.

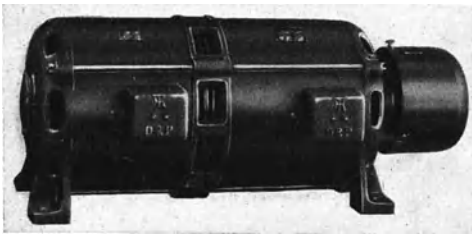


Abb. 33. Zweimaschinensatz-Umformer (geschlossene Bauform) (Himmelwerke).

**26. Maschinennetz.** Die Voraussetzung für ein Maschinennetz sind mehrere schnelllaufende Motoren in einer Werkzeugmaschine, wobei entweder alle derartigen

Motoren mit der gleichen Drehzahl laufen sollen oder aber durch Verwendung verschiedener Polzahl das Vorhandensein einer Frequenz ausreicht, um die geforderten Drehzahlen zu erzielen. Auch bei Maschinennetzen ist eine Frequenzregelung durchführbar, wenn die Drehzahlen aller versorgten Motoren gleichzeitig und im gleichen Ausmaß geändert werden können

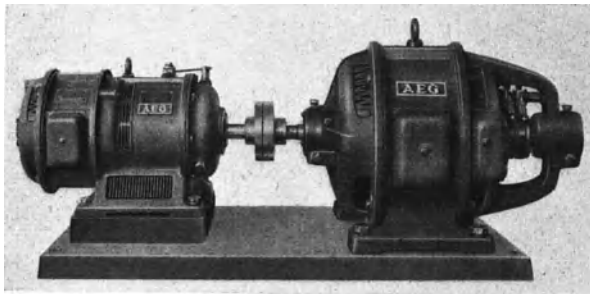


Abb. 34. Regelbarer Umformersatz. Umformerdrehzahl wird geändert, damit verschiedene Frequenzen (AEG.).

oder aber durch Verwendung polumschaltbarer Motoren die durch Frequenzerhöhung bedingte Drehzahlerhöhung bei einzelnen Motoren wieder ausgeglichen werden kann.

Für Maschinennetze muß mit einem größeren Leistungsbedarf gerechnet werden. Einachsumformer sind daher besonders mit Rücksicht auf die Lagerung und

Wartung nicht mehr angebracht. Hier wird der Zweimaschinensatz verwendet, den man zur Erzielung einer günstigen Leitungsführung möglichst nahe an die Maschine heransetzt, sofern eine Unterbringung im Maschinenfuß nicht mehr durchführbar ist.

**27. Werkstattnetz.** a) Planung. Während die Begriffe „Einzelversorgung“ und „Maschinennetz“ eindeutig sind, ist die Bezeichnung „Werkstattnetz“ als Sammelbegriff zu betrachten. Werkstattnetz besagt, daß in einem Betrieb ein Umformer nicht nur einen Arbeitsmotor oder eine Maschine mit Strom höherer Frequenz speist, sondern für mehrere voneinander unabhängige Maschinen bestimmt ist, wobei es unwesentlich ist, ob diese in einem oder in verschiedenen zu einem Betrieb gehörigen Räumen stehen. Je mehr Motoren an einen Umformer

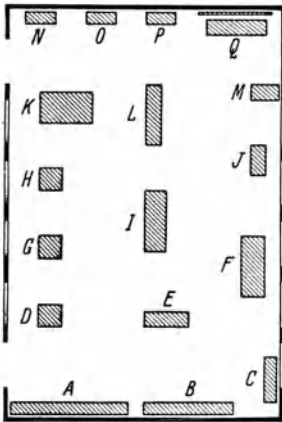


Abb. 35. Maschinenaufstellung.

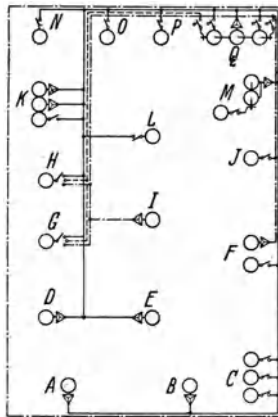


Abb. 36. Antrieb der Maschinen durch Netze von 50 Per/s, 75 Per/s und 100 Per/s. Außerdem 300-Hz-Umformer für Oberfräse gesondert.

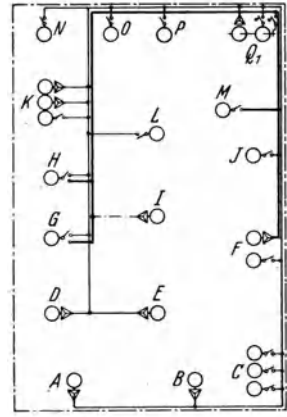


Abb. 37. Nur noch zwei Netze mit 50 Per/s und 300 Per/s.

Abb. 35...37. Lageplan und Schaltpläne einer mittleren Holzbearbeitungswerkstatt.

- |                         |  |                               |
|-------------------------|--|-------------------------------|
| A Pendelsäge;           | I Abrichte- u. Fügmaschine;                          | O Band- und Kreissägensleif-  |
| B Kappsäge;             | J Langlochbohrmaschine;                              | maschine;                     |
| C Astlochbohrmaschine;  | K Zweizylinderschleifmaschine;                       | P Werkzeugschleifmaschine;    |
| D Tischkreissäge;       | L Bandschleifmaschine;                               | Q Periodenunformer (Dreima-   |
| E Bandsäge;             | M Oberfräse, in Abb. 36, mit eingebautem             | schinensatz) mit Hauptschalt- |
| F Dichtenobelmaschine;  | Einachsumformer für 300 Perioden;                    | tafel.                        |
| G u. H Tischfräse;      | N Hobelmesserschleifmaschine;                        |                               |
| ▽ Sterndreieckschalter; | ⚡ Hebelschalter, — Netz mit 50 Per/s; - - - Netz mit |                               |
|                         | 100 Per/s und — — — Netz mit 300 Per/s.              |                               |

angeschlossen werden, um so wirtschaftlicher wird der Betrieb. Aus diesem Grunde soll bei einer Planung nicht zunächst gefragt werden, wieviel Frequenzen erforderlich und wieviel Motoren mit den einzelnen Schnellfrequenzen zu speisen sind, sondern welche Frequenz unter Ausnutzung der verschiedenen Motorpolzahlen alle Forderungen erfüllen kann. Es muß nötigenfalls versucht werden, die Schnittgeschwindigkeit der Werkzeuge den durch diese Frequenz erreichbaren Drehzahlwerten anzupassen. In Abb. 35 und 36 ist der Lage- und Schaltplan einer mittleren Holzbearbeitungswerkstatt gezeigt, wie sie den heutigen Verhältnissen entspricht. Abb. 37 gibt an, wie in Zukunft geplant werden könnte. In Abb. 36 ist für die Oberfräse ein eigener 300periodiger Umformer, für die Hobelmaschinen und Fräsen ein 75...100periodiges Werkstattnetz vorgesehen, für die übrigen Holzbearbeitungsmaschinen und die Vorschubantriebe ein 50periodiges Netz. Die mit Schnellfrequenz gespeisten Motoren sind in der beschriebenen Werkstatt alle 2polig ausgeführt. In der verbesserten Anlage (Abb. 37) ist nur ein 300periodiges Netz

neben dem normalen 50 periodigen Netz vorgesehen. Jetzt ist nur der Oberfräsenmotor 2polig, während der Motor für die Abrichthobelmaschine 6- oder 8polig und für die Dickenhobelmaschine 6polig ausgeführt sind. Für die Fräsen können Arbeitsmotoren mit getrennten Wicklungen geliefert werden, die wahlweise entweder an die Schnellfrequenz oder an das normale Netz angeschlossen werden. Ein

wahlweiser Anschluß derselben Wicklung an beide Netze ist infolge des großen Frequenzunterschiedes von 50 auf 300 Per/s nicht möglich.

b) Umformerausnutzung. Der Vorteil der Werkstattnetze beruht hauptsächlich in der besseren Ausnützbarkeit des Umformers. Nur selten sind alle hochdrehzahligen Motoren gleichzeitig eingeschaltet und gleichzeitig vollbelastet. Man kann vielmehr mit einer mittleren Belastung rechnen, die sich je nach den Betriebsbedingungen ändert und häufig bei ungefähr 60 % des Gesamtanschlußwertes

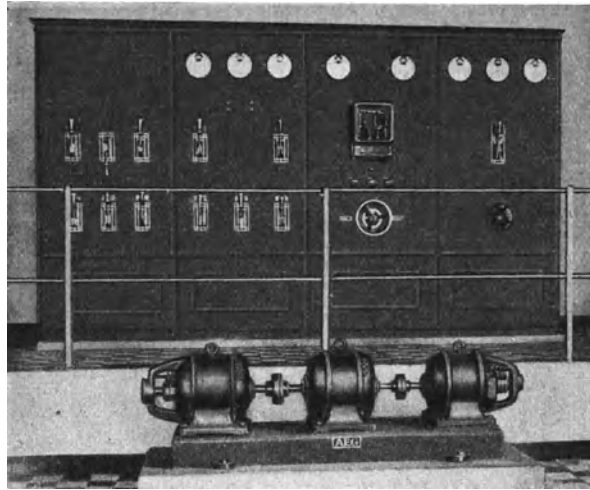


Abb. 38. Dreimaschinensatz zur Erzeugung der beiden Schnellfrequenzen für die Schaltung nach Abb. 36 mit dazugehöriger Schalttafel.

der Motoren liegen wird. Wird dieser Wert überschritten, so werden die Umformmaschinen zwar stärker warm, aber wenn diese Überlastung vorübergehend ist, gleicht sich diese stärkere Erwärmung wieder aus. Die Überlastung an sich ist unbedenklich, wenn die damit verbundenen Spannungsschwankungen keine zu

hohen Werte annehmen können. Der Wirkungsgrad der Umformer wächst mit der Größe, und schließlich spielen bei großen Umformern die Einschaltstromstöße der einzelnen Arbeitsmotoren kaum eine Rolle, so daß besondere Maßnahmen zur Herabsetzung dieser Stromstöße gespart werden können. In Betrieben

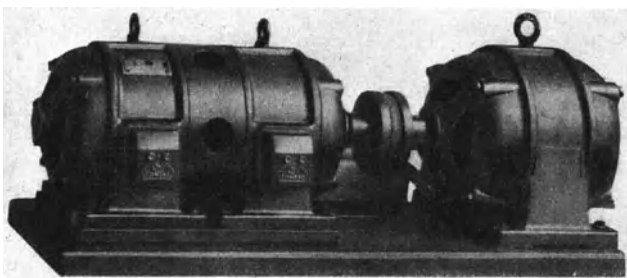


Abb. 39. Dreimaschinensatz mit einseitigem Antrieb zur Erzeugung von zwei Frequenzen oder einer sehr hohen Frequenz durch Doppelumformung (Siemens).

mit einem Werkstattnetz ist die Maschinenaufstellung so ungebunden und freizügig, wie es bei elektrischer Einzelversorgung immer der Fall ist.

Bei Werkstattnetzen werden die Umformer vielfach in besonderen Räumen untergebracht (Abb. 38), in denen gleichzeitig, soweit erforderlich, auch die Schalttafeln aufgestellt werden. Ist ein Abschalten während der Leerlaufzeit mit Rücksicht auf die Eigenart des Arbeitsverfahrens nicht möglich, laufen die Arbeitsmotoren also schwach- oder unbelastet, so ist mit einer hohen Belastung des



Induktionsumformers durch Blindstrom zu rechnen. In derartigen Fällen empfiehlt sich zur Verbesserung des Leistungsfaktors  $\cos \varphi$  der Einbau von Kondensatoren. Der Einbau von Kondensatoren kann im übrigen dazu benutzt werden, eine Anlage ohne Vergrößerung des Umformers zu erweitern. Sie entlasten nämlich den Induktionsumformer vom Blindstrom und ermöglichen somit eine höhere Wirkstromabgabe.

e) Parallelbetrieb. Im Gegensatz zur Einzelversorgung und zum Maschinenetz wird in Werkstattnetzen weder die Frequenz noch die Spannung geändert, da hier nicht damit gerechnet werden kann, daß eine gleichzeitige Änderung der Drehzahlen aller Motoren möglich sein wird. Kommen in Betrieben große Belastungsschwankungen vor, wobei aber die einzelnen Belastungswerte über lange Zeit gleich bleiben, so muß man sich durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung darüber klar werden, ob eine Unterteilung des Umformers in zwei kleinere Umformer zweckmäßig ist. Vor Beschaffung der Umformer muß festgelegt werden, ob beide Umformer auf ein gemeinsames Netz arbeiten sollen. Ist dies der Fall, so müssen nicht nur die Induktionsumformer, sondern auch deren Antriebsmotore so aufeinander abgestimmt sein, daß bei Belastungsschwankungen keine Störungen oder unerwünschte Lastverteilungen auftreten können. Beim Parallelbetrieb sind zwei Formen zu unterscheiden: das Zusammenschalten und das Zusammenarbeiten der Maschinensätze. Selbst wenn die Kennlinien aller Einzelmaschinen aufeinander abgestimmt sind und die Induktionsumformer für gleiche Spannung und gleiche Frequenz ausgelegt sind, muß im Augenblick des Zusammenschaltens beachtet werden, daß sehr häufig die eine Maschine voll, die andere unbelastet und damit ihre Drehzahlen und hierdurch wieder Spannung und Frequenz entsprechend dem Motorschlupf verschieden sind. Dieser Unterschied spielt dann keine Rolle, wenn die Phasenlage der Maschinen gleich ist. Durch ungünstige Lage der Phasen zueinander kann aber kurzzeitig primär der doppelte, sekundär der einfache Kurzschlußstrom eines Generators auftreten, während etwa 0,1 bis 2 Sekunden kann dabei die Spannung zusammenbrechen, doch ist dies nur selten von Bedeutung. In diesem Falle schaltet man zwischen die Sekundärklemmen der Zusatzmaschine und das vorhandene Netz im Augenblick des Schaltens Dämpfungswiderstände ein. Die asynchronen Induktionsumformer besitzen im Gegensatz zu den Synchrongeneratoren keine ausreichende Dämpfung, welche Pendelungen entgegenarbeiten könnte. Das vorhandene synchronisierende Moment genügt nicht, so daß sie bei Pendelungen labil sind. Es ist daher bei Zusammenschaltung von Wandlern wichtig, die Antriebsmaschinen vorher schon so zu wählen, daß sie die gleiche Wirkung wie die Dämpfungswicklung der Synchrongeneratoren ausüben können. Sind die zu erwartenden Betriebsbedingungen von vornherein bekannt, so lassen sich alle diese Anforderungen leicht erfüllen. Voraussetzung ist allerdings, daß alle Schaltungen richtig ausgeführt werden. Dreimaschinensätze für Parallelbetrieb, bei dem der Antriebsmotor zwei Umformer für dieselbe Frequenz antreibt, die entweder einzeln oder beide aufs Netz speisen, sind ein Sonderfall. Hierbei kommt es hauptsächlich auf die richtige Zusammenkupplung der drei Maschinen an, um die vorher genannten Bedingungen zu erfüllen.

## IV. Schalten und Bremsen.

### A. Schaltgeräte.

Es werden in diesem Abschnitt nur die Schaltgeräte behandelt, die im Zusammenhang mit dem Schnelfrequenzantrieb von Bedeutung sind. Für die Auswahl dieser Geräte sind nicht nur elektrische, sondern vielfach auch mechanische

Gesichtspunkte maßgebend. Neben der höchstzulässigen Ein- bzw. Abschaltleistung spielt die Frage der verlangten Schalzhäufigkeit, die Frage der Hand- oder Fernbetätigung, der unmittelbaren Einschaltung, Stern-dreieck- oder Polumschaltung sowie die Abhängigkeitsschaltung und Verriegelung eine Rolle. Schließlich kann auch noch die Schutzart des Schalters ausschlaggebend sein. Bei Hand-

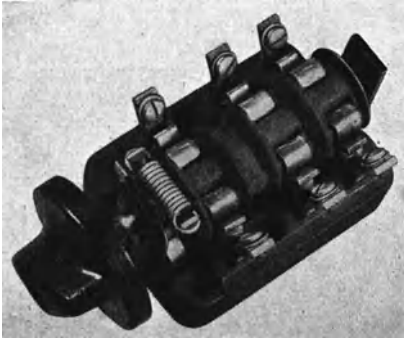


Abb. 40. Kleinwalzenschalter (Klößner).

betätigung verwendet man am häufigsten Walzen- oder Motorschutzschalter, bei Fernbetätigung Luft- oder Ölschütze, die gleichzeitig auch Motorschutzschalter sein können.

**28. Walzenschalter.** Die Walzenschalter bieten die Möglichkeit, in einem Schalter die verschiedensten Schaltfolgen zu vereinigen. Die Zahl der Schaltstellungen wird durch den kleinsten zulässigen Schaltwinkel begrenzt, für die Zahl der gleichzeitig durchführbaren Schaltverbindungen ist die Walzenlänge ausschlaggebend, da bei zu langer Walze eine Durchbiegung und damit schlechte Kontaktgabe zu erwarten ist. Außerdem legt der Gesamtkontaktdruck

das für die Schalterbetätigung erforderliche Drehmoment fest. Bei Verwendung von Walzenschaltern kann zwar eine Einschaltreihenfolge festgelegt werden, jedoch besteht keine Abhängigkeitsschaltung, wenn ein Motor infolge Überlastung ausfällt. Auch fehlt die Spannungsabhängigkeit des Schalters. Bleibt also beispielsweise bei Mehrmotorenantrieben die Spannung aus, so bleiben nach Beendigung der Auslaufzeit alle Motoren stehen, um dann bei Wiederkehren der Spannung gleichzeitig ohne Rücksicht auf etwa erforderliche Einschaltreihenfolge wieder hochzulaufen.

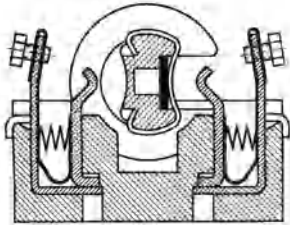


Abb. 41. Aufbau eines guten Walzenschalters. Reichlich bemessene Walzenkontakte, hohe Funkenstutztrennwände, Schraubenfedern an Stelle von Blattfedern.

Im allgemeinen rechnet man bei Walzenschaltern mit  $10 \cdots 30$  Schaltungen in der Stunde. Werden höhere Werte verlangt, so ist außer einer besonders sorgfältigen Lagerung und einer mechanisch kräftigeren Kontaktausführung auch eine Herabsetzung der Schaltleistung erforderlich. Der Stromdurchgang durch einen Leiter hat eine Erwärmung desselben zur Folge. Zwischen Kontakten ist immer mit einem zusätzlichen Übergangswiderstand und damit mit zusätzlicher Erwärmung zu rechnen. Diese Kontakterwärmung darf zur Vermeidung eines unzulässigen Kontaktabbrandes nicht zu groß werden. Je häufiger daher der Einschaltstrom auftritt, um so niedriger muß er gehalten werden,

damit die Grenzerwärmung niedrig bleibt. Bei dieser Gelegenheit sei darauf hingewiesen, daß ölgekühlte Schalter den luftgekühlten infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Öles unterlegen sind und nur dann für große Schalzhäufigkeit benutzt werden dürfen, wenn das Herstellerwerk dies nach Prüfung der Betriebsverhältnisse zuläßt.

Die gebräuchlichsten Ausführungen des Walzenschalters sind der Netz-, Stern-dreieck-, Umkehr-, Einfach- und Mehrfachpolumschalter. Außerdem findet man Schalter, die mehrere dieser Aufgaben vereinen, wie z. B. Umkehr-Stern-dreieckschalter. Im Zusammenhang mit Schnellfrequenzmotoren werden auch Netzschalter benötigt, die gegebenenfalls als Mehrzweckschalter von Bedeutung sind. Es ist hierbei jedoch besonders wichtig, daß beim Weiterschalten kein Lichtbogen

stehenbleiben kann, der sonst zu einem Netzkurzschluß führt. Für die Sicherheit des Schaltens sind gut ausgebildete Rasten in den einzelnen Schaltstellungen erforderlich, sowie Maßnahmen, die ein schleichendes Schalten oder ein Stehenbleiben der Schalterwalze zwischen den einzelnen Schaltstellungen verhindern.

Während früher die Walzenschalter als blech- oder gußgekapselte Aufbauswitcher geliefert wurden, findet man heute je nach dem Anwendungszweck die verschiedensten Formen. In den Abb. 40...44 sind Walzenschalter der verschiedensten Ausführungen gezeigt. Diese Vielfältigkeit gilt auch bezüglich des Betätigungsgriffes, der als Handrad, Knebel, Kugelgriff u. dgl. ausgebildet sein kann.

**29. Schütze.** Bei den Schützen wird die zum Einschalten erforderliche Kraft durch einen Schalmagneten aufgebracht. Wird die Spule des Magneten an eine Spannung gelegt, so zieht das Schütz an, die Schützkontakte werden geschlossen (Arbeitskontakte) oder geöffnet (Ruhekontakte). Das Einschalten kann entweder durch kurzzeitiges Schließen eines Kontaktes oder durch Dauerkontaktgabe erfolgen. Im Falle des kurzzeitigen Schließens muß ein besonderer Arbeitskontakt beim Schalten des Schützes einen Selbsthaltestromkreis schließen, der dem Magneten die Spannung zuführt und so ein Wiederabfallen des Schützes verhindert. Im Fall der Dauerkontaktgabe muß durch eine Wie-

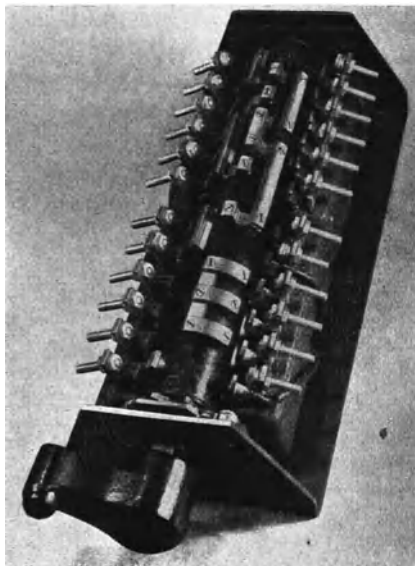


Abb. 42. Steuerwalze für Mehrmotoreinschaltung (Klöckner).

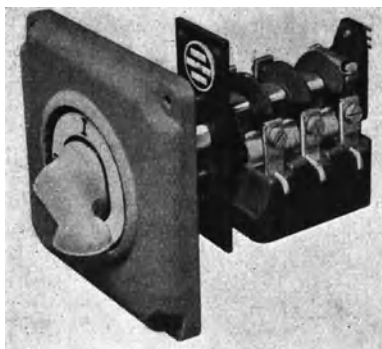


Abb. 43. Walzenschalter für hohe Beanspruchung. Der Griff ist nur in der Abschlußplatte gelagert. Schalter selbst ist entlastet (Klöckner).

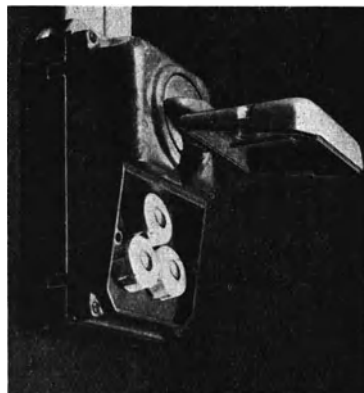


Abb. 44. Isoliergekapselter Walzenschalter. Die Klappe über den Sicherungen kann nur geöffnet werden, wenn ausgeschaltet ist (Klöckner).

dereinschaltsperre dafür gesorgt werden, daß bei einem Abfallen des Schützes infolge kurzzeitigen Ausbleibens der Spannung kein unbeabsichtigtes Wiedereinschalten des Schützes bei Wiederkommen der Spannung eintreten kann. Je nach-

dem, ob die Schützkontakte in Luft oder Öl arbeiten, spricht man von Luft- oder Ölschützen. Der durch das Schütz fließende Strom kann zur Erwärmung irgendwelcher Teile, wie Bimetallstreifen, herangezogen werden, die dann entweder elektrisch oder mechanisch auf die Magnetspule oder eine Schaltwelle einwirken. Ist



Abb. 45. Schütz: Magnetisch betätigter, fernsteuerbarer Schalter (Klöckner).

ein derartiger Bimetallstreifen so bemessen, daß er beim Erreichen der Stromstärke, die dem zugehörigen Motor schädlich werden könnte, das Schütz, allerdings mittelbar, zum Abfallen bringt, so wird der Motor damit gegen Überlastung geschützt und man bezeichnet dann diese Vereinigung von Schalter oder Schütz und Wärmeauslöser als Motorschutzschalter. Die Auslösezeit des Wärmeauslösers ist verschieden lang, je nach der Größe des Unterschiedes zwischen der eingestellten und der tatsächlich auftretenden Stromstärke. Bei Kurzschluß muß die Stromzuführung sofort unterbrochen werden. Dies geschieht entweder durch die bekannten Sicherungen oder durch eine im Schalter angeordnete Schnellauslösung. Diese Schnellauslösung bewirkt bei Eintreten eines Kurzschlusses ein so schnelles

Abfallen des Schützes, daß der Kurzschluß auf den zu schützenden Motor keine nachteilige Wirkung ausüben kann.

Bezüglich der Schalthäufigkeit gilt für die Schütze das gleiche, wie für die Walzenschalter. Dabei ist das Luftschütz dem Ölschütz überlegen. Bei den Schützen spielt hinsichtlich der Lebensdauer der Kontakte auch die Abschaltleistung eine Rolle, da hier besonders bei Schützen mit Schnellauslösung damit ge-

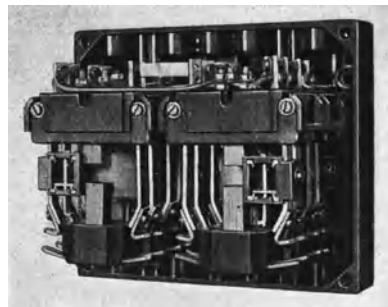
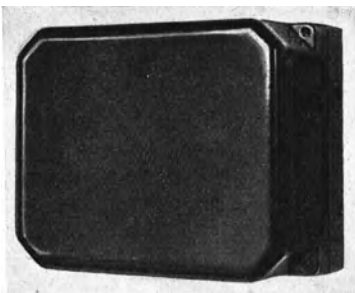


Abb. 46. Wendeschütz zur Drehzahlumkehr. Offen und geschlossen (Klöckner).

rechnet werden muß, daß bei unachtsamer Bedienung mehrmals der Kurzschlußstrom oder der volle Einschaltstrom abgeschaltet werden muß und daß dabei kein Schweißen der Kontakte oder unzulässiger Kontaktabbrand auftreten darf. Zur Erhöhung der Lebensdauer werden die Kontakte vielfach mit Edelmetallüberzug versehen.

Die Fernschalter (Schütze) für Drehstrommotoren sind meist dreipolig. Umschalter und Polumschalter werden aus einer entsprechenden Anzahl einzelner drei-

poliger Schalter zusammengesetzt, während als Stern-Dreieck-Fernschalter vereinzelt auch Sonderausführungen Verwendung finden. Setzt ein Schaltvorgang die Zusammenarbeit mehrerer Schalter voraus, so erhalten die Fernschalter zusätzliche Kontakte, um eine gegenseitige Abhängigkeit — Verriegelung — der einzelnen Schalter zu ermöglichen. Im Abschnitt B „Verriegelung“ auf den Seiten 39 bis 42 wird hierauf noch näher eingegangen.

Die Ölschalter werden aus naheliegenden Gründen nur mit Gehäuse geliefert, wobei das Gehäuse aus Guß oder Preßstoff u. dgl. besteht. Bei den Luftschaltern sind dagegen die verschiedensten Ausführungen üblich, je nachdem ob die Schalter an einer Wand, außen an einer Maschine, innerhalb eines Schaltschranks oder im Innern einer Maschine angebracht werden sollen. Die Abb. 45...48 geben einen Überblick der Schütze.

**30. Motorschutzschalter.** Es wurde schon erläutert, daß der durch einen Schalter fließende Strom dazu benutzt werden kann, bei unzulässig hohem Stromdurchgang den Schalter zwangsläufig abzuschalten. Dabei kann der Strom mittelbar oder unmittelbar auf das wärmeempfindliche Teil einwirken. Der Wärmeauslöser kann eine Metallverbindung sein, welche bei verhältnismäßig niedriger Temperatur schmilzt. In diese Metallverbindung ist eine unter Federspannung stehende Achse eingebettet, die durch das Weichwerden

der Metallverbindung zurückschnellen und damit den Schalter zum Abfallen bringen kann. Eine andere Ausführung besteht darin, daß zwei Metallstreifen, die sich bei Erwärmung verschieden stark ausdehnen, zu einer Spirale oder zu einem Streifen zusammengesetzt sind. Wie Abb. 49 zeigt, gibt dieser Streifen bei der Durchbiegung einen Auslösehebel frei, der das Schaltgerät abschaltet. Dabei kann der Bimetallstreifen mittelbar oder unmittelbar erwärmt und auf verschiedene Stromstärken eingestellt werden. Bei den handbetätigten Schaltern wird das Abfallen rein mechanisch bewirkt, da keine Abhängigkeit von der Spannung besteht, während bei den Fernschaltern der stromabhängige Teil beim Auslösen einen Kontakt öffnet, der die Spule spannungslos macht und damit den Schalter abschaltet.

Die Einstellung der Schalter auf die verschiedenen Stromstärken erfolgt entweder durch die Änderung der erforderlichen Durchbiegung, bis der Bimetall-

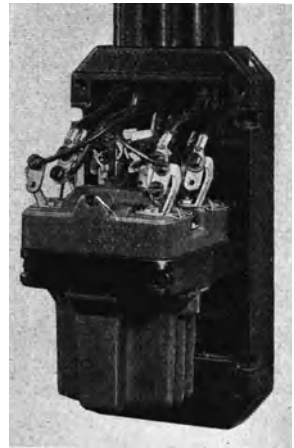


Abb. 47. Niederspannungsschütz. Schaltmagnet in Öl, Kontakte in Luft (Klöckner)

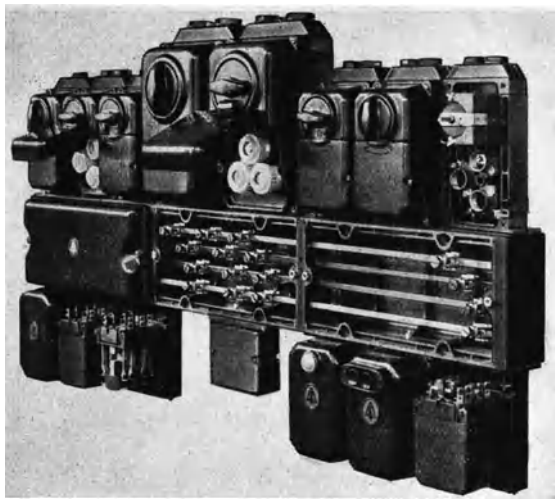


Abb. 48. Schaltgerätgruppe mit Walzenschaltern, Schützen und Verteilerkästen (Klöckner).

streifen ein Auslöseteil freigeben kann, oder durch Auswechseln der Heizstreifen für den Bimetallauslöser.

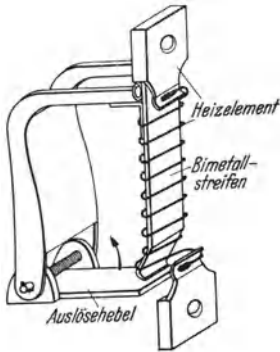


Abb. 49. Überstromauslöser.

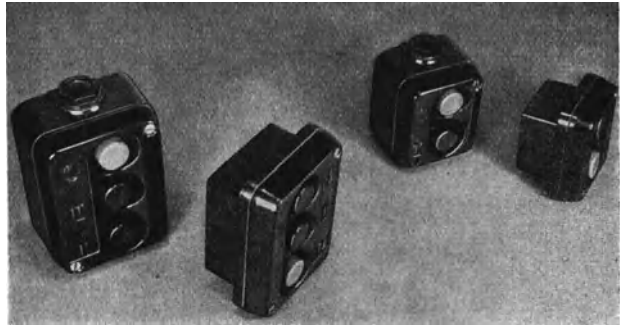


Abb. 50. Druckknopfschalter (Klöckner).

Für den Schutz von Motoren muß weiterhin dafür gesorgt werden, daß etwa auftretende Kurzschlüsse sich nicht auf die Motorwicklung schädlich auswirken können. Besonders die großen Schalter werden vielfach mit der sog. Schnellauslösung versehen, die dafür sorgt, daß der Schalter sofort abfällt, wenn ein bestimmtes Vielfaches des Nennstromes auftritt. Fehlen derartige Schnellauslöser im Schalter, so muß der Motor gegen Kurzschluß durch die üblichen Schmelzsicherungen abgesichert werden.



Abb. 51. Schwenkschalter (Siemens).

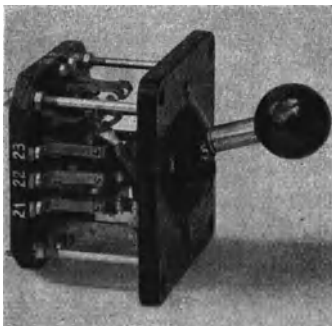


Abb. 53. Kugelschalter, Mehrfachschaltung mit einem Steuerschalter, z. B. nach oben, unten, rechts und links (Siemens).



Abb. 52. Endschalter, zur Begrenzung von Bewegungen (Klöckner).

### 31. Betätigungsschalter.

Der Begriff Betätigungsschalter umfaßt alle Geräte, welche dazu dienen, die fernbetätigten Schalter und die Schalter mit einer spannungsabhängigen Spule ein- oder auszuschalten. Die gebräuchlichsten Formen sind die Druckknopf- und die Schwenkschalter (Abb. 50 u. 51) für Handbetätigung, sowie die Endschalter zur Begrenzung eines Arbeitsweges (Abb. 52). Daneben gibt es als Sonderformen Kugel-, Paket-, Walzen- und Kippschalter (Abb. 53 u. 54). Der Paket- und der Walzenschalter kommt wie der sog. Kammernockenschalter

(Abb. 55 u. 56) jeweils dann in Frage, wenn zwischen verschiedenen Schaltmöglichkeiten gewählt werden kann. Sie dienen dann zum Einstellen einer be-

stimmten Schaltfolge, während das Einschalten selbst durch einen Druckknopf- oder Schwenkschalter erfolgt.

In manchen Fällen, wie beispielsweise beim Kugelschalter ist es mechanisch unmöglich, gleichzeitig zwei oder mehr Schaltvorgänge auszulösen. Man spart hierdurch Verriegelungskontakte an

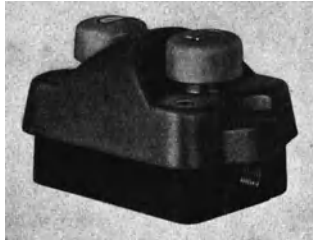


Abb. 54. Fußschalter (Klöckner).

den Fernschaltern und verbilligt damit die Ausrüstung. Wird ein Schalter nicht von Hand, sondern wie die Endschalter durch einen bewegten Teil der Werkzeugmaschine betätigt, so besteht die Gefahr, daß ein schleichendes Schalten eintritt und keine einwandfreie Kontaktgabe möglich ist. In einem solchen Falle sind Schnappschalter einzubauen, die durch Federbelastung plötzlich abschalten.

Hinsichtlich der Bauformen sind auch bei den Betätigungsschaltern Ein- und Aufbauswitcher, blech-, guß- und isolierstoffgekapselte Ausführungen zu unterscheiden. Die Schalter werden einzeln an die Maschine angebaut oder zu Schalttafeln (Abb. 57) vereinigt, wobei dann zur Erhöhung der Betriebssicherheit Signallampen oder andere optische Anzeiger des Schaltzustandes erforderlich sind.

## B. Verriegelungen.

Verriegelungen können den verschiedensten Zwecken dienen. Sie können das gleichzeitige Einschalten mehrerer Schalter erzwingen oder eine Reihenfolge des Ein- oder Ausschaltens festlegen. Eine Verriegelung ist auch dann erforderlich, wenn der Schaltvorgang von irgendwelchen Einflüssen, wie Zeit, Strom, Spannung, Fortschreiten des Arbeitsganges usw. gesteuert werden soll. Es würde den Rahmen dieses Werkstatthuches überschreiten, wenn man auf alle diese Fragen eingehen würde, doch sind sie so wichtig, daß hier wenigstens die gebräuchlichsten Fälle kurz gestreift werden.

**32. Stern-Dreieck-Fernschalter.** Beim Stern-Dreieck-Fernschalter soll der Motor zunächst in Sternschaltung an das Netz angeschlossen werden, und wenn der Einschaltstrom abgeklungen ist, soll die Umschaltung auf Dreieck erfolgen. Den Zeitpunkt des



Abb. 55. Kammernockenschalter. Zusammensetzbarer Steuerschalter für mehrere Steuerkreise (AEG.).

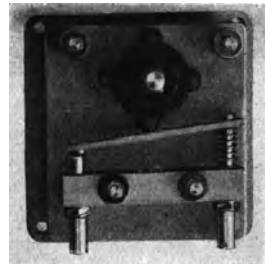


Abb. 56. Blick in eine Kammer des Kammernockenschalters. Geschaltet wird durch Nocken (AEG.).

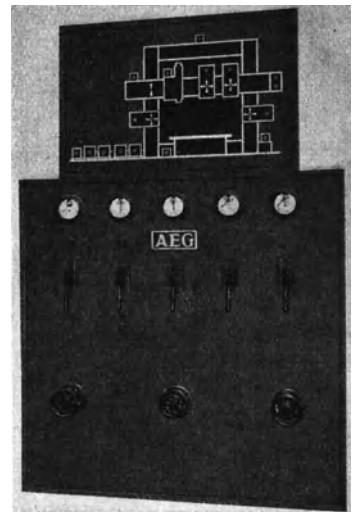


Abb. 57. Schaltschrank mit Betriebsleuchtbild (AEG.).

Umschaltens kann man durch verschiedene Maßnahmen festlegen. Vielfach wird in der Sternschaltung ein Bimetallstreifen beheizt, der nach bestimmter Zeit, die zum Abklingen des Einschaltstromes genügt, einen Kontakt schließt und damit das Dreieck-

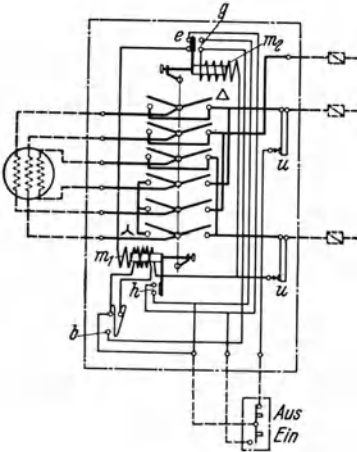


Abb. 58. Selbsttätiger Sterndreieckschalter. Schaltschema (AEG.).

*b* Bimetall-Zeitkontakt für die selbsttätige Umschaltung; *e* Unterbrecherkontakt für den Stromkreis des Magneten *m*<sub>1</sub>; *g* Parallelkontakt zu dem „Ein“-Druckknopf für den Magneten *m*<sub>1</sub>; *h* Parallelkontakt zu dem „Ein“-Druckknopf für den Magneten *m*<sub>2</sub>; *m*<sub>1</sub> Magnet für die Sternschaltung; *m*<sub>2</sub> Magnet für die Dreieckschaltung; *u* Überstrom- (Bimetall-) Auslöser. Magnet *m*<sub>1</sub> schaltet Motor in  $\lambda$  an Netz. Der auf verschiedene Auslösezeiten einstellbare Bimetall-Zeitkontakt *b* schließt Magnetstromkreis *m*<sub>2</sub>, schaltet auf  $\Delta$  um. Gleichzeitig werden *m*<sub>1</sub> und *b* ausgeschaltet.

Sternschütz überlegen sein. An die Stelle des Bimetallstreifens kann auch ein Zeitrelais oder ein Stromwächter treten.

**33. Stern-Dreieck-Netzumschaltung.** Soll in einem Betrieb ein Motor wahlweise mit 50- und 100periodigem Strom gespeist werden, wobei die Spannung in beiden Fällen 380 Volt beträgt, so muß dieser Motor an das 50periodige Netz in Stern- und an das 100periodige Netz in Dreieckschaltung angeschlossen werden. Um Fehlschaltungen zu vermeiden, sind bei der Verwendung von Fernschaltern diese elektrisch zu verriegeln, oder aber man vereinigt bei Handbetätigung den Netzumschalter und den Stern-Dreieck-Schalter gemäß Abb. 60 zu einem einzigen Schalter.

**34. Mehrmotorenantrieb.** Bei Mehrmotorenantrieb wird vielfach die Forderung gestellt, daß zwischen den einzelnen Motoren eine bestimmte Abhängigkeit vorhanden ist, um eine Beschädigung der Werkzeuge oder Ausschuß zu vermeiden. Ist beispielsweise eine Werkzeugmaschine mit zwei Arbeitsmotoren und einem Vorschubmotor ausgerüstet, so muß die Abhängigkeit bestehen bleiben, wenn beide oder nur ein beliebiger der beiden Arbeits-

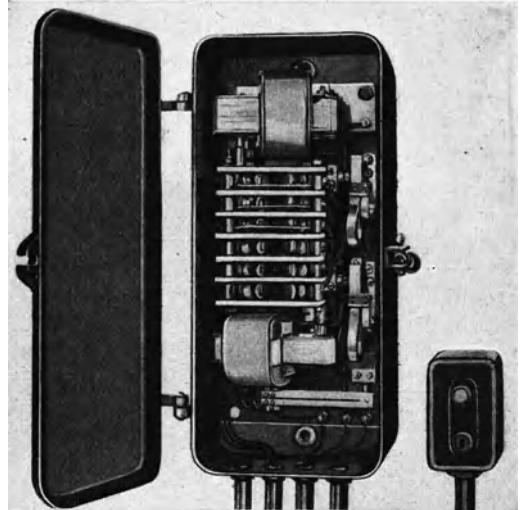


Abb. 59. Ansicht des  $\lambda$ - $\Delta$ -Schalters nach Abb. 58 (AEG.).

schütz einschaltet oder der zunächst einen Kontakt öffnet, wodurch das Sternschütz abfällt und dann erst das Dreieckschütz anzieht. Im ersten Fall muß, wie Abb. 58 u. 59 zeigen, zwischen den Schützen eine mechanische Verbindung vorhanden sein und außerdem die Zugkraft des Dreieckschützes dem

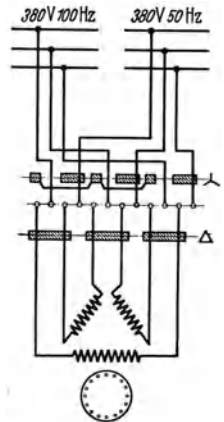


Abb. 60. Schaltplan eines Netzumschalters. Derselbe Motor in  $\lambda$  an 50 Hz oder in  $\Delta$  an 100 Hz.



motoren in Betrieb genommen werden. Das Abschalten der Arbeitsmotoren kann dabei aus beliebigen Gründen von Hand, zwangsweise infolge Überlastung, bzw. wegen Ausbleibens der Spannung erfolgen. Sowie ein Arbeitsmotor abgeschaltet wird, muß der Vorschubmotor sofort selbsttätig abgeschaltet werden. Sofern die Arbeitsmotoren mit Schnelfrequenz, der Vorschubmotor mit Normalfrequenz gespeist wird, müssen die Schalter der Schnelfrequenzmotoren unmittelbar oder über sog. Zwischenrelais von der Spannung des höherperiodigen Netzes abhängig sein. Als Schaltgeräte verwendet man bei derartigen Abhängigkeitsschaltungen Fernschalter (Schütze), die im allgemeinen gleichzeitig Motorschutzschalter sind. Außerdem ist ein Wahlschalter erforderlich, um die jeweilige Abhängigkeit im Mehrmotorenbetrieb einzustellen. In Abb. 61 ist angenommen, daß alle Motoren am gleichen Netz liegen. Der Wahlschalter gibt die Möglichkeit, den Vorschubmotor in besonderen Fällen zum Einrichten und Anfahren auch allein laufen zu lassen, doch leuchtet dann aus Sicherheitsgründen eine Warnlampe auf.

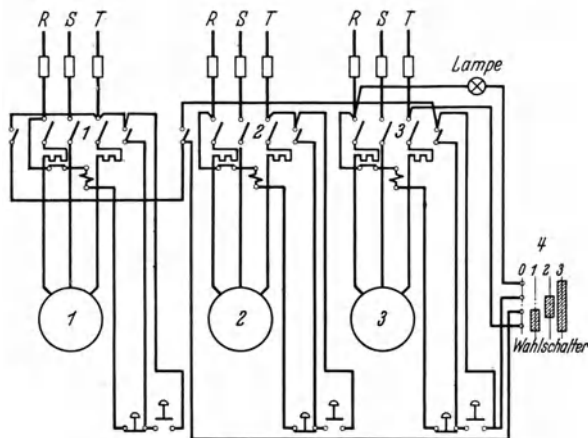


Abb. 61. Schaltplan eines Werkzeugmaschinenantriebes mit zwei Arbeitsmotoren (1 u. 2) und einem Vorschubmotor (3). Wahlschalter bestimmt, ob Vorschubmotor in Abhängigkeit von Motor 1 oder Motor 2 verriegelt wird, oder zum Einrichten ohne Verriegelung laufen soll. Hierbei brennt Warnlampe.

Mit zunehmender Anzahl der Motoren und damit auch der Schalter wird es unmöglich, die bisherige Art des Schaltplanes beizubehalten, wenn die gegenseitige Verriegelung der Schalter in der Zeichnung klar erkennbar sein muß. Es empfiehlt sich in derartigen Fällen, auf die Darstellung der Hauptkontakte der Schalter sowie auf die Leitungen zwischen Schalter und Motor zu verzichten, und nur die Steuerleitungen, d. h. die für die Abhängigkeitsschaltung wichtigen Verbindungsleitungen zwischen Schutzspulen, Hilfskontakten, Betätigungsschaltern, Wahlschaltern usw. einschließlich dieser Schaltteile zu zeichnen. Die sinnfälligste Form dieser Darstellung ist das Stromlaufbild, bei dem gezeigt wird, welchen Weg der Strom, bezogen auf den jeweiligen Schalter, durchlaufen muß. Die Schalter werden dabei fortlaufend mit Zahlen bezeichnet, wobei diese Zahlen gleichzeitig als Kennziffer für die zugehörigen Hilfskontakte dienen, z. B. jeder Arbeitskontakt des Schalters „ $a_1$ “, Ruhekontakt „ $r_1$ “. Arbeitskontakte sind Kontakte, die bei eingeschaltetem Schütz,

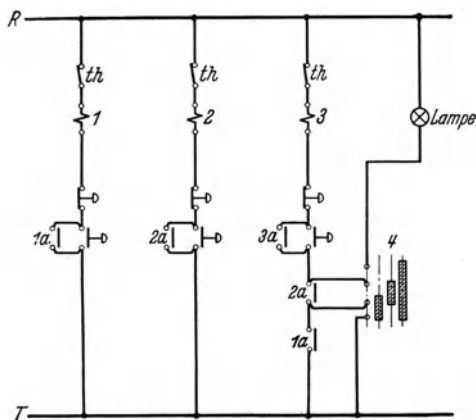


Abb. 62. Vereinfachtes Stromlaufbild zu Abb. 61. Nur Steuerstromkreise.

beziehen auf den jeweiligen Schalter, durchlaufen muß. Die Schalter werden dabei fortlaufend mit Zahlen bezeichnet, wobei diese Zahlen gleichzeitig als Kennziffer für die zugehörigen Hilfskontakte dienen, z. B. jeder Arbeitskontakt des Schalters „ $a_1$ “, Ruhekontakt „ $r_1$ “. Arbeitskontakte sind Kontakte, die bei eingeschaltetem Schütz,

Ruhekontakte solche, die bei abgeschaltetem Schütz geschlossen sind. Da derartige Schaltbilder häufig Verwendung finden, ist in Abb. 62 die in der vorhergehenden Abb. 61 gezeigte Schaltung auch als Stromlaufbild wiedergegeben. Es ist dabei zu beachten, daß beim Stromlaufbild auf die räumliche Anordnung der einzelnen Teile keine Rücksicht genommen wird, sondern daß einzig und allein die elektrischen Zusammenhänge maßgebend sind.

**35. Einschaltung von Induktionsumformersätzen.** Die Notwendigkeit der Verriegelung bei der Einschaltung von Stromwandler-Maschinensätzen sei an einem Beispiel erläutert. Bei der Erzeugung von 75 periodigem Strom wird meistens ein zweipoliger Induktionsumformer durch einen vierpoligen Motor angetrieben. Bei Kurzschluß im Sekundärnetz (Schnellfrequenz) könnte beim Einschalten zuerst die zweipolige Maschine hochlaufen und damit der Läufer der vierpoligen Maschine, die für hohe Drehzahlen nicht geplant ist, gefährdet werden. Wenn dies auch ein ausgesprochener Sonderfall ist, so empfiehlt es sich trotzdem, die Reihenfolge des

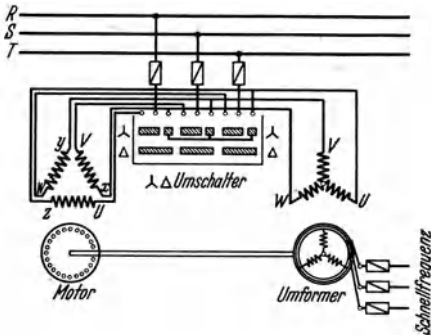


Abb. 63. Verriegelung des Umformers gegen den Antriebsmotor bei Einschaltung durch Walzenschalter. Der  $\Delta$ -Schalter legt die Ständerwicklung erst an das Primärnetz, wenn der Antriebsmotor auf  $\Delta$  geschaltet wird, der Umformersatz also schon hochgelaufen ist.

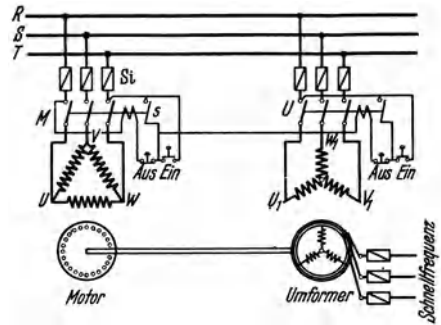


Abb. 64. Verriegelung des Umformers gegen den Antriebsmotor bei Schützensteuerung. Das Schütz  $U$  für den Umformer kann erst eingeschaltet werden, wenn der Motor über das Schütz  $M$  schon eingeschaltet ist.

Einschaltens zwangsläufig festzulegen, zumal damit der Vorteil erzielt wird, daß die Ständerwicklung des Induktionsumformers nie an Spannung liegt, wenn der Umformer nicht in Betrieb sein soll. In Abb. 63 ist die einfachste Form der Verriegelung bei Verwendung eines Stern-Dreieckschalters für den Abtriebsmotor gezeigt, während Abb. 64 bei Verwendung von zwei Fernschaltern gilt.

### C. Bremsen.

Schnellfrequenzmotoren werden nicht nur deshalb angewandt, um mit der besten Arbeitsgeschwindigkeit rechnen zu können, sondern auch in der Absicht, die Oberfläche des Werkstückes so sauber bearbeiten zu können, daß, wie beispielsweise bei den Oberfräsen, zusätzliche Arbeitsgänge überflüssig werden und damit Zeit und Geld gespart wird. Infolge der ausgezeichneten Lagerung dieser Motoren ist mit sehr langen Auslaufzeiten zu rechnen. Bei der Wahl der Mittel, um diese Zeiten weitgehend zu verkürzen, sind einige Punkte von besonderer Wichtigkeit. Die Länge der Auslaufzeit hängt von der in den umlaufenden Teilen steckenden Drehwucht  $\frac{m v^2}{2}$  und den Verzögerungs- bzw. Bremskräften ab. Nachdem die Drehwucht durch die Motordrehzahl und die mechanische Ausbildung der Werkzeugmaschine festliegt, kann eine Verkürzung der Auslaufzeit also nur durch Erhöhung der Bremskräfte erreicht werden. Genau wie beim Hochlauf des Motors

die Beschleunigungskräfte und ihr zeitlicher Verlauf eine große Rolle spielen, ist dies auch hinsichtlich der Größe des zeitlichen Verlaufes der Verzögerungskräfte der Fall, nur daß hier noch zu beachten ist, daß bei verhältnismäßig schweren und unzuweckmäßig befestigten Werkzeugfuttern sich diese bei häufigem und zu schnellem Bremsen lockern können. Als Faustregel kann man annehmen, daß das Bremsmoment dem Nennmoment entsprechen soll.

Die Bremsverfahren kann man in drei Gruppen einteilen, die rein mechanisch wirkenden Bremsen, die elektrisch beeinflussten oder gesteuerten Bremsen und das rein elektrische Bremsen. Zur ersten Gruppe gehören die altbekannten Backen- und Bandbremsen, zur zweiten die Bremslüftmagnete oder das Eldro-Gerät in Verbindung mit der ersten Gruppe, sowie die verschiedenen Arten von Verschiebeankeermotoren, zur dritten Gruppe die Gegenstrom- und die Gleichstrombremsung unter Zuhilfsnahme der verschiedensten Mittel und die Bremsung durch Selbsterregung mittels Kondensatoren. Die Hilfsmittel sind besonders bei Gegenstrombremsung erforderlich, um ein Hochlaufen in der umgekehrten Drehrichtung zu verhindern. Derartige Hilfsmittel sind Fliehkraftschalter und Bremswächter.

Soll ein Motor häufig stillgesetzt werden, so muß berücksichtigt werden, daß die der Drehwucht entsprechende Energie bei jedem Bremsen in Wärme umgewandelt wird. Bei mechanischer und bei Gleichstrombremsung sowie bei der Bremsung durch Selbsterreger entsprechen die Bremsverluste ungefähr den einfachen, beim Gegenstrombremsen ungefähr den dreifachen Anlaßverlusten. Diese Werte beziehen sich auf das Bremsen von der synchronen Drehzahl auf Stillstand.

Über die rein mechanische Bremsung soll hier nichts gebracht werden, da sie einerseits allgemein bekannt und andererseits in Verbindung mit den Schnellfrequenzmotoren selten ist. Auch die Nutzbremung, bei welcher die in den umlaufenden Massen steckende Energie in die elektrische Energie zurückverwandelt wird, soll hier nicht behandelt werden, da diese Art des Bremsens für die nächste Zukunft noch für Schnellfrequenzantriebe ohne Bedeutung ist. Sie könnte möglicherweise in Verbindung mit gesteuerten Röhren von Interesse sein.

Bei der mechanisch-elektrischen Bremsung sind zwei Gruppen zu unterscheiden, die Verschiebeankeermotoren, bei welchen Motor und Bremse ein unteilbares Ganzes bilden und die übrigen Ausführungen, die mit dem Motor zusammengebaut sein können, wo dies aber nicht Bedingung ist.

**36. Verschiebeankeermotoren.** Bei den Verschiebeankeermotoren, von denen Abb. 65 den Schnitt durch einen Motor, Abb. 66 einen vergrößerten Ausschnitt zur besseren

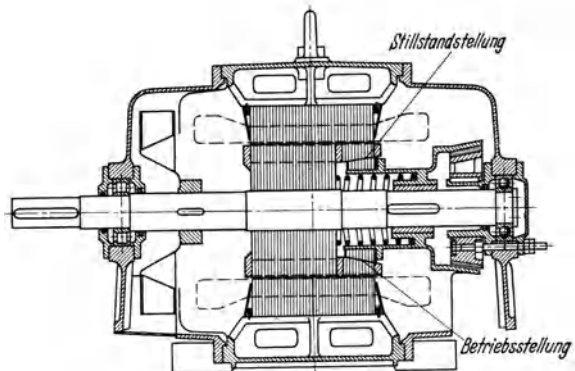


Abb. 65. Schnitt durch einen Motor mit Eigenbremsung (Sachsenwerk).

Erkennbarkeit der Einzelheiten der Bremseinrichtungen zeigt, wird das Motor-drehfeld zur Steuerung der Bremse ausgenutzt. Auf der Motorwelle ist eine axial verschiebbare Buchse, welche auf der einen Seite einen lamellierten Kegel trägt, auf der anderen Seite selbst als Kegelhülse ausgebildet ist. Diese verschiebbare

Buchse und damit die Kegelhülse wird durch eine entsprechend bemessene Feder bei abgeschaltetem Motor gegen einen mit dem Motorlagerschild festverbundenen

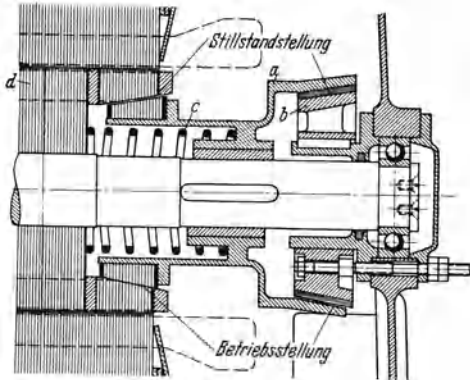


Abb. 66. Bremsenrichtung des Motors, Abb. 65 (Sachsenwerk). Bei Stillstand und beim Bremsen drückt die Feder *c* die verschiebbare Hülse *a* auf den fest am Gehäuse angebrachten Bremskegel *b*. Bei Einschaltung des Stromes wird die Hülse *a* nach links in den Läufer hineingezogen.

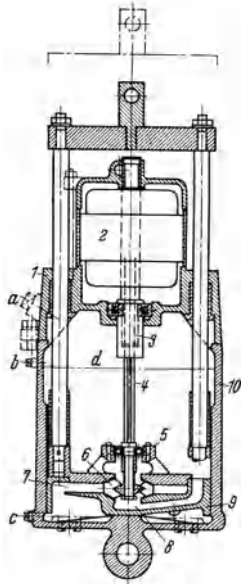


Abb. 67. Längsschnitt durch den Eldrolüfter. Elektrisch betriebener, hydraulischer Bremslüfter zum Zusammenbau mit einer mechanischen Bremse (AEG.).

1 Zylinderdeckel; 2 Antriebsmotor; 3 Motorwelle; 4 Antriebswelle; 5 Kugellager; 6 Flügelrad; 7 Verbindungsöffnung; 8 Kanal; 9 Kolben; 10 Gehäuse; *a* Ölinguß; *b* Ölüberlauf; *c* Ölablaß; *d* Ölspiegel.



Abb. 68. Ansicht des Eldrolüfters (AEG.).

Einschalten und mechanische Beanspruchung durch das Schlagen haben zur Entwicklung des nachstehenden Sondergerätes geführt.

**38. Eldrolüfter.** Der Eldrolüfter Abb. 67 u. 68, der die mechanische Bremse eines Hebezeuges betätigt, besteht aus einem Zylindergehäuse, in dem ein Kolben und ein mit ihm in Verbindung stehendes Joch durch Öldruck

in die Höhe gedrückt wird. Der Öldruck wird durch eine von einem kleinen Käfigläufermotor angetriebene Flügelradpumpe erzeugt. Nach dem Abschalten des

Bremskegel gedrückt. Wird der Motor eingeschaltet, so zieht das Motorfeld auch im Leerlauf die Buchse in den kegelig ausgedrehten Läufer hinein, wodurch die Bremse gelüftet wird und außerdem der Kegel mit für den magnetischen Rückschluß dieses Läuferstückes herangezogen wird, was aus Platzersparnisgründen wichtig ist.

**37. Magnetbremslüfter.** Genau wie bei den Verschiebeankermotoren ist auch bei den Magnetbremslüftern der mechanische Teil bei stillstehendem Motor in Bremsstellung, wobei das Gewicht des Lüfterankers einen Teil des Bremsgewichtes ausmacht. Der Ankerkern steht mit dem Bremsgestänge in Verbindung. Beim Einschalten des Motors bekommt die Lüfterwicklung gleichzeitig Spannung und zieht damit den Anker an. Für die Erwärmung der Magnetwicklung ist die Einschaltedauer und die Schalthäufigkeit von großer Bedeutung. Während die Halteleistung der Magnetbremslüfter verhältnismäßig klein ist, muß beim Einschalten, d. h. beim Anziehen des Magneten mit einer großen Scheinleistung gerechnet werden, die sich im gleichen Verhältnis wie der Hub ändert. Man verringert daher mit zunehmender Schalthäufigkeit den Hub, um die Erwärmung und gleichzeitig den Hubweg zu verkürzen. Trotzdem läßt sich selbst bei Verwendung einer Luftdämpfung ein Schlagen der Magnete auf die Dauer nicht ganz vermeiden. Diese Nachteile, hohe Leistungsaufnahme beim

Motors bremst das Öl das Flügelrad in etwa  $\frac{1}{10}$  Sek., während durch die Belastung, z. B. eine Bremsfeder, der Kolben wieder in seine Ausgangsstellung zurückgeführt wird, wobei das Öl in den oberen Zylinderraum zurückströmt. Die Öldämpfung schont alle mechanischen Teile und sorgt für ein stoßfreies Arbeiten. Im Vergleich zu Bremslüftmagneten ist der Einschaltstrom nur gering. Selbst bei starker Überlastung ist die Stromaufnahme des Motors fast unverändert. Bei verringertem Hub ist neben dem Vorteil einer Verkürzung der Hub- und Senkzeiten eine Schalthäufigkeit von 600 Schaltungen/Std. ohne weiteres zulässig.

39. Die Gegenstrombremsung ist die bekannteste Form der elektrischen Bremsung. Hierbei wird die Drehrichtung des Ständerfeldes und damit auch des Motors umgekehrt, wobei darauf zu achten ist, daß der Motor in der neuen Drehrichtung nicht hochlaufen kann, da sonst Werkzeug und Werkstücke gefährdet sind. Je nach der Läuferausführung kann das auftretende Bremsmoment so große Werte

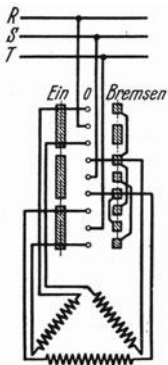


Abb. 69. Gegenstrombremsung. Motor wird in  $\Delta$ -Schaltung gebremst, um die Bremsung sanft zu halten und den Bremsstrom zu beschränken.

annehmen, daß es für den Antrieb unzulässig ist. Um in solchen Fällen das Bremsmoment herabzusetzen, schaltet man am einfachsten während des Bremsvorganges in eine Phase einen Widerstand ein, durch den das auftretende Bremsmoment beschränkt werden kann. Ursprünglich wurden für die Gegenstrombremsung Walzenschalter benutzt, die außer der Null- und der Betriebsstellung noch eine Bremsstellung hatten. In der Null- und in der Betriebsstellung hatten die Schalter eine Rast, während der Schalter in der Bremsstellung festgehalten werden mußte, weil er sonst unter Federkraft in die Nullstellung zurückschnellte.

Durch diese Ausführung wollte man erreichen, daß der Arbeiter den Bremsvorgang sicherer steuern kann. Dabei wurde zur Verringerung des Bremsmomentes entweder der schon erwähnte Widerstand eingeschaltet oder aber der Motor in Stern-

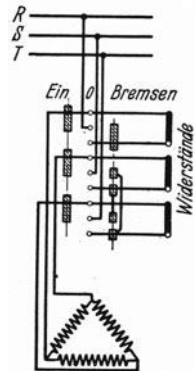


Abb. 70. Gegenstrombremsung mit Widerständen zur Beschränkung des Bremsmomentes.

schaltung gebremst (Abb. 69 u. 70). Die Unzuverlässigkeit der Bedienung hinsichtlich der richtigen Beendigung des Bremsens führte dazu, die Bremszeit unabhängig von der Achtsamkeit des Bedienungsmannes festzulegen. Dies setzt voraus, daß zum Schalten Fernschalter benutzt werden. Das Bremsschutz zieht dann beim Abschalten an und bleibt so lange eingeschaltet, bis es durch ein besonderes Schaltglied zum Abfallen gebracht wird. Als gebräuchlichstes Schaltglied zur Bremsüberwachung gilt zur Zeit noch der Fliehkraftschalter, welcher bei Unterschreitung einer bestimmten Drehzahl einen Kontakt betätigt, der das Bremsschutz steuert. Der Nachteil dieser Schalter beruht darauf, daß sie wegen ihrer verhältnismäßig hohen Empfindlichkeit nur für niedrige Betriebsdrehzahlen zu empfehlen sind.

40. Bremswächter. Eine sehr gute Lösung, welche gleichzeitig den Vorteil hat, daß sie auch gleichzeitig bei Rechts- und Linkslauf benutzt werden kann, keine Schleifringe oder sonstige der Abnutzung unterworfenen Teile besitzt und trotz vollkommener Zuverlässigkeit in keiner Weise von den vorhandenen Schwungmassen in der Schaltgenauigkeit abhängt, ist der Alnico-Bremswächter. Bei diesem Gerät ist mit der Motorwelle ein Anker verbunden, der aus einer Aluminium-Nickel-Kobalt-Legierung hergestellt ist und die denkbar besten Eigenschaften eines Dauermagneten aufweist. In einem Gehäuse ist ein als Kurzschlußkäfig ausgebildeter Ring gelagert, welcher den Anker umschließt und nach Erreichung einer Drehzahl

von etwa 100 U/min von dem vom Anker ausgeübten Drehmoment gegen eine Feder verdreht wird und dabei die Schaltbewegung vollführt. Mit diesem Käfig ist nämlich eine Kontaktvorrichtung verbunden, die zum Auslösen der für die Bremsung erforderlichen Schaltvorgänge dient. Der Zeitpunkt des Öffnens und Schließens der Kontakte kann in geringen Grenzen durch Verstellen des Federdruckes im Alnico-Schalter geändert werden. In der Regel wird der Alnico-Schalter unmittelbar mit dem zu bremsenden Motor gekuppelt (Abb. 71), jedoch



Abb. 71. Alnico-Bremswächter am Lager-schild eines Motors (AEG.).



Abb. 72. Alnico-Bremswächter über ein Getriebe mit der Motorwelle verbunden (AEG.).

besteht durchaus die Möglichkeit, ihn irgendwie mit der Werkzeugmaschine zusammenzubauen und mit einer vom Motor angetriebenen Welle zu kuppeln (Abb. 72),

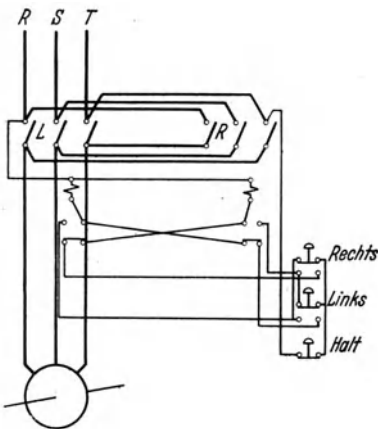


Abb. 73. Schaltplan einer druckknopfbetätigten Schützensteuerung für Rechts- und Linkslauf eines Motors.

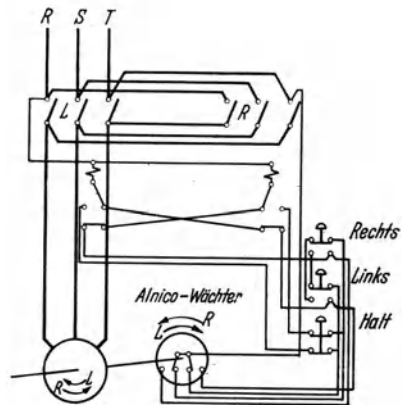


Abb. 74. Durch Hinzufügen eines Alnico-Bremswächters zur Schaltung Abb. 73 wird eine einwandfreie Bremsung gewährleistet.

Aenn der Anbau am Motor aus Platzersparnisgründen nicht erwünscht ist. Wie die wbb. 73 u. 74 zeigen, ist in den Fällen, in welchen betriebsmäßig Rechts- und

Linkslauf verlangt wird, nur der Alnico-Schalter als Zusatzgerät erforderlich, um auch eine sorgfältige Bremsüberwachung zu gewährleisten.

Vereinzelte führt man den Arbeitsmotoren bei der Gegenstrombremsung nicht den Netzstrom zu, sondern einen Strom, dessen Spannung so weit herabgesetzt ist, daß das vorhandene Moment für einen Hochlauf des Motors in der entgegengesetzten Drehrichtung nicht mehr genügt, bzw. daß der Bremsvorgang so verzögert wird, daß der Bedienungsmann den Motor rechtzeitig vom Netz abschalten kann.

Im Zusammenhang mit der Gegenstrombremsung sei auf eine meist unbeachtete aber sehr unangenehme Bremswirkung hingewiesen, die dann auftritt, wenn polumschaltbare Motoren von der höheren auf die niedrigere Drehzahl zurückgeschaltet werden. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß durch das Umschalten der Motorläufer zunächst übersynchron läuft und der Motor daher als Generator arbeitet.

**41. Gleichstrombremsung.** Während bei der Gegenstrombremsung Vorsichtsmaßnahmen erforderlich sind, die ein Hochlaufen in der entgegengesetzten Drehrichtung verhindern, hört bei der Gleichstrombremsung die Bremswirkung bei Stillstand des Motors auf, und ein Hochlauf ist überhaupt nicht möglich. Abgesehen von verschwindenden Ausnahmen wird die Gleichstrombremsung fast immer so ausgeführt, daß nach dem Abschalten des Arbeitsmotors vom Drehstromnetz einer oder zwei Phasen des Ständers Strom zugeführt wird. Hierdurch entsteht im Motorständer ein im Raum stillstehendes magnetisches Feld, in welchem sich der Läufer dreht. In der Läuferwicklung werden dadurch Ströme induziert, die eine kräftige und dabei stoßfreie, sanfte Bremsung zur Folge haben. Je nach dem verlangten Bremsmoment wird die an die Motorklemmen zu legende Spannung bemessen, da diese in Verbindung mit dem Widerstand der von dem Gleichstrom durchflossenen Ständerwicklung die Stärke des Bremsstromes bestimmt.

Der erforderliche Gleichstrom wird in den meisten Fällen mittels Trockengleichrichter erzeugt, da diese keinerlei Wartung benötigen. Da die verlangte Gleichstromspannung im Vergleich zu der Drehstromnetzspannung sehr niedrig ist, wird noch ein Umspanner benötigt, welcher Anzapfungen erhält, um eine Regelung der Gleichspannung und damit des Bremsstromes bzw. des Bremsmomentes ohne besondere Widerstände zu ermöglichen. Abb. 75 zeigt eine Steuerung für einen polumschaltbaren Drehstrommotor mit Trockengleichrichter für die Gleichstrombremsung. Wenn es erforderlich ist, daß auch beim Ausbleiben der Drehstromspannung zur Vermeidung von Beschädigung der Werkzeugmaschine oder ihrer Teile eine Bremsung sichergestellt werden muß, so wird an Stelle des Trockengleichrichters ein Drehstrom-Gleichstrom-Umformersatz aufgestellt, der den benötigten Gleichstrom liefert. Dieser Umformer erhält eine zusätzliche Schwung-

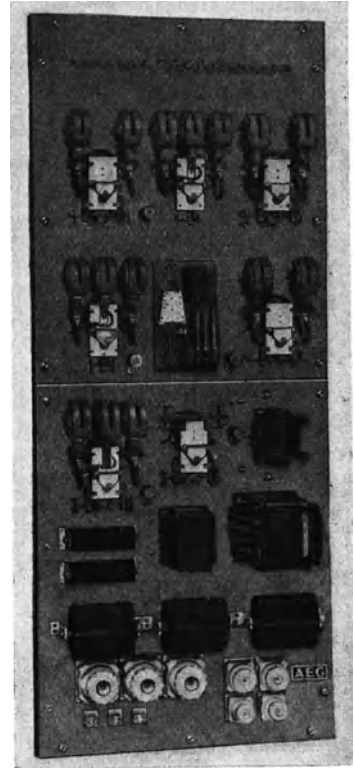


Abb. 75. Vollständige Schützensteuerung eines polumschaltbaren Motors. Unten auf der Tafel die Trockengleichrichter zur Lieferung des Bremsgleichstromes.

masse, die so bemessen ist, daß ihr Arbeitsinhalt ausreicht, um auch beim Ausbleiben der Drehstromspannung die Bremsstromlieferung so lange aufrecht zu erhalten, daß ein Bremsen der Arbeitsmotoren sichergestellt ist. Den Umformer baut man aus Gründen der Platzersparnis, wie Abb. 76 zeigt, oft als Eingehäuseumformer.



Abb. 76. Schaltschrank eines Bohrwerkes. Der Einachsbrumumformer links oben liefert durch sein Schwungmoment auch beim Ausbleiben der Netzspannung ausreichend Bremsgleichstrom.

Wenn für die Notbeleuchtung der Werkstätten eine Gleichstrombatterie aufgestellt ist, kann der Bremsstrom durch entsprechende Anzapfung dieser Batterie entnommen werden. Soll der Bremsgleichstrom einem vorhandenen Gleichstromnetz entnommen werden, so muß durch Vorschalten von Widerständen die Netzspannung auf die gewünschte Bremsspannung herabgesetzt werden.

Bei der Gleichstrombremsung zieht nach dem Abfallen des Hauptschalters, welcher die Verbindung Drehstromnetz - Motor hergestellt hatte, das Bremserschütz an. Für diesen Schaltvorgang ist natürlich eine gewisse Zeitspanne nötig. Ist nun aus irgendwelchen Gründen dieser Zeitverlust unerwünscht, so wird der Arbeitsmotor auch während

des Betriebes an das Gleichstromnetz gelegt. Als Stromquelle dient dabei ein Gleichstromgenerator. Bei dieser Lösung hat man zwar den Vorteil, daß bei Weg-

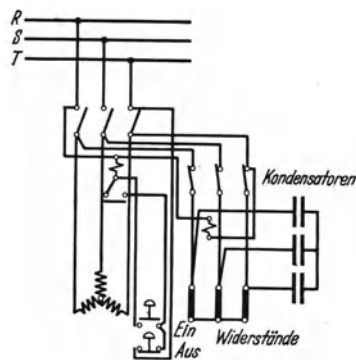


Abb. 77. Kondensator-Bremse. Beim Abschalten vom Netz läuft der Motor als „selbsterregter Asynchronmotor“. Die erzeugte Energie wird in Widerständen vernichtet.

bleiben der Drehstromspannung der Bremsvorgang sofort einsetzt, doch ist dafür der Nachteil in Kauf zu nehmen, daß während des Betriebes zusätzliche Leistungsverluste in Höhe der Bremsleistung auftreten, und daß außerdem der in der Wicklung fließende Gleichstrom auch entsprechende Wärmeverluste zur Folge hat. Infolgedessen darf dann die Belastung des Motors nur einen kleineren Wert erreichen, weil sonst Arbeitsbelastung und Gleichstromwärmeverluste zusammen eine Überschreitung der Grenztemperatur ergeben.

**42. Kondensatorbremsung.** Treibt man einen Drehstrom-Asynchronmotor, der als Käfigläufer ausgebildet sein kann, mit seiner synchronen Drehzahl an, so kann diese Maschine an den Ständerklemmen Strom der Spannung und Frequenz ab-

geben, für die sie gewickelt ist. Die einzige Voraussetzung ist, daß zwischen je zwei Klemmen richtig bemessene Kondensatoren liegen. Man nützt diese Erscheinung dadurch zum Bremsen von Motoren aus, daß im Augenblick des Abschaltens der Motoren vom Netz die Kondensatoren gemeinsam mit Widerständen zum Ver-



nichten der erzeugten elektrischen Energie zugeschaltet werden (Abb. 77). Die in den umlaufenden Teilen steckende lebendige Energie wird durch den „selbsterregten Asynchrongenerator“ in elektrische Energie umgewandelt, die dann in den bereits erwähnten Widerständen vernichtet wird. Das Bremsmoment läßt sich durch Verändern der Widerstände einstellen. Der Vorteil dieser Bremsart würde bei entsprechender Ausbildung der Schalter darin bestehen, daß sie auch bei Ausbleiben der Netzspannung zum gewünschten Erfolge führt. Preislich ist diese Lösung zur Zeit den anderen Bremsarten allerdings noch unterlegen, so daß sie bisher noch nicht durchsetzen konnte.

Beim augenblicklichen Stand der Technik kann die Gleichstrombremsung als die für Schnellfrequenzmotoren geeignetste Bremsart bezeichnet werden. Sie ist überall da zu empfehlen, wo sich wegen des häufigen Bremsens oder der vielen zu bremsenden Arbeitsmotoren die Beschaffung eines Gleichrichters bzw. eines Gleichstromgenerators lohnt. In den anderen Fällen, wo nur einzelne Arbeitsmotoren selten gebremst werden sollen, wird die Gegenstrombremsung die beste Lösung bedeuten. Dabei gehören zur Gegenstrombremsung entweder Bremswächter oder Mittel zur Herabsetzung des Bremsmomentes. Wenn der Anbau einer mechanischen Bremse durchführbar ist, ist das Eldro-Gerät (Abschn. 38) als bestes zu empfehlen.

## V. Beispiele ausgeführter Anlagen.

Am wichtigsten waren, wie schon im ersten Abschnitt erwähnt, die hohen Drehzahlen bei der Bearbeitung von Holz. So sind auch in der Holzindustrie die meisten und ausgedehntesten Schnellfrequenzanlagen ausgeführt worden. In diesem Abschnitt werden daher zunächst die typischen schnellfrequenzgetriebenen Holzbearbeitungsmaschinen behandelt werden, nachdem einleitend ein Sondermotor für hohe Drehzahlen beschrieben worden ist. Ein weiteres wichtiges Gebiet für den Schnellfrequenzantrieb sind die Elektrowerkzeuge. Leicht zu bearbeiten sind die Kunststoffe und so beginnt sich, abgeleitet von den Maschinen der Holzindustrie, auch hier der Schnellfrequenzantrieb durchzusetzen. Ebenso sind Sondermaschinen der Holzbearbeitung, wie beispielsweise die Oberfräse, unmittelbar in die Leichtmetallindustrie übernommen worden. In der Metallindustrie schließlich sind bisher hauptsächlich bei Schleifmaschinen Schnellfrequenzantriebe benutzt worden. Aus allen diesen Gebieten soll im folgenden eine Auswahl kennzeichnender Maschinen gegeben werden. Die Beispiele können die allerneuesten Anwendungen der Schnellfrequenzen nur zum Teil aufzeigen, da viele neue Ausführungen noch in Versuchsfeldern laufen und außerdem von einigen Werken, die derartige Antriebe in ihrem Betriebe benutzen oder die diese entwickelt haben, Angaben und Bildunterlagen nicht zu erhalten sind.

Trotzdem wird dieser Abschnitt so vielgestaltige Beispiele geben, daß sie als Anhalt oder Anregung für eigene neue Planungen dienen können.

### A. Sondermotor für hohe Drehzahlen.

Der in den Abb. 78 u. 79 gezeigte Sondermotor hat ein Gewicht von 4,1 kg bei einer Länge von 210 mm ohne Wellenstumpf und leistet 0,24···0,34 bzw. 0,5···1 PS je nach den zur Speisung benutzten Frequenzen. Der Motor ist mit Wälzlagern ausgerüstet und wird mit Außenkegel oder Innenkegel mit Überwurfmutter als Zangenspannung serienmäßig geliefert. Zum Festhalten beim Werkzeugwechsel dient der in Abb. 78 sichtbare Vierkant. Tabelle 5 ist nach den Angaben der Herstellungsfirma aufgestellt. Als Drehzahlen sind die Richtwerte der

Lastdrehzahlen angegeben, die in Abschnitt „Normung“ näher erläutert sind. Da ein Frequenzumformer zur Erzeugung der hohen Frequenzen notwendig ist, so ist



Abb. 78. Sondermotor für hohe Drehzahlen. 1 PS bei 21000 U/min (Sachsenwerk).

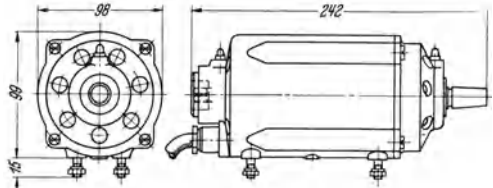


Abb. 79. Abmessungen des Sondermotors (Sachsenwerk).

die Ausführung mit nur einem Arbeitsmotor am teuersten. Für einen Arbeitsmotor mit 0,82 PS bei 16000 Umdrehungen und dem dazugehörigen Frequenzwandler kostet die Anlage ungefähr 500 RM. Für drei Arbeitsmotoren kostet die Anlage rund 1000 RM. und für 6 Motoren schließlich 1500 RM., so daß hier der einzelne Arbeitsmotor nur noch die Hälfte des einzeln betriebenen Motors kostet.

Tabelle 5. Motordauerleistung.

Lastdrehzahl	Nennfrequenz Per/s	Watt	PS	Verbrauch kVA
2800	50	150	0,24	0,3
4000	75	200	0,27	0,4
5300	100	250	0,34	0,5
8000	150	370	0,5	0,66
10000	200	470	0,67	0,85
16000	300	600	0,82	1,1
21200	400	750	1	1,3

Dieser Sondermotor ist seiner sorgfältigen Bauart und seiner geschlossenen zweckmäßigen Bauform wegen geeignet, in großem Maße in Sondermaschinen, für die kein eigener Motor entwickelt werden kann, eingebaut zu werden.

bigen Bauform wegen geeignet, in großem Maße in Sondermaschinen, für die kein eigener Motor entwickelt werden kann, eingebaut zu werden.

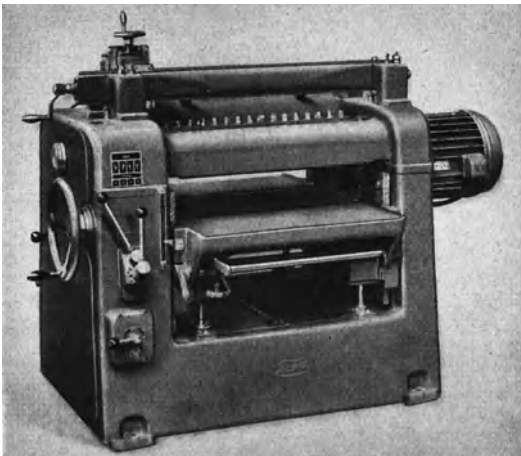


Abb. 80. Dickthohelmaschine Schnellfrequenzgespeister Anbaumotor (Siemens).

## B. Beispiele aus der Holzindustrie<sup>1</sup>.

**43. Hobelmaschinen.** In der Holzindustrie werden hauptsächlich Hobel- und Fräsmaschinen mit Schnellfrequenz betrieben. Es liegen die Betriebserfahrungen vieler Jahre vor. Zunächst hat man normale Käfigläufermotoren, die für 220 u. 380 Volt gewickelt waren, an die Schnellfrequenzen 75 Per/s und 100 Per/s angeschlossen. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 80. Diese Dickthohelmaschine hat als Antrieb einen Anbaumotor in geschlossener Ausführung mit Rippenkühlung. Die Motoren sind in der üblichen

Weise für 220/380 Volt gewickelt und leisten je nach der Type zwischen 2 und 19 kW. Die Läufer dieser Motoren sitzen auf der verlängerten Messerwelle. Die-

<sup>1</sup> Vgl. Werkstattbuch Heft 78 „Maschinen und Werkzeuge für die spangebende Holzbearbeitung“.

selben Motoren können ohne weiteres an Schnellfrequenz 75 Per/s bei 285 Volt oder an 100 Per/s bei 380 Volt angeschlossen werden und laufen dann mit 4000 bzw. 5300 U/min. Bei Dickenhobelmaschinen läuft die Messerwelle ständig mit derselben Drehzahl und nur der Vorschub wird geändert. Die Maschine wird also nur an eine der drei obigen Frequenzen angeschaltet.

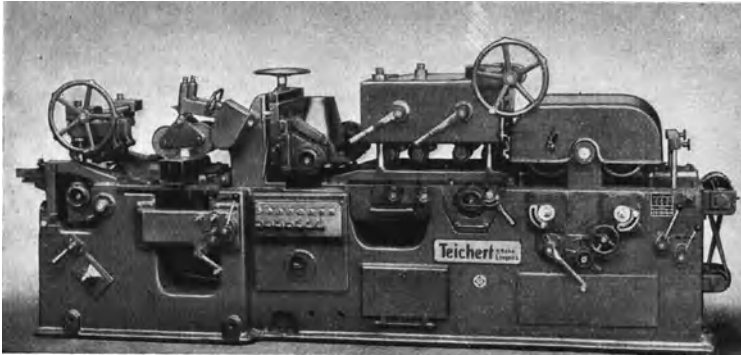


Abb. 81. Fußbodenbretterhobelmaschine (Teichert). 5 Messerwellenmotoren je 4,6 kW bei 5300 U/min (Siemens).

Die in Abb. 81 gezeigte Fußbodenbretter-Hobelmaschine veranschaulicht den Begriff des Maschinennetzes (Abschn. 26). Die Maschine hat 5 Messerwellen, deren Motoren alle mit Schnellfrequenz von 100 Per/s gespeist werden, so daß die

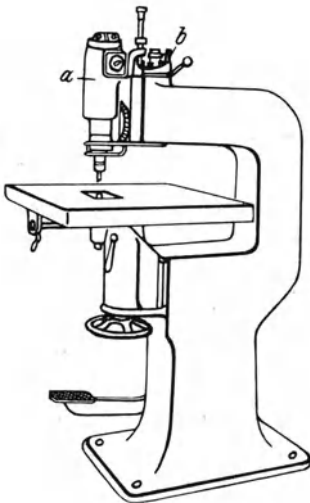


Abb. 82. Oberräse mit schnelfrequenzgespeistem Motor (Elze & Heß). Der Fußhebel dient zum Anheben des Fräskopfes bei Werkstückwechsel.

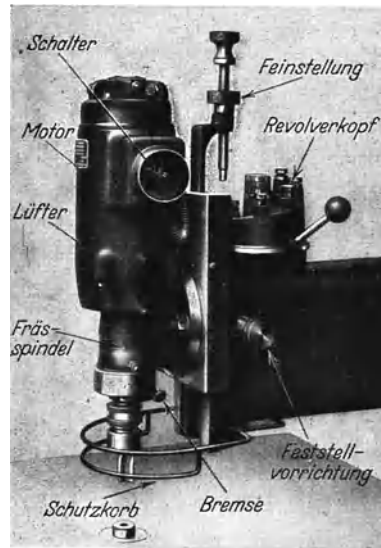


Abb. 83. Oberteil einer Ständer-Oberräse (Elze & Heß).

Motoren also mit 5300 U/min laufen. Die Motoren haben eine Leistung von je 4,6 kW. Auch hier sind alle Motoren in geschlossener Bauart mit Rippenkühlung ausgeführt, da bei diesen Hobelmaschinen außerordentlich viel Hobelspäne abfallen und sehr viel Holzstaub aufgewirbelt wird. Die Motoren werden über Druckknöpfe durch Luftschütze gesteuert. Die Steuerung ist so verriegelt, daß der

Vorschubmotor erst eingeschaltet werden kann, wenn sämtliche Messerwellen laufen. Wenn ein Messerwellenmotor wegen Überlastung ausfällt, wird auch der Vorschub

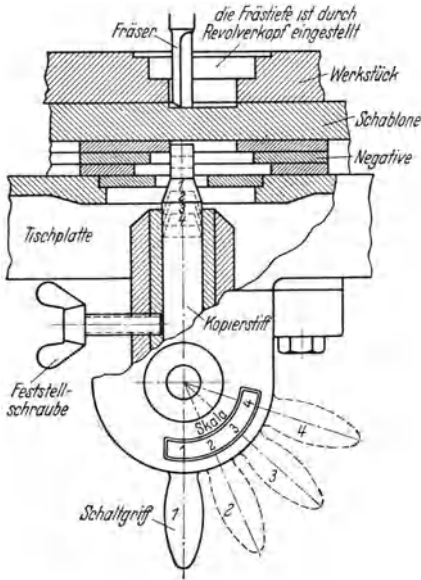


Abb. 84. Kopiervorrichtung für Mehrschablone.



Abb. 85. Fuchsschwanzgriffschablone in Arbeitsstellung (Elze & Heß). Die Schablone hat auf der Unterseite eine Aussparung, in der die Kopierrolle läuft. Vorschub von Hand. Ungefähr 3...4 m/min.

ausgeschaltet. Einzelne Motoren können, wenn sie für eine Bearbeitung nicht gebraucht werden, abgeschaltet werden, ohne daß die Verriegelung der anderen Motoren dadurch aufgehoben wird.

**44. Oberfräsen.** Die Oberfräsen sind die ersten Maschinen gewesen, die schon frühzeitig mit Schnellfrequenz betrieben wurden. Um mit einem ein- oder zweischneidigen Werkzeug hinreichend hohe Schnittgeschwindigkeiten erzielen zu können, war es notwendig, sehr hohe Drehzahlen zu erreichen. Da aber außerdem bei der Holzbearbeitung

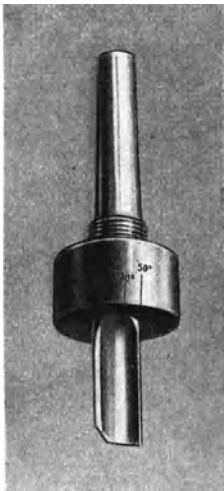


Abb. 86. Einschneidiges Oberfräs Werkzeug im Futter (Elze & Heß).

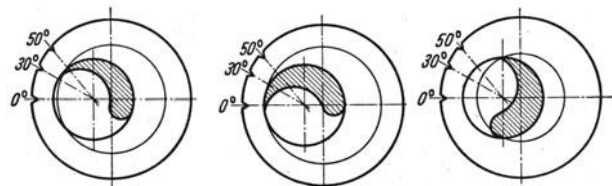


Abb. 87. Einstellung des Werkzeuges im außermittigen Spannfutter (Elze & Heß).

viel Staub auftritt, mußte eine robuste Antriebsart gefunden werden. So entstand die schnellfrequenzangetriebene Oberfräse (Abb. 82). Der Motor ist mit der Frässpindel durch eine elastische Kupplung verbunden und sitzt auf einem durch Fußhebel beweglichen Schlitten. Wie Abb. 83 zeigt, können mit dem Revolverkopf verschiedene Frästiefen eingestellt werden. Dazu wird dann der Kopierstift

jeweils in die entsprechende Stellung gebracht, wie aus Abb. 84 ersichtlich ist. Der Fräser (Abb. 86 u. 87) ist ein einschneidiges, gleichmittiges Werkzeug, das

nicht hinderdreht oder hinterschliffen zu werden braucht. Er wird in ein außermittig spannendes Futter aufgenommen, wie Abb. 86 zeigt. Um eine richtige Schnittgeschwindigkeit einzuhalten, werden folgende Fräserdurchmesser für die Lastdrehzahlen der verschiedenen Schnellfrequenzen empfohlen:

Bei allen Außenfräsarbeiten lassen sich diese Durchmesser fast immer anwenden. Eine ausführliche Tabelle über die benötigten Futter, die erforderlichen Fräser und die genauen Winkelstellungen findet sich an der unten angegebenen Stelle<sup>1</sup>. Welchen Vorteil in wirtschaftlicher Beziehung die Einsetzung von Oberfräsen bringen kann, zeigt Abb. 88 für die Bearbeitung von 12 mm Sperrholz. Ähnliche Beispiele lassen sich, wenn auch nicht immer mit so deutlichem Unterschied für fast alle Holzbearbeitungen mittlerer und leichterer Art aufstellen.

Tabelle 6. Lastdrehzahl und Fräserdurchmesser.

U/min	Schnellfrequenz	Fräserdurchmesser mm
	Per/s	
10600	200	30
13200	250	23
16000	300	20
21200	400	14

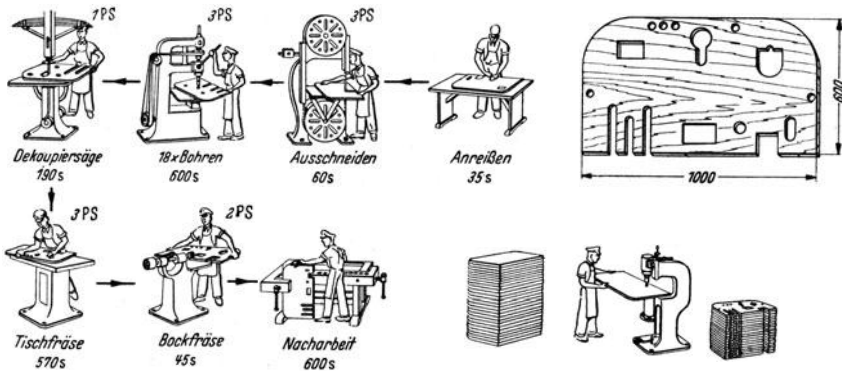


Abb. 88. Vergleich der Herstellungsgänge eines Arbeitstückes aus 12 mm Sperrholz.

Das sicher freischneidende und daher nie heißwerdende einfache Werkzeug und die erzielbare hohe Schnittgeschwindigkeit haben der Oberfräse auch Eingang in andere Industrien, und zwar vornehmlich in die Kunststoffindustrie und die Leichtmetallbearbeitung verschafft. Wesentlich dazu beigetragen hat aber der robuste einfache Antrieb durch einen schnellfrequenzgespeisten Kurzschlußläufermotor. Dieser Direktantrieb hat es auch erst ermöglicht, eine zweckmäßige, geschlossen wirkende und deshalb schöne Werkzeugmaschine zu schaffen.

### C. Beispiele aus der Metallindustrie.

**45. Schnellfrequenz-Krafthandwerkzeuge.** Die Krafthandwerkzeuge steigern die Leistungsfähigkeit ganz beträchtlich, da sie vom Arbeiter nur die Führung des Werkzeuges verlangen, während sie selbst die benötigte Arbeitsleistung liefern. Diese Arbeitsleistung ist außerdem ein Vielfaches der Leistung, die der Arbeiter selbst hergeben könnte. Ein Haupt Gesichtspunkt für die Anwendbarkeit der Krafthandwerkzeuge ist die zu erwartende Wirtschaftlichkeit. Besonders sorgfältig muß diese Frage geprüft werden, wenn die Kraft zum Betrieb der Werkzeuge durch einen eigenen Maschinensatz erst erzeugt werden muß. Dies ist beim Preßluft- und beim Schnellfrequenzantrieb der Fall. Da der Preßluftantrieb aber wegen

<sup>1</sup> Z. Holz als Werkstoff. 1. Jg. (1932). Berlin: Julius Springer.

der großen Verluste im Kompressor und in den Leitungen und Werkzeugen eine sehr große Kraftversorgungsanlage im Vergleich zur Leistung benötigt, so scheidet er beim Vergleich mit den Schnellfrequenz-Krafthandwerkzeugen schon von vornherein aus. Seine trotzdem häufige Verbreitung besonders in Flugzeugwerken verdankt das Preßluftwerkzeug seinem leichteren Gewicht. So wiegt das in Abb. 8 gezeigte Preßluftwerkzeug nur 380 g. Nachteilig sind aber die Unwirtschaftlichkeit und der große Drehzahlabfall bei Belastung.

a) Unempfindlichkeit. Außer der Wirtschaftlichkeit wird vom Krafthandwerkzeug verlangt, daß es unempfindlich, ausreichend kräftig und nicht zu schwer ist. Der gleichzeitigen Erfüllung dieser drei



Abb. 89.  
Läufer eines Schnellfrequenz-Krafthandwerkzeuges (Bosch).

Forderungen wird das Krafthandwerkzeug, das mit Schnellfrequenz getrieben wird, weitgehend gerecht. Der robuste Käfigläufer (Abb. 89) ist gerade für Handwerkzeuge bestens geeignet. Der elektrische Teil erfordert damit überhaupt keine Wartung, so daß bei der verhältnismäßig einfachen mechanischen Wartung immer ein betriebsfertiges Werkzeug zur Verfügung steht. Anders dagegen ist es beim Universalmotor, dessen Läufer Abb. 90 im Vergleich zum Käfigläufer zeigt. Wegen des starken Absinkens der Drehzahl mit der Belastung muß die Leerlaufdrehzahl sehr hoch liegen. Die beiden abgebildeten Läufer gehören zu Motoren gleicher Leistung, der Universalmotor

braucht aber doppelt so viel U/min im Leerlauf. Diese hohen Drehzahlen machen ein sehr sorgfältiges Vergießen der Wicklungen des Läufers und ein genaues

Auswuchten erforderlich. Außer diesen empfindlichen Teilen hat der Universalmotor aber auch noch einen Kollektor, der empfindlich ist. Die Anfälligkeit für Betriebsstörungen ist also beim Universalmotor bedeutend höher als beim Schnellfrequenzmotor.

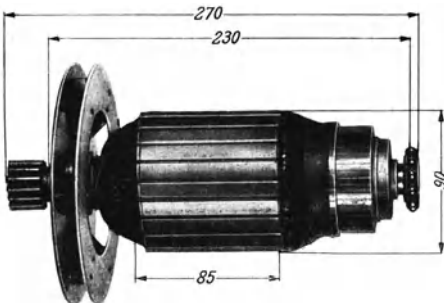
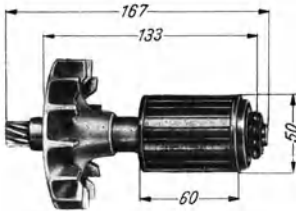


Abb. 90. Vergleich der Läufer eines Schnellfrequenz- und eines Allstrom-Krafthandwerkzeuges (Bosch).

Beiden Arten von Elektrowerkzeugen ist jedoch eine Störungsquelle gemeinsam, und zwar die Empfindlichkeit der Zuleitungen und vor allem der Anschlüsse im Werkzeug. Diese Empfindlichkeit besteht aber bei den Preßluftwerkzeugen in noch viel größerem Umfange.

Rein mechanisch werden Krafthandwerkzeuge heute so starr gebaut, daß sie dem rauen Werkstattbetrieb voll gewachsen sind.

b) Leistung. Das Krafthandwerkzeug muß vor allem auch bei starker Belastung noch genügend durchziehen. Um nicht zu hohe Leerlaufdrehzahlen zu

haben, ist es erwünscht, daß das Werkzeug möglichst über den ganzen Bereich der Belastung eine annähernd gleiche Drehzahl beibehält. Abb. 91 zeigt die ungefähre Drehzahlcharakteristik der drei wichtigsten Krafthandwerkzeugarten. Von einer gemeinsamen Leerlaufdrehzahl an bleibt nur beim Schnellfrequenzantrieb die Dreh-

zahl fast konstant, während sie beim Preßluft- und beim Allstromwerkzeug mit der Belastung stark absinkt. Dieses Absinken der Drehzahl ist übrigens auch deutlich zu hören. Der hohe singende Ton derartiger Werkzeuge fällt beim Ansetzen an das Werkstück zu einem tiefen brummenden Ton ab. Das Schnellfrequenzwerkzeug hat dagegen nur einen Drehzahlabfall von  $6 \cdot 8\%$ , der nur schwer zu hören ist. Durch diese gleichbleibende Drehzahl hat das Schnellfrequenzwerkzeug eine große Spanleistung. Es „schafft“ also mehr als gleich schwere andere Werkzeuge.

c) Gewicht. Das Gewicht eines Handwerkzeuges ist bestimmend für seine Anwendbarkeit. In der Tabelle 7 sind die Gewichte einiger Werkzeuge gegenübergestellt.

Das niedrigere Gewicht bei derselben Leistungsabgabe erklärt sich aus dem einfachen Aufbau und daraus, daß ein Motor mit höherer Drehzahl mehr Leistung (bezogen auf sein Gewicht) als ein niedrigdrehzahliger Motor abgibt. Dabei sind in obiger Zusammenstellung für die Schnellfrequenzwerkzeuge teilweise 15% zu niedrige Leistungsabgaben angegeben. Die verhältnismäßig geringe Gewichtsersparnis bei der Blechschere hat ihre Ursache darin, daß der Scheidenteil, der bei beiden Werkzeugen gleichviel wiegt, ziemlich schwer im Vergleich zum elektrischen Teil ist. Preßluftwerkzeuge werden in ganz kleinen Abmessungen gebaut, so daß sich also ganz leichte Werkzeuge ergeben. Diese haben bisher

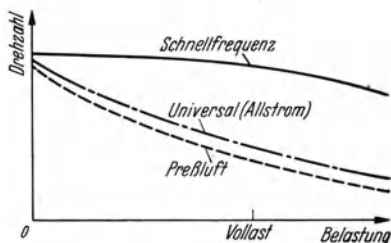


Abb. 91. Ungefähre Drehzahlkennlinien von Krafthandwerkzeugen (Bosch).

Tabelle 7. Gewicht von Elektrohandwerkzeugen.

Krafthandwerkzeug	Leistungsabgabe Watt	Allstromwerkzeug kg	Schnellfrequenzwerkzeug kg	Gewichtersparnis %
Bohrmaschine . .	300	8,5	3,9	54
Bohrmaschine . .	850	21,4	13,4	38
Schleifmaschine .	500	13,5	6,1	55
Schleifmaschine .	850	21,5	9	58
Blechschere . .	100	3,5	2,8	20

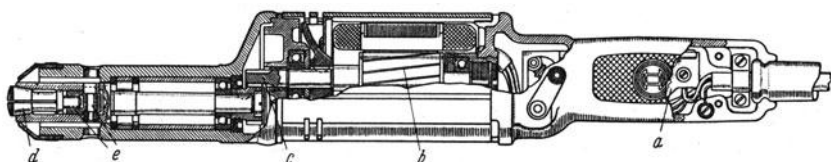


Abb. 92. Schnitt durch einen Schnellfrequenz-Handmotor (Bosch).

a Momentenschalter; b Kurzschlußanker; c Antriebsritzeln; d Spannange; e Spannhülse und Exzenterbolzen.

noch keine Konkurrenz, da sehr kleine Schnellfrequenzmotoren noch nicht gebaut werden. Von den Größen an, bei denen gleichkräftige Schnellfrequenzwerkzeuge vorhanden sind, sind die Preßluftwerkzeuge ungefähr gleich schwer bis 50% schwerer.

Die Schnellfrequenz-Handwerkzeuge können einfach und robust aufgebaut sein. Abb. 92 zeigt einen Schnitt durch einen Handmotor, Abb. 93 die Außenansicht desselben Handmotors.



Abb. 93. Ansicht des Schnellfrequenz-Handmotors 0,1 kW bei 2800 U/min.

Diese Werkzeuge werden in Werkstätten meistens an ein fest verlegtes Netz angeschlossen. Auf Außenstellen wird zur Speisung der Werkzeuge oft ein fahrbarer Frequenzwandler benutzt, wie ihn Abb. 94 zeigt. In den folgenden Abb. 95 bis 99 sind weitere Schnellfrequenz-Krafthandwerkzeuge gezeigt.

**46. Schleifmaschinen.** Wie notwendig hohe Drehzahlen auch für Metallbearbeitung sind, ist aus den Schaubildern am Anfang des Buches zu ersehen. Trotzdem sind bisher wirklich hohe Drehzahlen nur beim Schleifen angewandt worden. Schnellaufende Drehbänke und Fräsmaschinen, insbesondere für die feinmechanische Fertigung und für die Leichtmetall- und Kunststoffbearbeitung sind bisher



Abb. 94. Fahrbarer Frequenzwandler (Bosch).



Abb. 95. Schnellfrequenz-Handbohrmaschine bohrt in Stahl bei 5 mm Durchm. (Bosch).



Abb. 96. Schnellfrequenz-Tellerschleifer 0,5 kW bei 2700 U/min (Bosch).



Abb. 97. Schnellfrequenz-Polierer 0,3 kW bei 1100 U/min (Bosch).



Abb. 98. Schnellfrequenz-Blechscherer schneidet Blech bis 1,5 mm Stärke (Bosch).



Abb. 99. Schnellfrequenz-Schrauber bis 8 mm Schrauben ohne Vorbohren in Holz (Bosch).

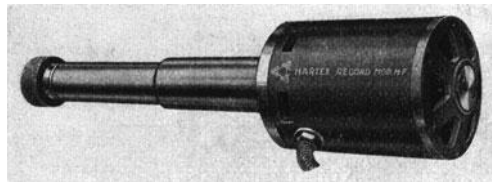


Abb. 100. Schnellfrequenz-Innenschleifspindel (Hartex).

noch nicht mit Schnellfrequenzantrieb ausgerüstet worden. Nach den ausgezeichneten Erfahrungen, die mit Schnellfrequenzantrieben gemacht worden sind, wird aber auch diese Entwicklung nicht mehr lange auf sich warten lassen. Von den bisher ausgeführten Schleifmaschinenantrieben sollen hier einige markante Beispiele gezeigt werden.

Bei Innenschleifmaschinen hat sich eine immer höhere Drehzahl als notwendig erwiesen, um bei kleinsten Schleifscheibendurchmessern die für einen guten Schliff erforderlichen hohen Schnittgeschwindigkeiten zu erhalten. Um eine weitgehende Anpassung an den jeweiligen Schleifscheibendurchmesser zu erreichen und um



gleichzeitig den Vorteil der unmittelbar angetriebenen Arbeitsspindel zu haben, ist die in Abb. 100 gezeigte Innenschleifspindel geschaffen worden. Die verschiedenen Drehzahlen werden durch Auswechseln der Schleifspindeln und durch Speisung der Spindeln mit verschiedener Frequenz erzielt. Von polumschaltbaren Wicklungen ist abgesehen worden, um die Spindeln nicht zu unhandlich werden zu lassen.

Die in Abb. 101 gezeigte Flächenschleifmaschine soll mit 2000 U/min laufen. Da diese Drehzahl außerdem von der Belastung unabhängig sein soll, konnte nur ein Asynchronmotor als Antrieb in Frage kommen, wenn gleichzeitig eine weitgehende Robustheit des Motors verlangt wird. Die Drehzahl 2000 U/min ist aber mit einem normalen Drehstrom-Asynchronmotor nicht zu erreichen. Daher hat man einen Frequenzumformer eingebaut, der Schnellfrequenz 75 Per/s liefert. An einem vierpoligen Motor ergibt sich damit als Lastdrehzahl 2000 U/min.

Ähnlich war die Planung bei der Kurbelzapfenschleifmaschine (Abb. 102). Durch einen Frequenzumformer wird die Schleifspindel mit 150 Per/s gespeist und läuft dann mit 8000 U/min.

Die Zylinderschleif- und Honmaschine (Abb. 103) vereinigt Frequenzumformung und Polumschaltung mit mechanischer Über- und Untersetzung. Ein polumschaltbarer Motor, 4 auf 2 Pole, wird durch Normalfrequenz und durch Schnellfrequenz 75 Per/s gespeist. In Verbindung mit

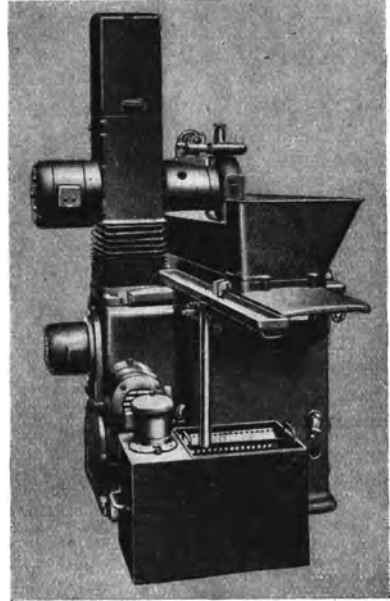


Abb. 101. Schnellfrequenz-Flächenschleifmaschine (Siemens).

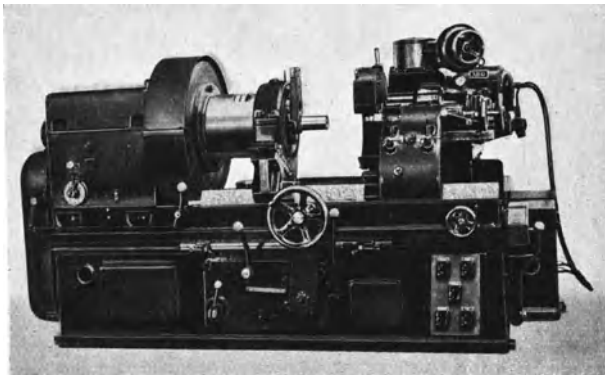


Abb. 102. Kurbelzapfenschleifmaschine mit Schnellfrequenzantrieb (AEG.).

einer Übersetzung 1 : 2 und Untersetzung 1 : 20 werden folgende Lastdrehzahlen erzielt: 70 — 100 — 140 — 200 — 1400 — 2000 — 2800 — 4000 — 5600 — 8000 U/min. Die niedrigen Drehzahlen werden beim Honen (Ziehschleifen) und die

hohen Drehzahlen beim Schleifen benutzt. Der Frequenzumformer steht, ausgeführt als Zweimaschinensatz, hinter der Maschine.

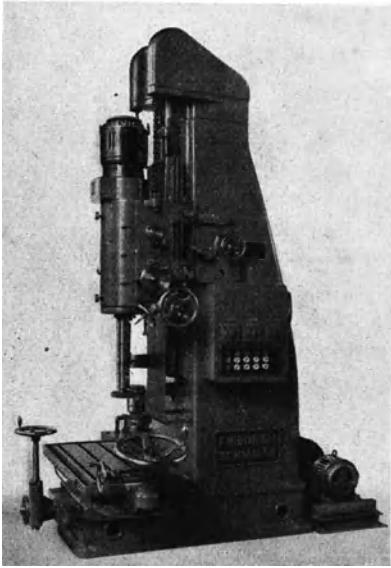


Abb. 103. Schleif- und Ziehschleif- (Hon-) Maschine für Zylinder (Friedr. Schmalz). Frequenzwandler hinter der Maschine.

Diese Beispiele sind nur eine kleine Auswahl der schon ausgeführten Anlagen. In der Holzindustrie sind noch zahlreiche hier nicht aufgeführte mit Schnellfrequenz betriebene Maschinen seit langer Zeit in Betrieb. In der optischen Industrie werden Zelluloid- und Kunststoffe auf Unterfräsen bearbeitet, die gleichfalls mit Schnellfrequenz gespeist sind. Hierbei hat der Käfigläufer noch einen besonderen Vorteil. Bei den üblichen Schleifringläufern besteht die Gefahr, daß die Funken, die am Schleifring gezogen werden, den hochexplosiven Zelluloidstaub entzünden. Der schnellfrequenzgespeiste Käfigläufermotor ist also zu seinen vielen anderen Vorteilen hier auch noch feuersicherer als alle anderen Antriebe.

Der beschränkte Platz eines Werkstattbuches verbietet es, noch weitere Beispiele anzuführen. Trotzdem dürfte dieser Abschnitt einen Überblick über die Möglichkeiten des Schnellfrequenzantriebes gegeben haben. Bei der Planung einer Anlage wäre außer den Vorbedingungen für den Umformer und die Mo-

tore noch zu berücksichtigen, daß sich die Anlage später erweitern läßt und daß ganz bestimmte Richtwerte für die Drehzahlen einer guten Arbeitsvorbereitung dienlich sind. Diese Gesichtspunkte werden im abschließenden Abschnitt „Normung“ behandelt.

## VI. Normung.

### A. Grundlagen der Normung.

**47. Normungszahlen und Reihen.** Bei der Festlegung (Normung) technischer Größen spielt die Stufung eine entscheidende Rolle. Der Mensch hat das Bedürfnis, eine Größe um ein bestimmtes Verhältnis größer zu machen, um sie von dem nächstkleineren Wert zu unterscheiden. Durch Zuschlag eines festgelegten Prozentsatzes zum ersten Wert entsteht also der zweite Wert. Stellt man nach diesem Grundsatz mehrere Zahlenwerte zusammen, so erhält man eine Reihe. Ist der Zuschlagsprozentsatz beispielsweise 25%, so ergibt sich jeder weitere Wert durch Multiplikation eines Wertes mit 1,25. Dieser Wert heißt der Stufensprung. Eine solche Reihe, die durch fortgesetzte Multiplikation mit einem bestimmten Faktor entsteht, heißt geometrische Reihe. Der Gegensatz hierzu ist die arithmetische Reihe, bei der der Abstand der einzelnen Glieder voneinander derselbe bleibt. Diese Reihe würde also z. B. die Zahlengruppe 3 — 4 — 5 am Anfang und die Gruppe 98 — 99 — 100 am Ende enthalten, da ja der Abstand (hier 1) derselbe bleiben muß. Am Anfang beträgt der Stufensprung (von 3 auf 4) 33% und am Ende (99 auf 100) 1%. Diese Stufungsart ist also denkbar ungünstig und deshalb sind in der Technik schon seit jeher geometrisch gestufte Reihen benutzt worden.

Ein Hauptmerkmal unseres Zahlensystems ist der Aufbau auf der Grundzahl 10, das Dezimalsystem. Den Abstand von einer Zehnerpotenz zur nächsten (also von  $1 \cdots 10$  oder von  $100 \cdots 1000$ ) nennt man eine Dekade. Die Dekaden hat man nun, um zu den Normungszahlen zu kommen, in zunächst 10 geometrische Sprünge unterteilt. Diese Reihe heißt R 10 und hat den Stufensprung 1,25. Durch Einfügen des geometrischen Mittels zwischen die Werte dieser Reihe ergab sich die Reihe R 20 und daraus dann in derselben Art die Reihe R 40. Diese Reihe hat den Stufensprung  $\sqrt[40]{10} \approx 1,06$  — jedes Glied ist also um 6% größer als das vorhergehende — und ist für technische Belange als feinste Reihe anzusehen. Die Hauptwerte, das sind für den praktischen Gebrauch abgerundete Werte, weichen von den Genauwerten trotz der Abrundungen um nicht mehr als 1,26% ab. Diese Werte und Reihen sind im Normblatt Din 323 festgelegt.

Andere Reihen als die Grundreihen (die sog. abgeleiteten Reihen) lassen sich bilden, wenn man aus einer bestimmten Grundreihe nur jedes zweite, dritte, vierte usw. Glied auswählt und zu einer neuen Reihe zusammensetzt. So entsteht beispielsweise die Verdoppelungsreihe dadurch, daß man aus der Reihe R 10 jeden dritten Wert nimmt. Diese Reihe heißt dann R 10/3. Will man die Reihe am Anfang oder Ende begrenzen, so schreibt man den Anfangs- oder Endwert in Klammern dazu. R 40/3 (2800 $\cdots$ ) bezeichnet also eindeutig die Reihe 2800, 3350, 4000, 4750, 5600 usw.

Beim Rechnen mit Normungszahlen können die gewohnten arithmetischen Rechenmethoden nicht genau übernommen werden. So ergibt  $8 \times 8$  nicht 64, sondern die Normungszahl 63. Dies kommt daher, daß die tatsächliche Normungszahl ja nicht 8 heißt, sondern 7,9433. Wenn man also mit den (abgerundeten) Hauptwerten rechnet, muß man nachher den dem Ergebnis am nächsten liegenden Normungszahlwert nehmen. Da die Hauptwerte nach der negativen und positiven Seite abweichen, ist zudem anzunehmen, daß sich die Abweichungen beim Rechnen aufheben. Wählt man dann außerdem den Zahlenwert aus der Reihe R 40, so kann das Ergebnis höchstens um 3% falsch sein. Diese Genauigkeit genügt aber für die allermeisten technischen Belange vollständig. Das Rechnen mit Normungszahlen hat dabei den unschätzbaren Vorteil, daß bei allen Rechnungen wieder Normungszahlen herauskommen, sofern die Ausgangszahlen Normungszahlen waren. Dies ist möglich, weil die technisch wichtigen Zahlen  $\pi$  und  $\sqrt{2}$  sich in die Normungszahlenreihen einfügen lassen.

**48. Harmonische Reihe.** Den abgeleiteten Reihen, die nach dem schon geschilderten Grundsatz gebildet werden, aus einer der Grundreihen jeweils bestimmte Glieder herauszunehmen, ist als Hauptmerkmal ein gleichbleibender Stufensprung zu eigen. An sich ist es aber auch möglich, eine Reihe zu bilden, bei der der Stufensprung sich ändert. Diese Änderung kann einmalig nach einer bestimmten Anzahl von Gliedern vorkommen, um aus einer feinstufigen Reihe, z. B. für den oberen Zweig eine grobe Stufung zu erhalten. Ebenso wäre es aber möglich, eine Reihe mit zwei verschiedenen Stufensprüngen, die sich abwechseln, zu bilden. Um nun einen Anhalt zu finden, welcher Reihe irgendwelche Zahlzusammenstellungen am besten angenähert sind, bedient man sich des sog. NZ-Papieres. Dieses Kurvenpapier (Abb. 104) gibt als Abszisse die Gliednummer der einzelnen Zahlenwerte einer Reihe an, also wird das erste Glied über der Gliednummer 1, das zweite Glied der zu untersuchenden Zahlenreihe über der Gliednummer 2 usw. aufgetragen. Die Ordinate gibt im logarithmischen Maßstab die Zahlenwerte selbst an. Ein-gezeichnet sind die Werte der Reihe R 40. Es sind also alle in den Grundreihen und in den davon abgeleiteten Normungsreihen vorkommenden Zahlenwerte vor-

handen. Im Gegensatz zu den sonst gewohnten logarithmischen Maßstäben (z. B. Rechenschieber) sind die Abstände hier gleich, da die eingetragenen Zahlen, Normungszahlen der Reihe R 40, geometrisch mit gleichem Stufensprung gestuft sind. Die eingetragenen Geraden stellen die Grundreihen und einige wichtige abgeleitete Reihen dar, und zwar jeweils von 1,0 anfangend. Wichtig ist bei diesen Reihen nicht die Lage, also der Anfangspunkt, sondern die Neigung, die ein unmittelbares Maß für den Stufensprung ist. Die Werte einer zu untersuchenden Reihe werden nun in dieses NZ-Papier eingetragen. Wenn alle einzelnen Werte Normungszahlen sind, liegen die Punkte immer auf den waagerechten und senkrechten Linien. Sonst müssen sie, wie bei anderem Kurvenpapier auch, zwischen den waagerechten Reihen interpoliert eingetragen werden. Auf den senkrechten Linien, die ja nur die Gliednummer, also eine reine Ordnungszahl angeben, müssen die Punkte der zu

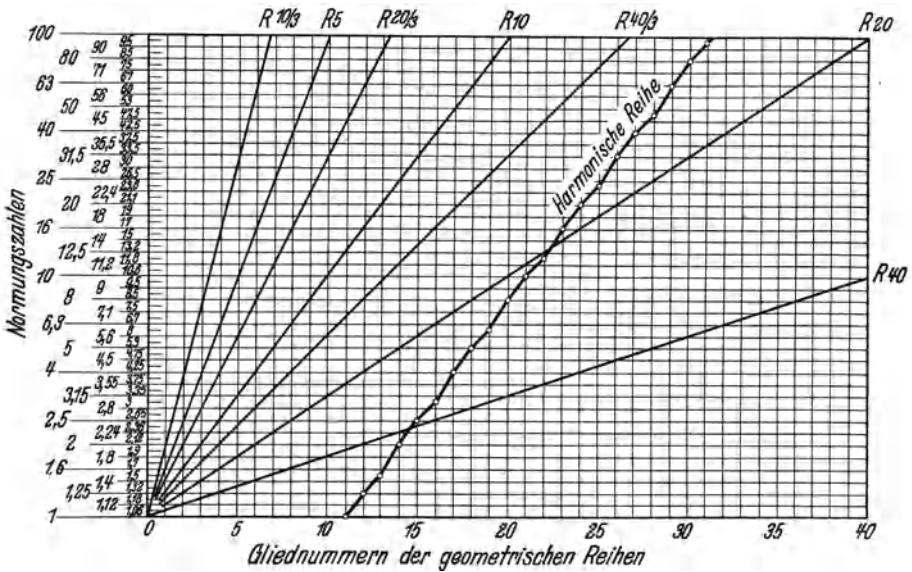


Abb. 104. NZ-Papier nach Prof. Kienzle. Das Papier dient dazu, feststellen zu können, welcher Normreihe eine gegebene Reihe am nächsten kommt. Die harmonische Reihe, die die Grundlage der Frequenznormung darstellt, ist kräftiger eingetragen. Sie entspricht der Reihe R 10.

untersuchenden Zahlenreihe immer liegen. Durch Parallelverschieben der eingetragenen, die zu untersuchende Reihe charakterisierende Linie, stellt man fest, welcher geometrischen Reihe sie am besten angenähert ist. Die Linie kann nur bei gleichbleibender geometrischer Stufung eine Gerade sein. Bei sich ändernder Stufung wird sie gebogen, bei mehreren abwechselnden Stufensprüngen eine Zickzacklinie.

In Abb. 104 ist außer den Richtstrahlen eine besonders hervorgehobene Linie eingezeichnet. Diese Linie stellt die sog. „harmonische Reihe“ dar, die auf der ISA-Tagung 1939 in Helsinki bekannt gemacht wurde. Sie ist eine Reihe mit verschiedenen, sich ständig wiederholenden Stufensprüngen und geht von den Zahlen 4 — 5 — 6 aus. Die anschließenden Werte erhält man durch fortgesetztes Verdoppeln oder Halbieren dieser Dreiergruppe. Nach oben setzt sich die Reihe also fort mit den Werten 8; 10; 11,8; dann 16; 20; 23,6 usw. und nach unten mit 3; 2,5; 2; dann 1,5; 1,25; 1 usw. Da auch diese Reihe als eine Art abgeleitete Reihe anzusehen ist, enthält sie also nur Normungszahlen. Sie ist aber durch Rechnen entstanden und daher gilt auch hier die Normungszahlenrechenregel: „Nicht das

arithmetische Resultat angeben, sondern die nächstliegende Normungszahl“. Daher erscheint in der obigen Reihe als Verdoppelung von 6 der Wert 11,8 und dann, auch arithmetisch richtig, weiter der Wert 23,6.

Die harmonische Reihe hat einen ungleichen Stufensprung. Um nun festzustellen, welcher Grundreihe sie angenähert ist, sind ihre Werte, vom Wert 1 beginnend, in der Abb. 104 aufgetragen. Um die Richtstrahlen nicht zu überdecken, ist angenommen, daß dieser Wert 1 schon das elfte Glied ist, damit fängt die Linie der harmonischen Reihe also bei Gliednummer 11 an. Die Verbindungslinie der eingetragenen Punkte läuft mit dem Richtstrahl R 10 parallel. Sie ist zwar nicht gerade, aber die Zickzackform ist nur schwach. Da nun die Grundreihe R 10 den Stufensprung 1,25 hat, d. h. also jeder Wert gegenüber dem nächstniedrigeren um 25% zugenommen hat, so muß die ihr parallele harmonische Reihe auch den mittleren Stufensprung 1,25 haben. Diese Stufung ist für die Schnellfrequenznormung fein genug.

### B. Normung der Schnellfrequenzwerte.

**49. Frequenznormung.** Es ist bei der Schnellfrequenznormung nicht möglich, von Drehzahlen auszugehen, da die Drehzahlabfälle je nach der Erzeugungsart zu unterschiedlich sind und außerdem darauf Rücksicht genommen werden muß, daß die für eine bestimmte Drehzahl erwünschte Schnellfrequenz auch mit Induktionsumformern herzustellen ist. Dazu müssen sich aber die Polzahlen des Umformers unbedingt als ganze gerade Zahlen ergeben. Aber auch eine Normung der Polzahlen stößt auf Schwierigkeiten, da es keine Reihe gibt, die trotz genügend feiner Stufung die ungeraden Werte überspringt. Deshalb müssen die Schnellfrequenzen selbst genormt werden.

Genormt werden müssen die Nennfrequenzen, d. h. die Schnellfrequenzen, die durch einen Induktionsumformer mit Synchronantrieb zu erreichen wären. Für diese Nennschnellfrequenzen wird als Normung vorgeschlagen: Stufung nach einer harmonischen Reihe mit den Ausgangsgliedern 400 — 500 — 600 Per/s. Die weitere Reihe ist wie oben beschrieben, durch Halbieren oder Verdoppeln zu bilden, wobei nur Normungszahlen der Reihe R 40 zu benutzen sind. Tabelle 8 gibt die Zahlenwerte dieser harmonisch gestuften Schnellfrequenzreihe an.

Tabelle 8. Zahlenwerte für Normfrequenzen und Lastdrehzahlen.

Per/s	Erzeugungspolzahl bei		Drehzahlen der Arbeitsmotoren		Zerlegung in 3 Verdoppelungsreihen		
	1500 Umdr.	3000 Umdr.	Normal-schlupf	Doppel-schlupf	Reihe 40/12 (2650...)	Reihe 40/12 (3350...)	Reihe 10/3 (4000...)
	des Wandlers						
50	—	—	2800	2650	2650		
62,5	— <sup>1</sup>	—	3550	3350		3350	
75	2	—	4250	4000			4000
100	4	2	5600	5300	5300		
125	6	—	7100	6700		6700	
150	8	4	8500	8000			8000
200	12	6	11200	10600	10600		
250	16	8	14000	13200		13200	
300	20	10	17000	16000			16000
400	—	14	22400	21200	21200		
500	—	18	28000	26500		26500	
600	—	22	33500	31500			31500
800	—	30	45000	42500	42500		
1000	—	38	56000	53000		53000	
1200	—	46	67000	63000			63000

<sup>1</sup> Nur im Mitfeldbetrieb erreichbar.

Der Anschluß an das normale Drehstromnetz ist vorhanden, da der Wert 50 Per/s auch in dieser Normungsreihe vorkommt.

Wie am Anfang dieses Hauptabschnittes dargelegt wurde, kann man jede Reihe durch eine Kurzformel eindeutig definieren. Die vorliegende Reihe ist aus drei Reihen zusammengesetzt und würde formelmäßig heißen:

Schnellfrequenzreihe =

$$R\ 10/3 (\dots 400\dots) + R\ 10/3 (\dots 500\dots) + R\ 40/12 (\dots 600\dots)$$

**50. Elektrische Verhältnisse und Lastdrehzahlen.** Die Schnellfrequenzen werden fast allgemein im Gegenfeld-Umformverfahren erzeugt. (Siehe den Abschnitt Um laufende Wandler.) Die Wandler werden dabei fast immer durch einen Asynchronmotor angetrieben. Diese Motoren haben aber Schlupf, so daß also die erzeugten Frequenzen nicht mit den Nennfrequenzen übereinstimmen können, sondern um den Schlupf der Wandlerantriebsmotoren niedriger liegen. Die Nennfrequenz könnte nur erzielt werden, wenn der Antrieb des Wandlers mit genau 3000 U/min oder 1500 U/min beispielsweise durch einen Synchronmotor erfolgen würde. In der Regel ist also die erzeugte Frequenz um den Schlupf eines Asynchronmotors zu niedrig. Da die Arbeitsmotoren auch Asynchronmotoren sind, die auch Schlupf haben, so muß von der theoretisch mit der Nennfrequenz zu erzielenden Richtdrehzahl der doppelte Schlupf abgezogen werden, wenn der Wandlersatz durch den üblichen Asynchronmotor angetrieben wird. Bei Synchron- oder bei Gleichstromantrieb läßt sich die Nennfrequenz genau erzeugen, der Drehzahlabfall ist also nur durch den Schlupf der Arbeitsmotoren bedingt.

Die Drehzahl eines Asynchronmotors ist  $n = \frac{120 \cdot f}{p} - \sigma$ . Hierin ist  $f$  die zugeführte Frequenz,  $p$  die Polzahl des Motors und  $\sigma$  der Schlupf des Motors. Bei gegebenem Motor sind Polzahl und Schlupf bekannt. Die höchsten Drehzahlen erzielt ein zweipoliger Motor, so daß also die Formel zur Errechnung der höchstmöglichen Drehzahlen heißt:  $n = 60 \cdot f - \sigma$ . Im vorhergehenden Abschnitt ist dargelegt worden, daß dieser Schlupf sich gewöhnlich zusammensetzt aus dem Umwandler-Antriebsmotorschlupf und dem Arbeitsmotorschlupf. Es lassen sich also die genauen, erreichbaren Drehzahlen errechnen, wenn man die Schlupfwerte der Motoren kennt. Da der Schlupf auch für Vollast und alle Zwischenlasten angegeben werden kann, lassen sich die Lastdrehzahlen genau berechnen. Für die überschlägige Rechnung und für Arbeitsvorbereitungsarbeiten wird man nicht für jeden Motor mit der genauen zugehörigen Schlupfzahl rechnen. Genau so, wie man bei den Richtwerten für die Lastdrehzahlen bei Werkzeugmaschinen einheitlich 6% Schlupf des Antriebes annimmt, sollen auch hier 6% Schlupf für den Asynchronmotor angenommen werden. Da in der Reihe R 40 der Stufensprung 1,06 ist, erhält man auch als Lastdrehzahlen Normungszahlen. Man braucht nur in der Reihe R 40 einen Wert vom theoretischen Genauwert zurückzugehen.

Die Drehzahl eines zweipoligen Motors ist also bei einer Speisung mit Schnellfrequenz von 100 Per/s  $n = 60 \cdot 1000 - 6\%$  oder  $60 \cdot 100 \cdot 0,94 = 5640$  U/min. Die nächstgelegene Normungszahl ist 5600. Wird die Schnellfrequenz durch einen asynchron angetriebenen Wandler erzeugt, so vermindert sich diese Drehzahl noch einmal um den Schlupf.  $n = 60 \cdot 0,94 \cdot 100 \cdot 0,94 = 5292$  U/min. Die Normungszahl 5300 weicht nur ganz wenig vom wirklichen Genauwert ab. So lassen sich also alle mit den Normschnellfrequenzen erreichbaren Drehzahlen berechnen. Am schnellsten findet man einen Lastdrehzahlrichtwert, wenn man mit der vereinfachten Formel  $n = \frac{120 \cdot f}{p}$  rechnet und dann in der Reihe R 40 um einen oder zwei Werte zurückgeht.

Es sei hier noch besonders betont, daß die errechneten Normwerte fast immer etwas zu niedrig liegen, weil volle Belastung nur selten vorkommt. Da also die tatsächlichen Drehzahlen um 1...3% höher liegen, ist der gemachte Fehler für Überschlagsrechnung und Arbeitsvorbereitung günstig.

Für die Normschnellfrequenzen sind die Richtwerte der Lastdrehzahlen in Tabelle 8 zusammengestellt worden. Besonders hervorgehoben sind die Richtwerte, die den doppelten Schlupf berücksichtigen, da sie den Regelfall darstellen. Es sind auch die erforderlichen Wandler-Polzahlen für Antrieb durch zweipoligen oder vierpoligen Antriebsmotor im Gegenfeldbetrieb angegeben. Die Werte dieses Normvorschlages sind in dem Drehzahl-Schnittgeschwindigkeits-Schaubild, Abb. 2, am Anfang dieses Buches schon benutzt.

Da die Norm-Schnellfrequenzen sowie die in der Formel zur Drehzahlberechnung vorkommenden Zahlenwerte Normungszahlen sind, so muß auch die entstehende Lastdrehzahlreihe eine Zahlenreihe sein, die nur aus Normungszahlen besteht. Da die Formelwerte bis auf die Frequenz konstant bleiben, muß dieselbe Aufteilung der Lastdrehzahlreihe wie bei der Frequenzreihe möglich sein, um sie formelmäßig zu erfassen. Die Reihe der Richtwerte der Lastdrehzahlen heißt formelmäßig:

$$R_{LD} = R \ 40/12 \ (2650\cdots) + R \ 40/12 \ (3350\cdots) + R \ 10/3 \ (4000\cdots).$$

Sie ist also genau wie die Schnellfrequenzreihe eine aus drei ineinandergeschachtelten Verdoppelungsreihen bestehende harmonische Reihe. In Tabelle 8 sind diese drei Verdoppelungsreihen einzeln aufgeführt.

Es sei noch erwähnt, daß ein anderer Normvorschlag bereits veröffentlicht ist<sup>1</sup>. Die dort angegebene Reihe ist aus zwei Reihen zusammengestellt und hat den mittleren Stufensprung 1,41. Da der größte Sprung in dieser Reihe aber 1,5 beträgt, dürfte sie etwas zu grob gestuft sein.

**51. Spannungsnormung.** Um bestehende Anlagen erweitern zu können, ohne auf ein bestimmtes Fabrikat festgelegt zu sein, wäre es erforderlich, daß zu jeder Schnellfrequenz eine bestimmte Spannung normenmäßig festgelegt wird. Bisher bestehen nur sog. „Firmennormen“, die aber bei derselben Frequenz verschiedene Werte angeben. Lediglich für Motoren, die für 220/380 Volt gewickelt sind und an höhere Frequenzen gelegt werden sollen, hat man sich auf die folgenden Spannungen geeinigt:

$$\begin{array}{l} \text{Schnellfrequenz } 75 \text{ Per/s, } 285 \text{ Volt,} \\ \text{„ } 100 \text{ Per/s, } 380 \text{ Volt.} \end{array}$$

Dem zuständigen Normenausschuß des Vereins Deutscher Elektrotechniker ist ein Vorschlag zur Normung der Spannungen zu den in diesem Abschnitt vorgeschlagenen Schnellfrequenzen zugeleitet worden.

<sup>1</sup> KLINGELNBERG: Technisches Hilfsbuch.