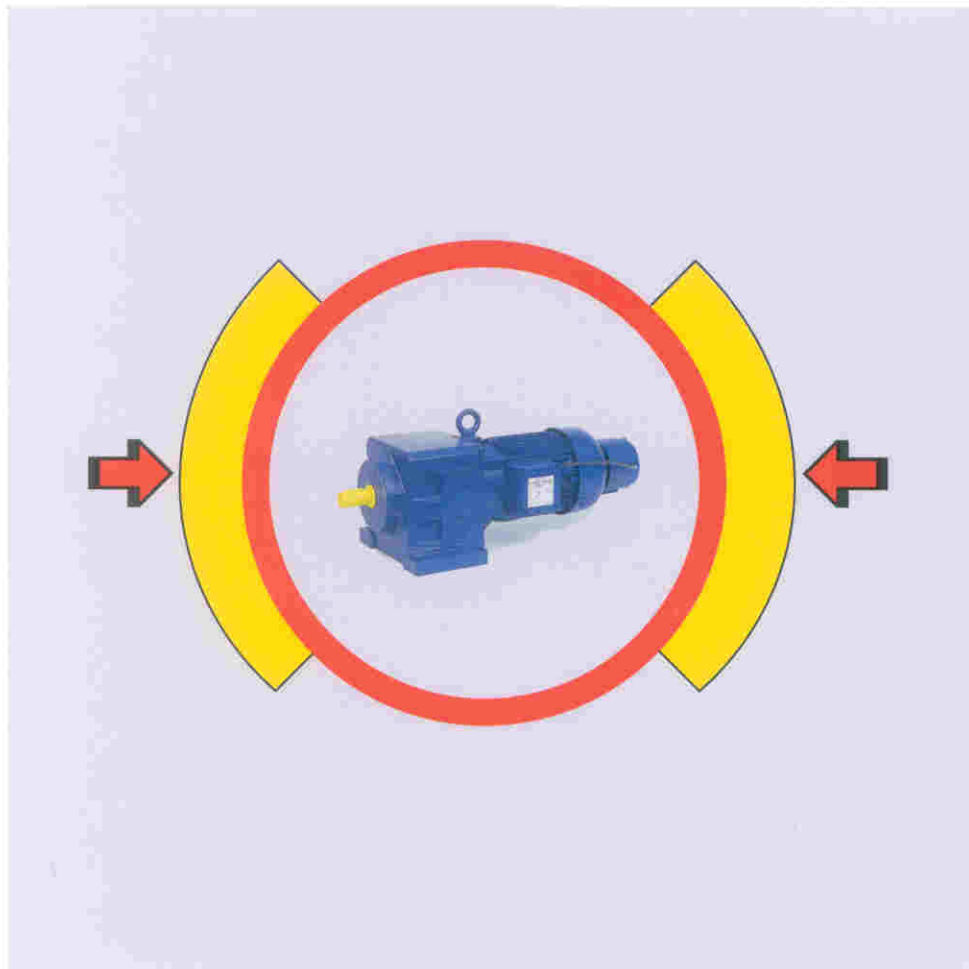


**Anlaufen, Bremsen, Positionieren
mit Drehstrom-Asynchronmotoren**



Helmut Greiner

Anlaufen, Bremsen, Positionieren
mit Drehstrom-Asynchronmotoren

Danfoss

Helmut Greiner

Anlaufen, Bremsen, Positionieren mit Drehstrom-Asynchronmotoren

Dipl.-Ing. (FH) Helmut Greiner, Jahrgang 1929, ist gelernter Elektroinstallateur und hat ein Ingenieurstudium im Fach Elektrotechnik absolviert. Er hat vier Jahrzehnte in der Firma Bauer Antriebstechnik in Esslingen auf dem Gebiet der Motorenentwicklung gearbeitet. Er ist heute für die Firma Danfoss Bauer beratend tätig.

Diejenigen Bezeichnungen von im Buch genannten Erzeugnissen, die zugleich eingetragene Warenzeichen sind, wurden nicht besonders kenntlich gemacht. Es kann also aus dem Fehlen der Markierung ® nicht geschlossen werden, dass die Bezeichnung ein freier Warenname ist. Ebenso wenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmusterschutz vorliegen.

Von den in diesem Buch zitierten VDE-Vorschriften und Normblättern haben stets nur die jeweils letzten Ausgaben verbindliche Gültigkeit.

Autor und Danfoss Bauer haben alle Texte und Abbildungen mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Deshalb übernehmen weder Autor noch Danfoss Bauer irgendwelche Garantien für die in diesem Buch gegebenen Informationen. In keinem Fall haften Autor oder Danfoss Bauer für irgendwelche direkten oder indirekten Schäden, die aus der Anwendung dieser Informationen folgen.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an die Danfoss Bauer GmbH zu zahlen, deren Höhe mit der Danfoss Bauer GmbH zu vereinbaren ist.

VORWORT

Bei vielen Anwendungen von Getriebemotoren – vor allem im Bereich der Förder- und Handhabungstechnik – ist bei der Antriebswahl neben Leistung oder Drehmoment vor allem das Betriebsverhalten zu beachten. Der Motor soll sanft beschleunigen, schonend und doch sicher bremsen und punktgenau anhalten.

Anlaufen, Bremsen und Positionieren – das sind wichtige Teilaufgaben, die elektrischen Antrieben im Rahmen der Automatisierung und Rationalisierung übertragen werden.

Das Buch wendet sich an den Praktiker der Antriebstechnik.

Es soll Antworten geben auf antriebstechnische Fragen, die nach den langjährigen Erfahrungen des Autors bei der Planung und Anwendung von Drehstrom-Getriebemotoren besonders häufig gestellt werden.

Aichschieß, im Juli 2000

Helmut Greiner

INHALTSVERZEICHNIS

I EINFÜHRUNG

- 1 Allgemeines
- 2 Beurteilungskriterien für sanftes Anlaufen und Bremsen
 - 2.1 Rutschen auf einem Förderband
 - 2.2 Kippen auf einem Förderband
 - 2.3 Pendeln einer Last am Kranhaken
 - 2.4 Übergangsverhalten der Beschleunigung und Verzögerung

II ANLAUF

- 3 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie des Motors
- 4 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Last
- 5 Direkte Einschaltung am starren Netz
- 6 Unterteilter Anlauf bei Polumschaltung
- 7 Stern-Dreieck-Anlauf
- 8 Teilwicklungsanlauf
- 9 Anlasstransformator
- 10 Vorwiderstände
 - 10.1 Dreiphasige Vorwiderstände
 - 10.2 Einphasiger Vorwiderstand (KUSA-Widerstand)
- 11 Elektronische Anlaufschaltungen
- 12 Frequenzgeführter Anlauf
- 13 Zusatz-Schwungmasse
- 14 Sonderläufer mit erhöhtem Schlupf
- 15 Anlaufkupplungen
 - 15.1 Fliehkraftkupplungen
 - 15.2 Hydrodynamische Kupplungen
 - 15.3 Induktionskupplungen
- 16 Thermische Bewertung des Schaltbetriebes
 - 16.1 Kennzeichnung von Schalt-Betriebsarten
 - 16.2 Schaltbetrieb bei überwiegender Leistungsabgabe
 - 16.2.1 Leerschalthäufigkeit Z_0
 - 16.2.2 Zulässige Betriebsschalthäufigkeit Z_{lim}
 - 16.2.3 Thermisch gleichwertige Schalthäufigkeit Z_{th}
 - 16.2.4 Typprüfung
 - 16.2.5 Zusammenstellung der Formelzeichen
 - 16.3 Schaltbetrieb bei überwiegender Beschleunigung
- 17 Ermittlung der Anlaufzeit
- 18 Klassifizierung des Anlaufverhaltens
 - 18.1 Anlaufverhalten nach IEC 60034-12
 - 18.2 Code Letter nach NEMA
 - 18.3 NEMA-Klassifizierung nach Drehmoment-Charakteristik
 - 18.4 Anlaufklassen

III ELEKTRODYNAMISCHE AUSLAUFBREMUNG

- 19 Übersynchrone, generatorische Bremsung
- 20 Reversierung (Drehrichtungswechsel aus vollem Lauf)
- 21 Gegendrehfeldbremsung
- 22 Gleichstrom-Auslaufbremsung
 - 22.1 Wirkungsweise
 - 22.2 Schaltung der Ständerwicklung
 - 22.3 Bemessung der Gleichstromquelle
 - 22.4 Schaltplan der Steuerung
 - 22.5 Elektronische Gleichstrom-Bremsgeräte
- 23 Polumschaltung
 - 23.1 Entstehung und Verlauf der Bremsmomente
 - 23.2 Dämpfung der Bremsmomente
 - 23.3 Berechnung von Bremszeit und Bremsweg
 - 23.4 Rückschaltempfehlung
 - 23.5 Elektronische Sanfrückschaltung SPR
- 24 Frequenzsteuerung
- 25 Thermische Bewertung der elektrodynamischen Bremsverfahren
 - 25.1 Übersynchrone, generatorische Bremsung
 - 25.2 Reversierung
 - 25.3 Gegendrehfeldbremsung
 - 25.4 Gleichstrom-Auslaufbremsung
 - 25.5 Polumschaltung
 - 25.6 Frequenzsteuerung

**IV BESTIMMUNG DES
MASSENTRÄGHEITSMOMENTES**

- 26 Rotor-Massenträgheitsmoment
 - 26.1 Motoren mit fester Drehzahl
 - 26.2 Polumschaltbare Motoren
 - 26.3 Zylindrische Stahlkörper
- 27 Homogene Körper mit einfachen geometrischen Formen
- 28 Experimentelle Ermittlung des Massenträgheitsmomentes
 - 28.1 Drehpendel
 - 28.2 Stabpendel
 - 28.3 Auslaufversuch
- 29 Trägheitsfaktor F_I
- 30 Aufteilung des Drehmomentes entsprechend den Massenanteilen
- 31 Umwertung bewegter Massen
 - 31.1 Rotation
 - 31.2 Translation
 - 31.3 Linearbewegung als Tangente am Kreis

V MECHANISCHE BREMSUNG

- 32 Allgemeines
- 33 Bremssysteme
 - 33.1 Unterteilung der Bremssysteme
 - 33.2 Federdruckbremse oder Magnetbremse

Inhaltsverzeichnis

- 34 Anbau oder Einbau
- 35 Ausführungsbeispiele
 - 35.1 Einscheiben-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet am Lagerschild
 - 35.2 Zweiseiben-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet am Lagerschild
 - 35.3 Einscheiben-Federdruckbremse an der Lüfterhaube
 - 35.4 Zweiseiben-Federdruckbremse an der Lüfterhaube
 - 35.5 Einscheiben-Federdruckbremse Reihe ABR an der Lüfterhaube
 - 35.6 Einscheiben-Federdruckbremse Reihe FBR an der Lüfterhaube
 - 35.7 Kegel-Federdruckbremse mit Lüftung durch Motorfeld
 - 35.8 Backen-Federdruckbremse mit WS-Lüftmagnet
 - 35.9 Lamellen-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet
 - 35.10 Einscheiben-Federdruckbremse mit DS-Lüftmagnet am Lagerschild
- 36 Elektrische Speisung des Lüftmagneten
 - 36.1 Eine Nennspannung in Stern- oder Dreieckschaltung
 - 36.2 Spannungsumschaltung im Verhältnis 1 : 1,73
 - 36.3 Spannungsumschaltung im Verhältnis 1 : 2
 - 36.4 Polumschaltung: Dahlanderschaltung oder zwei getrennte Wicklungen
 - 36.5 Anlasseinrichtungen zur Verminderung der Klemmenspannung
 - 36.6 Betrieb am Umrichter mit variabler Frequenz
 - 36.7 Fallbeispiele mit Vorzugslösungen
 - 36.7.1 Motoren mit fester Bemessungsspannung
 - 36.7.2 Motoren mit umschaltbarer/variabler Bemessungsspannung
 - 36.8 Nennspannung von Gleichstrom-Lüftmagneten
 - 36.8.1 Spannungsspitzen durch Selbstinduktion
 - 36.8.2 Genormte Bemessungs-Gleichspannungen
 - 36.8.3 Schaltung der Dioden
 - 36.9 Option Steckanschluss
- 37 Ansprechzeit beim Lüften
 - 37.1 Lüften mit WS-Magneten
 - 37.2 Lüften mit GS-Magneten
 - 37.3 Verlustarbeit bei langer Lüftzeit
 - 37.3.1 Grundsätzliche Unterschiede beim Anlaufvorgang
 - 37.4 Thermische Entlastung des Motors
- 38 Ansprechzeit beim Einfallen
 - 38.1 Einfallen bei WS-Magneten
 - 38.2 Einfallen bei GS-Magneten
- 39 Massenträgheitsmoment der Reibscheiben
- 40 Auswahl nach Bremsmoment
 - 40.1 Erforderliches Bremsmoment
 - 40.2 Auslaufbremsung
 - 40.3 Hubbetrieb
- 41 Auswahl nach Bremsarbeit
 - 41.1 Schaltarbeit pro Bremsung
 - 41.2 Thermisch zulässige Schaltarbeit
 - 41.3 Verminderung der mech. Schaltarbeit durch el. Schaltmaßnahmen
 - 41.3 Schaltarbeit pro Reibungselement
- 42 Verschleiß

Inhaltsverzeichnis

- 43 Bremszeit
 - 43.1 Verzögerung
 - 43.2 Hubbetrieb
 - 43.3 Senkbetrieb
- 44 Nachlaufzeit
 - 44.1 Ansprechzeit
 - 44.2 Bremszeit
 - 44.3 Nachlaufzeit
- 45 Nachlaufweg
 - 45.1 Translation
 - 45.2 Rotation
- 46 Vorteile eines Baukastensystems
- 47 Arbeitsvermögen großer Bremsen

- VI POSITIONIEREN**
- 48 Allgemeines zur Positionierung
- 49 Toleranzen
 - 49.1 Antrieb
 - 49.2 Mechanische Bremse
 - 49.3 Steuerung
 - 49.3.1 Ansprechzeiten von Schützen
 - 49.3.2 Näherungsschalter
 - 49.3.3 Zeitrelais
 - 49.4 SPS (Speicherprogrammierbare Steuerungen)
- 50 Getriebelose
 - 50.1 Richtwerte für übliche Getriebe
 - 50.2 Auswirkung auf lineare Bewegung
- 51 Drehzahlverhältnis 1 : 2 (Dahlanderschaltung)
 - 51.1 Äußere und innere Strom- und Feldrichtung bei der Dahlanderschaltung
 - 51.2 Modellausnutzung bei der Dahlanderschaltung
 - 51.3 Relative Höhe der Drehmomentkennlinien
- 52 Andere Drehzahlverhältnisse (getrennte Wicklungen)
 - 52.1 Klemmschaltung
 - 52.2 Ausführbare Drehzahlverhältnisse
 - 52.3 Modellausnutzung bei getrennten Wicklungen
 - 52.4 Relative Höhe der Drehmomentkennlinien
 - 52.5 Kostenvergleich
- 53 Möglichkeiten und Grenzen der Polumschaltung
- 54 UmrichterMotoren
- 55 Indexpositionierung mit SynchPos

ANHANG

- A1 Technische Daten von Federdruckbremsen

Literaturhinweise

Stichwortverzeichnis

I EINFÜHRUNG

1 Allgemeines

Der Drehstrom-Asynchronmotor mit Käfigläufer verdankt seinen guten Ruf als robuster, problemloser Antrieb nicht zuletzt den guten Anlaufeigenschaften: Mit einem Anzugsmoment vom 1,5...2,5-fachen Bemessungsmoment ist er in der Lage, auch schwergängige Arbeitsmaschinen unter Vollast loszureißen und rasch zu beschleunigen.

Während diese Eigenschaft in der großen Mehrzahl der Anwendungsfälle positiv bewertet wird, gibt es auch eine Reihe von Arbeitsmaschinen, bei denen die ruckartige Beschleunigung zu Problemen führen kann. Beispiele sind das Pendeln einer Last am Kranhaken, das Kippen von Flaschen auf einem Förderband, die stoßartige Überbeanspruchung von mechanischen Übertragungselementen.

Die »Verbesserung des Anlaufverhaltens« eines Drehstrom-Käfigläufermotors zielt daher selten auf eine Erhöhung, sondern meist auf eine **Verminderung des Hochlaufmomentes**.

Bei der Weiterentwicklung elektrischer Antriebe ist ein deutlicher Trend zu größerer **Schalzhäufigkeit** und zu höheren Anforderungen an die **Positioniergenauigkeit** zu beobachten. Während früher der Elektromotor durchlaufend betrieben und das Fördergut oder Werkzeug mit mechanischen Systemen geschaltet und schrittweise bewegt wurde, kann heute der gebremste Motor direkt takten und positionieren. Besonders ausgeprägt ist diese Entwicklung bei Servoantrieben und Schrittmotoren, wie sie in der modernen Handhabungstechnik benötigt werden. Aber auch in der Peripherie solcher »Roboter« werden Positionierantriebe eingesetzt.

Anlaufen, Bremsen und Positionieren – das sind also wichtige Teilaufgaben, die elektrischen Antrieben im Rahmen der Automatisierung und Rationalisierung übertragen wurden.

Bei sehr hohen Geschwindigkeiten und extremen Anforderungen an die Haltegenauigkeit werden Motoren mit stufenlos einstellbarer Drehzahl eingesetzt – zum Beispiel Gleichstrom-Nebenschlussmotoren mit verstellbarer Ankerspannung oder Drehstrom-Umrichter motoren mit Frequenzverstellung über einen statischen Umrichter.

In beiden Fällen kann die Geschwindigkeit von einem Sollwertgeber auf die Positioniergeschwindigkeit »geführt« werden – bei modernen Umrichter motoren und bei Gleichstrommotoren im Verhältnis bis 100 : 1.

Beide Lösungen erfordern einen relativ hohen Aufwand, der nicht in allen Anwendungsfällen gerechtfertigt erscheint.

Hier bietet sich ein breites Verwendungsfeld für eine Lösung, die im Rahmen dieser Ausführungen besonders behandelt werden soll: der **polumschaltbare Drehstrommotor** mit zwei festen Drehzahlstufen im Verhältnis maximal 10 : 1, die über konventionelle Komponenten der Schaltgerätetechnik angesteuert werden.

Die Rückschaltung von der hohen auf die niedrige Drehzahl erfolgt durch **generato-
rische Bremsung**, wobei die Positioniergeschwindigkeit ohne jeglichen Aufwand für eine Steuerung oder Regelung mit sehr engen Toleranzen erreicht wird.

Die Umschaltzeiten und -wege sind extrem niedrig, was im Sinne der Rationalisierung sehr erwünscht ist, oftmals jedoch mit Rücksicht auf empfindliches Transportgut zu unerwünscht hohen Verzögerungen und damit zu einem nicht ganz ruckfreien Fahrverhalten führt.

Aus der Positioniergeschwindigkeit wird mit einer angebauten Federdruckbremse **mechanisch gebremst** – diese Bremse wirkt bei eventuellem Stromausfall als Sicherheitsbremse und hält die Last fest.

2 Beurteilungskriterien für sanftes Anlaufen und Bremsen

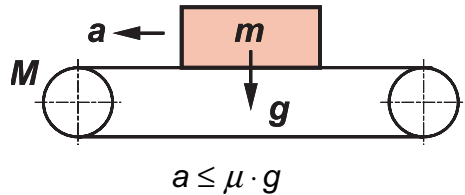
Ein »sanfter Anlauf« oder eine »sanfte Bremsung« wird vom Konstrukteur oder Anwender einer Arbeitsmaschine meist gefordert, wenn die Betriebserfahrungen zeigen, dass die direkte Einschaltung oder Bremsung zu stoßartig abläuft. Dem Antriebstechniker ist im konkreten Fall schon sehr geholfen, wenn die »Sanftheit« in Form einer Mindestzeit präzisiert wird, obwohl diese Messgröße unter stark wechselnden Belastungsbedingungen oder gar für Anlagen mit sehr unterschiedlicher Geschwindigkeit nicht ausreichend ist. Entscheidend ist die **Beschleunigung oder Verzögerung**, wie nachfolgend an drei Beispielen aus der Fördertechnik gezeigt wird.

Sanftanlauf wird z. B. verlangt um Folgendes zu vermeiden:

2.1 Rutschen auf einem Förderband

Bild 2.1
Rutschgrenze bei reibschlüssiger Kraftübertragung

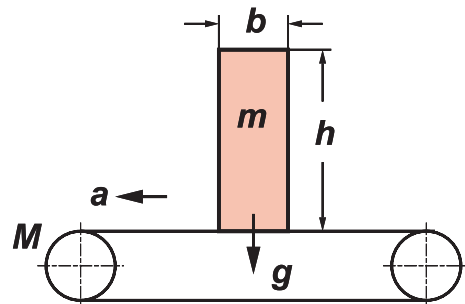
a - Beschleunigung in m/s^2
 μ - Reibungszahl
 g - Fallbeschleunigung in $9,81 \text{ m/s}^2$



2.2 Kippen auf einem Förderband

Bild 2.2
Kippgrenze für relativ hohes Fördergut

a - Beschleunigung in m/s^2
 b - Standbreite des Gutes in m
 h - Höhe des Fördergutes in m
 g - Erdbeschleunigung in $9,81 \text{ m/s}^2$



2.3 Pendeln einer Last am Kranhaken

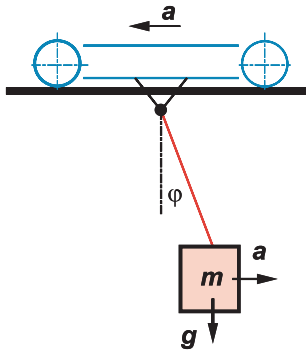
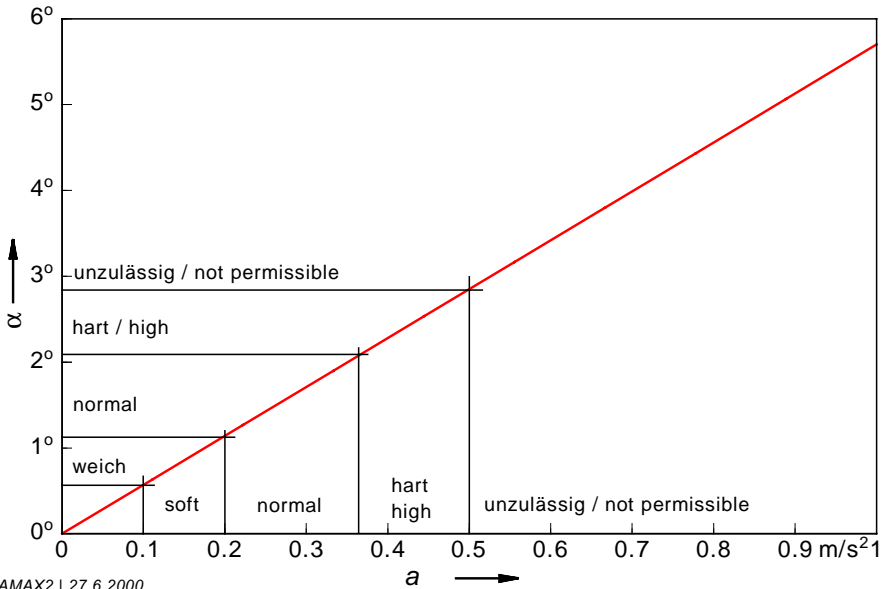


Bild 2.3.1
Pendeln einer am Seil hängenden Last

$$a \leq \tan \alpha \cdot g$$

- a – Beschleunigung in m/s²
- α – Winkel der Auslenkung
(mit Erfahrungswert max. 3 ° wird
a ≤ 0,5 m/s²)
- g – Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

Für die Beurteilungskriterien des Anfahrverhaltens eines Kranfahrantriebes ist **Bild 2.3.2** nützlich:



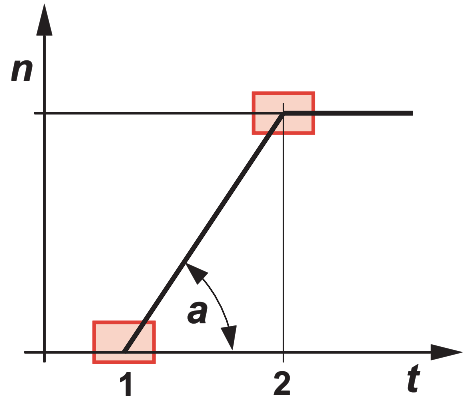
EBAMAX2 | 27.6.2000

Bild 2.3.2 Beschleunigung als Beurteilungskriterium für das Fahrverhalten eines Kranfahrantriebes

2.4 Übergangsverhalten der Beschleunigung oder Verzögerung

Bild 2.4.1
Anlaufvorgang

- n – Drehzahl
- t – Zeit
- a – Maß für Beschleunigung
- 1 – Beginn der Beschleunigung
- 2 – Ende der Beschleunigung

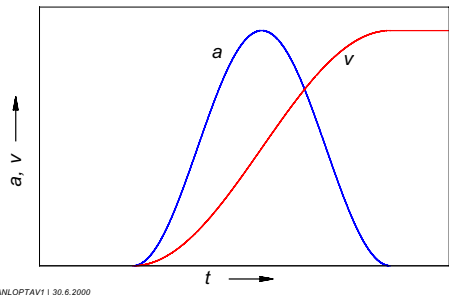


Die Beschleunigung – dargestellt durch den Winkel a – ist in üblichen praktischen Grenzen beliebig niedrig wählbar, d. h. der Vorgang ist im Sinne der üblichen Definition sehr sanft. Bei einer kritischen Betrachtung des Übergangsverhaltens an den Stellen (1) und (2) im Diagramm fällt auf, dass sich die Beschleunigung (Winkel a) »ruckartig« ändert. Tatsächlich wird die **Änderung der Beschleunigung** als **Ruck** bezeichnet:

$$r = \frac{da}{dt}$$

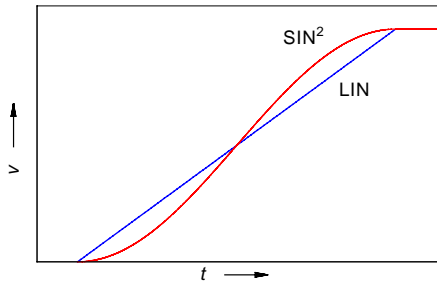
Der Ruck ist für Pendelungen und andere Störungen empfindlicher Transportgüter verantwortlich und wird bei schwierigen Antriebsproblemen beseitigt, indem statt der in Bild 2.4.1 gezeigten linearen Rampe eine mehr oder weniger an die ideale Sinusform angenäherte Rampe verwendet wird. Typische Anwendungen sind z. B. Regalförderfahrzeuge, Drehtische, fahrbare Schweißroboter.

Bild 2.4.2
Idealer Verlauf von Beschleunigung a und Geschwindigkeit v für ruckfreien Anlauf



Der »sinusförmige« Verlauf von Beschleunigung und Geschwindigkeit erfordert einen zusätzlichen Aufwand, der in modernen Umrichtern serienmäßig integriert ist.

2 Beurteilungskriterien für sanftes Anlaufen und Bremsen



ANLCO14 | 27.6.2000

Bild 2.4.3
Verlauf der Geschwindigkeit v mit »Cosinus-Verschleifung« oder »Sinus-Verschleif« SIN^2 der Geschwindigkeitsübergänge im Vergleich zur linearen Rampe LIN



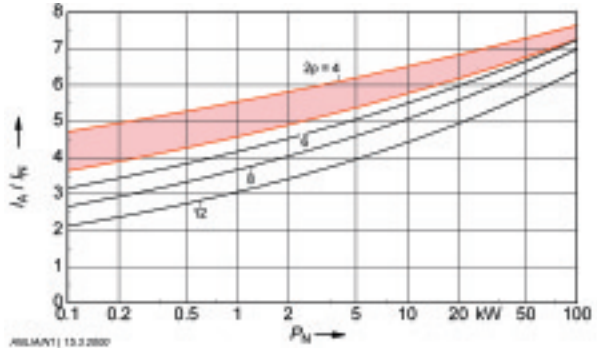
Bild 2.4.4 Hallenkran zur Wartung von Verkehrsflugzeugen. Besondere Anforderungen an sanftes Anfahren und Bremsen der Kranfahrbetriebe.

II ANLAUF

3 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien des Motors

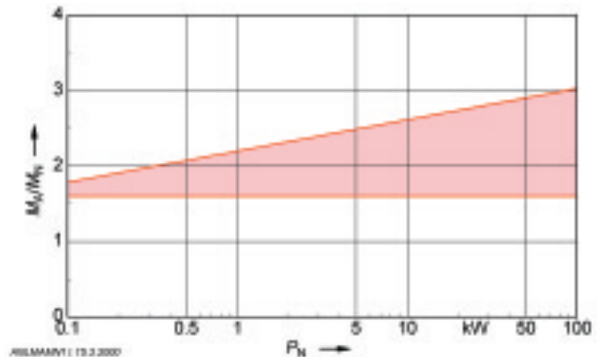
Aus der Wirkungsweise des Asynchronmotors ergibt sich, dass bei stillstehendem Läufer und Synchrondrehzahl des Drehfeldes – also bei 100 % Schlupf – im Sekundärkreis relativ hohe Spannungen und Ströme entstehen, die zu entsprechend hohen Anzugsströmen in der Ständerwicklung führen (**Bild 3.1**).

Bild 3.1
Richtwerte für den relativen Anzugsstrom I_A/I_N bei Direkteinschaltung von Drehstrom-Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100 \text{ kW}$



Mit dem umlaufenden Drehfeld bilden die hohen Stabströme ein kräftiges Anzugsmoment, das allerdings wegen der Phasenverschiebung nicht die gleiche Relation zum Bemessungsmoment aufweist, wie es der Stromerhöhung entsprechen würde.

Bild 3.2
Richtwerte für das relative Anzugsmoment M_A/M_N bei Direkteinschaltung von Drehstrom-Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100 \text{ kW}$



3 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien des Motors

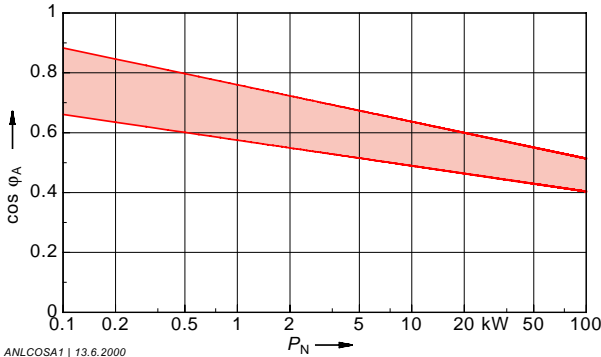


Bild 3.3
Richtwerte für den Leistungsfaktor im Kurzschluss $\cos \varphi_A$ bei Direkteinschaltung von Drehstrom-Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100$ kW

Zur Verminderung des Anzugsstromes und Erhöhung des Anzugsmomentes muss bei mittleren und größeren Bemessungsleistungen der Läuferwiderstand durch **Stromverdrängung** erhöht werden. Im Bereich bis etwa zur Achshöhe 315 bieten Pressgussläufer eine relativ freie Gestaltungsmöglichkeit für die Läufer-Nutformen – bei größeren Einheiten muss die fertigungstechnisch einfache Rundnut durch Tiefnuten oder Doppelkäfige ersetzt werden (**Bild 3.4**), um einen ausgeglichenen Kennlinienverlauf zu erreichen (**Bild 3.6**).

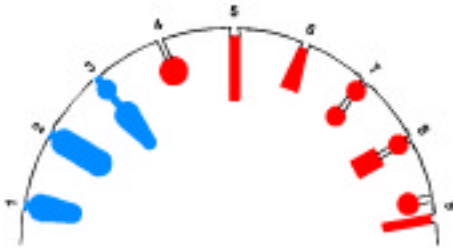


Bild 3.4
Beispiele für Käfigläufer-Nutformen Pressgussläufer mit
1 – Tropfennut
2 – Tiefnut
3 – Doppelnut
Einfachkäfigläufer mit
4 – Rundstab
5 – Hochstab
6 – Keilstab
Doppelkäfigläufer 7, 8 und 9

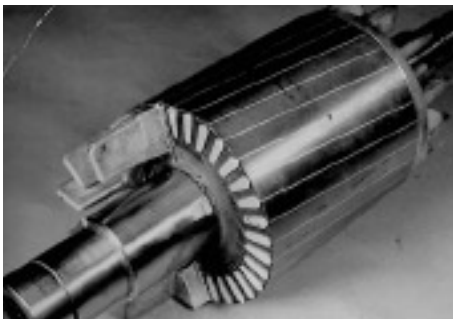


Bild 3.5
Schnitt durch einen Pressguss-Käfigläufer mit Tropfennut

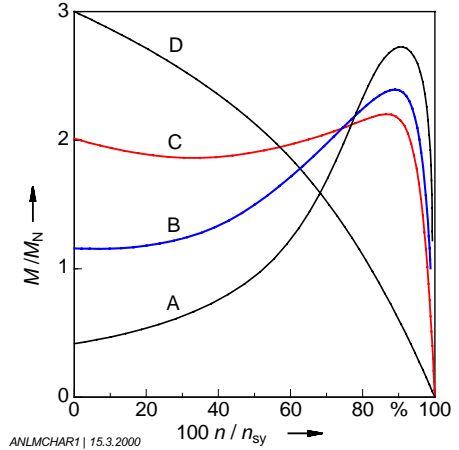
3 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien des Motors

Bild 3.6

Typische Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien von Käfigläufermotoren mit verschiedenen Läuferbauarten

- A – Rundstab (4)
 - B – Keilstab (6), Hochstab (5), Tropfennut (1)
 - C – Doppelnut (3), Doppelkäfig (7,8,9)
 - D – Widerstandsläufer (z. B. Messing, Bronze, Silumin)
- n_{sy} – Synchron-Drehzahl

Die Zahlen in Klammern entsprechen Bild 3.4



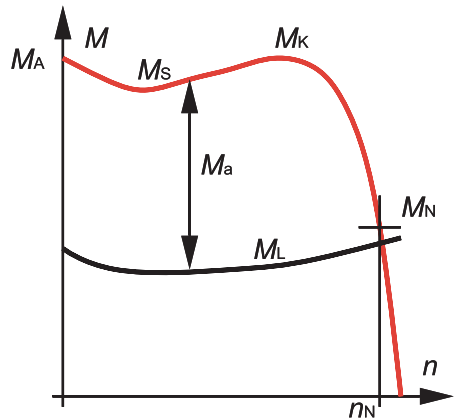
Im weiteren Verlauf dieser Abhandlung wird ein Kennlinienverlauf etwa nach C vorausgesetzt, wie er für kleine und mittlere Käfigläufermotoren typisch ist. Bei starken Abweichungen von dieser »Rechteckform« ergeben sich teilweise erhebliche Änderungen für die genannten Richtwerte.

Bild 3.7 zeigt eine typische Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik mit den wichtigsten Kennwerten.

Bild 3.7

Typische Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Käfigläufermotors mit den Kennwerten

- n – Drehzahl
- M – Drehmoment
- M_N – Bemessungsmoment
- n_N – Bemessungsdrehzahl
- M_A – Anzugsmoment
- M_K – Kippmoment
- M_S – Sattelmoment
- M_L – Lastmoment
- M_a – Beschleunigungsmoment



4 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Last

Maßgebend für das Anlaufverhalten eines Antriebes ist die relative Höhe der vom Motor entwickelten Drehmomente (Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie) im Vergleich zu den von der Last und den Trägheitsmomenten verlangten Drehmomenten. Die Kennlinie der Last ist von der Art der Arbeitsmaschine abhängig. In **Bild 4** sind einige typische (idealisierte) Lastkennlinien gezeigt. In der Praxis treten auch Mischformen auf, deren Verlauf dem Hersteller der jeweiligen Maschine oft nicht genau bekannt ist, weil die Ermittlung einen erheblichen Aufwand erfordert. In diesem Fall muss eine Annahme nach Erfahrung oder nach dem ungünstigsten Fall getroffen werden. Abweichend von den gezeigten, theoretischen Kennlinien ist beim Anlauf aus dem Stillstand heraus (relative Drehzahl 0...0,1) mit einem erhöhten »Losbrechmoment« zu rechnen.

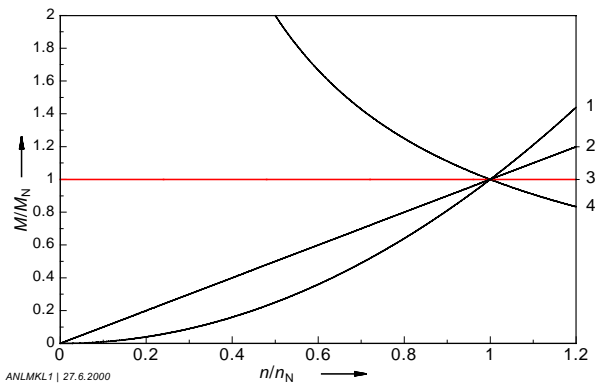


Bild 4
Typische Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien von Arbeitsmaschinen.

Abhängigkeit des Drehmomentes von der relativen Drehzahl:

- 1 – quadratisch
(Pumpen, Lüfter)
- 2 – linear
(Kalander, Glättwalzen),
- 3 – konstant
(Hebezeuge, Förderer, Überwindung von Reibung und Gravitation)
- 4 – reziprok
(Wickler, Werkzeugmaschinen)

5 Direkte Einschaltung am starren Netz

Für den Anlauf eines typischen Käfigläufermotors mit »Rechteckkennlinie« (Form C nach **Bild 3.5**) gegen eine Arbeitsmaschine mit »konstantem Drehmoment« (Form 3 nach Bild 4) ergibt sich eine einfache Berechnungsweise für das Beschleunigungsmoment M_a , die für praktische Anwendungsfälle vollkommen ausreicht. Unter den obigen Voraussetzungen gilt für die Berechnung der Beschleunigungszeit

$$t_a = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot M_a}$$

- t_a – Beschleunigungszeit in s
- J – Gesamt-Massenträgheitsmoment in kgm^2
- n – Drehzahl in r/min
- M_a – Beschleunigungsmoment in Nm

Richtwerte für **Hochlaufzeit** und **Hochlaufweg** bei Leerlauf und Belastung mit Bemessungsmoment sind den **Bildern 5.1 bis 5.3** zu entnehmen.

Bild 5.1
Richtwerte für die Hochlaufzeit t_a von Normmotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100$ kW bei Leerlauf ($M = 0$) und Nennlast ($M = M_N$)

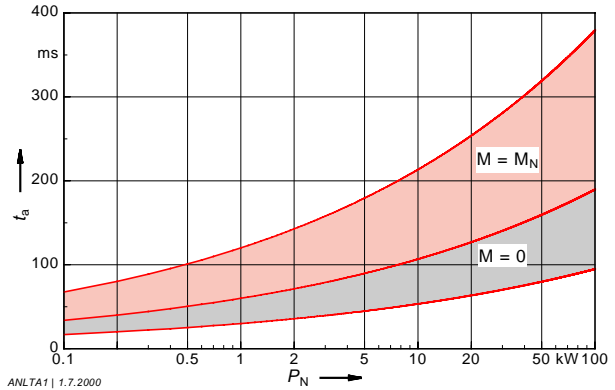
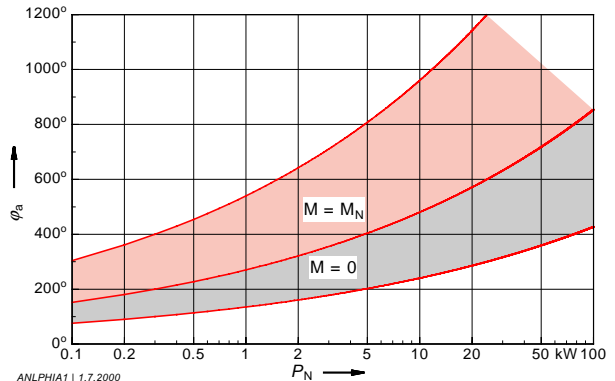


Bild 5.2
Richtwerte für den Hochlaufweg α_a in Winkleinheiten von Normmotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100$ kW bei Leerlauf ($M = 0$) und Nennlast ($M = M_N$)



5 Direkte Einschaltung am starren Netz

Bei der Bewertung dieser Richtwerte ist zu bedenken:

- Die Form der Kennlinie von Motor und Last weicht mehr oder weniger von der in Bild 1.6 gezeigten Idealform ab.
- Nach DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1) [2.2] sind folgende Toleranzen zulässig:
 M_A : -15 / +25 %
 M_k : -10 %
- Als Lastmoment wurde das Bemessungsmoment M_N angenommen. Die meisten Antriebe sind jedoch nicht voll ausgelastet.
- Das externe Massenträgheitsmoment ist meist nicht oder nur näherungsweise bekannt.

Die üblichen Hochlaufzeiten von Normmotoren liegen deutlich unter 1 s. Die **thermisch zulässige Anlaufzeit**, die unter der Abkürzung **ART** (allowable run-up time) gelegentlich in Ausschreibungen erfragt wird, liegt wesentlich höher (Bild 5.3).

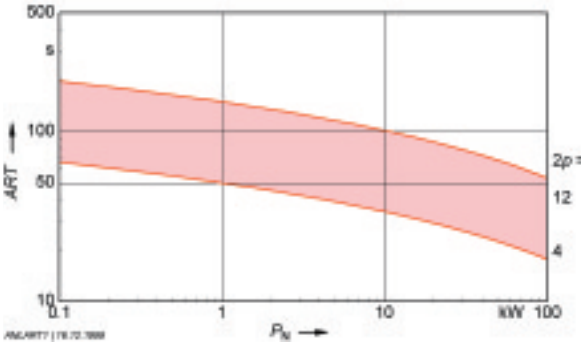


Bild 5.3
Richtwerte für die thermisch zulässige Hochlaufzeit ART (allowable run-up time) von Normmotoren mit Bemessungsleistungen $P_N = 0,1 \dots 100$ kW bei den Polzahlen $2p = 4 \dots 12$

Als **Sattelmoment** eines Wechselstrommotors ist in DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1) unter 2.14 definiert:

»Kleinste stationäres asynchrones Drehmoment, das der Motor im Drehzahlbereich zwischen Stillstand und Kippmoment bei den Bemessungswerten für Spannung und Frequenz entwickelt«.

Für den Mindestwert des Sattelmomentes wird in Abschnitt 20 der Norm gefordert:

	$P_N < 100$ kW	$P_N \geq 100$ kW
Drehstrommotoren ohne Polumschaltung	$0,5 M_N$ $0,5 M_A$	$0,3 M_N$ $0,5 M_A$
Drehstrommotoren mit Polumschaltung	$0,3 M_A$	$0,3 M_A$

Diese Tabelle signalisiert zwei Tatbestände:

- Große Motoren haben niedrigere relative Sattelmomente als kleine Motoren
- Polumschaltbare Motoren haben niedrigere Sattelmomente als eintourige Motoren.

5 Direkte Einschaltung am starren Netz

Man kann davon ausgehen, dass die relativ niedrigen Werte der Norm bei Serienmotoren deutlich überschritten werden. Bei Einzelanfertigungen – z.B. mit ungewöhnlichen Polzahlverhältnissen – sind synchrone und asynchrone Sättel nicht völlig auszuschließen. Eine Abschwächung der Einsattelung ist durch aufwendige Sondermaßnahmen möglich, z. B.

- optimales Nutzahzahlverhältnis Ständer/Läufer (bei Polumschaltung oft schwierig)
- höhere Nutschrägung im Läufer
- größerer Luftspalt
- andere Sehnung in der Ständerwicklung.

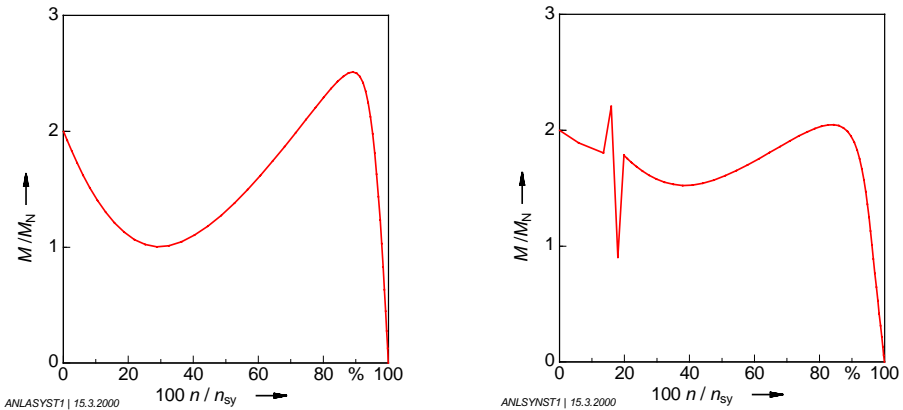


Bild 5.4 Drehmomentkennlinien mit ausgeprägtem Sattel
links: asynchron
rechts: synchron

Die messtechnische Erfassung von Drehmoment-Einsattelungen erfordert einen gewissen Aufwand: Das mit einer Drehmoment – Messnabe elektronisch erfasste Drehmoment und die Drehzahl werden auf einen x-y-Schreiber gegeben und beim langsamen Hochlauf aufgezeichnet. Bei raschem Durchlauf können synchrone Sättel durch das Massenträgheitsmoment »überspielt« und nicht erfasst werden. Oft muss eine verdächtige, diskrete Drehzahl gezielt »angefahren« werden, um den scharf ausgeprägten Drehmenteinbruch zu ermitteln. Hieraus ergibt sich für die praktische Anwendung, dass sich synchrone Sättel meist nicht bemerkbar machen. Die Kombination eines asynchronen mit einem synchronen Sattel kann hingegen den Hochlauf behindern. **Bild 5.5** zeigt die Hochlaufkennlinie eines Motors (M) mit ausgeprägtem asynchronem Sattel und eine Lastkennlinie (L). Im dunkel angelegten Bereich überwiegt M: Es kann beschleunigt werden. Im hell angelegten Bereich bei S überwiegt die Last L: Der Antrieb bleibt hängen, nimmt fast den Anzugsstrom auf und wird durch den Schutzschalter vom Netz getrennt, ehe er seine Drehzahl erreicht.

5 Direkte Einschaltung am starren Netz

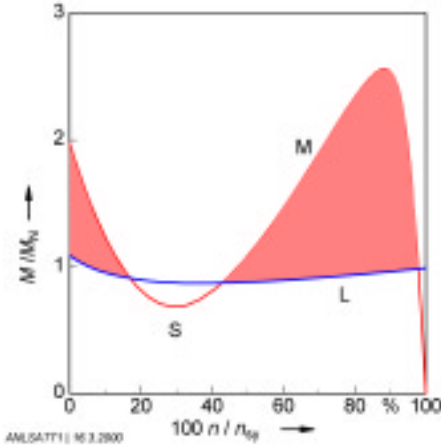


Bild 5.5
Hochlauf eines Motors (M) mit ausgeprägtem asynchronem Sattel (S) gegen eine Last (L)

Hochlauf wird im Bereich S unterbrochen

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde für Anzugsstrom und Anzugsmoment der »quasistationäre« Zustand vorausgesetzt. In der »alten« deutschen VDE 0530 Teil 1/1.66 war noch ausdrücklich definiert, dass diese Werte »nach Abklingen der **Ausgleichsvorgänge**« gelten. Damit sollte deutlich gemacht werden, dass nicht die **Spitzenwerte** vor dem Einschwingen in den stationären Zustand gemeint sind – dass solche Spitzenwerte aber durchaus vorhanden sind. Da die Ausgleichsvorgänge nach wenigen Halbperioden beendet sind, kann ihr thermischer Effekt vernachlässigt werden. Für empfindliche elektronische oder mechanische Bauteile ist jedoch durchaus interessant, wie hoch die Spitzenwerte sein können. Eine messtechnische Erfassung ist außerordentlich schwierig; dementsprechend schwanken die Angaben in der Literatur [2.8, 2.10, 2.11]:

- Spitzenwert des Stromes $I_{\max} = (2 \dots 5) \times I_A$
- Spitzenwert des Momentes $M_{\max} = (3 \dots 6) \times M_A$

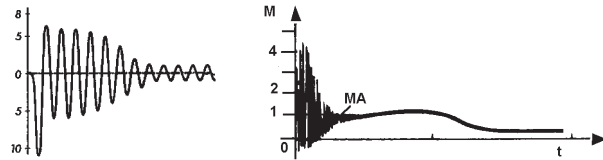


Bild 5.6
Spitzenwerte beim Einschalten vor dem Einschwingen in den stationären Zustand
links: Strom
rechts: Moment

Das **Schalten in Phasenopposition** ist ein Sonderfall der oben beschriebenen Vorgänge. In Spezifikationen von Kraftwerksausrüstern wird gelegentlich verlangt, dass Motoren eine Umschaltung auf ein Fremdnetz in Phasenopposition aushalten müssen. Nach Literaturangaben ist hierbei ein Spitzenmoment vom 8...10-fachen Bemessungsmoment zu erwarten: Dies ist eine außergewöhnlich hohe Beanspruchung für die mechanischen Übertragungselemente. Die Forderung ist überzogen

5 Direkte Einschaltung am starren Netz

und wird den praktischen Verhältnissen nicht gerecht, da normalerweise vor der Umschaltung auf ein Fremdnetz sauber synchronisiert und selbst bei einer Notumschaltung auf 20° Phasenwinkel und ca. 40% Restspannung optimiert wird. Phasenopposition kann jedoch auch bei Industrieanwendungen auftreten, wenn das Netz sehr kurz (z. B. einige Millisekunden) einbricht. In diesem Fall hat die vom Motor generatorisch erzeugte Remanenzspannung eine abnehmende Frequenz und kann – wenn auch mit reduzierter Amplitude – zur wiederkehrenden Netzspannung in Phasenopposition stehen. Die Drehmomentspitzen können bei 3...8-fachem Bemessungsmoment liegen.

6 Unterteilter Anlauf bei Polumschaltung

Bei polumschaltbaren Motoren mit zwei oder mehr Drehzahlen sollte stets über die niedrigste Drehzahlstufe eingeschaltet werden: Dadurch werden Anzugsstrom und Verlustwärme reduziert.

Bei reinem Schwungmassenanlauf entsprechen die Verluste im Rotor rechnerisch der Energie, welche die beschleunigten Massen nach dem Hochlauf haben, also

$$W_{\text{rot}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2} = \frac{J \cdot n^2}{182,5}$$

Die Verluste lassen sich nach **Bild 6.1** graphisch darstellen:

Beim Einschalten springt das Drehfeld ϕ fast ohne Verzögerung auf die Synchrondrehzahl n_{sy} , während der Rotor erst innerhalb der Zeit t_a auf diesen Wert beschleunigt. Die Differenz zwischen Drehfelddrehzahl n_{sy} und Rotordrehzahl n_{rotor} ist ein Maß für die Verlustleistung, das Dreieck über der Zeit t_a stellt die im Rotor auftretende Verlustarbeit V_{rotor} dar.

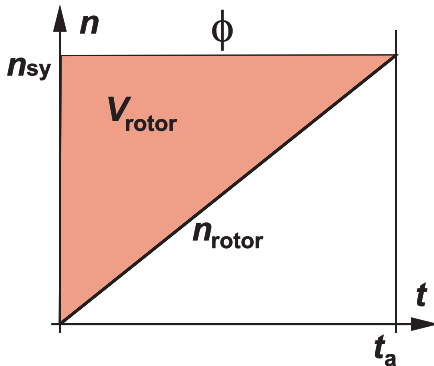


Bild 6.1 Verlustarbeit im Rotor V_{rotor} bei Direktanlauf mit voller Drehfelddrehzahl n_{sy}

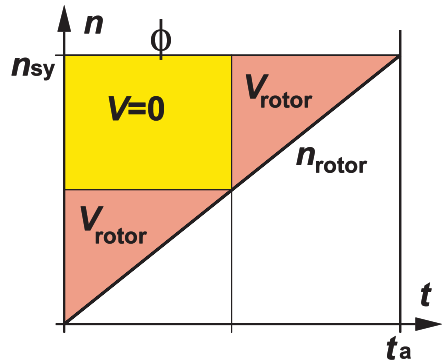


Bild 6.2 Verlustarbeit im Rotor V_{rotor} bei unterteiltem Hochlauf durch Polumschaltung 1:2 (z.B. 4/2-polig) mit verlustfreier Fläche $V=0$

Bei unterteiltem Hochlauf (z. B. durch Polumschaltung im Drehzahlverhältnis 1 : 2 nach **Bild 6.2**) kann die Verlustarbeit im Vergleich zur Direkteinschaltung auf die Hälfte vermindert werden.

Bei anderen Polzahlverhältnissen ist die Einsparung teilweise erheblich niedriger.

6 Unterteilter Anlauf bei Polumschaltung

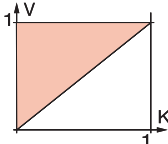
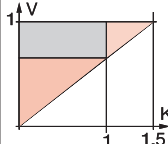
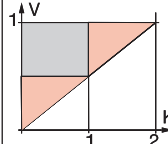
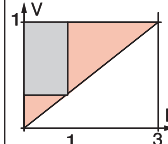
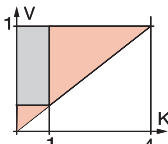
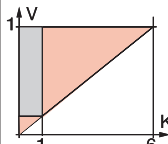
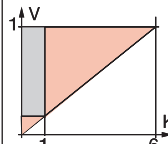
Diagramm				
Polzahl	z. B. 4	6/4	8/4, 4/2	6/2
Verhältnis K	1	1 : 1,5	1 : 2	1 : 3
Verlust-Relation R	1	0,555	0,5	0,555
Diagramm				
Polzahl	8/2	12/2	20/2	
Verhältnis K	1 : 4	1 : 6	1 : 10	
Verlust-Relation R	0,625	0,72	0,82	

Bild 6.3 Verlustarbeit (rote Flächen) und Verlusteinsparung (graue Flächen) bei stufenweiser Einschaltung durch Polumschaltung im Drehzahlverhältnis K

7 Stern-Dreieck-Anlauf

In Niederspannungsnetzen wird die Höhe des zulässigen Anzugsstromes durch die Elektrizitätswerke begrenzt. Die Vorschriften können im Einzelfall örtlich verschieden sein, doch gibt die folgende Tabelle aus den »Technischen Anschlussbedingungen« der VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke) einen guten Anhaltspunkt.

	Direkte Einschaltung	Stern-Dreieck- Einschaltung	Einschaltung über Anlass- vorrichtung $I_A \leq 2 I_N$
Einphasenstrom- Motoren bei 230 V	bis 1,1 kW	–	–
Einfach-Käfigläufer- Drehstrommotoren bei 400 V	bis 2,2 kW	bis 4 kW	bis 11 kW
Stromverdrängungs- läufer-Drehstrom- motoren bei 400 V	bis 4 kW	bis 7,5 kW	bis 11 kW

Tabelle 7.1 Maximal zulässige Motor-Bemessungsleistung bei Niederspannungsversorgung nach den Einschaltvorschriften der VDEW

Zur Erfüllung dieser Vorschriften wird häufig die **Stern-Dreieck-Einschaltung** verwendet.

Die Motorwicklung ist für die Betriebsspannung in Δ -Schaltung ausgelegt, wird aber in der Anlassstufe in Y geschaltet. Die Spannung pro Wicklungsstrang beträgt dadurch nur das $1/\sqrt{3}$ fache der Bemessungsspannung. Anzugsmoment und Anzugsstrom sind gegenüber der direkten Einschaltung auf ein Drittel vermindert.

$$M_{AY} = \frac{M_{A\Delta}}{3}$$

$$I_{AY} = \frac{I_{A\Delta}}{3}$$

7 Stern-Dreieck-Anlauf

Hat also ein Motor beispielsweise bei Direkteinschaltung ein Anzugsmoment von 2fachem Bemessungsmoment, so ist sein Anzugsmoment bei Y-Einschaltung nur noch

$$M_{AY} = \frac{1}{3} \cdot M_{A\Delta} = \frac{2}{3} \cdot M_N$$

d. h. der Motor läuft in der Anlassstellung bei Belastung mit höheren Drehmomenten als $(2/3)M_N$ nicht an. **Stern-Dreieck-Einschaltung ist also nur bei Leer- oder Schwachlast-Anlauf anwendbar.**

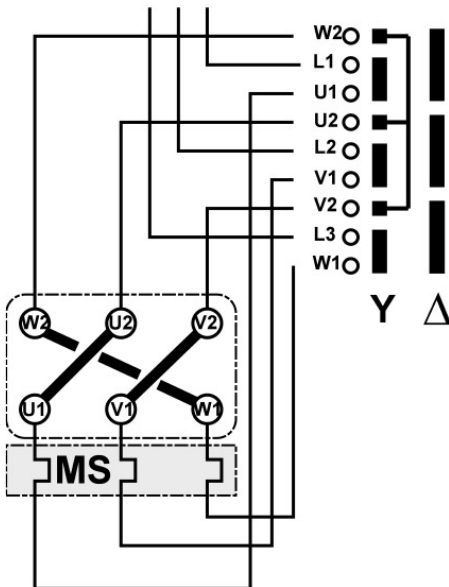


Bild 7.2

Schaltbild für Y-Δ-Anlauf mit Anordnung und Bemessung des Motorschutzrelais für den Strangstrom $I_{ph} = I_N / \sqrt{3}$

7 Stern-Dreieck-Anlauf

Bei Y- Δ -Anlauf gegen Schwerlast oder Vollast wird die Anlaufspitze von Moment und Strom ungenügend gedämpft, wie Bild 7.3 zeigt.

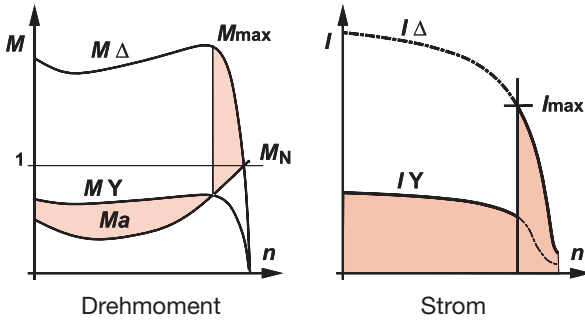


Bild 7.3 Spitzenwerte von Moment M_{max} und Strom I_{max} bei ungünstiger Umschaltung von Y auf Δ wegen Anlauf gegen zu hohe Last

Weil das auf 1/3 reduzierte Hochlaufmoment für einen Anlauf gegen Teil- oder Vollast nicht ausreicht, wird gelegentlich die **verstärkte Stern-Dreieck-Einschaltung** verwendet. Moment und Strom sind auf etwa 50 % der Werte bei Direkteinschaltung vermindert. Die Methode erfordert einen relativ hohen Aufwand für die Wicklungsausführung (unterteilte Stränge) und Verdrahtung und hat deshalb mit dem einfachen Y- Δ -Anlauf nur noch die Bezeichnung gemeinsam (Bild 7.4).

I Anlauf	II Anlauf	III Betrieb
$M_A/M_{AD} \approx 30\%$	$\approx 40 \dots 50\%$	100 %
$I_A/I_{AD} \approx 30\%$	$\approx 50\%$	100 %

Bild 7.4 Schaltung und Kennwerte bei verstärkter Stern-Dreieck-Einschaltung

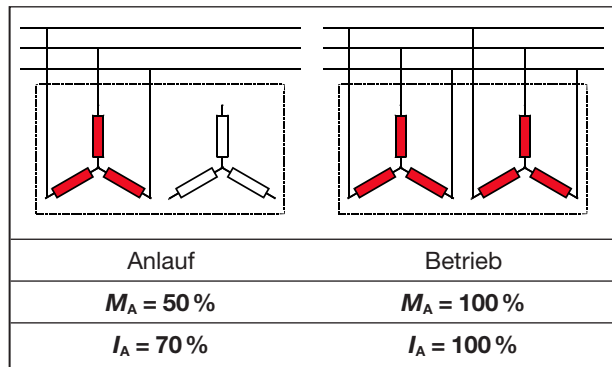
Obige Kennwerte für Anzugsmoment und Anzugsstrom im Vergleich zur Direkteinschaltung (Index D) beziehen sich auf eine symmetrische Unterteilung der Wicklungsstränge. Es wurden auch asymmetrische Aufteilungen mit entsprechend geänderten Momenten und Strömen ausgeführt. Diese komplizierten Verfahren sind heute weitgehend durch elektronische Sanftanlasser abgelöst.

8 Teilwicklungsanlauf

Die in Europa häufig verwendete Y-Δ-Einschaltung zur Verminderung von Anzugsstrom und Anzugsmoment ist in Nordamerika vergleichsweise wenig gebräuchlich. Relativ häufig wird als Anlassverfahren das **Part-Winding-Starting** verwendet, das in NEC 430-3 [2.5] definiert ist: Voraussetzung ist eine Wicklung, bei der im Normalbetrieb zwei Gruppen parallel geschaltet sind. Für den Anlauf wird die Parallelschaltung aufgehoben, d. h. es ist nur eine der beiden Gruppen aktiv. Dies wirkt wie ein Vorwiderstand und vermindert Anzugsmoment und Anzugsstrom, wenn auch nicht in dem Maße wie bei der Y-Δ-Einschaltung.

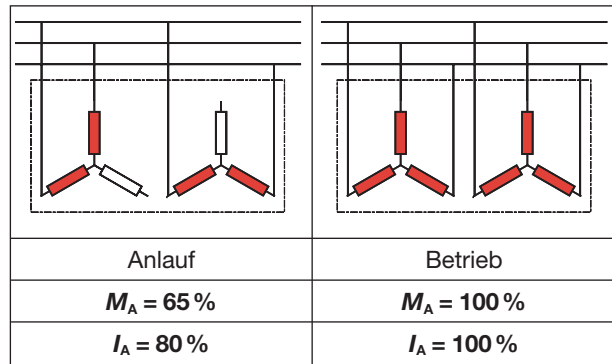
Es gibt zahlreiche Schaltungsvarianten – ein einfaches Beispiel ist in **Bild 8.1** dargestellt: Die Wicklung ist für die Bemessungsspannung mit zwei parallelen Zweigen (YY-Schaltung) ausgelegt; beim Anlauf wird nur einer der Zweige aktiviert. Für diese Schaltung gilt:

Bild 8.1
Grundsätzliches Schaltbild für den in Nordamerika gebräuchlichen Teilwicklungsanlauf (part-winding-starting) nach der »3-3-Methode«, d. h. 3 Anlaufkontakte + 3 Betriebskontakte



Bei der etwas komplizierteren »4-2-Methode« werden zunächst 2/3 der Stränge aktiviert:

Bild 8.2
Grundsätzliches Schaltbild für den in Nordamerika gebräuchlichen Teilwicklungsanlauf (part-winding-starting) nach der »4-2-Methode«, d. h. 4 Anlaufkontakte + 2 Betriebskontakte



9 Anlasstransformator

Das Anzugsmoment eines Asynchronmotors hängt quadratisch von der angelegten Spannung ab, der Anzugsstrom linear:

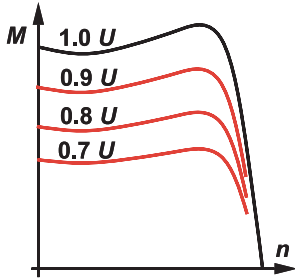


Bild 9.1
Drehmoment-Reduzierung in quadratischer
Abhängigkeit von der Ausgangsspannung eines
Anlasstransformators

$$M_A \approx U^2$$

$$I_A \approx U$$

Im Gegensatz zum Y- Δ -Anlauf lässt sich mit einem einstellbaren Anlasstransformator eine lastabhängige Optimierung des Anlaufvorganges ermöglichen – wenn auch mit relativ großen Aufwand.

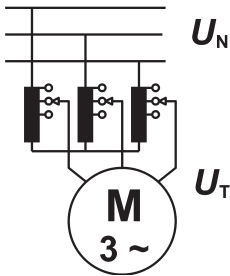


Bild 9.2
Kennwerte mit Anlasstransformator

\ddot{u} – mit Transformator

M – Moment

I – Strom im Netz

S – Scheinleistung

Index N – ohne Transformator

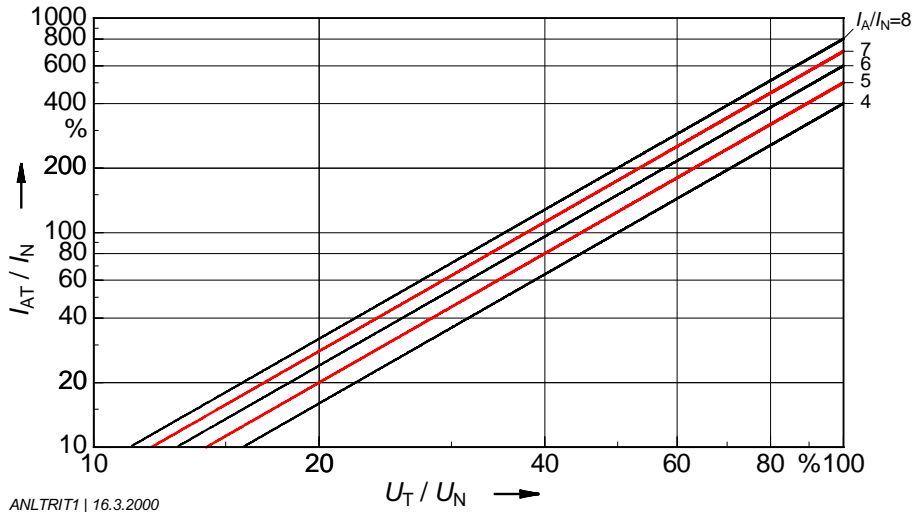
T – mit Transformator

A – Anzug

$$\ddot{u} = \frac{U_T}{U_N}$$

$$\frac{M_{AT}}{M_{AN}} = \frac{I_{AT}}{I_{AN}} = \frac{S_{AT}}{S_{AN}} = \ddot{u}^2$$

9 Anlasstransformator



ANLTRIT1 | 16.3.2000

Bild 9.3 Reduzierung des relativen Anzugsstromes im Netz bei Verwendung eines Anlasstransformators

- I_A/I_N Rel. Anzugsstrom im Netz bei Direkteinschaltung
- I_{AT}/I_N Rel. Anzugsstrom im Netz mit Anlasstrafo
- U_T Spannung am Transformator-Ausgang

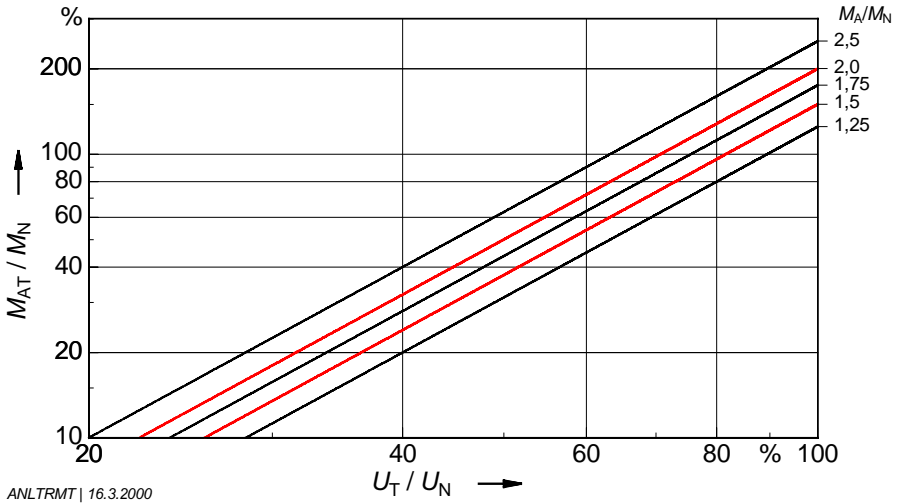


Bild 9.4 Reduzierung des relativen Anzugsmomentes bei Verwendung eines Anlasstrafo

- M_A/M_N Rel. Anzugsmoment bei Direkteinschaltung
- M_{AT}/M_N Rel. Anzugsmoment mit Anlasstransformator
- U_T Spannung am Transformator-Ausgang

10 Vorwiderstände

Eine quadratische Herabsetzung des Hochlaufmomentes durch Spannungsverminderung ist auch durch Spannungsabfall an Vorwiderständen erreichbar.

10.1 Dreiphasige Vorwiderstände

Bild 10.1.1

Kennwerte mit 3phasigen

Vorwiderständen

R_V – Widerstand

M – Moment

I – Strom

U – Spannung

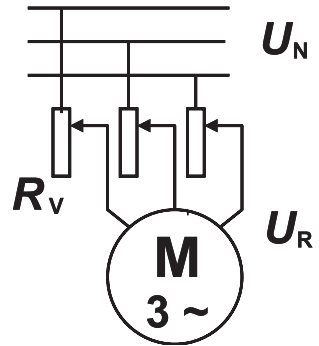
Index N – Netz

R – mit Widerstand

A – Anzug

$$\frac{M_{AR}}{M_{AN}} = \left(\frac{U_R}{U_N} \right)^2$$

$$\frac{I_{AR}}{I_{AN}} = \frac{U_R}{U_N}$$



Bei der Berechnung des Vorwiderstandes R_V ist der Leistungsfaktor im Kurzschluss $\cos \varphi_A$ zu berücksichtigen; Richtwerte sind **Bild 10.1.2** zu entnehmen.

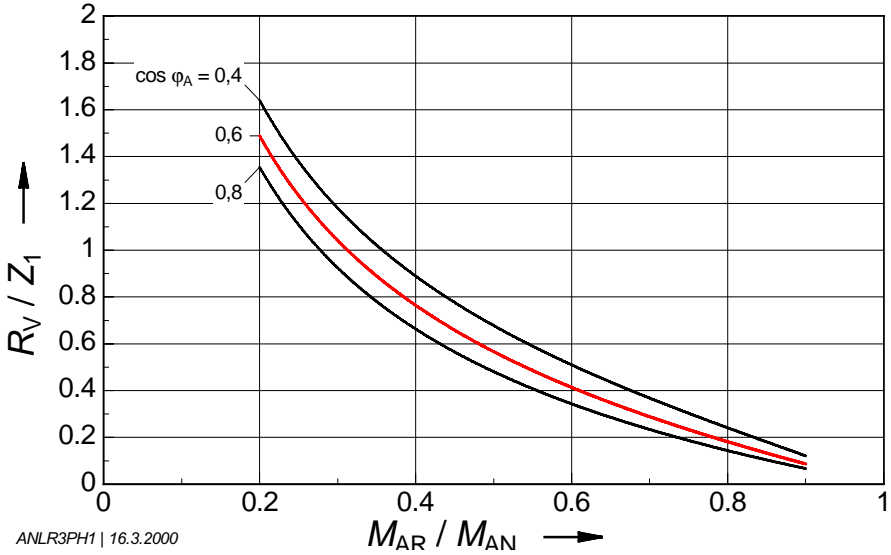


Bild 10.1.2 Richtwerte für 3phasige Vorwiderstände in Abhängigkeit von der gewünschten Drehmoment-Reduzierung

- R_V Vorwiderstand/Leitung (Ω)
- M_{AR} reduziertes Anzugsmoment
- M_{AN} Anzugsmoment am Netz
- $\cos \varphi$ Leistungsfaktor im Anzug
- Z_1 Scheinwiderstand pro Wicklungsstrang

$$Z_1 = \frac{U_N}{1,73 \cdot I_A}$$

10.2 Einphasiger Vorwiderstand (KUSA-Widerstand)

Wenn es nur auf die Verminderung des Anzugsmomentes und nicht auf eine entsprechende Reduzierung des Anzugsstromes ankommt, kann der Geräte- und Schaltungsaufwand herabgesetzt werden, indem nur in einen der drei Netzleiter ein Vorwiderstand eingebaut wird. Das Verfahren ist unter der Bezeichnung **KUSA-Schaltung** (**KU**rzschluss-**SA**nftanlauf) recht stark verbreitet. Unsymmetrie und Leistungsfaktor im Kurzschluss machen die Vorausberechnung kompliziert; sie wurde deshalb in eine praxisgerechte Form gebracht. Da sowohl die verschiedenen Motorauslegungen der Hersteller als auch unterschiedliche Lastverhältnisse eine relativ große Streuung bedingen, wird empfohlen, den KUSA-Vorwiderstand reichlich zu bemessen und mit einer Abgriffschelle zu versehen, sodass er vor Ort optimal angepasst werden kann. Für die Strombelastbarkeit genügt eine Auslegung für S2, S3 oder S4.

10.2 Einphasiger Vorwiderstand (KUSA-Widerstand)

Nach dem Hochlauf ist der Vorwiderstand gemäß **Anschlussbild 10.2.1** zu überbrücken. Bei relativ langer Anlaufzeit besteht die Gefahr, dass ein phasenausfallempfindliches Motorschutzrelais einen »Zweileiterbetrieb« erkennt und auslöst. In diesem Fall ist die Phasenausfallempfindlichkeit auf andere Weise zu verwirklichen.

Bild 10.2.1
Anschlussbild für die KUSA-Schaltung

- c1 – Hauptschütz
- d1 – Zeitrelais
- d2 – Hilfsschütz
- r1 – KUSA-Widerstand

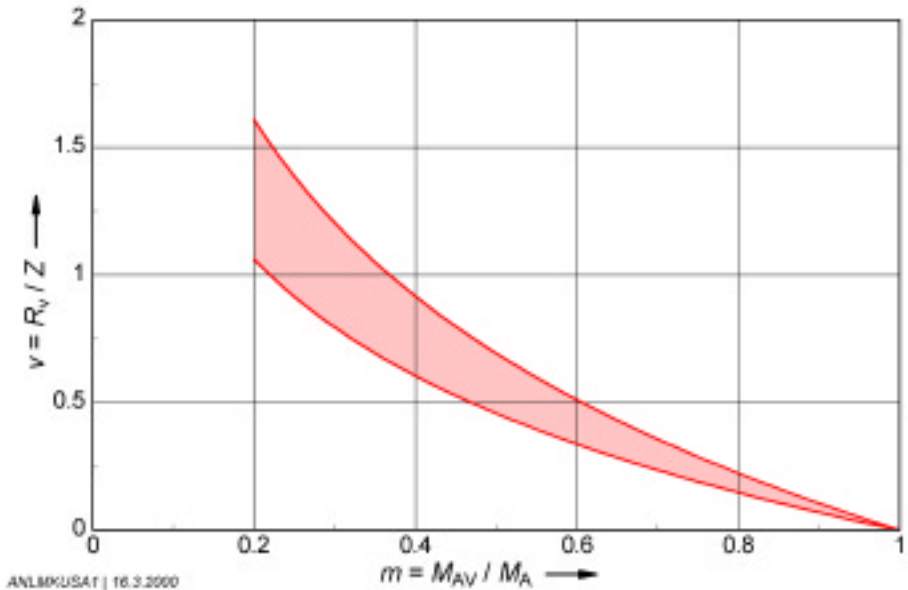
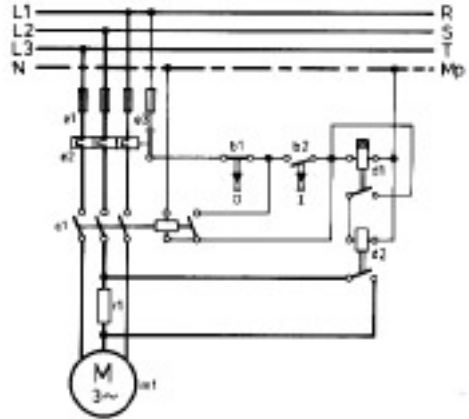


Bild 10.2.2 Richtwerte für den KUSA-Widerstand in Abhängigkeit von der gewünschten Drehmoment-Reduzierung

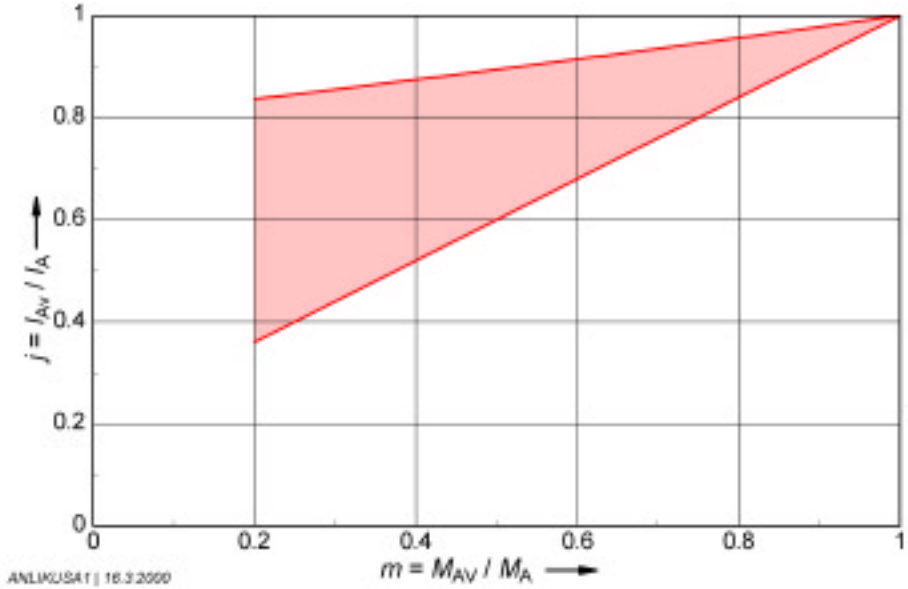


Bild 10.2.3 Richtwerte für die Abnahme des Anzugsstromes in Abhängigkeit von der Drehmoment-Reduzierung

Für die Berechnung nach obigen Diagrammen gilt:

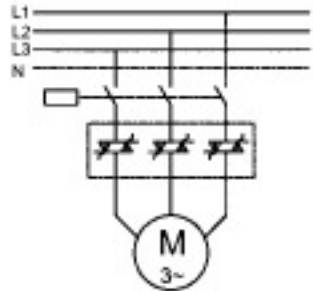
$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{cA \cdot I_N} \quad R_V = Z \cdot v \quad m = \frac{M_{AV}}{M_A} \quad j = \frac{I_{AV}}{I_A}$$

- Z – Scheinwiderstand der Wicklung in W
- U – Netzspannung in V
- I_A – Anzugsstrom am Netz in A
- cA – Stromverhältnis I_A/I_N
- R_V – KUSA-Vorwiderstand in Ω
- M_A – volles Anzugsmoment am Netz
- M_{AV} – reduziertes Anzugsmoment mit KUSA
- I_{AV} – reduzierter Anzugsstrom in A

11 Elektronische Anlaufschaltungen

Bei den Softstartern der Serie MCD 3000 wird die Motorspannung (Phasenanschnittsteuerung) in den drei Außenleitern über Thyristoren in Antiparallelschaltung gemäß **Bild 11.1** gesteuert. Über die Einstellung der Stromgrenze können Anlaufmoment und -zeit leicht und **stufenlos** einjustiert werden. Im Softstarter eingebaute Stromwandler messen den Motorstrom und liefern ein Rückführsignal zur Konstantstromregelung.

Bild 11.1
Prinzipschaltbild einer elektronischen Anlaufschaltung mit antiparallelem Thyristorpaar in allen Außenleitern



Im Gegensatz zu anderen Anlassschaltungen (außer dem frequenzgeführten Anlauf nach Abschnitt 12) werden Spannung und Drehmoment stetig verändert und Einschwingvorgänge vermieden. Die grundsätzlichen Unterschiede im Verlauf von Drehmoment und Strom im Vergleich zur Direkteinschaltung und zum nur bei Leerlauf oder Schwachlast geeigneten Stern-Dreieck-Anlaufschaltung sind in **Bild 11.2** gezeigt.

11 Elektronische Anlaufschaltungen

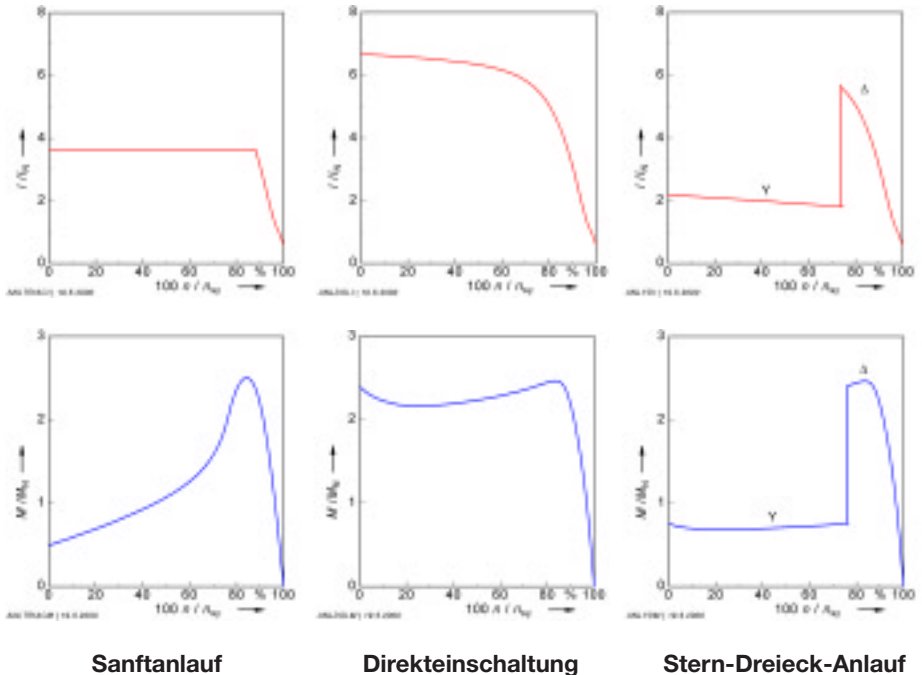



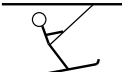



Bild 11.2 Strom I und Drehmoment M bei Sanftanlauf mit elektronischem Gerät im Vergleich zur Direkteinschaltung und zum Stern-Dreieck-Anlauf (nach Unterlagen der Fa. Danfoss Antriebs- und Regeltechnik GmbH)



Softstarter reduzieren den Anlaufstrom und die mechanische Stoßbelastung. Dies schont Transportgut und Übertragungsmittel und erhöht somit die Lebensdauer. Sie können – im Gegensatz zur Y- Δ -Einschaltung und zum KUSA-Verfahren – einfach und stufenlos an wechselnde Lastverhältnisse angepasst werden. Desweiteren bietet die Danfoss-Serie MCD 3000 eine Gleichstrom-Auslaufbremsung, deren Bremsmoment und Wirkzeit stufenlos einstellbar sind (vgl. auch Abschnitt 22).

11 Elektronische Anlaufschaltungen

Der MCD 3000-Softstarter kann für viele Anwendungen Vorteile bieten:

Anwendung	Vorteile
<p>Pumpen</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Minimierter hydraulischer Schlag in den Röhren beim Starten und Stoppen.• Unterstromschutz verhindert Schäden durch verstopfte Röhren oder Wasserniedrigstand.• Automatischer Reset gewährleistet den ununterbrochenen Betrieb von unbemannten Pumpstationen.• Phasenumkehrschutz verhindert Schäden durch Gegenlauf der Pumpe.• Schutz gegen kurzzeitige Überlast verhindert Schäden durch in die Pumpe eingesogenen Abfall.
<p>Förderbänder</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Kontrollierte Softstarts ohne mechanische Schocks (z. B. fallen beim Anlaufen keine Flaschen auf einem Förderband um), minimierte Beanspruchung.• Kontrolliertes Stoppen ohne mechanische Schocks. Softstopp.• Optimales Softstarten auch bei variierenden Startlasten wie etwa beladen oder unbeladen anlaufenden Kohleförderbändern.• Wartungsfreiheit.
<p>Zentrifugen</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Gleichmäßiges Anbringen des Drehmoments verhindert mechanische Beanspruchung.• Reduzierte Startzeiten gegenüber Stern/Dreieck-Schaltung.• Reduzierte Stoppszeiten (Gleichstrombremse und sanftes Abbremsen).
<p>Skilifte</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Ruckfreies Beschleunigen erhöht den Komfort für Skifahrer und verhindert das Schaukeln von T-Bügeln usw.• Reduzierter Anlaufstrom ermöglicht das Starten großer Motoren bei schwacher Stromversorgung.• Gleichmäßige und allmähliche Beschleunigung unabhängig davon, ob der Skilift leicht oder schwer belastet ist.• Phasenumkehrschutz verhindert den Betrieb in umgekehrter Richtung.
<p>Ventilatoren</p> 	<ul style="list-style-type: none">• Reduzierter Anlaufstrom ermöglicht es, dass große Ventilatoren gestartet werden, wenn die maximale Stromkapazität begrenzt ist.• Phasenumkehrschutz verhindert den Betrieb in umgekehrter Richtung.

11 Elektronische Anlaufschaltungen

Anwendung	Vorteile
Mischer 	<ul style="list-style-type: none"> • Sanftes Rotieren beim Start verringert die mechanische Beanspruchung.
Zerkleinerer 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Startfähigkeit verfügbar für das Starten, nachdem der Zerkleinerer angehalten hat, als er nicht ganz leer war. Das thermische Motormodell des MCD 3000 kann auf die wirkliche Überlastkapazität des angeschlossenen Motors abgestimmt werden und erlaubt es dem Motor, Anlaufdrehmoment für eine höchstmögliche Zeitdauer zu liefern.

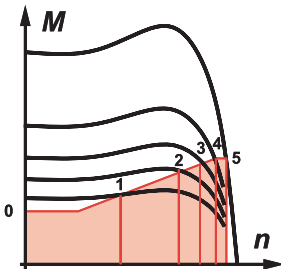


Bild 11.3
Hochlauframpe für die Steuerung der Ausgangsspannung am Sanftanlaufgerät zur langsamen Steigerung des Drehmomentes von 0 bis zum Betriebspunkt 5



Bild 11.4
Softstarter der Reihe MCD 3000 für Motorleistungen 4...1300 kW, Spannungen 200...690 V (Danfoss Antriebs- und Regeltechnik GmbH)

12 Frequenzgeführter Anlauf

Bei den bisher beschriebenen Anlaufverfahren wird die Hochlaufzeit verlängert, indem das Beschleunigungsmoment M_a reduziert wird:

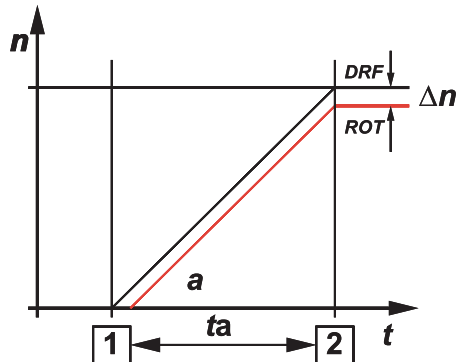
$$t_a = \frac{\Sigma J \cdot n}{9,55 \cdot M_a}$$

t_a	–	Hochlaufzeit in s
ΣJ	–	Massenträgheitsmomente in kgm^2
n	–	Drehzahl in r/min
$M_a = M_{\text{mot}} - M_L$		Beschleunigungsmoment in Nm

In jedem Fall handelt es sich um einen freien, ungeführten Anlauf, der aus den im Abschnitt 17 geschilderten Gründen nicht wesentlich länger als etwa 1...3 s dauern kann. Für längere Zeiten müssen andere, aufwändigere Verfahren eingesetzt werden – z. B. der frequenzgeführte Anlauf. Die Frequenz wird nach einer **Rampe** gemäß **Bild 12.1** in einstellbarer Zeit auf einen wählbaren Endwert hochgefahren – die Rotordrehzahl folgt mit dem für den jeweiligen Drehmomentbedarf nötigen Schlupf.

Bild 12.1
Frequenzgeführter Anlauf

- DRF – Drehfeldrehzahl
- ROT – Rotordrehzahl
- Δn – Schlupfdrehzahl
- t_a – Beschleunigungszeit
- a – Maß für Beschleunigung
- (1) – Beginn der Rampe
- (2) – Ende der Rampe



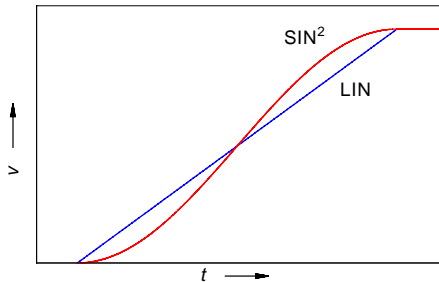
Die Beschleunigung – dargestellt durch den Winkel a – ist in üblichen praktischen Grenzen beliebig niedrig wählbar, d.h. der Vorgang ist im Sinne der üblichen Definition sehr sanft. Bei einer kritischen Betrachtung des Übergangsverhaltens an den Stellen (1) und (2) im Diagramm fällt auf, dass sich die Beschleunigung (Winkel a) »ruckartig« ändert. Tatsächlich wird die **Änderung der Beschleunigung** als **Ruck** bezeichnet:

$$r = \frac{da}{dt}$$

Der Ruck ist für Pendelungen und andere Störungen empfindlicher Transportgüter verantwortlich und wird in modernen Umrichterregelungen einfach beseitigt, indem statt der in Bild 12.1 gezeigten linearen Rampe eine mehr oder weniger an die ideale Sinusform angenäherte Rampe verwendet wird. Typische Anwendungen sind alle Fördereinrichtungen für empfindliches Transportgut, vor allem Regalförderfahrzeuge, Drehtische, fahrbare Schweißroboter.

12 Frequenzgeführter Anlauf

Solche Steuerungen werden auch als **Cosinus-Verschleifung** oder **Sinus-Verschleiß** bezeichnet.



ANLCOIN | 27.6.2000

Bild 12.2

Verlauf der Geschwindigkeit v mit Cosinus-Verschleifung oder Sinus-Verschleiß SIN² der Geschwindigkeitsübergänge im Vergleich zur linearen Rampe LIN



Bild 12.3

Frequenzumrichter der Danfoss-Reihe VLT



Bild 12.4

Aufsteck-Flachgetriebe;
Motor mit angebautem Frequenzumrichter der Danfoss Bauer Reihe »Eta-K« lieferbar für Motorleistungen bis 7,5 kW

13 Zusatz-Schwungmasse

Ein Blick auf die Formel für die Hochlaufzeit zeigt, dass auch über die Vergrößerung der Massenträgheitsmomente und eine Erhöhung der Läuferdrehzahl eine Verlängerung der Anlaufzeit möglich ist.

Vorteile:

- geringe Lastabhängigkeit
- kein schaltungstechnischer Aufwand

Nachteile:

- mechanische Sonderausführung
- erhöhte thermische Belastung des Motors bei Schaltbetrieb
- erhöhter Verschleiß der mechanischen Bremse bei Schaltbetrieb.

Die Vergrößerung des Massenträgheitsmomentes wird ausgedrückt durch den **Trägheitsfaktor**.

$$FI = \frac{J_{\text{ext}} + J_{\text{rot}}}{J_{\text{rot}}}$$

FI – Trägheitsfaktor (Factor of Inertia)
 J_{ext} – Externes Massenträgheitsmoment
 J_{rot} – Rotor - Massenträgheitsmoment

Je nach konstruktiver Ausführung (schwerer Lüfter, Zusatz-Schwungmasse) werden Faktoren $FI = 3 \dots 8$ erreicht.

Bild 13.1 zeigt einige prinzipielle Ausführungsmöglichkeiten mit folgenden Merkmalen:

- schwerer Lüfter: keine oder geringe Maßänderung
- interne Masse: verlängertes Motorgehäuse
- externe Masse: verlängertes zweites Wellenende, Unfallschutzbestimmungen beachten!

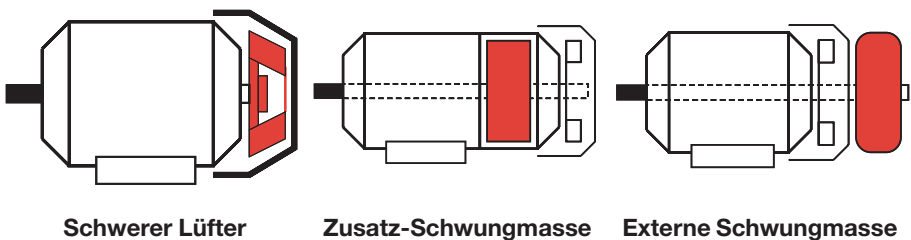


Bild 13.1 Prinzipielle Ausführungsmöglichkeiten für eine Zusatz-Schwungmasse

13 Zusatz-Schwungmasse

Der Unterschied zum normalen Antrieb wird beim Vergleich der nachfolgenden Hochlauf-Oszillogramme deutlich: Während der Normaltyp N in sehr kurzer Zeit – also »hart« – hochläuft, zeigt der Sondertyp G sowohl bei Leeranlauf als auch bei Volllast ein »sanftes« Anlaufverhalten.

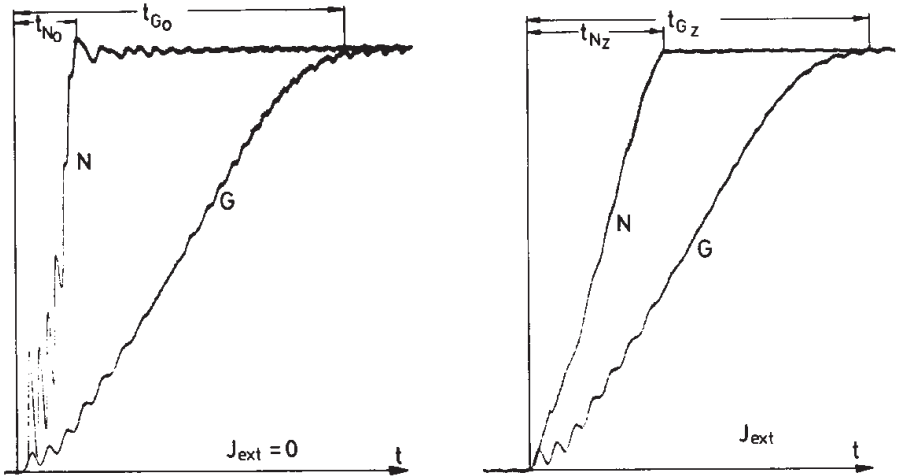


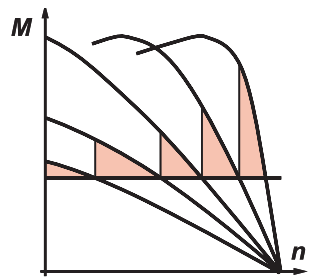
Bild 13.2
Hochlauf mit und ohne Zusatz-Schwungmasse
N – Normaltyp ohne Zusatzmasse
G – Sondertyp mit Zusatzmasse
0 – ohne externe Masse (Leer)
Z – mit externer Masse (Last)

14 Sonderläufer mit erhöhtem Schlupf

Der Anlauf von Schleifringläufermotoren mit Läuferanlasser – in diesem Beitrag nicht näher behandelt – hat einige entscheidende Vorteile:

- Die Drehzahl kann in mehrere Stufen unterteilt werden. Eine kurze Verweilpause bei Teilgeschwindigkeit gibt der Last Zeit, sich an die Geschwindigkeit zu »gewöhnen« und z. B. Pendelungen zu beenden.
- Die dreieckförmigen Abschnitte mit stetig abnehmendem Drehmoment ergeben einen sanften Drehzahlübergang, der mit einer »Cosinus-Verschleifung« (Abschnitt 2.5) zu vergleichen ist.
- Die thermischen Verluste entstehen hauptsächlich im Anlasswiderstand, also außerhalb der Maschine, wo sie leicht abführbar sind.

Bild 14.1
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Schleifringläufermotors beim Anlauf in fünf Drehzahlstufen



Asynchronmotoren mit **Sonder-Käfigläufer** verbinden einen Teil dieser Vorteile mit dem einfachen Prinzip des Kurzschlussläufers. Die Prinzipdarstellung in **Bild 14.2** soll dies deutlich machen.

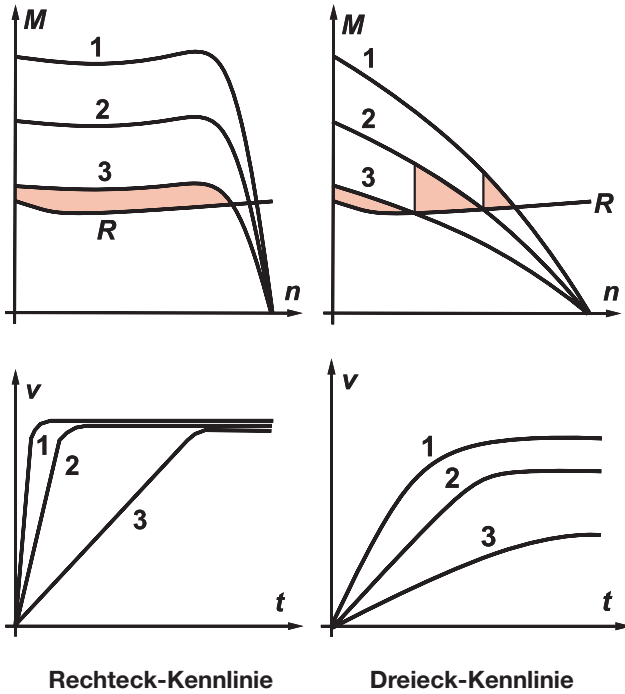


Bild 14.2 Vergleich von Rechteck- mit Dreieck-Kennlinie bei Abstufung (1, 2, 3) bis knapp über das Reibungsmoment R in der Auswirkung auf das v/t -Diagramm

Das Oszillogramm **Bild 14.3** zeigt den weichen Übergang in die Endgeschwindigkeit. Die »Dreieck-Charakteristik« wird mit einer Sondernut und/oder mit Widerstandsmaterial im Pressgussläufer erreicht. Viele **Fahrwerke** von kleinen und mittleren Krananlagen sind mit diesen äußerlich nicht von normalen Kurzschlussläufermotoren zu unterscheidenden Sonderantrieben (Danfoss-Bauer-Werksbezeichnung: DL) ausgerüstet. Da ein Eingriff in den Läuferkreis nicht möglich ist, werden die in Bild 14.2 gezeigten Stufen 1, 2 und 3 durch »verstärkten Y- Δ -Anlauf« nach Abschnitt 7 erreicht.

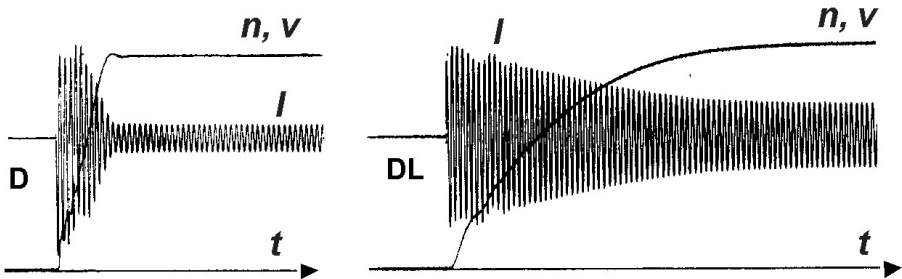


Bild 14.3 Vergleich von Strom I , Drehzahl n und Geschwindigkeit v über der Hochlaufzeit t eines üblichen Antriebes (D) mit einem speziellen Kranfahrantrieb (DL)

Bild 14.4
Sonder-Kurzschlussläufermotoren der Bauart DL am Drehwerk und Fahrwerk eine Turmdrehkrans



15 Anlaufkupplungen

Anlaufkupplungen übertragen zunächst ein relativ geringes Drehmoment und erlauben dem Motor einen raschen Leeranlauf, während sich die Last nur verzögert in Bewegung setzt. Durch selbsttätig ablaufende Vorgänge (Fliehkraft, Turbulenz) oder durch elektromagnetische Steuerung wird das übertragbare Moment der Kupplung langsam gesteigert und die meist schwere Last (z. B. ein langes Förderband) sanft beschleunigt. Diese Kupplungsart wird auch wegen der thermischen Entlastung von Antrieb und Netz verwendet. Trotz gewisser bauartbedingter Unterschiede gilt für Anlaufkupplungen das nachstehende, grundsätzliche Hochlaufdiagramm.

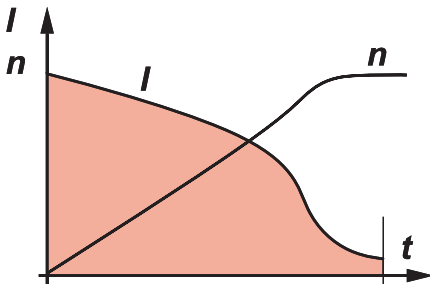
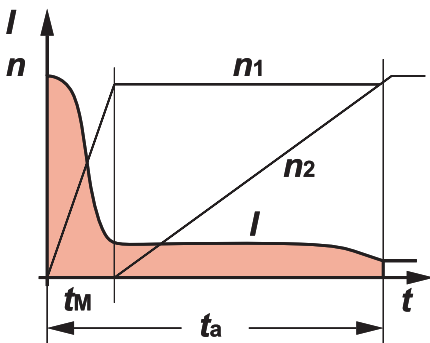


Bild 15

Verlauf von Motordrehzahl n_1 , Arbeitsdrehzahl der angetriebenen Maschine n_2 und Strom I bei

- Direkteinschaltung (oben)
- mit Anlaufkupplung (unten)



Anlaufzeit mit Kupplung:

t_M - Motor

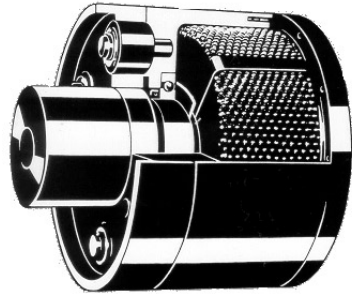
t_a - Last

15.1 Fliehkraftkupplungen

Diese Kupplungen werden durch die Drehzahl betätigt. Ein langsamer, vom Quadrat der Drehzahl abhängiger Aufbau des übertragbaren Drehmomentes ist erwünscht, um einen Sanftanlauf zu bewirken.

Bild 15.1
Prinzipbild einer Fliehkraftkupplung mit
Metallkugeln

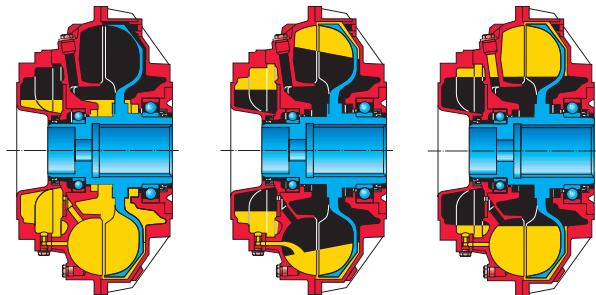
(Bauart METALLUK)



15.2 Hydrodynamische Kupplungen

Bei Strömungs- oder Turbokupplungen wird das Drehmoment verschleißfrei über eine Ölfüllung übertragen. Durch eine Verzögerungskammer wird es besonders schonend aufgebaut.

Bild 15.2
Füllstand einer
hydrodynamischen Kupp-
lung bei verschiedenen
Betriebszuständen
links Stillstand
Mitte Anfahren
rechts Betrieb



(Bauart VOITH
Turbokupplung)

15.3 Induktionskupplungen

Diese Kupplungsart ist eine Abwandlung der Drehfeldmaschine. Im Gegensatz zum Induktionsmotor hat sie zwei umlaufende Teile, deren Schlupf von zunächst 100 % auf den Nennschlupf von wenigen Prozent abnimmt. Die Drehmomentkennlinie ist auf einfache Weise elektromagnetisch steuerbar. Es gibt Ausführungen mit und ohne Schleifringe.

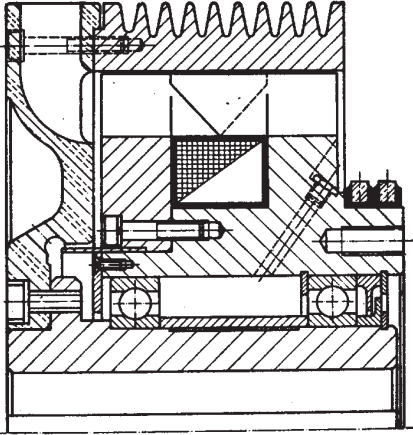


Bild 15.3
Schnittbild einer Induktionskupplung
nach dem Wirbelstromprinzip

(Bauart STROMAG)

16 Thermische Bewertung des Schaltbetriebes

Übersteigt die Schalthäufigkeit ein normales Maß (Richtwert etwa 60 Einschaltungen/h), so ist die thermische und – je nach Art der Kraftübertragung – auch die mechanische Zusatzbeanspruchung bei der Projektierung des Antriebes zu berücksichtigen.

16.1 Kennzeichnung von Schalt-Betriebsarten

In DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1) sind besondere Kurzbezeichnungen für die Kennzeichnung des Schaltbetriebes vorgesehen. Die Betriebsart S3 bezeichnet keinen Schaltbetrieb; sie wurde in den Vergleich aufgenommen, um den Unterschied zu S4 deutlich zu machen.

	<p>M Belastung V elektrische Verluste t Zeit t_{cyc} Spieldauer t_N Betriebszeit mit konstanter Belastung t_0 Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen</p>	<p>S3 Betriebsart S3 – Periodischer Aussetzungsbetrieb Ein Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Betriebszeit mit konstanter Belastung und eine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen umfasst, wobei der Anlaufstrom die Übertemperatur nicht merklich beeinflusst. Die Kennzeichnung ist S3, ergänzt durch die relative Einschaltdauer. Beispiel: S3 25 %</p>
--	--	--

<p>The figure consists of two vertically aligned graphs sharing a common time axis (t). The top graph plots torque (M) on the vertical axis. It shows a periodic load cycle. The total duration of one cycle is labeled t_{cyc}. Within each cycle, there is a period of constant load labeled t_N and a period of zero load (no current in windings) labeled t_0. The load is represented by a grey shaded area that starts at a high value and then drops to a lower, constant value. The bottom graph plots voltage (V) on the vertical axis. It shows the voltage profile during the switching process. The time from the start of the voltage rise to the point where it reaches its steady-state value is labeled t_a (anlaufzeit). The time during which the voltage is zero, corresponding to the t_0 period in the torque graph, is also shown.</p>	<p>M Belastung V elektrische Verluste t Zeit t_{cyc} Spieldauer t_N Betriebszeit mit konstanter Belastung t_0 Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen t_a Anlaufzeit</p> <p>Relative Einschaltdauer $= (t_a + t_N)/t_{cyc}$</p>	<p>S4 Betriebsart S4 – Periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs Ein Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine merkliche Anlaufzeit, eine Betriebszeit mit konstanter Belastung und eine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen umfasst. Die Kennzeichnung ist S4, ergänzt durch die relative Einschaltdauer, das Massenträgheitsmoment des Motors (J_M) und das Massenträgheitsmoment der Belastungsmaschine (J_{ext}), beide auf die Motorwelle bezogen. Beispiel: S4 25 % $J_M = 0,15 \text{ kgm}^2$ $J_{ext} = 0,7 \text{ kgm}^2$</p>
---	--	--

16.1 Kennzeichnung von Schalt-Betriebsarten

<p>The diagram consists of two vertically aligned graphs sharing a common horizontal time axis (t). The top graph plots torque (M) on the vertical axis. It shows a sequence of pulses: a positive pulse of duration t_a, a longer positive pulse of duration t_N, a zero-torque interval of duration t_o, a negative pulse of duration t_{Br}, and another positive pulse. The total duration of one cycle is labeled t_{cyc}. The bottom graph plots electrical losses (V) on the vertical axis. It shows positive pulses corresponding to the positive torque pulses in the top graph, with the highest loss occurring during the t_N interval.</p>	<p>M Belastung V elektrische Verluste t Zeit t_{cyc} Spieldauer t_N Betriebszeit mit konstanter Belastung t_o Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen t_{Br} Zeit mit elektrischer Bremsung</p> <p>Relative Einschaltdauer $= (t_a + t_N + t_{Br})/t_{cyc}$</p>	<p>S5 Betriebsart S5 – Periodischer Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung Ein Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Anlaufzeit, eine Betriebszeit mit konstanter Belastung, eine Zeit mit schneller, elektrischer Bremsung und eine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen umfasst. Die Kennzeichnung ist S5, ergänzt durch die relative Einschaltdauer, das Massenträgheitsmoment des Motors (J_M) und das Massenträgheitsmoment der Belastungsmaschine (J_{ext}), beide auf die Motorwelle bezogen. Beispiel: S5 25 % $J_M = 0,15 \text{ kgm}^2$ $J_{ext} = 0,7 \text{ kgm}^2$</p>
--	--	--

<p>The figure consists of two vertically aligned graphs sharing a common time axis (t). The top graph plots torque (M) on the vertical axis. It shows a sequence of three phases: a constant load phase (grey rectangle) of duration t_N, a braking phase (grey rectangle with negative torque) of duration t_{Br}, and a total cycle time t_{cyc} indicated by a double-headed arrow above the first two phases. The bottom graph plots voltage (V) on the vertical axis. It shows a constant load phase (orange rectangle) of duration t_0 and a braking phase (orange rectangle) of duration t_{Br}.</p>	<p>M Belastung V Elektrische Verluste t Zeit t_{cyc} Spieldauer t_N Betriebszeit mit konstanter Belastung t_0 Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen t_{Br} Zeit mit elektrischer Bremsung</p> <p>Relative Einschaltdauer=1</p>	<p>S7 Betriebsart S7 – Ununterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung Ein Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Anlaufzeit, eine Betriebszeit mit konstanter Belastung und eine Zeit mit elektrischer Bremsung umfasst. Es tritt keine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen auf. Die entsprechende Kennzeichnung ist S7, ergänzt durch das Massenträgheitsmoment des Motors (J_M) und das Massenträgheitsmoment der Belastungsmaschine (J_{ext}), beide auf die Motorwelle bezogen. Beispiel: S7 $J_M = 0,4 \text{ kgm}^2$ $J_{ext} = 7,5 \text{ kgm}^2$</p>
--	---	---

16.2 Schaltbetrieb bei überwiegender Leistungsabgabe

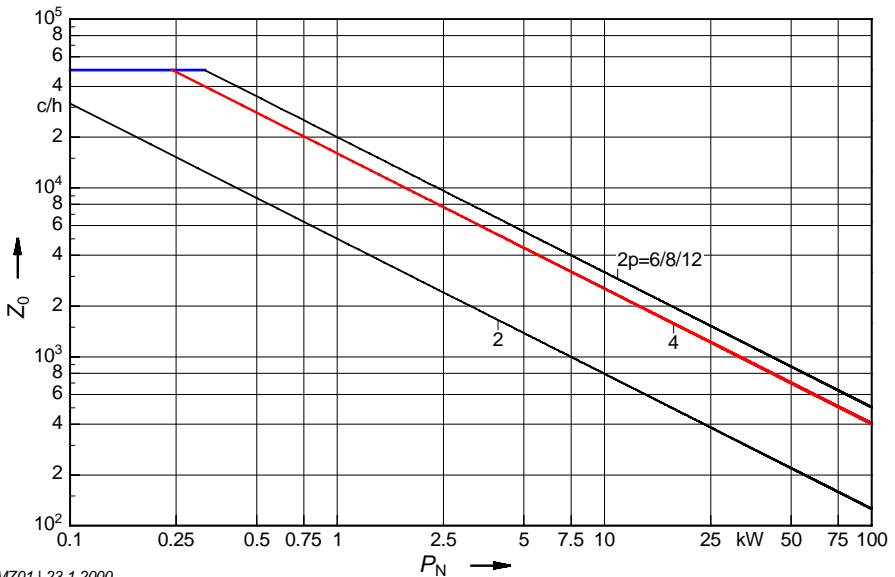
Während die in Abschnitt 16.3 beschriebene Beschleunigungsziffer (B -Wert) meist als Typkenngröße von reinen Beschleunigungsantrieben (z. B. Rollgangs-Motoren) Verwendung findet, wird für normale Drehstrommotoren (mit Leistungsabgabe im Schaltbetrieb) die Leerschalthäufigkeit als Ausgangsgröße herangezogen. Der nachfolgend beschriebene Rechengang bezieht sich ausschließlich auf die thermische Belastung der Motorwicklung; die aus dem Schaltbetrieb resultierende Stoßbelastung des Getriebes ist getrennt zu untersuchen.

16.2.1 Leerschalthäufigkeit Z_0

Die Leerschalthäufigkeit ist eine durch Versuch für jeden Motortyp ermittelte Kenngröße. Es ist die Anzahl der Anlaufschaltungen pro Stunde des leer laufenden Motors ohne fremde Trägheitsmomente, bei der die zulässige Wicklungsübertemperatur für Isolierstoffklasse F erreicht wird.

Der Versuchsablauf ist mit der Ermittlung des B -Wertes vergleichbar (siehe Abschnitt 16.3).

Richtwerte für Z_0 sind **Bild 16.2.1** zu entnehmen.



EMZ01 | 23.1.2000

Bild 16.2.1 Richtwerte für die thermisch zulässige Leerschalthäufigkeit Z_0 von IP65-Drehstrommotoren, Polzahlen $2p = 2/4/6/8/12$ in Isolierstoffklasse F

16.2.2 Zulässige Betriebsschalzhäufigkeit Z_{lim}

Die Leerschalthäufigkeit wird durch äußere Belastungen auf die zulässige Betriebsschalzhäufigkeit vermindert:

$$Z_{\text{lim}} = \frac{Z_0 \cdot K_L}{FI}$$

Der Einfluss der Belastung wird durch folgende Faktoren erfasst:

16.2.2.1 Trägheitsfaktor FI

Der Trägheitsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis aller Trägheitsmomente (einschließlich Rotor) zum Trägheitsmoment des Rotors (mit i = Getriebeuntersetzung):

$$FI = \frac{J_{\text{ext1}} + J_{\text{rot}}}{J_{\text{rot}}} = \frac{\frac{J_{\text{ext2}}}{i^2} + J_{\text{rot}}}{J_{\text{rot}}}$$

Die Anlaufzeit verlängert sich proportional mit FI :

$$t_a = \frac{J_{\text{rot}} \cdot FI \cdot n}{9,55 \cdot M_a}$$

Die zulässige Schalzhäufigkeit wird daher proportional mit FI vermindert.

Der Trägheitsfaktor FI ist für jeden Antriebsfall zu berechnen.

Richtwerte für das Rotor-Trägheitsmoment J_{rot} sind Abschnitt 26 oder den Katalogangaben zu entnehmen.

16.2.2.2 Belastungsfaktor K_L

Der Belastungsfaktor berücksichtigt die relative Auslastung P/P_N und die relative Einschaltdauer ED des Motors im Betrieb zwischen den Schaltvorgängen.

Die relative Auslastung hat einen quadratischen Einfluss auf die zulässige Schalzhäufigkeit. Die Auswirkung der relativen Einschaltdauer ist unterschiedlich: Bei Leerlauf oder geringer Auslastung wirkt die ED wegen der längeren Kühlperioden entlastend, bei Nennlast oder starker Auslastung wirkt sie wegen der Lastverluste belastend.

Werte für den Belastungsfaktor K_L sind dem **Bild 16.2.2.2** zu entnehmen. Sie gelten bei Isolierung nach Klasse F.

16.2 Schaltbetrieb bei überwiegender Leistungsabgabe

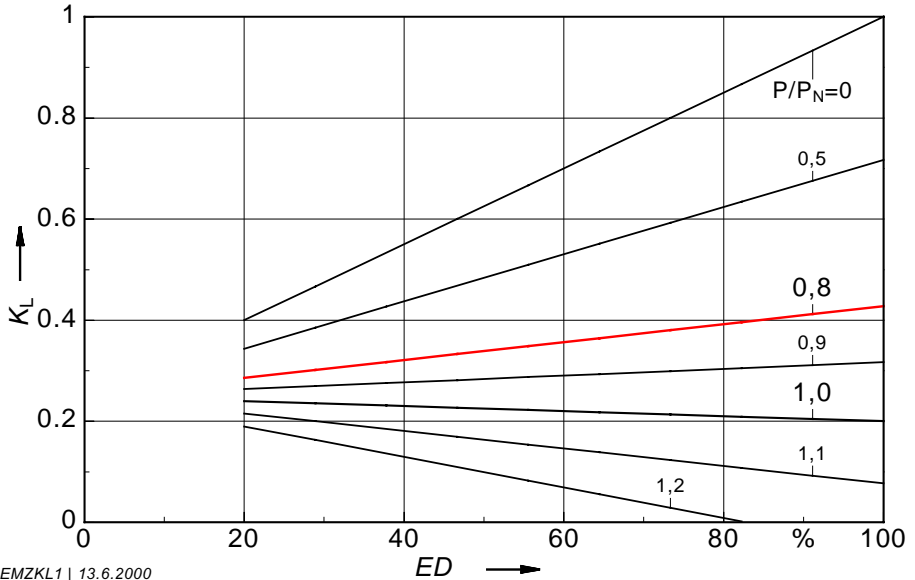


Bild 16.2.2.2

Belastungsfaktor K_L bei Schaltbetrieb, in Abhängigkeit von der relativen Einschalt-dauer ED und der relativen Motorbelastung P/P_N

16.2.3 Thermisch gleichwertige Schalthäufigkeit Z_{th}

Die unterschiedliche thermische Auswirkung der verschiedenen Schaltvorgänge wird durch die Schaltartfaktoren erfasst:

$$Z_{th} = K_A \cdot Z_A + K_G \cdot Z_G + K_R \cdot Z_R + K_B \cdot Z_B + K_M \cdot Z_A$$

Je nach Schaltvorgang sind folgende Faktoren anzuwenden:

16.2.3.1 Faktor für Anlaufschaltung K_A

Die Anlaufzeit wird umso länger, je größer das Lastmoment M_L ist:

Eine Anlaufschaltung wird daher durch das Lastmoment thermisch erschwert.

$$t_a = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot M_a} = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot (M_A - M_L)}$$

Bei Anlauf ohne Gegenmoment ist $K_A = 1$

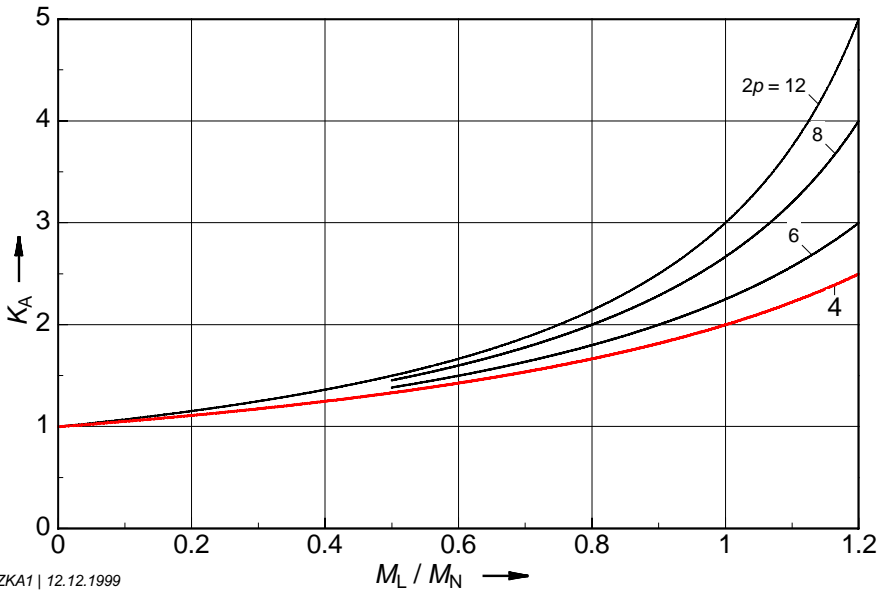
Der Einfluss von Anzugsmoment M_A und Lastmoment M_L auf den Faktor ergibt sich aus

$$K_A = \frac{M_A}{M_A - M_L}$$

Da M_A und M_L meist relativ angegeben werden, sind auch folgende Beziehungen nützlich:

$$K_A = \frac{\frac{M_A}{M_N}}{\frac{M_A}{M_N} - \frac{M_L}{M_N}} = \frac{1}{1 - \frac{M_L}{M_A}}$$

Mittelwerte für den Faktor K_A sind dem Bild 16.2.3.1 zu entnehmen.



EMZKA1 | 12.12.1999

Bild 16.2.3.1 Anlauffaktor K_A bei Schaltbetrieb. in Abhängigkeit vom relativen Lastmoment M_L/M_N während des Schaltvorganges und von der Polzahl $2p$

16.2 Schaltbetrieb bei überwiegender Leistungsabgabe

16.2.3.2 Faktoren für Gegendrehfeldbremsung K_G und Reversierung K_R

Theoretisch wirkt eine Gegendrehfeldbremsung gemäß Abschnitt 20 thermisch wie 3 Anläufe, eine Reversierung wie 4 Anläufe. Der Einfluss der Stromverdrängung vermindert diese theoretischen Werte auf folgende praktischen Faktoren:

Motor-Nennleistung	P_N	1,5	7,5	22	50 kW
Gegendrehfeldbremsung	K_G	2	1,8	1,6	1,4
Reversierung	K_R	3	2,8	2,6	2,4

16.2.3.3 Faktor für Gleichstrom-Auslaufbremsung K_B

Eine Gleichstrom-Auslaufbremsung hat thermisch etwa die 1,6fache Wirkung wie ein Anlauf; daher ist

$$K_B = 1,6$$

16.2.3.4 Faktor für mechanische Bremsung K_M

Die mechanischen Bremsen lüften beim Einschalten verzögert und verlängern dadurch die Hochlaufzeit des Motors. Diese Mehrbelastung ist nur schwer erfassbar, da sie von vielen Parametern beeinflusst wird.

Sofern die Bremse nicht vorgelüftet wird, gilt

$$K_M = \frac{1,3 \cdot t_{A1}}{t_a}$$

Bei Schnellerregung der Bremse wird

$$K_M = \frac{0,65 \cdot t_{A1}}{t_a}$$

Für t_a ist die tatsächliche Lasthochlaufzeit einzusetzen.

Ansprechzeit t_A der Bremsen bei Normalerregung siehe Tabellen im Sonderdruck SD 4.. oder SD 10.. Dieser Wert ist auch bei Schnellerregung in obige Formel einzusetzen.

16.2.4 Typprüfung

Für die Typprüfung gilt die Bedingung, dass die zulässige Betriebsschalzhäufigkeit gleich oder größer sein muss als die thermisch gleichwertige Schalzhäufigkeit, also

$$Z_{lim} \geq Z_{th}$$

16.2.5 Zusammenstellung der Formelzeichen:

- Z_0 – Leerschalthäufigkeit in c/h
- Z_{lim} – zulässige Betriebsschalzhäufigkeit in c/h
- Z_{th} – thermisch gleichwertige Schalzhäufigkeit in c/h
- Z_A – Anlaufschaltungen in c/h
- Z_G – Gegendrehfeldbremsungen in c/h
- Z_R – Reversierungen in c/h
- Z_B – Gleichstrom-Auslaufbremsungen in c/h
- F – Trägheitsfaktor
- J_{ext} – äußeres Massenträgheitsmoment in kgm^2
- J_{rot} – Rotor-Massenträgheitsmoment in kgm^2
- n – Drehzahl in 1/min
- t_a – Anlaufzeit in s
- t_{A1} – Ansprechzeit der Bremse in s
- M_a – Beschleunigungsmoment in Nm
- M_A – Anzugsmoment in Nm
- M_L – Lastmoment in Nm
- P – Leistungsbedarf in kW
- P_N – Motor-Bemessungsleistung in kW
- ED – relative Einschaltdauer in %
- K_L – Belastungsfaktor
- K_A – Schaltartfaktor für Anlauf
- K_G – Schaltartfaktor für Gegendrehfeldbremsung
- K_R – Schaltartfaktor für Reversierung
- K_B – Schaltartfaktor für Gleichstrom-Auslaufbremsung
- K_M – Schaltartfaktor für mechanische Bremsung
- i – Getriebe-Untersetzung

16.3 Schaltbetrieb bei überwiegender Beschleunigung

Bei jeder Beschleunigung (Anlaufen) und Verzögerung (elektrische Bremsung) treten relativ hohe elektrische Verluste auf, die der Anlauf- oder Bremszeit und damit also den bewegten Massen proportional sind.

Die **Beschleunigungsziffer** ist eine Maßzahl für die im Schaltbetrieb stündlich aufzubringende Beschleunigungsarbeit und damit für die Motor-Übertemperatur:

$$B = \Sigma J \cdot Z$$

B – Beschleunigungsziffer (B -Wert) in kgm^2/h
 J – Gesamt-Massenträgheitsmoment (mr^2) in kgm^2
 Z – Zahl der Einschaltungen pro Stunde in 1/h

16.3 Schaltbetrieb bei überwiegender Beschleunigung

Die Zusatz-Übertemperatur durch den Schaltbetrieb baut sich auf der Grund-Übertemperatur für Bemessungsbetrieb (ohne Schaltungen) $\Delta\vartheta_N$ auf und hängt linear mit dem B -Wert zusammen:

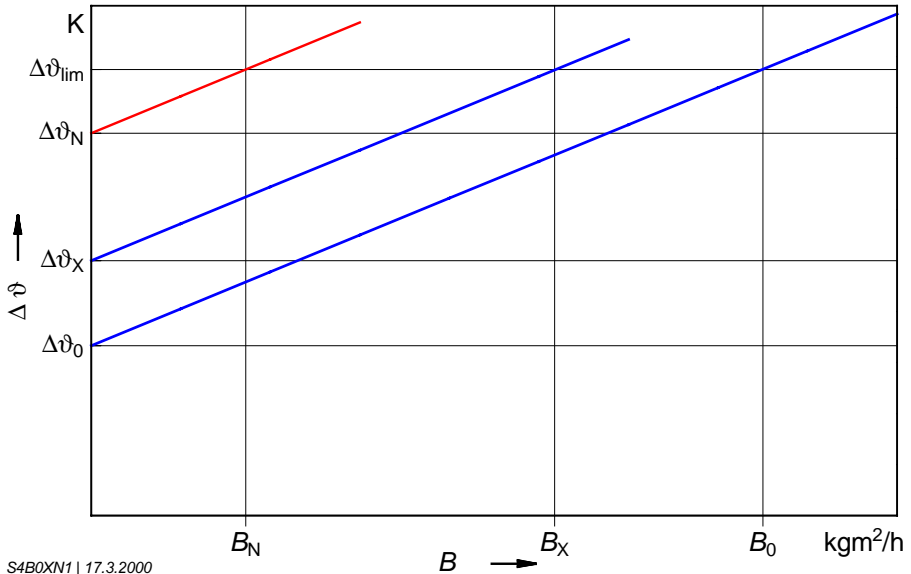


Bild 16.3.1 Beschleunigungsziffer B bei verschiedenen Belastungen (N – Bemessungslast, X – Teillast, 0 – Leerlauf)

Wird ein Motor mit Bemessungslast betrieben, sodass die nur wenig unter der zulässigen Übertemperatur ($\Delta\vartheta_{lim}$) liegende Bemessung-Übertemperatur ($\Delta\vartheta_N$) auftritt, so kann er nur noch eine geringe zusätzliche Schaltarbeit (B_N) aufbringen.

Bei Teillast (X) oder Leerlauf (0) hingegen kann dem Motor eine entsprechend höhere Schalthäufigkeit zugemutet werden, ohne dass die für seine Isolationsklasse zulässige Übertemperatur überschritten wird.

Innerhalb üblicher praktischer Grenzen ist die aus einem bestimmten B -Wert resultierende Übertemperatur konstant, gleichgültig ob der Motor mit großem Massenträgheitsmoment bei geringer Schalthäufigkeit oder aber mit kleinem Massenträgheitsmoment bei hoher Schalthäufigkeit belastet wird (vgl. **Bild 16.3.2**). Die mechanische Stoßbelastung der Übertragungsmittel wächst jedoch mit den bewegten Massen [2.9].

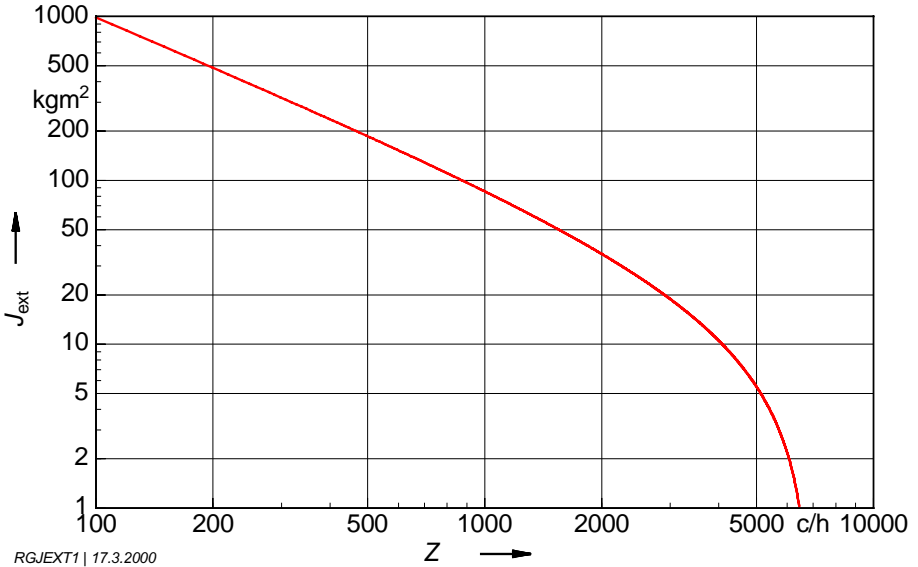


Bild 16.3.2 Zulässiges Fremd-Massenträgheitsmoment J_{ext} bei verschiedener Schalthäufigkeit Z , bezogen auf die Arbeitswelle eines 8poligen Rollgangs-Getriebemotors 1250 Nm, 75 r/min mit einem B -Wert von $1000 \text{ kgm}^2/\text{h}$



Bild 16.3.3 Anwendungsbeispiel von Rollgangs-Getriebemotoren mit überwiegender Beschleunigungsarbeit an einem Arbeitsrollgang

17 Ermittlung der Anlaufzeit

Die Verlängerung der Anlaufzeit t_a über eine Verminderung des Beschleunigungsmomentes M_a hat technische Grenzen, wie folgendes Rechenbeispiel für einen Normmotor der Baugröße 90L zeigt:

$$\begin{array}{lll} P_N = 1,5 \text{ kW} & M_A/M_N = 1,8 & F_l = 1,5 \\ n = 1405 \text{ r/min} & M_K/M_N = 2,2 & J_{\text{rot}} = 0,0035 \text{ kgm}^2 \\ & & M_N = 10 \text{ Nm} \end{array}$$

$$M_{\text{Hmittel}} = \frac{(1,8 + 2,2)}{2} \cdot 10 = 20 \text{ Nm}$$

$$M_a = M_{\text{Hmittel}} - M_N = 20 - 10 = 10 \text{ Nm}$$

$$t_a = \frac{0,0035 \cdot 1,5 \cdot 1405}{9,55 \cdot 10} = 0,074 \text{ s}$$

Für einen »Sanftanlauf« soll die Hochlaufzeit etwa 1 s betragen; das Beschleunigungsmoment ist also zu reduzieren auf

$$M_a = \frac{0,0035 \cdot 1,5 \cdot 1405}{9,55 \cdot 1} = 0,772 \approx 0,8 \text{ Nm}$$

Das vom Motor entwickelte mittlere Hochlaufmoment darf noch betragen

$$M_{\text{Hmittel}} = M_N + M_a = 10 + 0,8 = 10,8 \text{ Nm}$$

17 Ermittlung der Anlaufzeit

Eine maßstabgerechte Darstellung der Kennlinien zeigt, dass diese Rechnung nicht aufgehen kann: Das dunkel angelegte Überschussmoment ist so gering, dass die kleinste Schwergängigkeit (z. B. Kälte, Verschmutzung) dazu führt, dass der Antrieb nicht mehr hochlaufen kann.

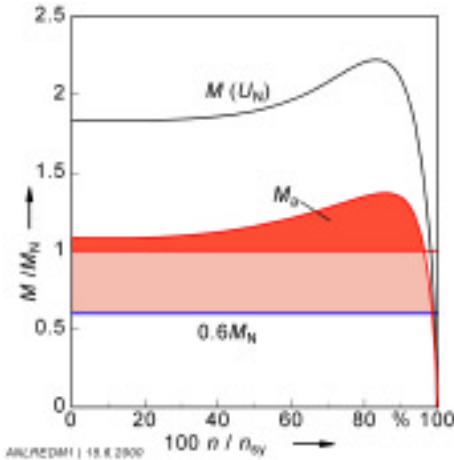


Bild 17.1

Grenzen der Beeinflussbarkeit der Beschleunigungszeit durch Verminderung des rechnerischen Beschleunigungsmomentes M_a

Wahrscheinlich ist jedoch die tatsächliche Belastung beim Hochlauf niedriger als das Bemessungsmoment, z. B.

$$M_L = 0,6 \cdot M_N = 0,6 \cdot 10 = 6 \text{ Nm}$$

Hieraus ergibt sich das im Diagramm zusätzlich hell angelegte tatsächliche Beschleunigungsmoment

$$M_a = M_{\text{Hmittel}} - M_L = 10,8 - 6 = 4,8 \text{ Nm}$$

und eine tatsächliche Hochlaufzeit

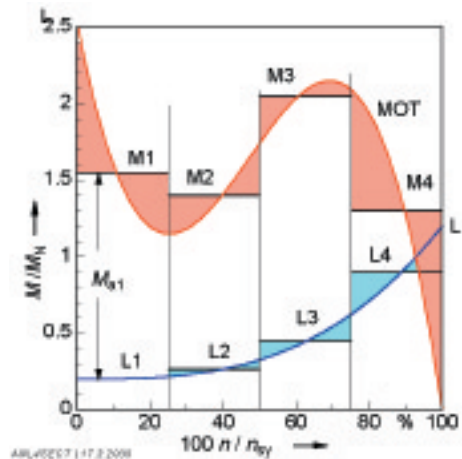
$$t_a = \frac{0,0035 \cdot 1,5 \cdot 1405}{9,55 \cdot 4,8} = 0,16 \text{ s}$$

Statt etwa 1 s braucht der Antrieb also nur knapp 0,2 s für den Anlauf – alles andere als »sanft«.

17 Ermittlung der Anlaufzeit

Bei einer Berechnung der Anlaufzeit nach der Formel in den vorangegangenen Abschnitten ist vorausgesetzt, dass das Beschleunigungsmoment M_a nahezu konstant ist. Bei einer Charakteristik von Motor und Last nach Bild 3.6 ist diese Voraussetzung erfüllt. Verlaufen die Kennlinien jedoch nach **Bild 17.2**, so liefert die Formel relativ ungenaue Werte. Wenn die Funktionen, also der mathematische Zusammenhang von Drehmoment und Drehzahl für die Kennlinien von Motor und Last, bekannt wären, käme eine mathematische Lösung in Betracht. Da diese Funktion zumindest für die Motorkennlinie und meist auch für die Lastkennlinie nicht vorliegt, müssen Näherungslösungen angewandt werden. Der Fehler wird vermindert, wenn der Drehzahlbereich in Abschnitte eingeteilt wird. Meist genügen schon drei Abschnitte, bei höheren Anforderungen oder bei sehr unzeitigem Verlauf der Kennlinien können nach dem gleichen Prinzip auch bis zu zehn Abschnitte gebildet werden.

Bild 17.2
Berechnung der Hochlaufzeit bei unzeitigem Verlauf der Drehmomentkennlinien von Motor (MOT) und Last (L) durch Unterteilung in vier Abschnitte 1, 2, 3, 4



Man bildet für jeden Abschnitt einen **arithmetischen Mittelwert** des Motormomentes M_1
des Lastmomentes L_1
des Beschleunigungsmomentes $M_{a1} = M_1 - L_1$

und rechnet abschnittsweise

$$t_{a1} = \frac{\sum J \cdot n_1}{9,55 \cdot M_{a1}}$$

Die Gesamt-Hochlaufzeit wird dann bei z Abschnitten

$$\Sigma t_a = t_{a1} + t_{a2} + \dots + t_{az}$$

Um die Fehlerquote beurteilen zu können, wurde für das in Bild 17.2 gezeigte Beispiel die Anlaufzeit t_a nach drei Methoden ermittelt:

- Mittelwert der gesamten Kennlinie: 100 %
- Abschnittsmethode mit vier Abschnitten: ca. 105 %
- Abschnittsmethode mit zehn Abschnitten: ca. 110 %

Angesichts der großen Abweichungen bei der Bestimmung der Massenträgheitsmomente und vor allem des effektiven Lastmomentes ist der Aufwand für die Abschnittsmethode in der Regel nicht gerechtfertigt.

Für den relativ häufigen Fall einer Lastkennlinie mit quadratisch ansteigendem Drehmoment (Lüfter, Pumpen) ergibt sich eine einfache Berechnung mit geringem Fehler:

$$t_a = \frac{J_{rot} \cdot Fl \cdot n}{9,55 \cdot M_N \cdot \left(a - \frac{b}{3}\right)}$$

t_a – Anlaufzeit in s
 J_{rot} – Massenträgheitsmoment des Rotors in kgm^2
 Fl – Trägheitsfaktor
 n – Läuferdrehzahl in r/min
 M_N – Bemessungsmoment des Motors in Nm
 $a = M_H / M_N$
 $b = M_L / M_N$

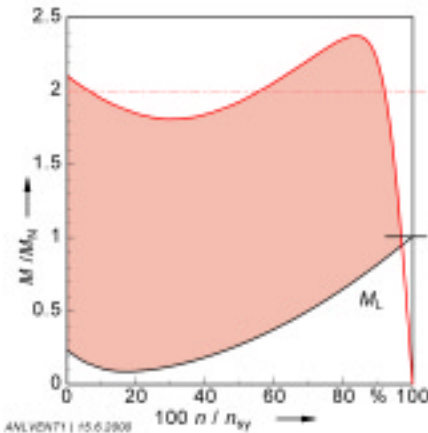


Bild 17.3
Berechnungsgrößen für die Hochlaufzeit bei quadratisch ansteigendem Lastmoment (Lüfter, Pumpen)

- M_H – mittleres Hochlaufmoment
- M_N – Bemessungsmoment
- M_L – Lastmoment

18 Klassifizierung des Anlaufverhaltens

Nachfolgend sind einige genormte und in der Praxis eingeführte Systeme zur Klassifizierung des Anlaufverhaltens von Käfigläufermotoren wiedergegeben.

18.1 Anlaufverhalten nach IEC 60034-12

Die Arbeiten der IEC TC2/WG 8 haben zu IEC 60034-12 und zu DIN VDE 0530 Teil 12 »Umlaufende elektrische Maschinen; Anlaufverhalten von Drehstrommotoren mit Käfigläufer für Spannungen bis einschließlich 660 V und 50 Hz« geführt. In Anlehnung an die amerikanischen NEMA-Vorschriften werden Grenzwerte für die Anlaufmomente und die auf Bemessungsleistung bezogene Einschalt-Scheinleistung festgelegt [2.3]:

Ausführung N (Design N)

Motoren mit normaler Anlauf-Charakteristik zur Direkteinschaltung; 2, 4, 6 und 8 Pole; 50 und 60 Hz

Ausführung NY (Design NY)

Motoren mit normaler Anlauf-Charakteristik zur Stern-Dreieck-Einschaltung (Werte 25 % von N)

Ausführung H (Design H)

Motoren mit hohem Anlaufmoment zur Direkteinschaltung 4, 6 und 8 Pole; 60 Hz

Ausführung HY (Design HY)

Motoren mit hohem Anlaufmoment zur Stern-Dreieck-Einschaltung (Werte 25 % von H)

Die Anforderungen der Ausführung N werden von allen listenmäßigen IP 65Motoren der Firma Danfoss Bauer erfüllt. Die Anforderungen der Ausführung H werden von listenmäßigen Typen 4polig ab 7,5 kW, 6polig ab 4,4 kW erfüllt. Die Grenzwerte für die bezogene Anzugs-Scheinleistung S_1 in kVA/kW werden von allen listenmäßigen Typen eingehalten.

P_N (kW)	$>0,4 \leq 6,3$	$>6,3 \leq 25$	$>25 \leq 100$
S_1 (kVA/kW)	13	12	11

Tabelle 18.1.1 Grenzwerte der bezogenen Kurzschluss-Scheinleistung S_1 von Drehstrom-Asynchronmotoren mit Nennleistungen $P_N = 0,4 \dots 100$ kW nach IEC 60034-12 und DIN VDE 0530 Teil 12

Zu den Anlaufbedingungen und zur Anlassfolge ist in der Bestimmung gefordert, dass Motoren der Grundausführung N für zwei aufeinander folgende Anläufe aus kaltem Zustand oder einen Anlauf aus betriebswarmem Zustand gegen ein relativ hohes Fremdträgheitsmoment und quadratisch mit der Drehzahl ansteigendes Gegenmoment ausgelegt sein müssen.

18 Klassifizierung des Anlaufverhaltens

Die Fremdträgheitsmomente sind in der Norm als Absolutwerte angegeben; eine Umwertung auf den relativen Wert F/I (vgl. Abschnitt 29) führt zu den Richtwerten nach **Bild 18.1.2**.

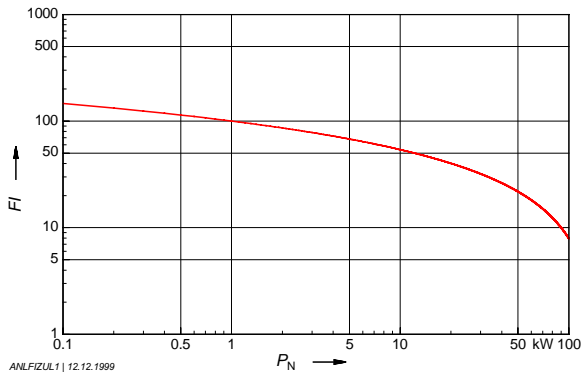


Bild 18.1.2
Richtwerte für das relative Fremdträgheitsmoment F/I bei den Anlaufbedingungen für Drehstrom-Motoren der Grundausführung N nach IEC 60034-12 (DIN VDE 0530 Teil 12)

Obwohl für Getriebemotoren recht unrealistisch, werden diese Anforderungen von listenmäßigen IP65-Motoren eingehalten. Es ergeben sich – unabhängig von der Bemessungsleistung – rechnerische Anlaufzeiten von etwa 5 s, was für kleine Bemessungsleistungen wenig praxistgerecht erscheint.

Alle obigen Aussagen zum Thema »genormtes Anlaufverhalten« beziehen sich auf das thermische Verhalten des Motors. Die mechanischen Auswirkungen – zum Beispiel infolge der Stoßwirkung des extrem hohen Fremdträgheitsmomentes – sind getrennt zu untersuchen.

18.2 Code Letter nach NEMA

Die Netzverhältnisse in Nordamerika machen eine Betrachtung der zusätzlichen Belastung beim Einschalten (»inrush«) notwendig. Während in Europa das Anzugsstromverhältnis I_A/I_N als Kennwert benutzt wird, verlangt NEMA MG1-10.36 die Angabe der auf die Abgabe (HP) bezogenen **Blockierscheinleistung** P_A (kVA), also das Verhältnis P_A/P_N in kVA/HP [2.4].

18.2 Code Letter nach NEMA

Dieser Kennwert wird in Form des »Code Letter« gemäß der folgenden Tabelle angegeben:

Code Letter	kVA/HP	Code Letter	kVA/HP
A	< 3,15	K	≥8,0 ... < 9,0
B	≥ 3,15 ... < 3,55	L	≥ 9,0 ... < 10
C	≥ 3,55 ... < 4,0	M	≥ 10 ... < 11,2
D	≥ 4,0 ... < 4,5	N	≥ 11,2 ... < 12,5
E	≥ 4,5 ... < 5,0	P	≥ 12,5 ... < 14
F	≥5,0 ... < 5,6	R	≥ 14 ... < 16
G	≥ 5,6 ... < 6,3	S	≥ 16 ... < 18
H	≥ 6,3 ... < 7,1	T	≥ 18 ... < 20
J	≥ 7,1 ... < 8,0	U	≥20 ... < 22,4
		V	≥ 22,4

Tabelle 18.2.1 Festlegung des Code Letter nach NEMA MG1-10.36

Für Sonderausführungen ist festgelegt:

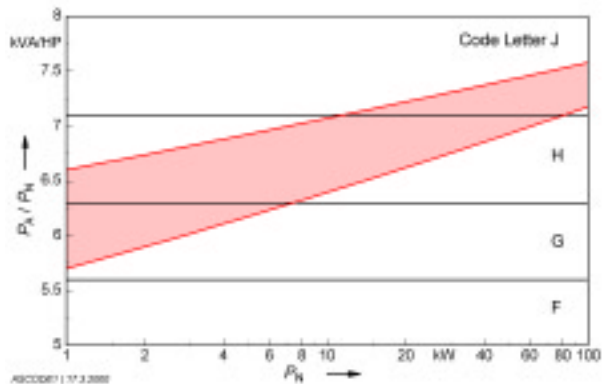
- Polumschaltung: höchster Code Letter
- Spannungsumschaltung: höchster Code Letter, sofern abweichend
- Frequenz 50/60Hz: Code Letter bei 60 Hz
- Y/Δ-Anlauf: Code Letter für Anlassstufe Y
- Part winding starting: Code Letter für Direktanlauf bei voller Wicklung

Das **Bild 18.2.2** zeigt den Trend des Code Letter für übliche 4polige Normmotoren – es kann und soll die Einzelbestimmung nicht ersetzen.

Bild 18.2.2
Trend des Code Letter
bei üblichen 4poligen
Normmotoren

Auftragung über der
Bemessungsleistung in kW

Angabe des Code Letter
für entsprechende Abgabe
in HP



18.3 NEMA-Klassifizierung nach Drehmoment-Charakteristik

NEMA bietet die Auswahl von vier Varianten, die sich nach dem grundsätzlichen Verlauf des Drehmomentes über der Drehzahl und nach der Höhe des relativen Anzugsstromes unterscheiden. Diese Ausführungen werden als **Design A, B, C, D und E** bezeichnet. Design A hat gleiche Drehmoment-Charakteristik wie B, jedoch höheren Anzugsstrom.

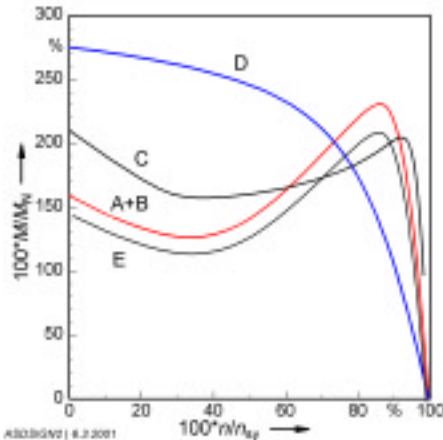


Bild 18.3
Grundsätzliche Drehmoment-Charakteristik bei Design A, B, C, D und E nach NEMA MG10

Die Grenzen von Anzugsmoment, Kippmoment und Anzugsstrom sind in NEMA MG1 tabellarisch festgelegt. Für übliche Anwendungen wird meist **Design B** verwendet, wobei die Norm allerdings den Schlupf unabhängig von der Baugröße auf 5 % begrenzt. Dies erscheint für kleine Maschinen technisch nicht notwendig und physikalisch kaum realisierbar.

Design D (weiche Charakteristik ohne ausgeprägtes Kippmoment) wird bei Anwendungen mit hohem Spitzenmoment (Pressen, Scheren, Hebezeuge) bevorzugt. Nach NEMA MG1-10.37 ist der Design-Letter auf dem Leistungsschild anzugeben.

18.4 Anlaufklassen

Zur Beurteilung des Anlaufs von listenmäßigen Drehstrom-Asynchronmotoren können die Drehmomentkennlinien der einzelnen Typen in »Anlaufklassen« (AK) eingeteilt werden. Die Anlaufklasse gibt an, gegen welches Lastmoment der Antrieb sicher hochlaufen kann:

<u>Anlaufklasse</u>	<u>Lastmoment</u>
AK 10	100 % Bemessungsmoment
AK 13	130 % Bemessungsmoment
AK 16	160 % Bemessungsmoment

Der zusätzliche Buchstabe – z. B. AK 16A – charakterisiert die Form der Drehmomentkennlinie nach ausgeprägten Werten für Anzugs-, Sattel- und Kippmoment sowie nach dem Bemessungsschlupf. Im Allgemeinen steigt der Bemessungsschlupf mit der Buchstabenfolge an.

Das gezeichnete Streuband (**Bilder 18.4.1 und 18.4.2**) wurde mit Rücksicht auf eine weitgehende Typenzusammenfassung relativ breit gewählt, sollte jedoch für übliche Anwendungsfälle eine ausreichende Beurteilung bieten.

Es gelten die genormten Toleranzen

- Anzugsmoment: –15 % bis +25 %
- Kippmoment: –10 %
- Bemessungsschlupf: +20 %

Außerdem ist zu beachten, dass die Drehmomentkennlinie für Bemessungsspannung gilt und sich quadratisch mit der tatsächlich angelegten Netzspannung ändert. Bei 5 % Unterspannung liegt die Kennlinie also bereits um etwa 10 % tiefer. Die Bilder 18.4.1 und 18.4.2 zeigen die Beispiele AK 16A und AK 13D. Für den jeweiligen Einzelfall stehen entsprechende Kennlinien für listenmäßige Typen zur Verfügung.

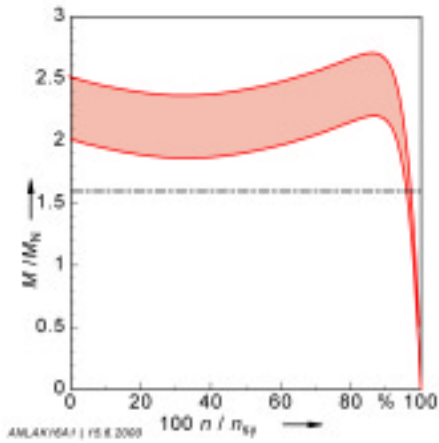


Bild 18.4.1 Drehmomentkennlinie der Anlaufklasse AK 16A

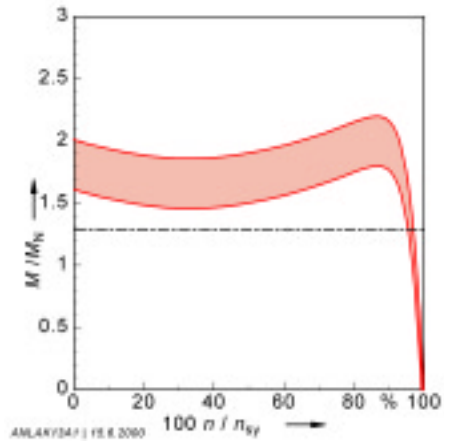


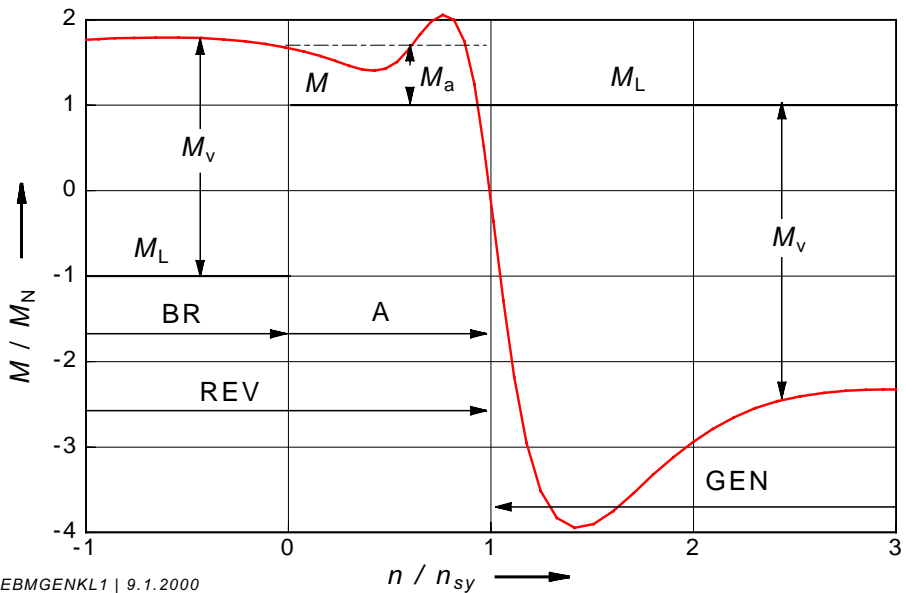
Bild 18.4.2 Drehmomentkennlinie der Anlaufklasse AK 13D

III Elektrodynamische Auslaufbremsung

Der Titel signalisiert drei wichtige Eigenschaften dieser Bremsmethode :

- Die Verfahren beruhen auf der Bremswirkung eines induzierten Leiters im Magnetfeld, arbeiten also **berührungs- und verschleißfrei**.
- Die Bremswirkung kommt nur **dynamisch**, also im Lauf zustande. Im Stillstand wird nicht gebremst (**keine Haltebremse**).
- Die Motorwicklung wird durch die Bremsung zusätzlich **thermisch belastet**.

Je nach Bremsverfahren werden unterschiedliche Abschnitte aus der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines Drehstrom-Asynchronmotors benutzt.

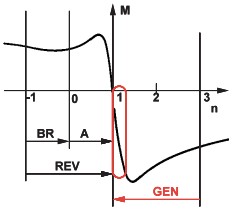


EBMGENKL1 | 9.1.2000

Bild III Anlaufen, Bremsen und Reversieren mit Käfigläufermotoren

- A – Anlauf
- BR – Gegendrehfeldbremsung
- REV – Reversierung
- GEN – Generatorische Bremsung
- M – Motormoment
- M_L – Lastmoment
- M_a – Beschleunigungsmoment
- M_v – Verzögerungsmoment

19 Übersynchrone, generatorische Bremsung



Beim Senken einer Last mit einem Hebezeug läuft der Motor – vom Benutzer unbemerkt – mit übersynchroner Drehzahl und speist als »Asynchrongenerator am Netz« Wirkleistung zurück. Die »generatorische Drehmomentkennlinie« im übersynchronen Bereich wird meist punktsymmetrisch zur Drehzahl n_{sy} dargestellt. Tatsächlich ist das »generatorische Kippmoment« jedoch wesentlich höher als das motorische Kippmoment. Was beim Rückschalten von einer hohen auf eine niedrige Drehzahl wegen des Umschaltstoßes störend sein kann (vgl. Abschnitt 23), wirkt

beim stetigen Senkbetrieb als Sicherheitsfaktor: Eine motorisch gehobene Last kann den »Bremsgenerator« beim Senken nicht »durchreißen« – selbst bei Zweileiteranschluss (also bei drastisch auf etwa 50 % gegenüber Dreileiteranschluss gesenktem Kippmoment) reicht das Bremsmoment aus, um die Last sicher und ohne nennenswerten Drehzahlanstieg zu senken.

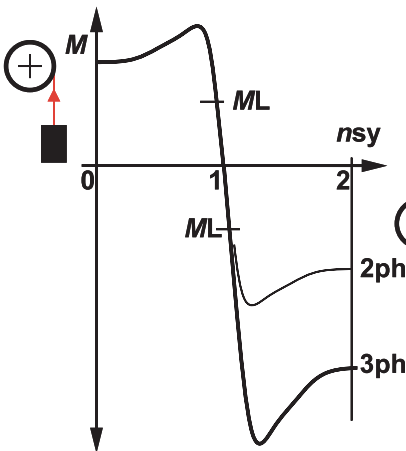


Bild 19.1

Senken einer Last (M_L) im übersynchronen Generatorbetrieb bei Dreileiteranschluss (3ph) und bei Zweileiteranschluss (»Phasenausfall« 2ph)



Bild 19.2 Heberantrieb in einer Automobilfabrik, angetrieben durch Getriebemotor. Kegelrad-Getriebe in Aufsteckform; Abwärtsbetrieb als übersynchrone Generator am Netz

20 Reversierung (Drehrichtungswechsel aus vollem Lauf)

Bild 20.3
Rechteck-Kennlinie mit optimaler
Ausnützung der Reibgrenze bei Brem-
sung (M_{BR}) und Hochlauf (M_H)

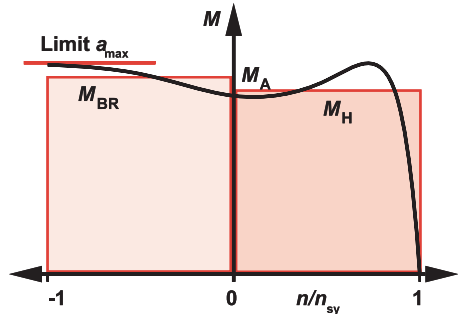
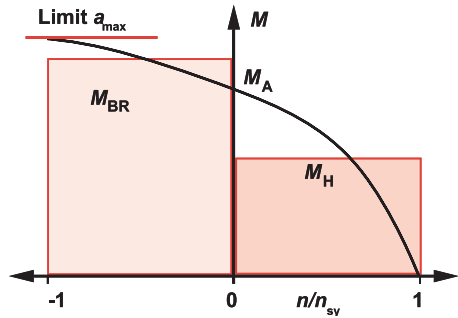
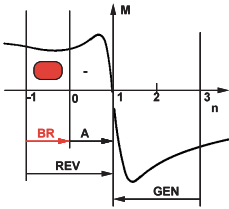


Bild 20.4
Dreieck-Kennlinie mit schlechter Ausnüt-
zung der Reibgrenze bei Bremsung (M_{BR})
und Hochlauf (M_H)



21 Gegendrehabfeldbremsung



Bei der Gegendrehabfeldbremsung (Gegenstrombremsung) werden die Massenträgheitsmomente des Antriebes wie im ersten Teil einer Reversierung bis zum Stillstand abgebremst. Beim Nulldurchgang der Drehzahl wird das »Gegenstromschütz« durch einen »Bremswächter« abgeschaltet und damit ein Anlauf des Antriebes in Gegendrehabrichtung vermieden. So einfach sich die Gegendrehabfeldbremsung in der Wirkung und in der Schaltung auch darstellt – in der Praxis gibt es zwei schwerwiegende Einschränkungen:

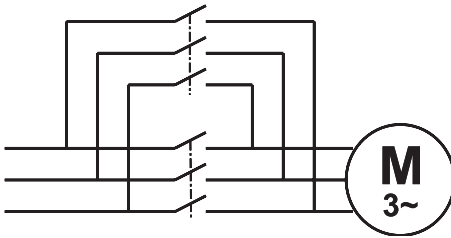
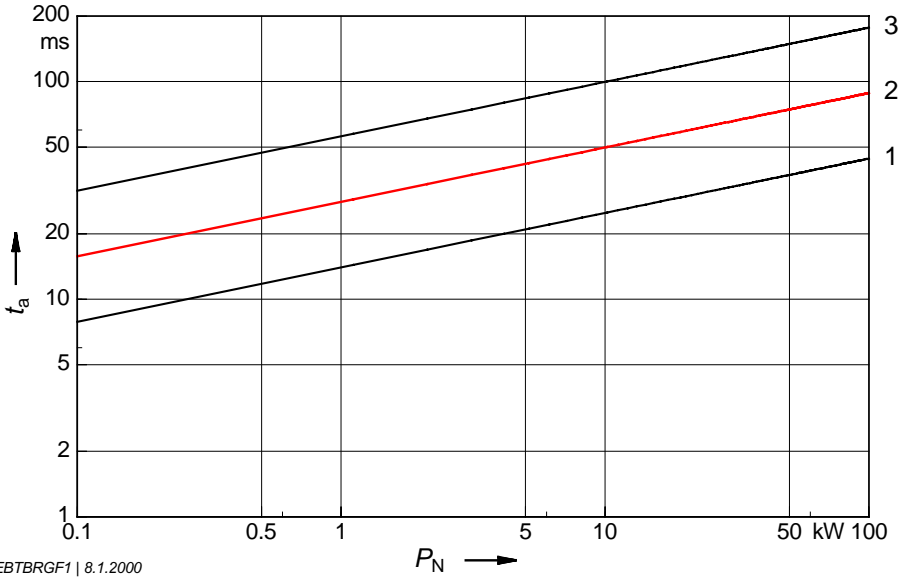


Bild 21.1
Grundsätzliches Schaltbild einer
Gegendrehabfeldbremsung

- Die mechanische Stoßbelastung kann vor allem bei spielbehafteten Übertragungsgliedern (z. B. Ketten, Klauenkupplungen) für Transportgut und Bauteile unzulässig hoch werden.
- Die Abschaltung des »Gegenstromschützes« genau im »Drehzahlnulldurchgang« ist umso schwieriger, je kürzer der Bremsvorgang ist. Zeitglieder können den Einfluss unterschiedlicher Last und Massenträgheitsmomente nicht erfassen. Drehzahlwächter stellen einen erhöhten Aufwand dar.

21 Gegendrehfeldbremsung



EBTBGRF1 | 8.1.2000

Bild 21.2 Richtwerte für die Gegendrehfeld-Bremszeiten bei 4poligen Drehstrom-Käfigläufermotoren mit Einfluss von Fl (relative Fremdmassen) und M_L (Lastmoment)

- 1 - $Fl = 1, M_L = 1$ Lastmoment = Reibung unterstützt die Bremsung
- 2 - $Fl = 1, M_L = 0$
- 3 - $Fl = 2, M_L = 0$

21 Gegendrehabfeldbremsung

Es gibt jedoch auch Anwendungsgebiete, wo das Prinzip der Gegendrehabfeldbremsung sehr beliebt ist: Es wird z. B. Beispiel im Rollgangsbetrieb häufig angewandt, da es keinen zusätzlichen Geräteaufwand erfordert.

Da der Reibungsschluss zwischen Rolle und Transportgut die maximal übertragbare Verzögerung begrenzt, liegen die Bremszeiten meist in einem Bereich, der noch visuell erfasst werden kann. Der Bedienungsmann »kontert« also manuell und schaltet das Gegenstromschütz so ab, dass der Bremsvorgang beim Nulldurchgang der Drehzahl abgeschlossen wird.

Bremswächter, die den Bremsvorgang automatisch beenden würden, sind im Rollgangsbetrieb relativ selten zu finden, da sie unter den schwierigen Einsatzbedingungen als mögliche Störquelle betrachtet werden.



Bild 21.3 Anwendungsbeispiel für die Gegendrehabfeldbremsung im Rollgangsbetrieb

22 Gleichstrom-Auslaufbremsung

Bei Speisung einer Drehstrom-Ständerwicklung mit Gleichstrom entsteht in der Ständerbohrung ein stillstehendes Magnetfeld Φ , das in den Stäben des Kurzschlussläufers eine Spannung induziert, solange sich der Läufer bewegt.

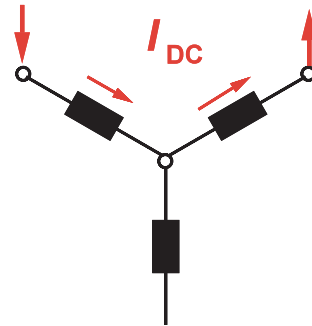
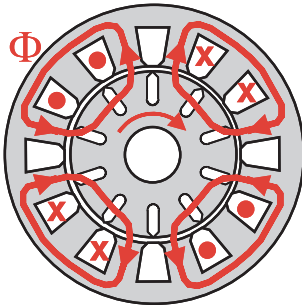
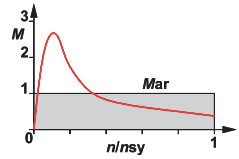


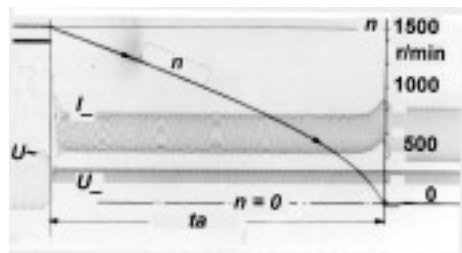
Bild 22.0 Feldausbildung bei Speisung einer 4poligen Drehstrom-Ständerwicklung in Sternschaltung

22.1 Wirkungsweise

Da der elektrische Widerstand des Läuferkäfigs sehr gering ist, genügen schon kleine induzierte Spannungen, um einen hohen Strom im Läufer hervorzubringen. Dieser Strom erzeugt eine kräftige Bremswirkung auf die Stäbe und damit auf den Rotor.

Bild 22.1.1

Oszillogramm einer Gleichstrom-Auslaufbremsung mit starker Verzögerung der Drehzahl n am Ende der Bremszeit t_a



22 Gleichstrom-Auslaufbremsung

Mit abnehmender Drehzahl sinken die Frequenz der induzierten Spannung und der induktive Widerstand. Wegen des allmählich überwiegenden ohmschen Widerstandes steigt nun die Bremswirkung mit abnehmender Drehzahl an. Erst kurz vor dem Stillstand fällt das erzeugte Bremsmoment stark ab und wird beim Aufhören der Bewegung schließlich gleich 0.

Die Gleichstrom-Auslaufbremsung eignet sich also nicht zum Festhalten einer Last. Andererseits ist jedoch die »sanft einsetzende und immer kräftiger zupackende« Charakteristik der Bremsung für fast alle Verzögerungsvorgänge geradezu ideal (**Bilder 22.1.1 und 22.1.2**).

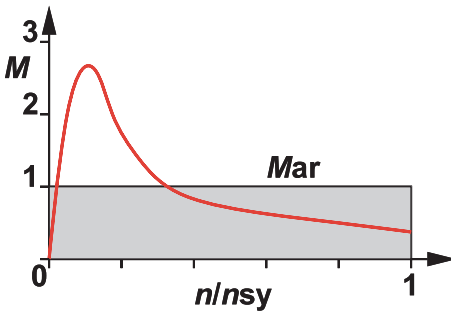


Bild 22.1.2

Wirksamkeit der Gleichstrom-Auslaufbremsung während des Drehzahlabfalls

$n \rightarrow 0$

M – Augenblickswert des Bremsmomentes

M_{ar} – Mittelwert des Bremsmomentes

22.2 Schaltung der Ständerwicklung

Die beste Bremswirkung ergibt sich bei Y-Schaltung der Ständerwicklung und Anschluss an zwei Stränge oder bei -Schaltung und Anschluss an zwei Dreieckspunkte.

Andere denkbare Speiseschaltungen ergeben geringere Bremswirkung.

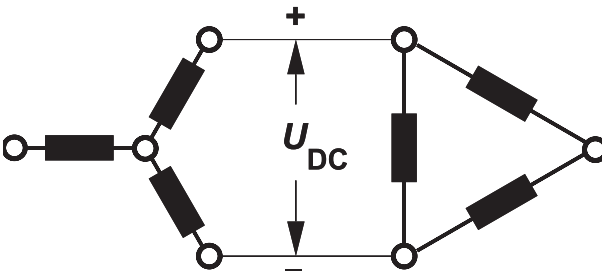


Bild 22.2

Schaltungen der Ständerwicklung bei Anschluss an Gleichspannung U_{DC}

22.3 Bemessung der Gleichstromquelle

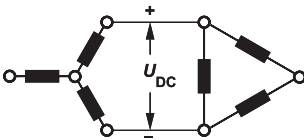
Der in Bild 22.1.2 dargestellte Mittelwert des Bremsmomentes kann für einen quantitativen Vergleich bei der Bemessung der Gleichstromquelle herangezogen werden. Er eignet aber sich nicht zur Berechnung von Bremszeit und Bremsweg. Für eine solche Berechnung ist die Abschnittsmethode nach Abschnitt 23.3 anzuwenden.

Das mittlere Bremsmoment wird etwa gleich dem Motor-Bemessungsmoment, wenn der Bremsstrom I_{DC} etwa 200 ... 250 % des Motor-Bemessungsstromes I_N beträgt, also $I_{DC} \approx 2.5 \cdot I_N$

Die anzulegende Gleichspannung ist so hoch zu wählen, dass dieser Bremsstrom beim jeweiligen Wicklungswiderstand zum Fließen kommt.

Für listenmäßige Typen mit Wicklungsauslegung für 400 V oder Y kann die erforderliche Gleichspannung U_{DC} der Kurvendarstellung **Bild 22.3** abhängig von der Motor-Bemessungsleistung P_N entnommen werden. Mit Rücksicht auf die mit der Polzahl verschiedene Wicklungsauslegung ergibt sich in der Kurvendarstellung ein relativ breites Streuband, dessen obere Werte eine härtere und dessen untere Werte eine etwas weichere Bremsung ergeben. Sollte sich die Bremsung im Betrieb als zu hart erweisen, so kann sie durch Spannungsverminderung, z. B. einen Vorwiderstand im Gleichstromkreis, gemildert werden.

Für die Umformung des im Netz vorhandenen Wechselstromes in Gleichstrom eignen sich am besten Gleichrichter in Einphasen-Brückenschaltung. Siliziumdioden sind gegen die zu erwartenden Induktions-Spannungsspitzen zu schützen.



$$U_{AC} = 400 \text{ V}$$

$$I_{DC} \cong 2,5 \cdot I_N$$

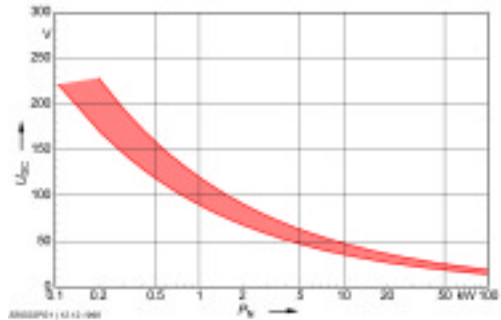


Bild 22.3 Richtwerte für die Bemessung einer Gleichstrom-Auslaufbremsung

Da die erforderliche Gleichspannung U_{DC} in der Regel niedriger ist als die Bemessungsspannung oder die Steuerspannung des Wechselstromnetzes, benötigt man zusätzlich einen Transformator. Die Sekundärspannung U_{sec} dieses Transformators muss um 25 % höher liegen als die benötigte Gleichspannung, da bekanntlich der arithmetische Mittelwert der pulsierenden Gleichspannung einer Einphasen-Brückenschaltung um den Faktor 0.8 niedriger liegt als der Effektivwert der angelegten Wechselspannung. Der Bemessungsstrom des Gleichrichters ist so zu wählen, dass der Brems-Gleichstrom I_{DC} im Aussetzbetrieb S3 5 % ED geliefert werden kann. Die Bemessungsleistung des Trafos beträgt bei S3 5 % ED etwa

$$P_{Tr} = U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot 1,5 \text{ (VA)}$$

22.4 Schaltplan der Steuerung

Die Schaltung ist so aufgebaut, dass nach dem Abschalten des Drehstromnetzes die Gleichspannung an zwei Klemmen der Motorwicklung gelegt wird. Zum Schutz des Gleichrichters vor generatorisch erzeugten Induktionsspannungen aus dem Motor wird die Umschaltung von Drehstrom- auf Gleichstromspeisung über ein Spannungsrelais erst vorgenommen, wenn die Restspannung auf etwa 1/3 der Betriebsspannung abgeklungen ist. Ein Zeitrelais sorgt nach Beendigung der Auslauf-Bremsung (1 ... 3 s) für die Wiederabschaltung der Gleichstromquelle, da sonst eine unzulässige Wicklungserwärmung eintreten würde.

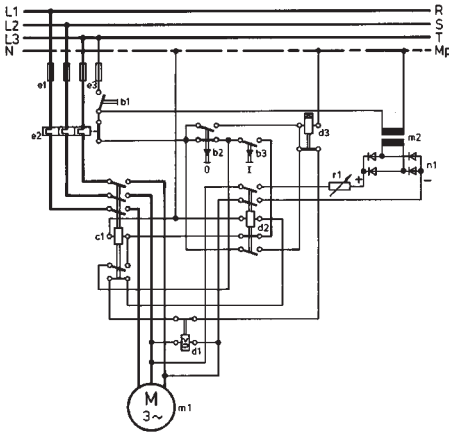


Bild 22.4
Schaltplan für Gleichstrom-Auslaufbremsung

22.5 Elektronische Gleichstrom-Bremsgeräte

In den vorangehenden Abschnitten wurden bewusst »konventionelle« Methoden der GS/WS-Umwandlung und der Steuerung beschrieben, um die Wirkungsweise deutlich zu machen. Es sind zahlreiche »Gleichstrom-Bremsgeräte« am Markt, die unter Verwendung elektronischer Bauteile eine kompakte, anpassungsfähige Lösung bieten, in die auch Sicherheitsfunktionen (z. B. gegen Überlappung von DS/GS-Speisung oder für die Wiederabschaltung der GS-Versorgung) und in Einzelfällen auch die Option für Sanftanlauf integriert sind.



Bild 22.5
Gleichstrom-Bremsgerät mit elektronischen Komponenten zur Umwandlung, Einstellung und Wiederabschaltung der Gleichspannung

23 Polumschaltung

Zum Positionieren werden häufig polumschaltbare Käfigläufermotoren mit Drehzahlverhältnissen 1:2, 1:3, 1:4, 1:6 oder 1:10 eingesetzt. Beim Drehzahlverhältnis 1:2 wird **eine** Wicklung in **Dahländerschaltung** verwendet, bei allen übrigen Drehzahlverhältnissen handelt es sich um Motoren mit zwei getrennten Ständerwicklungen, die zwar eine aufwendige Fertigung (**Bild 23.0.1**) und entsprechende Kosten (**Bild 23.0.2**) bedingen, die aber gegenüber Lösungen mit stetig verstellbarer Drehzahl (z. B. GS-Motoren oder Umrichter motoren) immer noch deutliche Preisvorteile bieten.

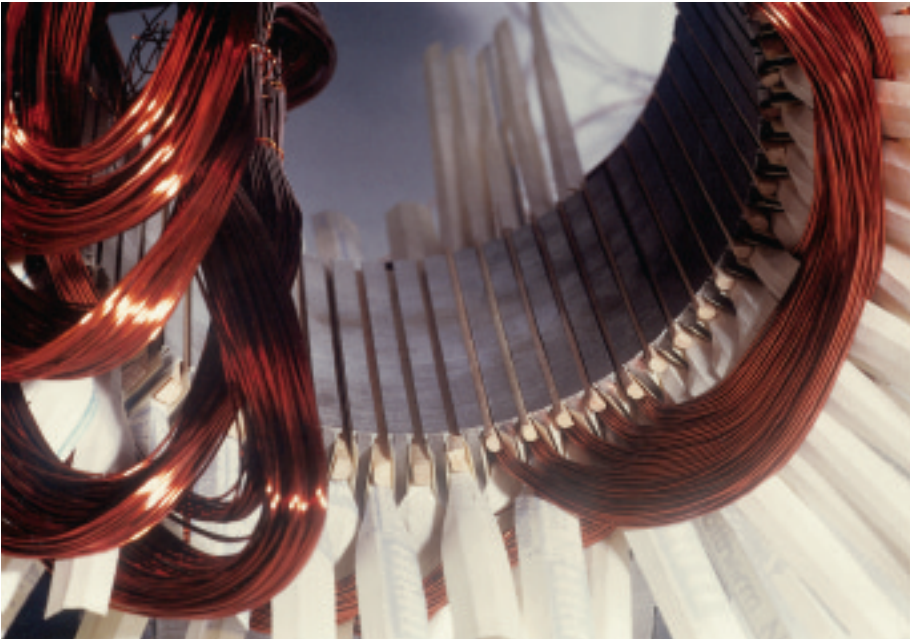
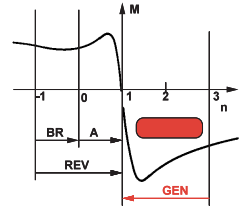
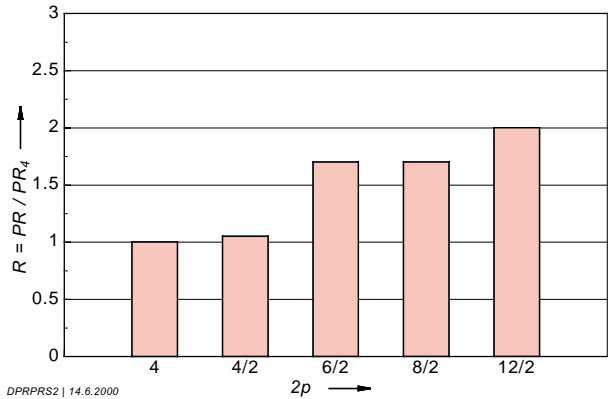


Bild 23.0.1 Manuelle Herstellung der zwei getrennten Wicklungen eines polumschaltbaren Motors

20polige Wicklung fertig am Nutgrund

2polige Wicklung halbfertig an der Nutöffnung



DPRPRS2 | 14.6.2000

Bild 23.0.2
 Richtwerte für die Kosten von polumschaltbaren Getriebemotoren mit Drehzahlverhältnis 1:2 (4/2polig), 1:3 (6/2polig), 1:4 (8/2polig), 1:6 (12/2polig) und 1:10 (20/2polig) im Vergleich zu einem Getriebemotor mit fester Drehzahl (4polig) Obere Drehzahl etwa 100 r/min – bezogen auf gleiche Maximal-Leistung

23.1 Entstehung und Verlauf der Bremsmomente

Eine generatorische Rückbremsung entsteht immer dann, wenn die momentane Drehzahl n des Rotors größer ist als die synchrone Drehzahl des Statorfeldes. Dies tritt dann auf, wenn z. B. bei polumschaltbaren Drehstrommotoren von der niedrigen Polzahl auf eine höhere Polzahl umgeschaltet wird. Hierbei entstehen generatorische Bremsmomente, deren Verlauf vom Polzahl- bzw. Drehzahlverhältnis und vom Motortyp abhängig ist, genauer ausgedrückt vom ohmschen Widerstand und vom Blindwiderstand im Läuferkreis.

Bei Drehstrommotoren mit Käfigläufer sind bestimmend:

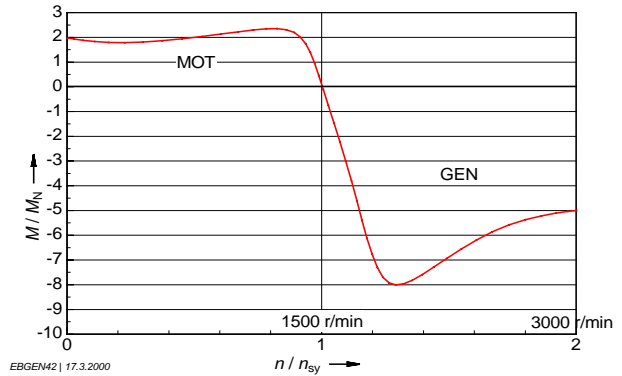
- Form der Käfigstäbe
- Form der Kurzschlussringe
- Werkstoff der Käfigstäbe und der Kurzschlussringe.

Bild 23.1 zeigt den Verlauf der Drehmomentkennlinie im motorischen und generatorischen Bereich. Die generatorischen Bremsmomente sind wesentlich höher als die motorischen Momente.

Beim generatorischen Rückbremsen können kurzzeitig Geräusche auftreten, die über den Betriebsgeräuschen der Drehstrommaschine liegen.

23.1 Entstehung und Verlauf der Bremsmomente

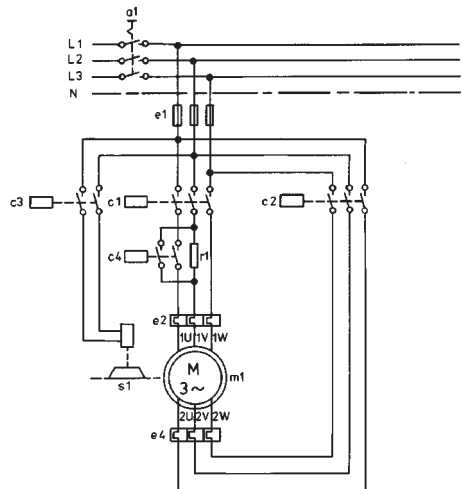
Bild 23.1
Verlauf des Drehmomentes beim Rückschalten von der niedrigen in die höhere Polzahl bei einem Drehzahlverhältnis 2:1. Das Verhältnis motorisches Kippmoment zu generatorischem Kippmoment entspricht hier etwa 1:4



23.2 Dämpfung der Bremsmomente

Berücksichtigt man bei einer solchen Rückschaltung die Verzögerung, die auf das Transportgut wirkt, so ist es in bestimmten Anwendungsfällen empfehlenswert, teilweise sogar zwingend notwendig, das Bremsmoment zu vermindern. Dies kann durch eine verhältnismäßig einfache Änderung in der vorhandenen Schützensteuerung erreicht werden (**Bild 23.2.1**).

Bild 23.2.1
Schaltplan für den nachträglichen Einbau eines Schützes zur Reduzierung der generatorischen Bremsmomente



23 Polumschaltung

Bei der Schaltung für die 2phasige Rückbremsung, mit oder ohne Vorwiderstand, muss steuerungstechnisch sichergestellt sein, dass der »2phasige Betrieb« nur für den Zeitraum der generatorischen Bremsung wirksam ist. Nach Ablauf der generatorischen Bremsung muss der Motorbetrieb an den 3 Leitern L1, L2 und L3 fortgeführt werden, weil sonst ein Teil der Wicklung thermisch überlastet ist.

Durch die Reduzierung der Bremsmomente wird die mechanische Beanspruchung des Getriebes und der nachgeschalteten Übertragungselemente verringert. Die Bremsmomente sind im **Bild 23.2.2** aufgezeichnet.

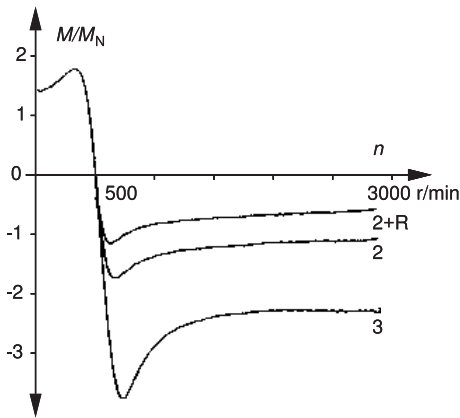


Bild 23.2.2

Drehmomentverlauf beim Rückschalten eines Drehstrom-Asynchronmotors mit zwei Drehzahlen und mit unterschiedlichen Schaltungsvarianten bei einem Drehzahlverhältnis 6 : 1

Kurve 3: 3phasige Rückbremsung

Kurve 2: 2phasige Rückbremsung

Kurve 2+R: 2phasige Rückbremsung mit einem zusätzlichen Vorwiderstand in einer Zuleitung

Weitere Möglichkeiten für eine Reduzierung der Bremswirkung:

- Bei Drehstrommotoren mit getrennter Wicklung kann die Wicklung, die nur zum generatorischen Bremsen benützt wird, für den speziellen Antriebsfall in begrenztem Umfang angepasst werden. Dazu müssen Reibungsverhältnisse, Schwungmasse und Geschwindigkeiten genau bekannt sein. Dann kann die Bremswicklung anwendungsbezogen ausgelegt werden. Bei dieser Methode entfällt die steuerungstechnische Veränderung.
- Die generatorische Bremsung erfolgt über eine Phasenanschnittsteuerung, wobei während der Verzögerungszeit die Spannung für den geforderten Verzögerungswert eingestellt wird. Damit kann ein sanftes und zeitgeführtes generatorisches Bremsen erreicht werden.
- Die konventionelle Steuerung nach 23.2.1 wird durch einen »elektronischen Sanftumschalter« nach 23.5 ersetzt.

23.3 Berechnung von Bremszeit und Bremsweg

Die in den Bildern 23.1 und 23.2 gezeigten Drehmomentkennlinien können nicht auf beliebige andere Auslegungen übertragen werden. Der Verlauf mit einem oft stark ausgeprägten »generatorischen Kippmoment« macht eine Berechnung von Bremszeit und Bremsweg recht aufwendig, da die Bildung eines »arithmetischen Mittelwertes« ungenaue Ergebnisse liefert.

In **Bild 23.3.1** ist die sehr ungenaue Mittelwertmethode mit der aufwendigen Abschnittsmethode grundsätzlich verglichen.

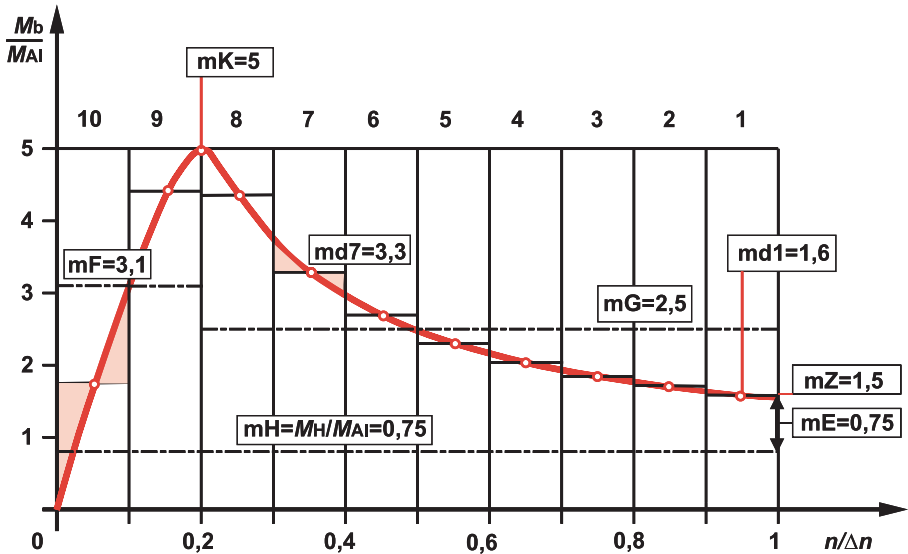


Bild 23.3.1 Prinzipbild für die Berechnung von Bremszeit und Bremsweg bei generatorischer Rückbremsung nach Mittelwert- und Abschnittsmethode

- M_b/M_{Al} – relatives generatorisches Bremsmoment
- M_{Al} – Anzugsmoment bei niedriger Drehzahl
- Δn – Drehzahldifferenz $n_{syll} - n_{syl}$
- mK – relatives generatorisches Kippmoment
- mH – relatives Lastmoment (Hubmoment)
- mG – arithmetischer Mittelwert des gen. Bremsmomentes im Bereich $n/\Delta n = 1 \dots 0,2$
- mF – arithmetischer Mittelwert des gen. Bremsmomentes im Bereich $n/\Delta n = 0,2 \dots 0$
- md – arithmetischer Mittelwert des gen. Bremsmomentes im betreffenden Drehzahlabschnitt (z. B. $md1$ im Abschnitt 1 über $n/\Delta n = 0,1$)

23 Polumschaltung

Die Rechnung mit den arithmetischen Mittelwerten m_G und m_F ergibt zu niedrige Bremszeiten und vor allem viel zu niedrige Bremswege. Dies gilt ganz besonders, wenn im Bereich der hohen Drehzahlen ($n/x.n$) das relative generatorische Bremsmoment m_Z nur wenig über dem relativen Hubmoment m_H liegt, wenn also die zur Verzögerung verfügbare Differenz m_E sehr gering ist.

Unabhängig vom Aufwand für die Berechnung von Bremszeit und Bremsweg gilt bei Polumschaltung: Es handelt sich um Zeiten und Wege für die **Rückschaltung** von der Arbeitsgeschwindigkeit auf die Positioniergeschwindigkeit t_a . Anschließend folgt ein mehr oder weniger langer Lauf (t_{pos}) mit der **Positioniergeschwindigkeit** (Bild 23.3.2) und erst abschließend die mechanische Bremsung (t_b).

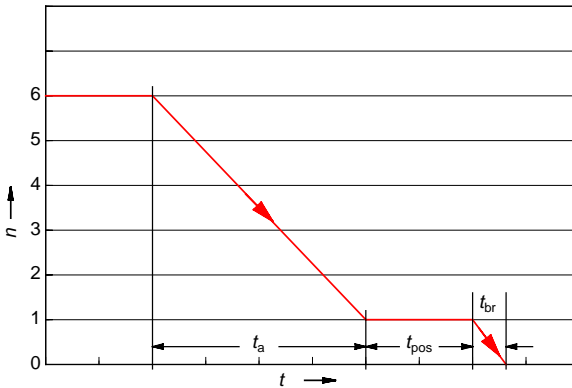


Bild 23.3.2
Drehzahlverminderung
durch Polumschaltung
6:1 von der Arbeits-
geschwindigkeit ($n = 6$)
auf die Positionier-
geschwindigkeit ($n = 1$)

EBRU/POS | 18.3.2000

Eine Vorausberechnung von Rückschaltzeiten und Rückschaltwegen ist nur bei Kenntnis der generatorischen Drehmomentkennlinie möglich. Trotzdem werden nachfolgend grobe Richtwerte genannt. Dabei ist angenommen, dass der Mittelwert des generatorischen Bremsmomentes etwa dem 2fachen Motor-Bemessungsmoment entspricht. Die Richtwerte sollten lediglich als Entscheidungshilfe für oder gegen eine weitergehende Nachrechnung benutzt werden.

23.3 Berechnung von Bremszeit und Bremsweg

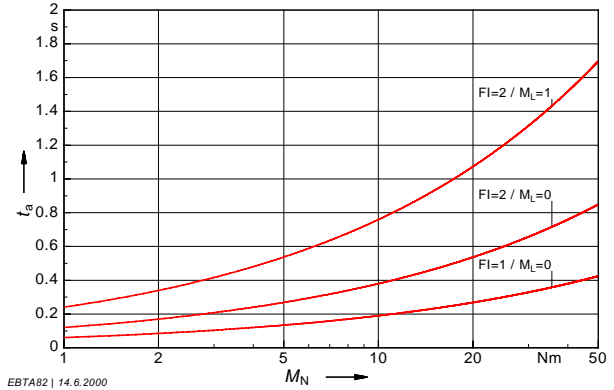


Bild 23.3.3 Richtwerte für die Rückschaltzeiten t_s von 8/2poligen Positioniermotoren mit Bemessungsmomenten $M_N = 1 \dots 100 \text{ Nm}$

$FI = 1 / M_L = 0$: keine Fremdschwungmassen, kein Lastmoment

$FI = 2 / M_L = 0$: Fremdschwungmassen entsprechen der Rotormasse, kein Lastmoment

$FI = 2 / M_L = 1$: Fremdschwungmassen entsprechen der Rotormasse, Lastmoment bei Senkbetrieb = Motor-Bemessungsmoment

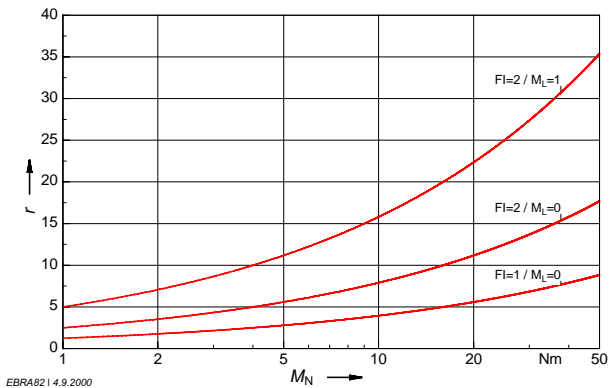


Bild 23.3.4 Richtwerte für die Rücklaufumdrehungen x von 8/2poligen

Positioniermotoren mit Bemessungsmomenten $M_N = 1 \dots 100 \text{ Nm}$

$FI = 1 / M_L = 0$: keine Fremdschwungmassen, kein Lastmoment

$FI = 2 / M_L = 0$: Fremdschwungmassen entsprechen der Rotormasse, kein Lastmoment

$FI = 2 / M_L = 1$: Fremdschwungmassen entsprechen der Rotormasse, Lastmoment bei Senkbetrieb = Motor-Bemessungsmoment

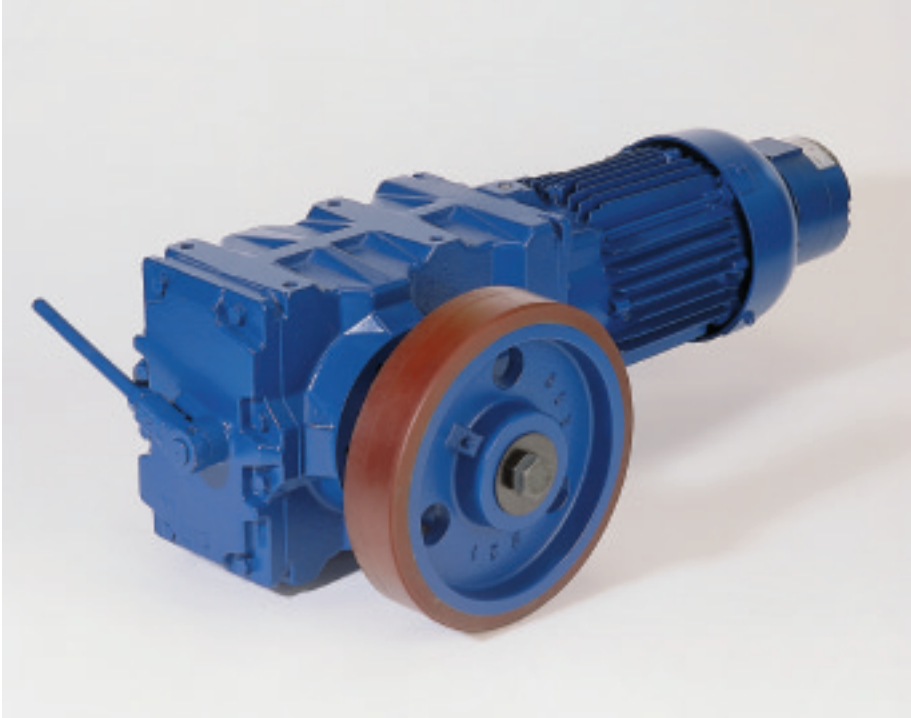


Bild 23.3.5 Antrieb für Elektrohängebahn (EHB) aus der Danfoss Bauer Reihe B 2000 mit 1:4 polumschaltbarem Kegelrad-Getriebemotor

23.4 Rückschaltempfehlung

Bei vielen Anwendungen spielt die Zeit für die Rückschaltung von der hohen auf die niedrige Drehzahl keine Rolle: So werden z. B. Lüfterantriebe abends von Tag- auf Nachtbetrieb umgestellt. Statt einer unverzögerten Umschaltung von der Drehzahlstufe II auf I kann der Antrieb auch vom Netz getrennt werden und auf die niedrige Drehzahlstufe I frei »austrudeln«.

Bei optimaler Einstellung der Umschaltzeit können die Übertragungsmittel – Wellen, Kupplungen, Getriebe – erheblich entlastet werden, wie **Bild 23.4** zeigt. Da bei dieser Anwendung Massenträgheitsmomente und Belastung nicht wechseln, kann der optimale Umschaltzeitpunkt durch Versuch ermittelt und über ein Zeitrelais eingestellt werden.

Bei optimaler Umschaltung trudelt der Antrieb zunächst um die Drehzahl n_I frei aus und beschleunigt dann mit dem Moment M_I , das etwas niedriger als das motorische Anzugsmoment M_A ist.

23.4 Rückschaltempfehlung

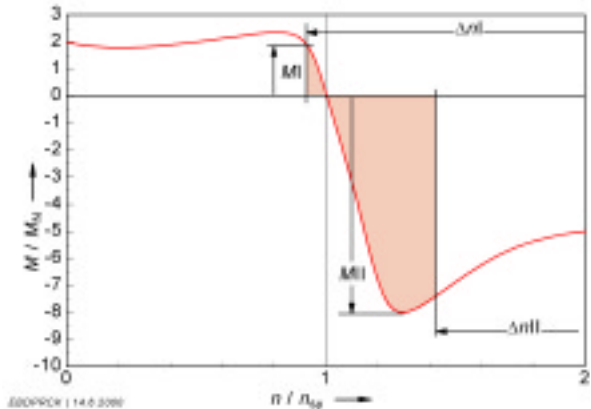
Wenn schon nach der Auslaufzeit Δn_{II} verfrüht umgeschaltet wird, so tritt das generatorische Bremsmoment M_{II} auf, das in diesem Beispiel etwa dem zweifachen Anzugsmoment entspricht.

In dem Diagramm wurde ein reiner Schwungmassenantrieb ohne nennenswertes Lastmoment dargestellt; die Verhältnisse sind auf einen Lüfterantrieb prinzipiell übertragbar.

Bild 23.4
Vergleich der Rückschaltung eines im Verhältnis 1:2 polumschaltbaren Antriebs von Drehzahlstufe II auf I.

Optimaler Auslauf $\propto n_I$
führt zur Momentenspitze M_I

Ungünstiger Auslauf $\propto n_{II}$
führt zur Momentenspitze M_{II}



23.5 Elektronische Sanfrückschaltung SPR

Dieses Gerät vereinigt die Funktionen der konventionellen Schützensteuerung für die zweiphasige Rückbremsung einschließlich der zeitgerechten Zuschaltung der dritten Netzleitung kurz vor dem Erreichen der synchronen Positionierdrehzahl. Der Schaltbefehl für den elektronischen, kontaktlosen Schalter wird aus einer Motorkenngröße ermittelt, passt sich also automatisch den jeweiligen Verhältnissen von Lastmoment und Massenträgheitsmoment an. Ein Zeitrelais und eine lastabhängige Justierung sind nicht erforderlich. Das Gerät SPR benötigt weder eine eigene Spannungsversorgung noch Steuerungssignale; es werden einfach zwei der drei Zuleitungen zur hochpoligen Wicklung durchgeschleift (**Bild 23.5.1**).

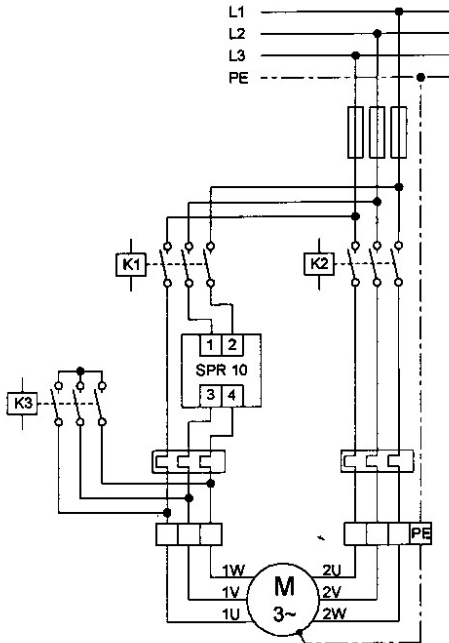


Bild 23.5.1
Schaltbild der elektronischen
Sanfrückschaltung SPR für pol-
umschaltbare Motoren

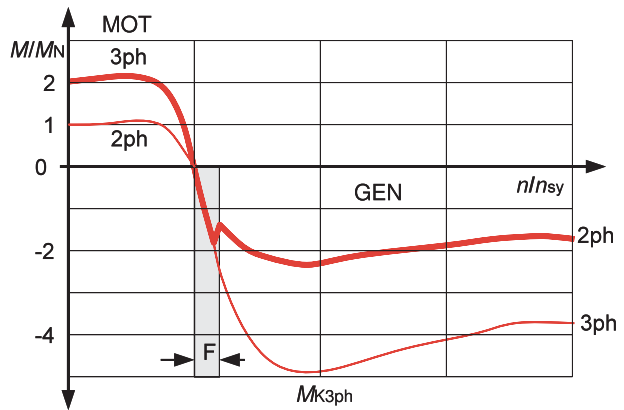
- K1 Schütz für niedrige Drehzahlstufe
- K2 Schütz für hohe Drehzahlstufe
- K3 Schütz für YY-Schaltung bei hoher Drehzahl, zusammen mit K2 (entfällt bei 2 getrennten Wicklungen Y/Y)

Die Auswirkungen der Schaltung auf die Drehmomentkennlinie sind aus **Bild 23.5.2** ersichtlich: Das generatorische Bremsmoment (GEN) ist in seinem ganzen Verlauf (2ph) auf Werte gedämpft, die etwa dem motorischen Anzugsmoment bei Dreileiteranschluss (3ph) entsprechen. Kurz vor dem Übergang in den motorischen Bereich (MOT) schaltet die Logik des Gerätes den dritten Leiter wieder zu, damit der Motor sein volles Drehmoment (3ph) entwickeln kann, das vor allem bei Hubbetrieb benötigt wird. Das »Fenster« F für den optimalen Umschalt-Zeitpunkt ist ziemlich eng: Wird zu früh umgeschaltet, so tritt im generatorischen Bereich (GEN) das hohe Kippmoment M_{K3ph} auf; wird zu spät umgeschaltet, dann wird im motorischen Bereich (MOT) ein zu geringes Drehmoment (2ph) entwickelt. Der optimale Zeitpunkt wird vom Gerät, unabhängig von den jeweiligen Lastverhältnissen, nach Auswertung von Motorkennwerten bestimmt.

23.5 Elektronische Sanfrückschaltung SPR

Bild 23.5.2
Änderung der Drehmomentkennlinie im motorischen (MOT) und generatorischen (GEN) Bereich bei Dreileiteranschluss (3ph) und Zweileiteranschluss (2ph) bei der Rückbremsung eines 8/2poligen Motors unter Verwendung des Sanftumschalt-Relais SPR

Umschaltung zum Normalbetrieb erfolgt im Zeitraum F automatisch durch das Gerät



Das elektronische Sanftumschaltgerät SPR beseitigt den Drehmomentstoß bei der Umschaltung von der Arbeits- auf die Positioniergeschwindigkeit und ermöglicht die Verwendung des robusten, polumschaltbaren Käfigläufermotors auch bei der Bewegung von mäßig empfindlichem Transportgut.

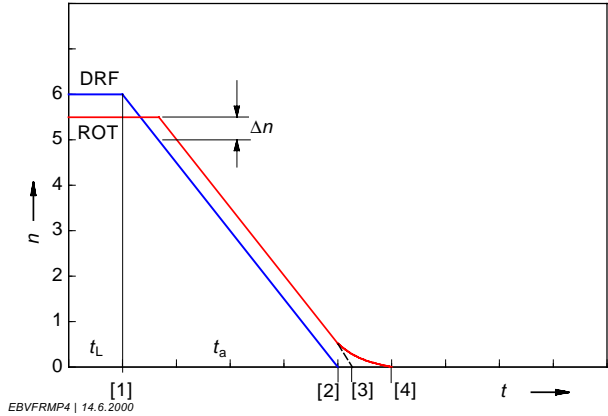


Bild 24.1 Schematische Darstellung einer frequenzgeführten generatorischen Bremsung Drehzahl n über der Zeit t

<i>DRF</i> – Drehfeldzahl	(1) – Beginn der Rampe
<i>ROT</i> – Rotordrehzahl	(2) – Ende der Rampe
$\times n$ – Schlupfdrehzahl	(3) – mechanische Haltebremse
t_L – Laufzeit	(4) – freier Auslauf
t_a – Bremszeit	(5) – gestörter Auslauf

In **Bild 24.2** ist zum Vergleich dargestellt, wie der Bremsvorgang beim Probetrieb verlaufen kann: Die Rotordrehzahl wird wesentlich langsamer verzögert, als es durch die Rampeneinstellung vorgegeben ist. Die »Störung« wird durch den Umrichter gemeldet oder durch den praktischen Ablauf bemerkt. Für die verzögerte Stillsetzung können u. a. folgende Gründe maßgebend sein:

Durch die Berechnung bedingt:

- Die Massenträgheitsmomente sind größer als bei der Vorausberechnung angenommen
- Die unterstützende Bremswirkung des Lastmomentes ist geringer als angenommen.

Durch den Umrichter bedingt:

- Wegen fehlendem Bremschopper oder einer zu niedrig eingestellten Strombegrenzung oder zu klein dimensioniertem Umrichter ist das vom Motor entwickelte Verzögerungsmoment M_a zu gering; es erfolgt un stetige Bremsung nach [5].
- Der Brems-Chopper ist zu schwach dimensioniert, Umrichter geht auf »Störung«; je nach Planung der Steuerung erfolgt mechanische Bremsung [3] oder freier Auslauf [4]; der Drehzahlverlauf hängt von den Antriebsdaten (Bremsmoment, Lastmoment, F) ab.

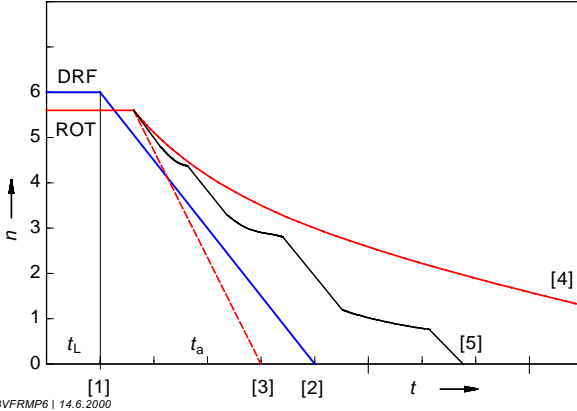


Bild 24.2
Schematische Darstellung einer frequenzgeführten Bremsung mit zu geringer Bremswirkung
Legende siehe Bild 24.1 und Text

Bei einer frequenzgeführten Bremsung treten im Vergleich zu den anderen elektrodynamischen Bremsverfahren wesentlich niedrigere Verluste auf. Die Gründe werden am Beispiel einer Direkteinschaltung prinzipiell dargestellt:

Bei einem Anlauf am Netz springt die Drehfeldfrequenz DRF praktisch unverzüglich auf die Synchrdrehzahl n_{sy} , während der Rotor seine Asynchrondrehzahl erst nach einer von Last und Massenträgheitsmomenten abhängigen Anlaufzeit erreicht. Die anfänglich hohe Schlupfdrehzahl zwischen DRF und ROT verursacht die relativ hohe Rotor-Verlustarbeit W_{rot} (**Bild 24.3**).

Bei einem frequenzgeführten Anlauf eilt die Drehzahl DRF der Drehzahl ROT dagegen nur um die Schlupfdrehzahl vor, mit der ein ausreichendes Beschleunigungsmoment erzeugt werden kann. Die schattiert dargestellte Fläche entspricht der Verlustarbeit W_{rot} im Rotor – sie ist beim Frequenzanlauf wesentlich geringer als bei der Direkteinschaltung am Netz (**Bild 24.4**).

Diese Überlegungen gelten sinngemäß auch für die generatorische Bremsung.

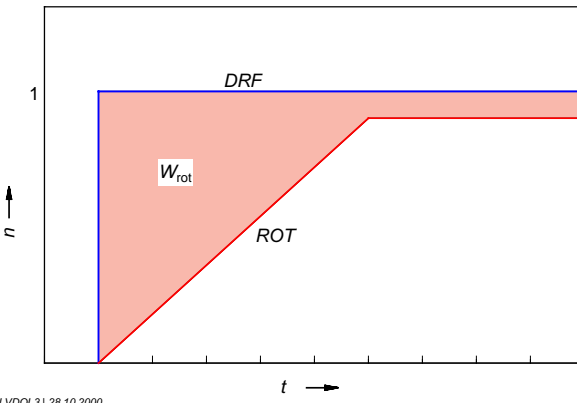
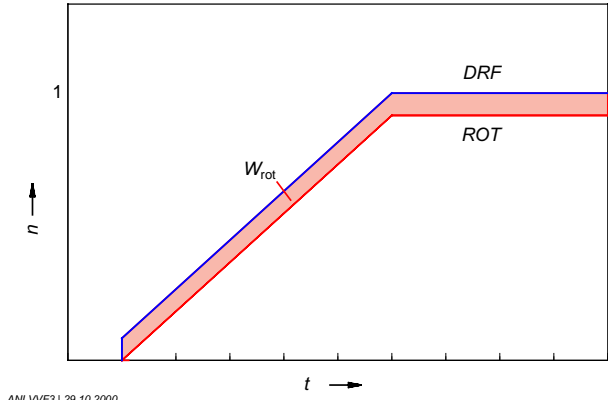


Bild 24.3
Schematische Darstellung der Verlustarbeit im Rotor W_{rot} bei Direktanlauf am Netz

24 Frequenzsteuerung

Bild 24.4
Schematische Darstellung
der Verlustarbeit im Rotor
 W_{rot} bei frequenzgeführtem
Anlauf



25 Thermische Bewertung der elektrodynamischen Bremsverfahren

Die beschriebenen Bremsverfahren haben unterschiedliche thermische Auswirkungen auf den Motor. Wenn Häufigkeit und Dauer der einzelnen Bremsungen so hoch sind, dass der Wärmehaushalt des Motors entscheidend beeinflusst wird, ist die Betriebsart nach DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1) entsprechend anzugeben.

Die thermische Bewertung muss im Einzelfall mit dem Motorhersteller abgestimmt werden; nachfolgend sind einige Richtwerte genannt. **Umsteuervorgänge** sind dabei im Vergleich zu einem **Anlaufvorgang** bewertet.

25.1 Übersynchrone, generatorische Bremsung

Da der Wirkungsgrad einer Asynchronmaschine im Generatorbetrieb besser ist als im Motorbetrieb, kann die für den Motor genannte Bemessungsleistung auch im Generatorbetrieb abgegeben werden.

25.2 Reversierung

Faktor K_R für die thermische Bewertung einer Reversierung im Vergleich zu einem Anlauf:

P_N (kW)	$\leq 1,5$	$\leq 7,5$	≤ 22	≤ 50
K_R	3	2,8	2,6	2,4

25.3 Gegendrehfeldbremsung

Faktor K_G für die thermische Bewertung einer Reversierung im Vergleich zu einem Anlauf:

P_N (kW)	$\leq 1,5$	$\leq 7,5$	≤ 22	≤ 50
K_G	2	1,8	1,6	1,4

25.4 Gleichstrom-Auslaufbremsung

Faktor K_B für die thermische Bewertung einer Reversierung im Vergleich zu einem Anlauf:

$$K_B = 1,6$$

25.5 Polumschaltung

Faktor K_{PU} für die thermische Bewertung einer Rückschaltung im Vergleich zu einem Anlauf:

$$K_{PU} \approx 1$$

Dieser Wert ist relativ hoch angesetzt; er kann im Einzelfall aufgrund von Messungen oder Erfahrungen nach unten korrigiert werden.

25.6 Frequenzsteuerung

Der Antrieb arbeitet als Generator; er wird thermisch nicht höher belastet als im Motorbetrieb mit entsprechender Leistung. Die Bremsarbeit geht in den Chopper, der gemäß Abschnitt 24 zu bemessen ist. Siehe auch grundsätzliche Ausführungen im Abschnitt 24.

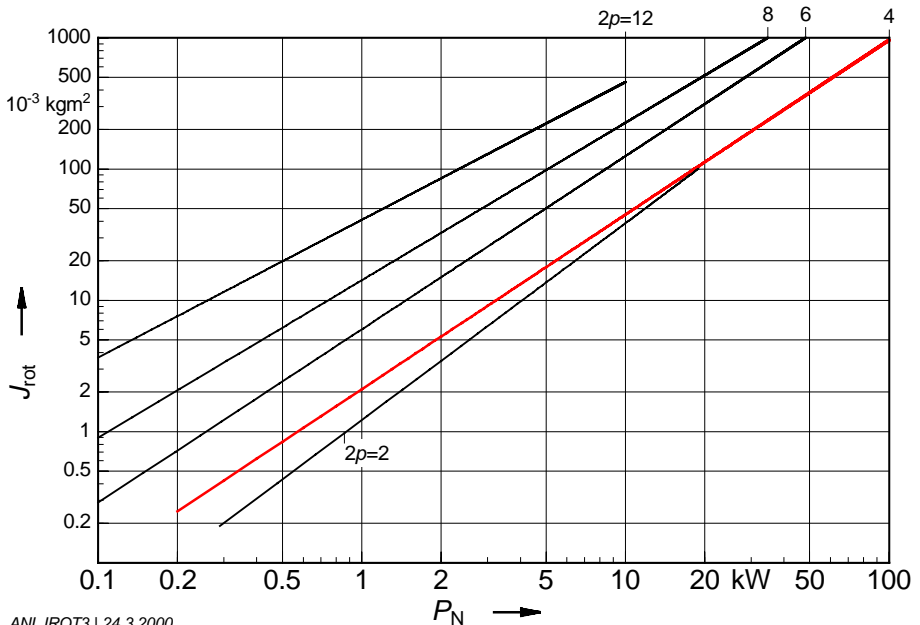
IV BESTIMMUNG DES MASSENTRÄGHEITSMOMENTES

Bei den Berechnungen zu Anlauf und Bremsung spielt das Massenträgheitsmoment eine entscheidende Rolle. In diesem Abschnitt sind die wichtigsten Regeln zur Bestimmung dieser Größe zusammengefasst.

26 Rotor-Massenträgheitsmoment

26.1 Motoren mit fester Drehzahl

Häufig dominiert das Rotor-Massenträgheitsmoment, das für gängige Motortypen den Hersteller-Katalogen zu entnehmen ist. Richtwerte ergeben sich aus **Bild 26.1**.



ANLJROT3 | 24.3.2000

Bild 26.1 Richtwerte für das Rotor-Massenträgheitsmoment J_{rot} von Normmotoren im Leistungsbereich $P_N = 0,1 \dots 100$ kW mit den Polzahlen $2p = 2 \dots 12$

Das Diagramm kann nur einen Anhaltspunkt geben, doch sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass auch die Herstellerangaben nach DIN VDE 0530 Teil 1, Tabelle 8, mit $\pm 10\%$ toleriert sind.

26.2 Polumschaltbare Motoren

Bei polumschaltbaren Motoren sind die Massenträgheitsmomente besonders stark von der jeweiligen Auslegung abhängig. Das nachfolgende Diagramm kann daher nur grobe Richtwerte geben.

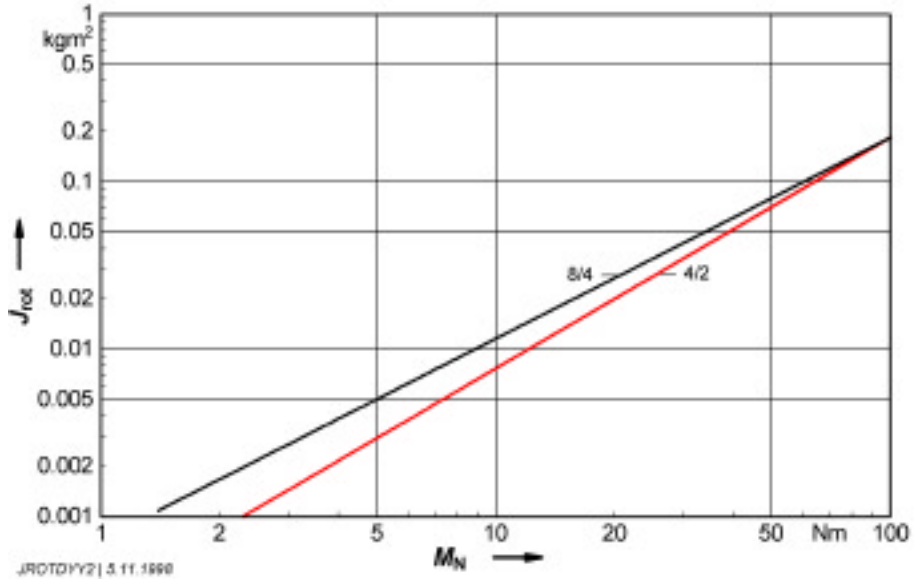


Bild 26.2 Richtwerte für das Rotor-Massenträgheitsmoment J_{rot} von polumschaltbaren Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistung P_N bei der oberen Drehzahl; Dahlanderschaltung für Drehzahlen 1:2 $2p = 8/4$ oder $4/2$

26.2 Polumschaltbare Motoren

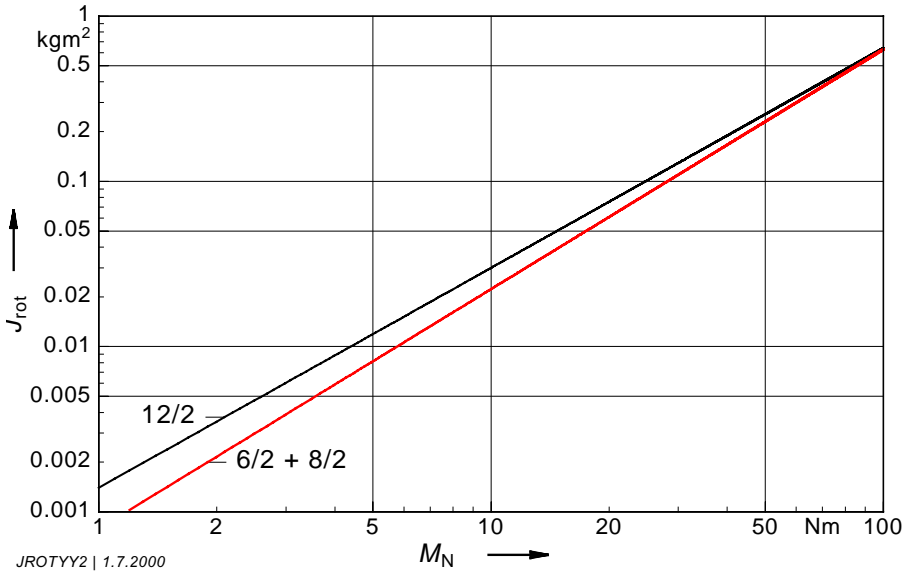


Bild 26.3 Richtwerte für das Rotor-Massenträgheitsmoment J_{rot} von polumschaltbaren Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistung P_N bei der oberen Drehzahl; Getrennte Wicklungen für Drehzahlen 1:3, 1:4 oder 1:6 $2p = 6/2, 8/2$ oder $12/2$

26.3 Zylindrische Stahlkörper

Für zylindrische Voll- oder Hohlkörper aus Stahl im Bereich üblicher Abmessungen lässt sich das auf eine Länge von 0,1 m bezogene Massenträgheitsmoment aus Bild 26.3 ermitteln.

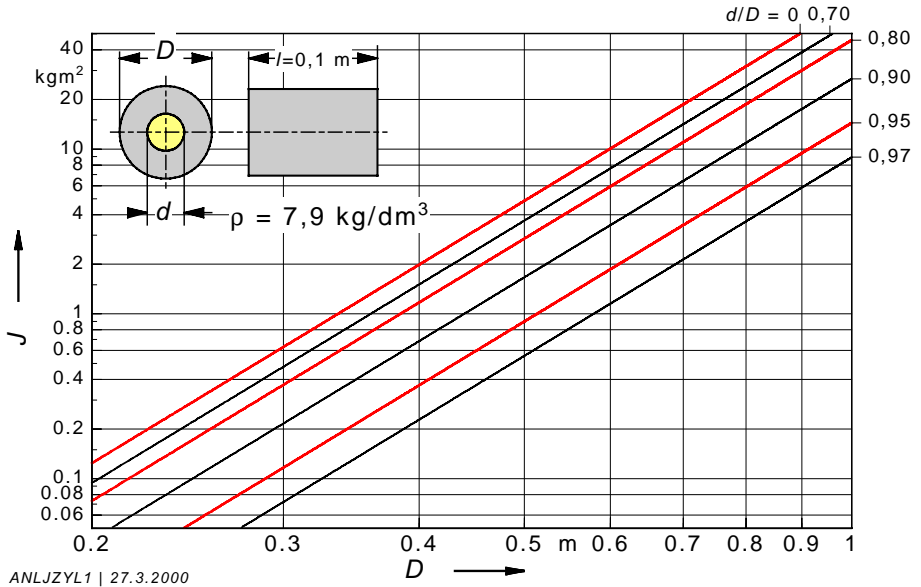
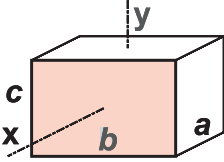
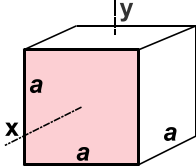
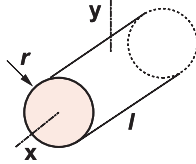
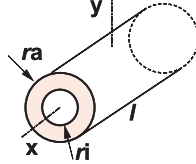
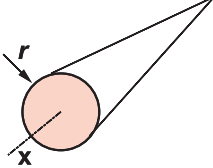
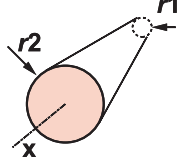


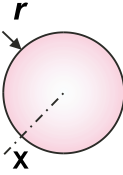
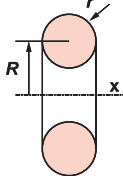
Bild 26.3 Diagramm zur Ermittlung des Massenträgheitsmomentes J von Voll- oder Hohlzylindern aus Stahl, bezogen auf die Länge 0,1 m

27 Homogene Körper mit einfachen geometrischen Formen

Körper mit Masse m (kg)	Massenträgheitsmoment J um x -Achse	Massenträgheitsmoment J um y -Achse
	$J_x = m \frac{b^2 + c^2}{12}$	$J_y = m \frac{a^2 + b^2}{12}$
	$J_x = m \frac{a^3}{6}$	$J_y = m \frac{a^3}{6}$
	$J_x = m \frac{r^2}{2}$	$J_y = m \frac{3r^2 + l^2}{12}$
	$J_x = m \frac{r_a^2 + r_i^2}{2}$	$J_y = m \frac{1}{4} \left(r_a^2 + r_i^2 + \frac{l^2}{3} \right)$
	$J_x = m \frac{3r^2}{10}$	
	$J_x = \frac{3m}{10} \cdot \frac{r_2^5 - r_1^5}{r_2^3 - r_1^3}$	

Fortsetzung Seite 27-2

27 Homogene Körper mit einfachen geometrischen Formen

Körper mit Masse m (kg)	Massenträgheitsmoment J um x -Achse	Massenträgheitsmoment J um y -Achse
	$J_x = m \frac{2r^2}{5}$	
	$J_x = m \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2 \right)$	

28 Experimentelle Ermittlung des Massenträgheitsmomentes

Bei komplizierten geometrischen Formen und unterschiedlichen Dichten ist oft eine Berechnung des Massenträgheitsmomentes nicht ganz einfach; es wird dann häufig experimentell ermittelt. Steht der Drehkörper als Einzelteil zur Verfügung, so kann das Verfahren nach Abschnitt 28.1 angewandt werden. Bei fertig montierten Maschinen bietet sich der Stabpendelversuch Abschnitt 28.2 oder der Auslaufversuch Abschnitt 28.3 an.

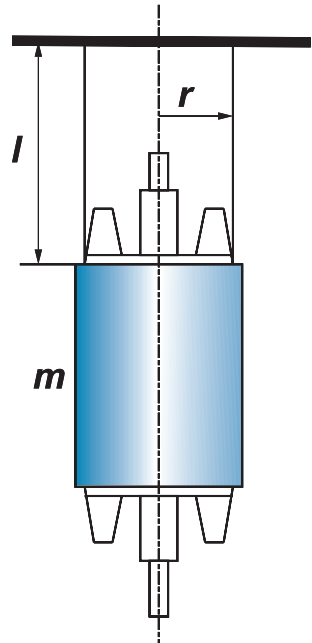
28.1 Drehpendel

Der an zwei oder drei parallelen Fäden aufgehängte Drehkörper (z.B. ein Rotor) wird aus der Ruhelage gedreht; es stellt sich eine Drehschwingung um die senkrechte Achse ein, deren Periodendauer – z. B. als $T=T_n/n$ bei n Schwingungen – zu messen ist.

$$J_{\text{rot}} = \frac{m \cdot g \cdot r^2 \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot l}$$

m – Masse = Gewicht in kg
 g – Fallbeschleunigung in $9,81 \text{ m/s}^2$
 r – Radius in m
 T – Zeit für eine Schwingung in s
 l – Befestigungslänge in m

Bild 28.1
Prinzip des Drehpendel-Versuchs zur Ermittlung des Massenträgheitsmomentes eines Rotors



28.2 Stabpendel

Die Maschine mit dem unbekanntem Massenträgheitsmoment wird mit einer Maschine mit bekanntem Massenträgheitsmoment gekuppelt. Das ganze System wird durch ein Stabpendel in Drehschwingung versetzt, deren Periodendauer (möglichst durch Auszählen mehrerer Schwingungen) zu ermitteln ist.

$$J_x = m \cdot g \cdot e \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} - J_{\text{mot}} - J_P$$

J_x – zu ermittelndes Massenträgheitsmoment in kgm^2
 J_{mot} – bekanntes Massenträgheitsmoment in kgm^2
 J_P – Massenträgheitsmoment des Pendels in kgm^2 $J_P = m_P \cdot e^2$
 m – Masse in Gewicht) des Pendels in kg
 g – Fallbeschleunigung in $9,81 \text{ m/s}^2$
 e – Abstand des Pendel-Schwerpunktes von der Drehachse in m
 T – Schwingungsdauer in s

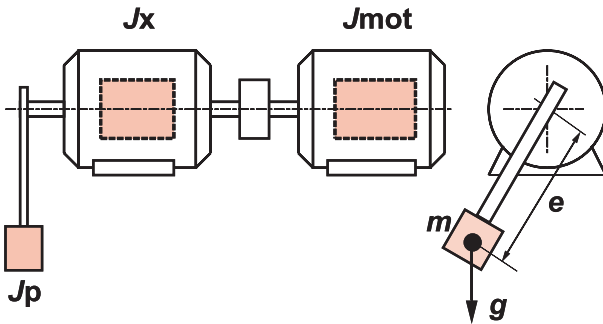


Bild 28.2
Prinzip des Stabpendel-Versuchs zur Ermittlung des Massenträgheitsmomentes eines Rotors

28.3 Auslaufversuch

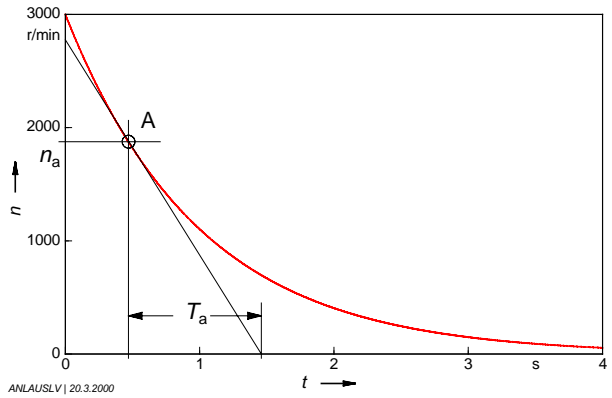
Bei diesem Versuch wird eine relativ genaue Kenntnis der Leerlauf-Reibungsverluste V_{Rbg} des Antriebes vorausgesetzt, die bei der Typprüfung durch »Trennung der Verluste« zu ermitteln sind. Ist dieser Wert bekannt und kann die Arbeitsmaschine abgekuppelt werden, so ist oszillographisch oder – bei langen Auslaufzeiten – durch punktweise Ablesung eine Auslaufkurve (Drehzahl als Funktion der Zeit) zu ermitteln. Es vermindert den Fehler, wenn die Drehzahl durch Frequenzerhöhung gesteigert werden kann. Die Tangente nach Bild 28.3 sollte möglichst nicht bei $n=0$ an die Kurve angelegt werden. Das Massenträgheitsmoment wird ermittelt aus:

$$J_x = \frac{91250 \cdot T_a \cdot V_{\text{Rbg}}}{n_a^2}$$

J_x – Gesuchtes Massenträgheitsmoment in kgm^2
 T_a – Gedachte Auslaufzeit - Tangentenabschnitt in s
 V_{Rbg} – Reibungsverluste in kW
 n_a – Drehzahl am Anlegepunkt der Tangente in r/min

28.3 Auslaufversuch

Bild 28.3
Auslaufversuch zur
Ermittlung des Massen-
trägheitsmomentes einer
zusammengebauten
Maschine
A – willkürlich gewählter
Anlegepunkt der
Tangente



29 Trägheitsfaktor FI

Der Trägheitsfaktor FI (Factor of Inertia) ist das Verhältnis sämtlicher auf die Drehzahl des Motors umgerechneter und von ihm angetriebenen Massen einschließlich des Trägheitsmomentes des Motorläufers zum Trägheitsmoment des Motorläufers, also

$$FI = \frac{J_{\text{total}}}{J_{\text{rotor}}} = \frac{J_{\text{extern}} + J_{\text{rotor}}}{J_{\text{rotor}}}$$



Bild 29 Getriebemotor in Aufstellung V1 zum Antrieb eines Kühlturmventilators
Lüfterrad-Durchmesser bis zu 3,5 m
typische Trägheitsfaktoren FI bis zu 30

30 Aufteilung des Drehmomentes entsprechend den Massenanteilen

Das vom Motor entwickelte Beschleunigungsmoment verteilt sich linear auf die Massen: Diese Gesetzmäßigkeit ist vor allem für die **Belastung von nachgeschalteten Übertragungsmitteln** – z. B. Getriebe – wichtig.

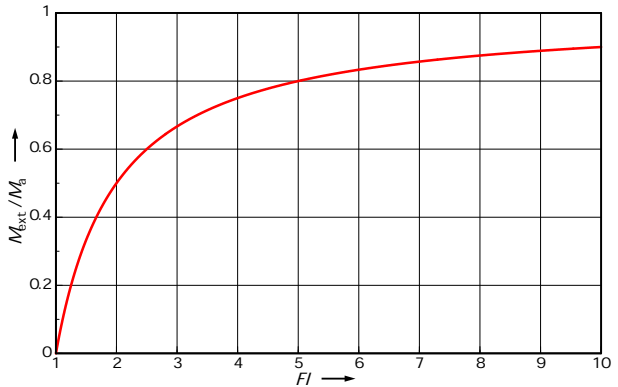
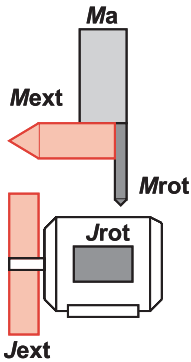


Bild 30.1

Moment geht nach Masse

Bild 30.2

Externer Anteil des Momentes

Der nach außen fließende Anteil des Beschleunigungsmomentes ist im **Bild 30.2** dargestellt; er errechnet sich aus

$$\frac{M_{\text{ext}}}{M_a} = \frac{J_{\text{ext}}}{\Sigma J} = \frac{J_{\text{rot}} \cdot (FI - 1)}{J_{\text{rot}} \cdot FI} = \frac{FI - 1}{FI}$$

Diese Betrachtung macht deutlich, weshalb dem Trägheitsfaktor FI bei der Bestimmung des **Stoßgrades** eine wesentliche Funktion zukommt. Der Stoßgrad ist mitbestimmend für den **Betriebsfaktor** zur Auswahl eines Getriebes. Bei der Festlegung der Betriebsfaktoren für Danfoss-Bauer-Getriebe sind folgende Faktoren maßgebend:

Stoßgrad	I	II	III
Trägheitsfaktor	$FI \leq 1,3$	$1,3 < FI \leq 4$	$FI > 4$
Getriebebelastung als Anteil von M_a	$\leq 0,23 M_a$	$0,23 \dots 0,75 M_a$	$> 0,75 M_a$
als Anteil von M_N (ca.)	$\leq 0,5 M_N$	$0,5 \dots 1,5 M_N$	$> 1,5 M_N$

31 Umwertung bewegter Massen

Die Massenanteile der Übertragungsmittel und der angetriebenen Maschine sind entsprechend ihrer Drehzahl oder Geschwindigkeit auf die Drehzahl der Läuferwelle umzurechnen:

31.1 Rotation

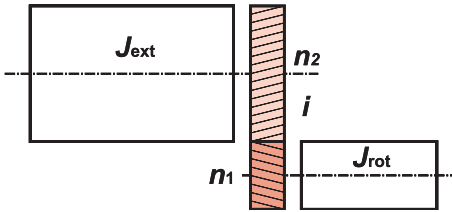


Bild 31.1
Schema für die Umrechnung einer rotierenden Masse auf die Rotorwelle

$$\begin{aligned} \Sigma J &= J_{\text{ext}1} + J_{\text{rot}} \\ &= \frac{J_{\text{ext}}}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} + J_{\text{rot}} = \frac{J_{\text{ext}}}{i^2} + J_{\text{rot}} \end{aligned}$$

31.2 Translation

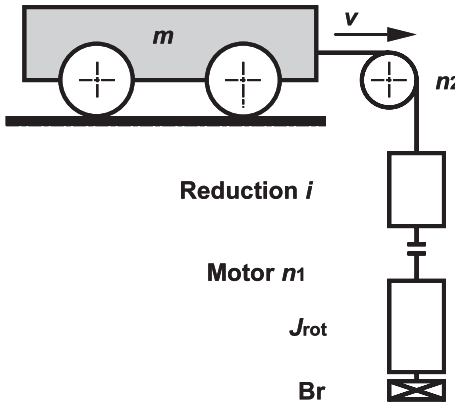


Bild 31.2
Schema für die Umrechnung einer linear bewegten Masse auf die Rotorwelle

$$\begin{aligned} \Sigma J &= J_{\text{ext}1} + J_{\text{rot}} \\ &= 91,2 \cdot m \cdot \frac{v^2}{n_1^2} + J_{\text{rot}} \end{aligned}$$

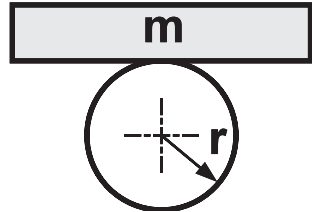
J – Massenträgheitsmoment in kgm^2
 m – Masse in kg
 v – Geschwindigkeit in m/s
 n – Drehzahl in r/min
 i – Getriebe-Untersetzung

31.3 Linearbewegung als Tangente am Kreis

Der früher im Technischen Maßsystem übliche Begriff »Schwungmoment GD^2 « wurde nicht in das SI übernommen. Für Berechnungen mit dem Massenträgheitsmoment mr^2 sind daher nicht nur die unterschiedlichen Einheiten, sondern auch die **andere Definition** zu beachten.

Bild 31.3
Linearbewegung am Kreis

Definition mr^2 und GD^2



m – Masse in kg
 d – Durchmesser in m
 r – Radius in m

$$J = m \cdot r^2 = \frac{m \cdot d^2}{4}$$



Bild 31.4 Großer Portalkran als Beispiel für den dominierenden Anteil linear bewegter Massen für die Belastung der Kranfahrantriebe

V MECHANISCHE BREMSUNG

32 Allgemeines

Die Anzahl und der relative Anteil der Elektromotoren, die mit einer an- oder eingebauten mechanischen Bremse als »Bremsmotor« oder »Stoppmotor« gebaut werden, nimmt ständig zu. Diese Entwicklung hängt mit der Forderung nach rationell und automatisch ablaufenden Fertigungsverfahren zusammen. Man kann innerhalb der hoch technisierten, mit kurzen Taktzeiten arbeitenden Arbeitsabläufe keine noch so kurzen Verlustzeiten für den Auslauf eines Motors und seiner Arbeitsmaschine in Kauf nehmen, und man verlangt in den mechanisierten Taktstrassen eine präzise und von äußeren Einflüssen unabhängige Positionierung von Werkzeugen, Werkstücken oder Transportgütern.

Mechanische Bremsen verkürzen also hauptsächlich die **Nachlaufzeiten und Nachlaufwege**, die bei einem ungebremsten, freien Auslauf entstehen würden. Daneben haben sie selbstverständlich ein traditionell starkes Anwendungsgebiet bei **Hebzeugen** aller Art.

Zwar stehen für die reine Auslaufbremsung eine ganze Reihe von »elektrischen« oder »dynamischen« Bremsverfahren zur Wahl, die alle auf der Bremswirkung eines stromdurchflossenen oder induzierten Leiters im Magnetfeld beruhen und daher im Prinzip ohne mechanische Reibung – also verschleißfrei – arbeiten:

Trotz dieser eindeutigen Vorteile der wartungsfreien elektrischen Bremsverfahren nehmen die mechanischen Bremsen zahlenmäßig eine Vorzugsstellung ein.

Die Erklärung liegt einerseits auf technisch-sachlichem Gebiet: Die elektrische Bremsung wirkt nur »dynamisch«, also im Auslauf, und nicht »statisch«, also im Stillstand. Da sie zudem meist das Stromversorgungsnetz als Energiequelle oder als Energieempfänger benötigt, kann sie meist nicht als »Sicherheitsbremse« im Sinne der Unfallverhütungsvorschriften anerkannt werden.

Meist ist jedoch wohl die Begründung auf einem anderen Gebiet zu suchen: Während nämlich bei der »elektrischen Bremsung« ein »normaler« Elektromotor durch besondere Maßnahmen der Projektierung, Installation und Steuerung – also durch nachträglichen Aufwand – zum »gebremsten Motor« wird, kann der speziell gebaute »Bremsmotor« ganz »normal« eingebaut und an das Netz angeschlossen werden.

Konstrukteure und Elektroingenieure, die eine neue Arbeitsmaschine entwickeln, verlagern das Problem der Bremsung also aus einer gerechtfertigten Tendenz zur Vereinfachung und aus wirtschaftlichen Gründen auf den Lieferanten des Elektromotors.



Bild 32.1
Malteserkreuz in der Titelgraphik eines bekannten
Mechanik-Lehrbuches

Beispiel für die mechanische Lösung für einen Schalt-
tisch



Bild 32.2
Drehtisch in einer SCHENCK-Transportanlage der Luft-
hansa mit Antrieb durch Getriebe-Bremsmotor als Bei-
spiel für die moderne Lösung mit elektrischem Antrieb



Bild 32.3
Getriebe-Bremsmotoren an Hubwerk, Drehwerk und
Fahrwerk eines Turmdrehkrans

Beispiel für Anwendungsmöglichkeiten von
Getriebe-Bremsmotoren

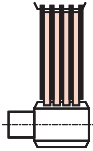

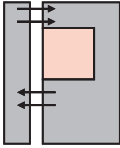
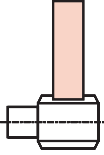
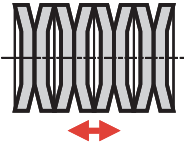
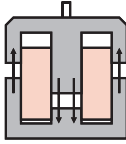
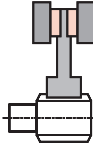
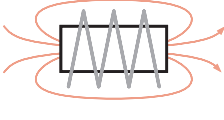
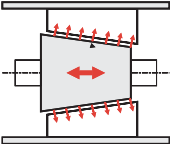

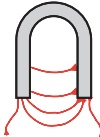

33 Bremssysteme

In vereinfachter Form lässt sich eine mechanisch wirkende Bremse in Bauelemente mit drei wichtigen Aufgaben aufgliedern:

- Reibung
- Bremskraft
- Lüftkraft.

33.1 Unterteilung der Bremssysteme

Die Prinzipdarstellung in **Bild 33.1** enthält die wichtigsten Bauelemente von mechanischen Bremsen. Aus den gezeigten Grundelementen lassen sich viele Kombinationen zusammenstellen, die in der Praxis auch gebaut werden.

Reibfläche	Bremskraft	Lüftkraft
 <p>Lamellen</p>	 <p>Schrauben-Druckfeder</p>	 <p>DC-Magnet</p>
 <p>Scheibe</p>	 <p>Tellerfedern</p>	 <p>AC-Magnet</p>
 <p>Zweiflächen</p>	 <p>Elektro-Magnet</p>	 <p>Ausnützung des Motorfeldes</p>
 <p>Kegel</p>	 <p>Permanent-Magnet</p>	 <p>Feder</p>

Fortsetzung Seite 33-2

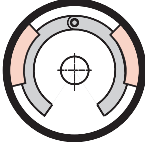
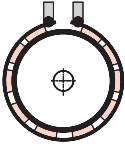
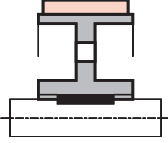
Reibfläche	Bremskraft	Lüftkraft
 <p data-bbox="218 368 295 392">Backen</p>	<p data-bbox="482 201 633 225">siehe Seite 33-1</p>	<p data-bbox="785 201 936 225">siehe Seite 33-1</p>
 <p data-bbox="228 568 285 592">Band</p>		
 <p data-bbox="213 767 296 791">Trommel</p>		

Bild 33.1 Einteilung der Bremssysteme

33.2 Federdruckbremse und Magnetbremse

Wird die Bremskraft mithilfe von einer oder mehreren Federn erzeugt, so spricht man von einer Federdruckbremse.

Da bei diesem System die Bremswirkung auch bei einem unbeabsichtigten Stromausfall wirksam wird, kann es als **Sicherheitsbremse** im Sinne der Unfallverhütungsvorschriften anerkannt werden. Die »Technischen Regeln für Aufzüge« (TRA) für die Bemessung und Ausführung der Bremse sind je nach Aufzugsart zusätzlich zu beachten. Wird die Bremskraft hingegen von einem Elektromagneten aufgebracht, der für seine Wirksamkeit das elektrische Netz benötigt, so hat man es mit einer Magnetbremse zu tun. Diese kann im Allgemeinen nicht als Sicherheitsbremse bezeichnet werden. Da die Federdruckbremse einen Elektromagneten für die Lüftung, also die Freigabe der Bremse, benötigt, werden im Sprachgebrauch die Begriffe »Federdruckbremse« und »Magnetbremse« häufig nicht streng getrennt.

34 Anbau oder Einbau

Die konstruktiven Lösungen für den Bremsmotor sind auch in der Wahl der Anordnung recht unterschiedlich: Man findet einerseits Stoppmotoren, deren Bremssystem so vollständig mit dem Antriebsmotor zu einer **konstruktiven Einheit** verbunden ist, dass sie sich äußerlich nur wenig oder gar nicht von normalen Motoren unterscheiden. Die Bremse ist mit Teilen des Motors zu einer Einheit integriert, ist also als **Einbaubremse** zu bezeichnen.



Bild 34.1 Getriebemotoren mit »Einbaubremse« oder »Anbaubremse am B-Lagerschild« sind äußerlich nicht zu unterscheiden

Bei anderen Lösungen wird die Bremse völlig **getrennt konstruiert** und gebaut und an der verstärkten Lüfterhaube oder am B-Lagerschild des Motors als **Anbaubremse** angebaut.

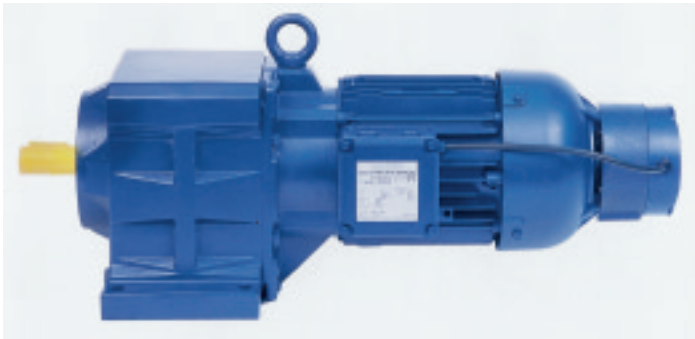


Bild 34.2 Getriebemotor mit »Anbaubremse« an der Lüfterhaube

Es liegt aus wirtschaftlichen und konstruktiven Gründen nahe, die Bremse in die Gesamtkonstruktion des Motors einzubeziehen und beiden ein gemeinsames Gehäuse zu geben. Darüber hinaus reizt es, das im Motor ohnedies vorhandene Magnetfeld für die Lüftung der Bremse auszunützen, statt dieser ein eigenes Magnetsystem zuzuordnen. Nach diesem Grundkonzept sind eine ganze Reihe technisch interessanter Lösungen entstanden. Wegen der konstruktive Verschmelzung von Motor und Bremse sind diese Lösungen häufig auch preisgünstiger. Diese Verschmelzung bedingt jedoch auch eine völlige Abhängigkeit der Funktionen von Motor und Bremse: Wartungsarbeiten und Reparaturen an der Bremse erfordern fast immer einen Eingriff in den Motor, also eine völlige Stillsetzung des Antriebes; Schäden an der Bremse führen nicht selten zwangsläufig zu erheblichen Folgeschäden am Motor. ***Da mechanische Bremsen durchweg nach dem Prinzip der Reibung arbeiten, haben sie zwangsläufig auch stets Verschleiß und im Allgemeinen kürzere Wartungsfristen und Lebensdauern als die praktisch verschleißfrei arbeitenden Elektromotoren.***

Bremsmotoren mit Anbaubremse sind im Allgemeinen nicht so formschön wie der »Motor mit integrierter Bremse«; die getrennte Kapselung des Bremssystems in einem eigenen Gehäuse sowie das eigene Magnetsystem erfordern einen größeren Aufwand. Die völlige Trennung der Funktionen erleichtert jedoch die Wartung, Instandsetzung und Reservehaltung von Verschleißteilen. In einigen Anwendungsfällen wird es sogar möglich sein, die Bremse ohne Betriebsunterbrechung zu überholen oder vorübergehend den Motor ohne Bremse zu betreiben. Dies gilt sinngemäß auch für Lösungen, bei denen die Bremse »autark« konstruiert und unter der Lüfterhaube am B-Lagerschild des Motors angebaut ist.

Bei allen Anwendungen, die hohe Betriebssicherheit und möglichst kurze Stillstandspausen verlangen, bietet sich daher die Anbaubremse als zuverlässiges Bauelement an.

Weitere Vorteile des Anbauprinzips sind in Abschnitt 46 ausführlich beschrieben. Beispiele für die verschiedenen Anbauarten und ihre technischen Vor- und Nachteile sind in der **Bildfolge 34.3** zusammengefasst.

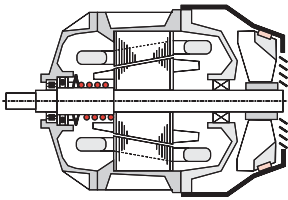


Bild 34.3.1
Einbaubremse mit
Konusläufer
Vorteile:
Ausnützung des
Motormagnetfeldes kompakte Bauweise
Nachteile:
Axialbewegung des
Läufers, große
Massenkräfte, Funktion
von Motor und Bremse
vollständig integriert

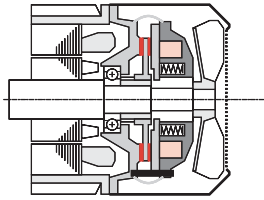


Bild 34.3.3
Einbaubremse mit
GS-Magnet
Vorteile:
kurze Baulänge, leichter
Zugang zum Reibbelag
Nachteile:
Feste Zuordnung von
Motor/Bremse, Funktion
von Motor und Bremse
weitgehend integriert

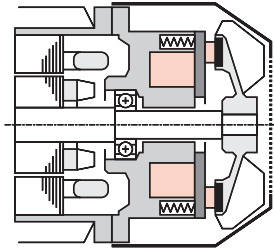


Bild 34.3.5
Anbaubremse am
B-Lagerschild
Vorteile:
vollständige Trennung der
Funktion und Kapsel von
Motor und Bremse
Nachteile:
Zugang zum Reibbelag
nach Abnahme von Lüfter
und Lüfterhaube; Demontage-Freiraum für die
Lüfterhaube erforderlich

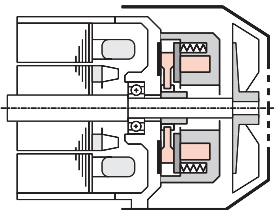


Bild 34.3.2
Einbaubremse mit
GS-Magnet
Vorteile:
kurze Baulänge
Nachteile:
Feste Zuordnung von
Motor/Bremse, Funktion
von Motor und Bremse
weitgehend integriert,
erschwerter Zugang zum
Reibbelag

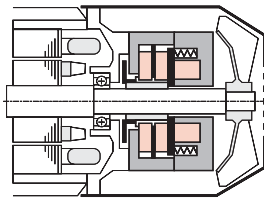


Bild 34.3.4
Anbaubremse am
B-Lagerschild
Vorteile:
teilweise Trennung der
Funktion von Motor und
Bremse, relativ kurze
Baulänge
Nachteile:
Zugang zum Reibbelag
nach Abnahme von Lüfter
und Lüfterhaube

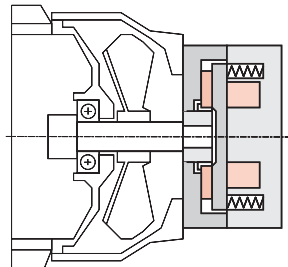


Bild 34.3.6
Anbaubremse an der
Lüfterhaube
Vorteile:
vollständige Trennung der
Funktion und Kapsel von
Motor und Bremse,
Notbetrieb des Motors
möglich, Ersatzbremse
leicht zu tauschen
Nachteile:
Platzbedarf nur geringfügig
erhöht, siehe Bild 34.4

Der erhöhte axiale Platzbedarf einer Anbaubremse (Bilder 34.2 und 34.3.6) gegenüber einer Einbaubremse (Bild 34.3.3) stellt sich optisch ungünstiger dar als er tatsächlich ist. **Bild 34.4** zeigt die Mehrlängen gegenüber der jeweiligen Ausführung ohne Bremse im Vergleich zwischen den Danfoss-Bauer-Anbaubremsen und einem Fabrikat, das nach Bild 34.3.3 als Einbaubremse konzipiert ist.

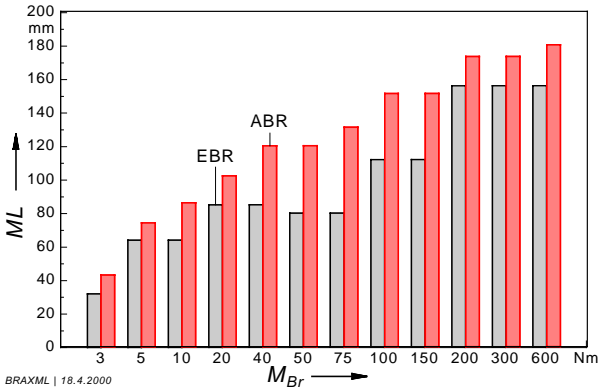


Bild 34.4
Mehrlängen (ML) gegenüber dem jeweiligen Motor ohne Bremse bei Einbaubremsen (EBR) und Anbaubremsen (ABR) in Abhängigkeit vom Nenn-Bremsmoment (M_{BR}) der Bremse

35 Ausführungsbeispiele

Die nachfolgende Sammlung von zehn Beispielen enthält auch Konstruktionen, die nicht mehr zum aktuellen Lieferprogramm gehören. Die gezeigten Ausführungen wurden jedoch in sehr großen Stückzahlen geliefert und sind noch im Einsatz. Da sich diese Schrift auch an die **Anwender** von Danfoss-Bauer-Antrieben wendet, wurden diese bewährten Bremsen mit aufgenommen.

35.1 Einscheiben-Federdruckbremse Reihe E003B mit GS-Lüftmagnet, Anbau am Lagerschild

Das Magnetgehäuse (5) enthält die vergossene Spule. Die Druckplatte (2) wird von den Federn (3) axial auf die Bremsscheibe (4) gedrückt. In Umfangsrichtung stützt sie sich an den Zylinderschrauben (10) ab. Bei Erregung wird die Druckplatte gegen den Druck der Federn vom Magnetgehäuse angezogen. Die Bremsscheibe (4) sitzt axial beweglich auf dem Mitnehmer (1), der auf dem verlängerten Wellenende des Elektromotors befestigt ist.

Der Elektromagnet ist so reichlich bemessen, dass auch ein vergrößerter Luftspalt überwunden werden kann, solange der Verschleiß in üblichen Grenzen bleibt. Eine Nachstellmöglichkeit ist nicht vorgesehen. Das Bremsmoment kann in Stufen mit der Federzahl geändert werden.

Auf Wunsch werden Federdruckbremsen auch mit Handlüftung (HL) ausgeführt, sodass sie z. B. bei Stromausfall mechanisch gelüftet werden können. Ein zweites Wellenende (2. WE) ermöglicht in diesem Fall ein Durchdrehen von Hand. Die Bremse wird außen am B-Lagerschild des Motors montiert, ist dabei allerdings in drei Hauptteile zerlegt.

Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter abgenommen werden; dazu ist in axialer Richtung ein Demontage-Freiraum etwa von der Länge der Lüfterhaube erforderlich.

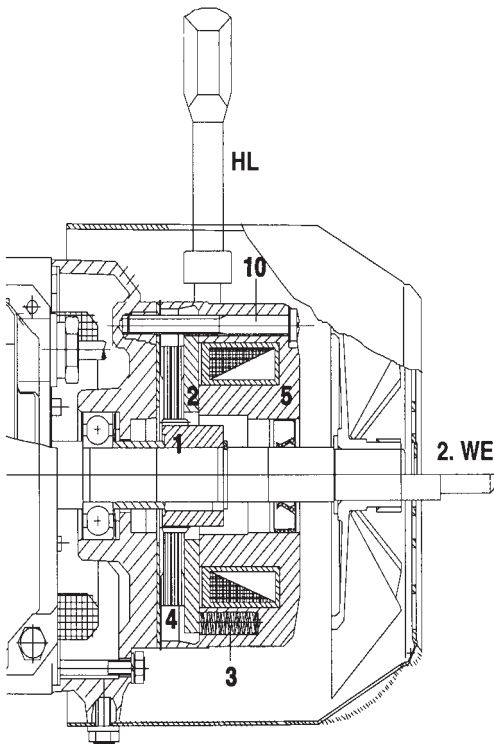


Bild 35.1
Einscheiben-Feder-
druckbremse mit
Gleichstrom-Lüftmagnet
Typenreihe E003B

35.2 Zweiseiben-Federdruckbremse Reihe Z008A mit GS-Lüftmagnet, Anbau am Lagerschild

Die Bremse wird mit den Anbauschrauben (A) außen am B-Lagerschild des Motors montiert; sie ist dabei über die inneren Befestigungsschrauben (B) zusammengehalten und kann als vollständiges Bauteil am Lager gehalten werden.

Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter abgenommen werden; dazu ist in axialer Richtung ein Demontage-Freiraum etwa von der Länge der Lüfterhaube erforderlich.

35.2 Zweischeiben-Federdruckbremse Reihe Z008A mit GS-Lüftmagnet,

Bild 35.2.1
Zweischeiben-Federdruckbremse mit Gleichstrom-Lüftmagnet
Typenreihe Z008A

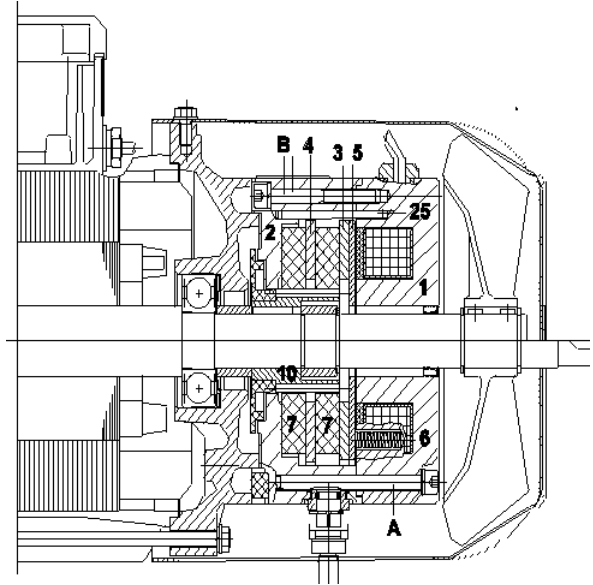
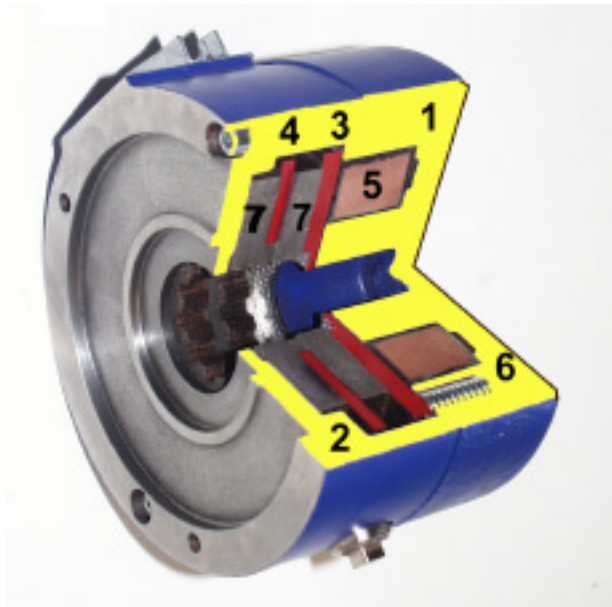


Bild 35.2.2 Zweischeibenbremse im perspektivischen Schnitt

- 1 Magnetgehäuse
- 5 Magnetspule
- 2 Zentrierflansch
- 6 Federn
- 3 Bremsplatte
- 7 Bremscheiben
- 4 Reibplatte
- 10 Mitnehmer



35.3 Einscheiben-Federdruckbremse Reihe E 025A, Anbau an Lüfterhaube

Das Magnetgehäuse (1) enthält die vergossene Spule. Das Gehäuse ist fest mit dem Zentrierflansch (2) verbunden. Die beschichtete Magnetplatte (5) und die Bremsplatte (3) werden von den Federn (6) axial auf die Bremsscheibe (7) gedrückt. In Umfangsrichtung stützen sie sich an den Spiral-Spannstiften (25) ab. Bei Erregung werden die Magnetplatte und die Bremsplatte gegen den Druck der Federn vom Magnetgehäuse angezogen. Die Bremsscheibe (7) und die Reibplatte (4) sitzen axial beweglich auf dem Mitnehmer (10), der auf dem verlängerten Wellenende des Elektromotors befestigt ist. Eine Nachstellmöglichkeit ist nicht vorgesehen. Das Bremsmoment kann in Stufen mit der Federzahl geändert werden.

Handlüftung (HL) und zweites Wellenende (2. WE) sind Optionen, die auf Wunsch lieferbar sind.

Die Bremse wird mit Anbauschrauben (A) außen an der Lüfterhaube des Motors montiert; sie ist dabei über die inneren Befestigungsschrauben (B) zusammengehalten und kann als vollständiges Bauteil am Lager gehalten werden.

Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter nicht abgenommen werden; ein zusätzlicher axialer Demontage-Freiraum ist nicht erforderlich.

Bei der hier gezeigten Version sind Einbaugleichrichter und Anschlussklemmen im Motor-Klemmenkasten untergebracht; die Verbindung erfolgt über ein leicht zugängliches, äußeres Kabel.

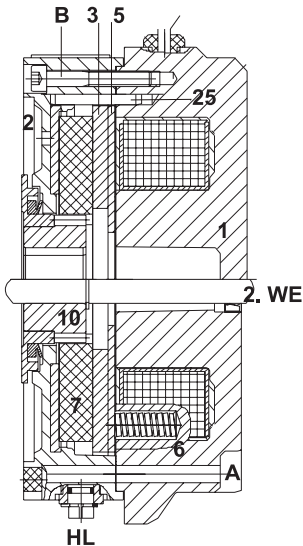


Bild 35.3

Einscheiben-Federdruckbremse mit Gleichstrom-Lüftmagnet Typenreihe E025A; Anschluss über Kabel am Motor-Klemmenkasten

35.4 Zweischeiben-Federdruckbremse Reihe Z025A mit GS-Lüftmagnet, Anbau an Lüfterhaube

Das Magnetgehäuse (1) enthält die vergossene Spule. Das Gehäuse ist fest mit dem Zentrierflansch (2) verbunden. Die beschichtete Magnetplatte (5) und die Bremsplatte (3) werden von den Federn (6) axial auf die Bremsscheiben (7) und die Reibplatte (4) gedrückt. In Umfangsrichtung stützen sie sich an den Spiral-Spannstiften (25) ab. Bei Erregung werden die Magnetplatte und die Bremsplatte gegen den Druck der Federn vom Magnetgehäuse angezogen. Die Bremsscheiben (7) und die Reibplatte (4) sitzen axial beweglich auf dem Mitnehmer (10), der auf dem verlängerten Wellenende des Elektromotors befestigt ist. Handlüftung (HL) und zweites Wellenende (2. WE) sind Optionen, die auf Wunsch lieferbar sind. Der Elektromagnet ist so reichlich bemessen, dass auch ein vergrößerter Luftspalt überwunden werden kann, solange der Verschleiß in üblichen Grenzen bleibt. Eine Nachstellmöglichkeit ist nicht vorgesehen. Das Bremsmoment kann in Stufen mit der Federzahl geändert werden.

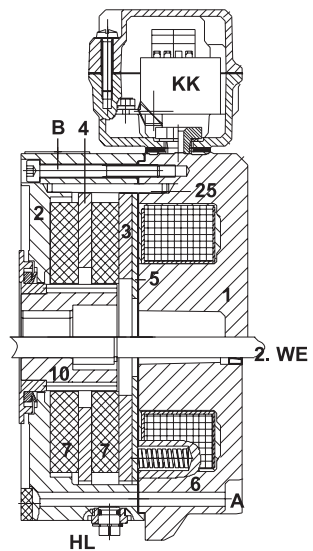
Die Bremse wird mit Anbauschrauben (A) außen an der Lüfterhaube des Motors montiert; sie ist dabei über die inneren Befestigungsschrauben (B) zusammengehalten und kann als vollständiges Bauteil am Lager gehalten werden.

Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter nicht abgenommen werden; ein zusätzlicher axialer Demontage-Freiraum ist nicht erforderlich.

Bei der hier gezeigten Version sind Einbaugleichrichter und Anschlussklemmen im angebauten Klemmenkasten (KK) untergebracht; der externe Anschluss erfolgt direkt in diesem Kasten

Bild 35.4

Zweischeiben-Federdruckbremse mit Gleichstrom-Lüftmagnet Typenreihe Z025A; Anschluss am Bremsen-Klemmenkasten



35.5 Einscheiben-Federdruckbremse Reihe ABR mit GS-Lüftmagnet, Anbau an Lüfterhaube

Diese Konstruktion enthält für die Bremsung die gleichen aktiven Bauteile wie die Reihe GBR, ist jedoch z. B. durch Verzicht auf einen eigenen Anschlusskasten wesentlich vereinfacht und dadurch bei gleichem Arbeitsvermögen preisgünstiger.

Das Magnetgehäuse (1) enthält die vergossene Spule; ein Antiklebeblech ist angeklebt (4). Das Gehäuse ist fest mit dem Zentrierflansch (2) verbunden. Die Druckplatte (3) wird von den Federn (5) axial auf die Bremsscheibe (8) gedrückt. In Umfangsrichtung stützt sie sich an zwei Zylinderstiften (12) ab. Bei Erregung wird die Druckplatte gegen den Druck der Federn vom Magnetgehäuse angezogen. Die Bremsscheibe sitzt axial beweglich auf dem Mitnehmer (7), der auf dem zweiten Wellenende des Elektromotors befestigt ist.

Die Bremse wird mit den Anbauschrauben außen an der Lüfterhaube des Motors montiert; sie ist dabei über die inneren Befestigungsschrauben (13) zusammengehalten und kann als vollständiges Bauteil am Lager gehalten werden.

Eine Nachstellmöglichkeit ist nicht vorgesehen. Das Bremsmoment kann in Stufen mit der Federzahl geändert werden.

Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter nicht abgenommen werden; ein zusätzlicher axialer Freiraum ist nicht erforderlich.

Einbaugleichrichter und Anschlussklemmen sind im Motor-Klemmenkasten untergebracht.

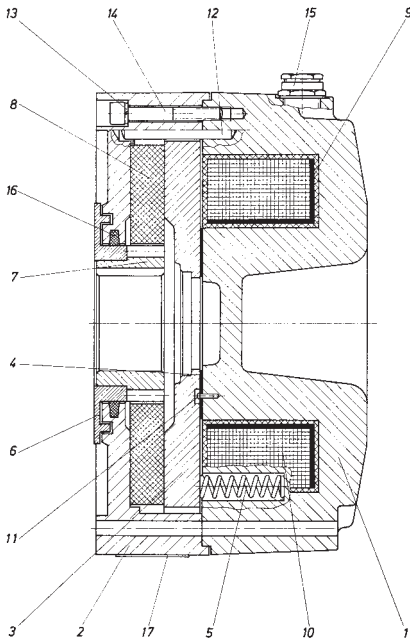


Bild 35.5
Einscheiben-Federdruckbremse mit
Gleichstrom-Lüftmagnet
Typenreihe ABR

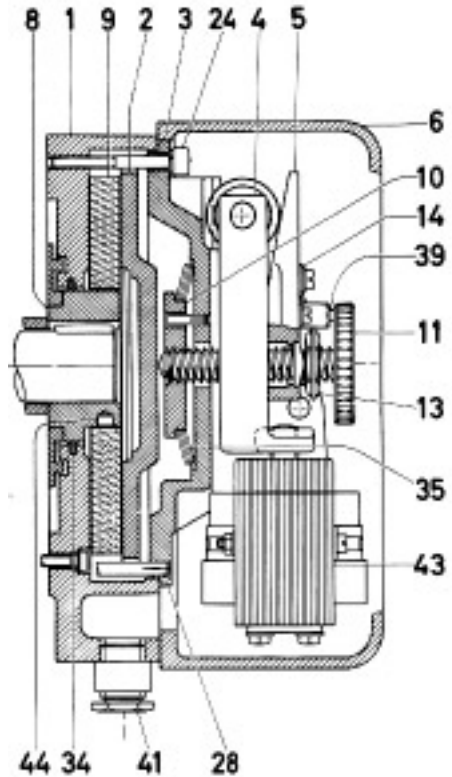
35.6 Einscheiben-Federdruckbremse Reihe FBR mit WS-Lüftmagnet, Anbau an Lüfterhaube

Der axial wirkende Bremsdruck des Tellerfedernpaketes (35) wird über Druckschraube (11) und Druckscheibe (2) auf die Bremsscheibe (9) übertragen. Die durch Reibung an den beiden seitlichen Planflächen der Bremsscheibe entstehende Bremskraft wirkt als Bremsmoment über den als Vierkant ausgebildeten Mitnehmer (8), der auf dem zweiten Wellenende des Motorläufers sitzt. Beim Lüften der Bremse zieht der Wechselstrommagnet (43) seinen Anker und die Rollengabel (4) an, wodurch der abgeschrägte Hebel (5) die Druckschraube (11) gegen den Druck des Federnpaketes (35) axial bewegt und damit Druckscheibe (2) und Reibscheibe (9) freigibt.

Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter nicht abgenommen werden; ein zusätzlicher axialer Freiraum ist nicht erforderlich.

Der Lüftmagnet benötigt keinen Gleichrichter; er ist parallel zu den Motorklemmen oder an der Steuerspannung angeschlossen.

Bild 35.6
Einscheiben-Federdruckbremse mit
Wechselstrom-Lüftmagnet
Typenreihe FBR



35.7 Kegel-Federdruckbremse mit Lüftung durch Motorfeld, integriert im Motor

Vom stirnseitigen Streufeld des normalen Elektromotors wird ein magnetisch leitfähiger Topf (1) axial angezogen. Der Topf ist mit drei am Umfang versetzten Bolzen (2) vernietet, die im B-Lagerschild (3) axial beweglich geführt sind und ihrerseits außerhalb des Motorgehäuses den Bremskonus (4) tragen. Beim Bremsen drückt die Feder (5) den Bremskonus (4) mit seinem Reibbelag (6) in den Innenkonus des Lüferrades (7). Zur Nachstellung des Verschleißes am Reibbelag (6) kann das Lüferrad (7) mit einer Ringmutter (8) axial nachgestellt werden.

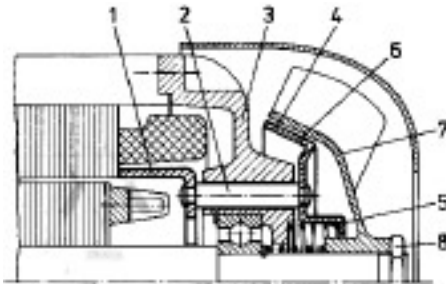


Bild 35.7
Kegel-Federdruckbremse mit Lüftung
durch das Streufeld des Elektromotors

35.8 Backen-Federdruckbremse Reihe 75 (BINDER) mit WS-Lüftmagnet angebaut an Lüfterhaube

Die Bremsstrommel (1) ist glockenförmig ausgebildet und mit Nut und Passfeder auf dem verlängerten Wellenende des Läufers befestigt. Auf einem Bolzen (2) sind die beiden Schenkel (3) der Innenbackenbremse schwenkbar angeordnet. Sie tragen an ihrem Außendurchmesser die Reibbacken (4) aus hochwertigem Reibmaterial; die Schenkel selbst bestehen aus Dynamoblech und bilden gleichzeitig den magnetischen Kreis für den Lüftmagneten (5). Beim Bremsen drückt die Feder (6) die beiden Reibbacken gegen den Innendurchmesser der Bremsstrommel. Beim Lüften zieht der Wechselstrom-Magnet (5) die beiden Schenkel (3) an und gibt damit die Bremsstrommel frei.

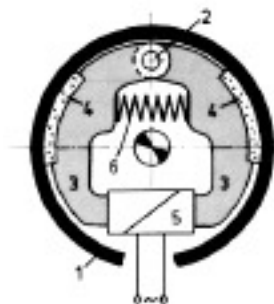


Bild 35.8
Prinzip einer Backen-Federdruckbremse mit Wechsel-
strom-Lüftmagnet; Typenreihe 75 (BINDER)

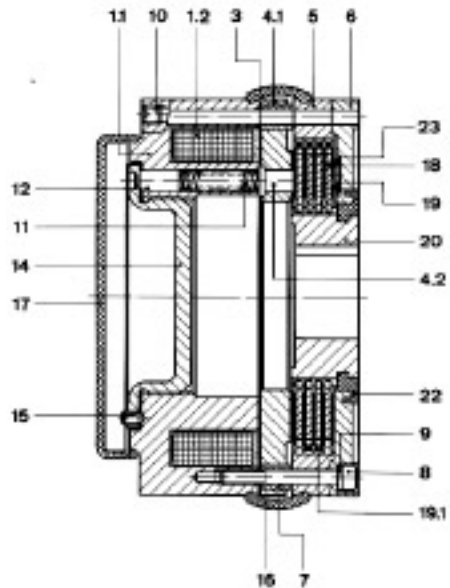
**35.9 Lamellen-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet Reihe 71/72 (BINDER),
angebaut an Lüfterhaube**

Das Magnetgehäuse (1.1) der Lamellen-Bremse enthält die eingegossene Spule (1.2) und ist mit Zahnring (5) und Aufnahmeflansch 16) durch Schrauben (8) verbunden. Der Anker (4.1), der zwischen Magnetgehäuse und Zahnring auf Buchsen (7) geführt ist, wird im stromlosen Zustand der Spule frei. Die Federn (11) drücken über die Bundbolzen (4.2) auf das Lamellenpaket. Beim Einschalten der Spule wird der Anker gegen den Federdruck magnetisch angezogen und gibt damit die Lamellen frei, d. h. die Bremse ist gelüftet.

Das Lamellenpaket besteht aus den außenverzahnten Stahllamellen (19), die über den Zahnring (5), die Schrauben (8) und den Aufnahmeflansch (6) gegen Verdrehen festgehalten werden, jedoch in axialer Richtung verschiebbar sind, und den innenverzahnten Reiblamellen (18). Die Lamellen sind abwechselnd angeordnet. Es befindet sich jeweils eine Stahllamelle mehr im Paket, als Reiblamellen vorhanden sind. Die Reiblamellen bestehen aus Spezialwerkstoff und sind mit ihrer Verzahnung mit der des Mitnehmers (20) im Eingriff. Der Mitnehmer ist auf der Läuferwelle aufgesetzt. Werden diese vollkommen planen Stahl- und Reiblamellen durch die Federkraft über den Anker zusammengepresst, so wird ein Bremsmoment über Aufnahmeflansch, Zahnring, Stahllamellen und Reiblamellen eingeleitet. Dabei wird nach außen keinerlei Druck in axialer Richtung erzeugt.

Bei den größeren Bremsen sind zusätzliche Spreizfedern (19.1) und Tellerfedern (23) zur Dämpfung von Schwingungen eingebaut.

Bild 35.9
Lamellen-Federdruckbremse mit GS-
Lüftmagnet; Typenreihe 71/72 (BINDER)



35.10 Einscheiben-Federdruckbremse mit DS-Lüftmagnet Reihe 73 (BINDER), angebaut am Lagerschild

Das Magnetsystem (1) mit Joch und Spulen ist auf den Sechskantschrauben (6) geführt. Es bildet mit dem Anker (2) und dem Ring (3) den feststehenden Teil der Bremse. Ring (3) und Magnetsystem (1) werden durch die Federn (5) auf Abstand gehalten. Die Reibscheibe (4) sitzt axial beweglich auf dem Mitnehmer (10) und bildet mit diesem über eine formschlüssige Drehverbindung den rotierenden Teil der Bremse. Beim Lüften zieht das Magnetsystem (1) den Anker (2) an, die Reibscheibe (4) ist frei. Beim Bremsen drücken die Federn (8) den Anker (2) gegen die Reibscheibe (4) und das Lagerschild (11).

Die beiden Hilfsschrauben (7) werden nach dem Anbau entfernt.

Das Drehstrom-Magnetsystem kann an den Motorklemmen angeschlossen werden. Für den Tausch der Reibscheibe müssen Lüfterhaube und Lüfter abgenommen werden; dazu ist in axialer Richtung ein Demontage-Freiraum etwa von der Länge der Lüfterhaube erforderlich.

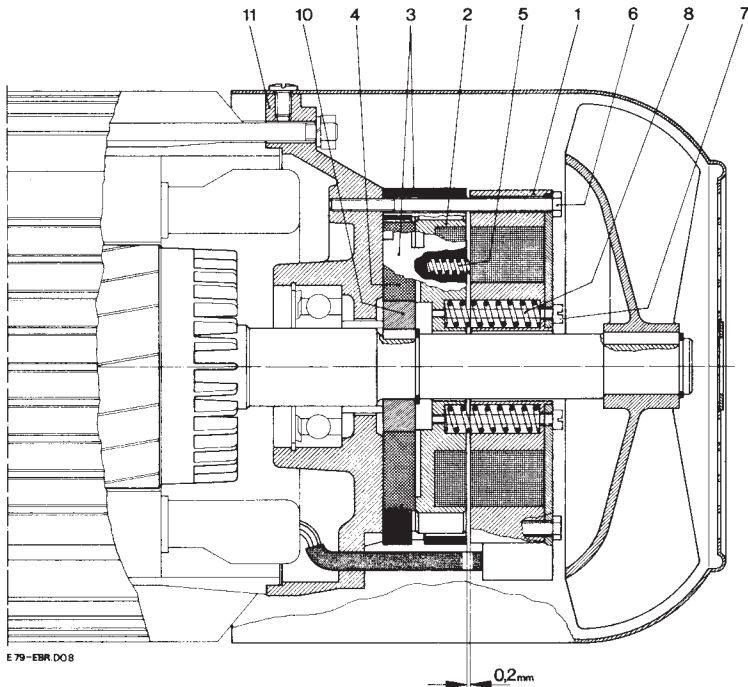


Bild 35.10 Einscheiben-Federdruckbremse mit DS-Lüftmagnet, angebaut am Lagerschild; Typenreihe 73 (BINDER)

36 Elektrische Speisung des Lüftmagneten

Während die Entscheidung für Gleich- oder Wechselstrom zur Erregung des Lüftmagneten schon mit der Wahl des Bremssystems gefallen ist, bleiben Höhe der Spannung und Schaltung in gewissen Grenzen frei wählbar. Im folgenden Abschnitt sind hierzu einige grundsätzliche Bemerkungen gemacht.

36.1 Eine Bemessungsspannung in Stern- oder Dreieckschaltung



Die einfachste Lösung ergibt sich, wenn die Spannung der Einspeisung gleich gewählt wird wie die Spannung des zugehörigen Elektromotors, so dass die Spule des Lüftmagneten einfach **parallel zu zwei Motorklemmen** geschaltet werden kann. Dieses Anschlussschema gilt auch bei Y- Δ -Einschaltung. Die Schalterpause zwischen den Schalterstellungen »Stern« und »Dreieck« muss möglichst kurz bleiben, sodass die Bremse nicht einfallen kann.

Bild 36.1.1
Motor (M) mit Bremse (BR) und Gleichrichter (G) für gleiche Nennspannung (U) und gemeinsamer Schalter (S)

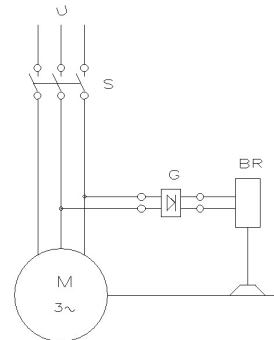
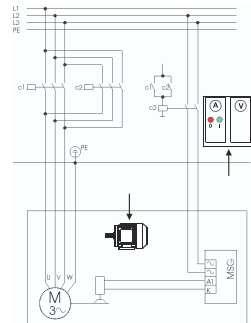


Bild 36.1.2
Beispiel für den vollständigen Anschlussplan eines ein-tourigen Drehstrommotors mit getrennter Ansteuerung der Bremse (Danfoss Bauer Anschlussbild A 311.1000-18)



36.2 Spannungsumschaltung für zwei Spannungen im Verhältnis 1 : 1,73



Die Spule des Lüftmagneten wird parallel zu zwei Klemmen eines Wicklungsstranges geschaltet und erhält gemäß **Bild 36.2** unabhängig von der Netzspannung stets die **Strang- oder Phasenspannung**. Bei der Sternschaltung wirkt dabei die Motorwicklung wie ein Spartransformator, die geringfügige Sternpunktverschiebung durch den kleinen Spulenstrom ist ohne praktische Auswirkung auf die Charakteristik des Motors.

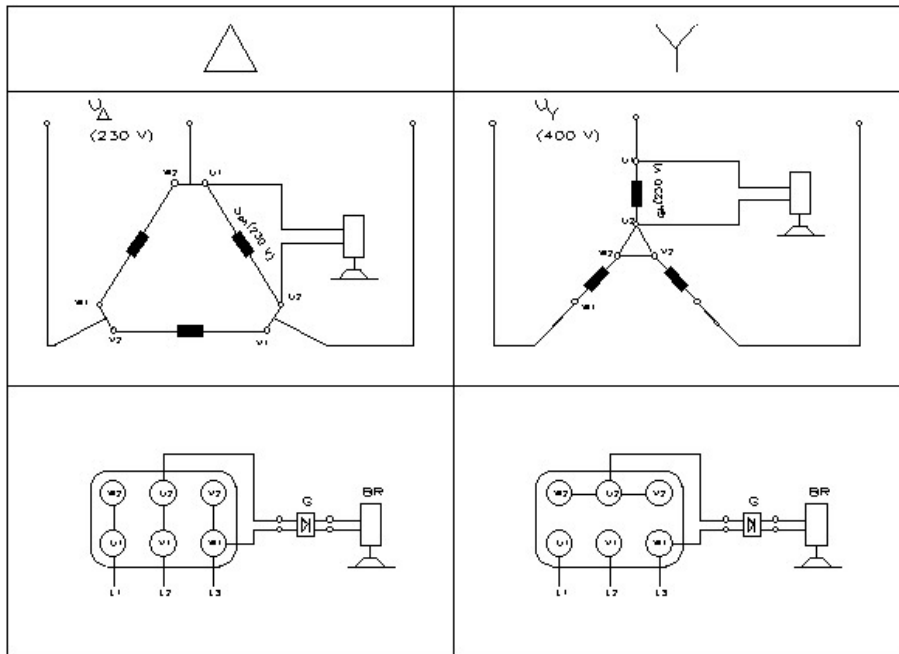


Bild 36.2 Anschluss des WS-Einganges parallel zu einem Wicklungsstrang bei spannungsumschaltbaren Motoren in Dreieck- und Stern-Schaltung

36.3 Spannungsumschaltung für zwei Spannungen im Verhältnis 1 : 2



Die Spule des Lüftmagneten wird parallel zur Hälfte eines Wicklungsstranges geschaltet und erhält bei beiden Schaltungsarten unabhängig von der Netzspannung stets die **Hälfte** der höheren »Strang- oder Phasenspannung«. Dabei wirkt die Motorwicklung wie ein Spartransformator; die geringfügige Sternpunktverschiebung durch den kleinen Spulenstrom ist ohne praktische Auswirkung auf die Charakteristik des Motors.

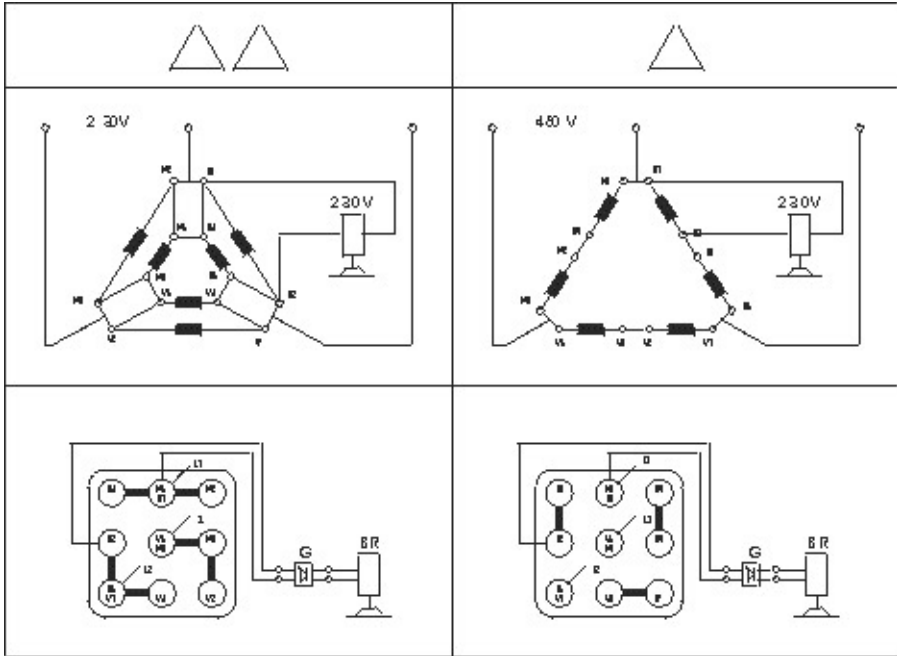


Bild 36.3 Anschluss des Wechselstromeinganges parallel zu einem halben Wicklungsstrang bei spannungsumschaltbaren Motoren in Doppeldreieck/Dreieck-Schaltung

36.4 Polumschaltung: Dahlanderschaltung oder zwei getrennte Wicklungen



In vielen Fällen kann es ratsam sein, die Eingangsseite des Gleichrichters nicht am Motor-Klemmenbrett, sondern an die **Steuerspannung** anzuschließen. Dies gilt besonders bei Motoren mit anormaler Nennspannung, mit polumschaltbarer Wicklung, mit Frequenzsteuerung oder mit Anlasseinrichtungen.

Die Bremse ist nicht mehr am Motorklemmenbrett, sondern über besondere **Hilfskontakte** am Polumschalter anzuschließen.

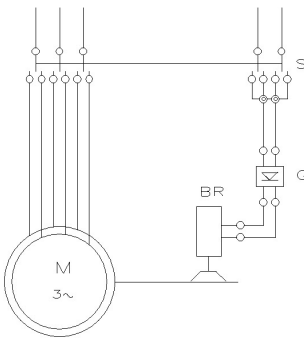


Bild 36.4.1 Anschluss des Wechselstromeinganges (G) einer Bremse (BR) bei polumschaltbaren Motoren

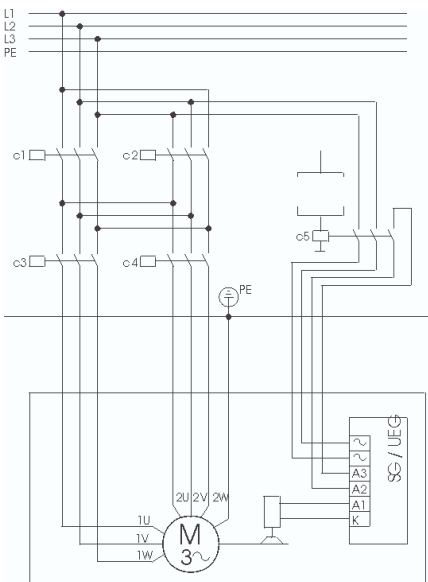
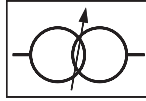


Bild 36.4.2 Beispiel für den vollständigen Anschlussplan eines polumschaltbaren Drehstrommotors mit getrennter Ansteuerung der Bremse; mit gleichstromseitiger Unterbrechung im Magnetkreis; (Danfoss Bauer Anschlussbild A 311.1000-07)

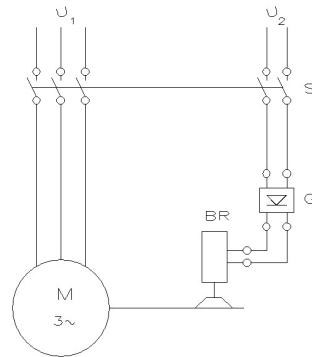
36.5 Anlass-Einrichtungen zur Verminderung der Klemmenspannung



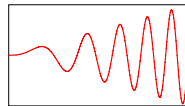
Bei Verwendung von Ständeranlassern, Anlasstransformatoren, Sanftanlaufgeräten usw. ist die Schaltung so auszuführen, dass die Bremse bereits in der ersten Anlasstellung **volle Bemessungsspannung** erhält.

Bild 36.5

Anschluss des Wechselstromeinganges (G) einer Bremse (BR) an das Steuernetz U_2 Der Motor erhält in der Anlasstufe die verminderte Spannung U_1



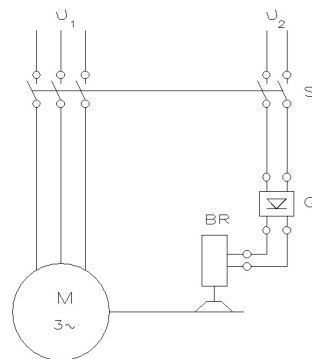
36.6 Betrieb am Umrichter mit variabler Frequenz



Bei Verwendung eines Umrichters ist die Bremse an das **Steuernetz** anzuschließen.

Bild 36.6.1

Anschluss des Wechselstromeinganges (G) einer Bremse (BR) an das Steuernetz U_2 Die Bremse wird unabhängig vom Motor mit konstanter Spannung und Frequenz versorgt



36 Elektrische Speisung des Lüftmagneten

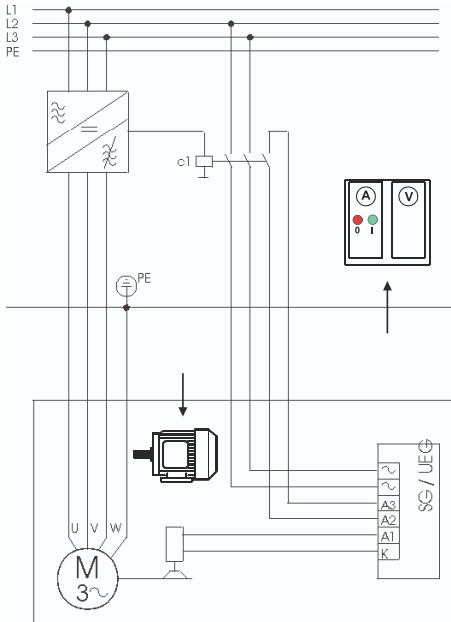


Bild 36.6.2


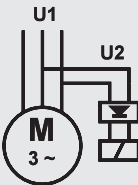
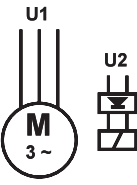
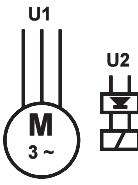

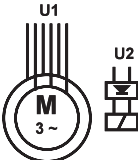
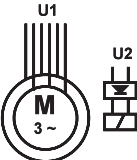
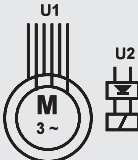

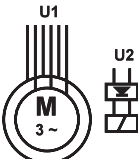
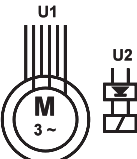
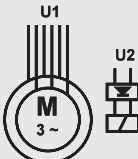
Beispiel für den vollständigen Anschlussplan eines umrichter gespeisten Drehstrommotors mit getrennter Ansteuerung der Bremse; mit gleichstromseitiger Unterbrechung im Magnetkreis (Danfoss Bauer Anschlussbild A 311.1000-08)

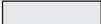
36.7 Fallbeispiele mit Vorzugslösungen

In den folgenden Tabellen sind praxiserprobte Vorschläge und Schaltungen gezeigt.

36.7 Fallbeispiele mit Vorzugslösungen

36.7.1 Motoren mit fester Bemessungsspannung

Motorausführung	Schaltung	Speisung des Lüftmagneten mit		
		Motorspannung (z. B. 400 V)	Sternspannung des Netzes (z. B. 230 V)	Steuerspannung (z. B. 230 V)
		$U_2 = U_1$	$U_2 = U_1/1,73$	$U_2 < U_1$
Feste Drehzahl				
Dahlander-schaltung				
Getrennte Wicklungen				

 = Vorzugslösung

**36.7.2 Motoren mit umschaltbarer oder variabler Bemessungsspannung
(z. B. 220/380 V)**

Motorausführung	Schaltung	Speisung des Lüftmagneten mit		
		Strangspannung (z. B. 220 V)	Strangspannung (z. B. 220 V)	Steuerspannung (z. B. 230 V)
		$U_2 = U_1$	$U_2 = U_1/1,73$	$U_2 < U_1$
Umschaltbar für zwei Spannungen 1 : 1,73				
Umschaltbar für zwei Spannungen 1 : 2				
		Netzspannung (z.B. 380 V)	Strangspannung (z.B. 220 V)	Steuerspannung (z.B. 230 V)
		$U_2 = U_1$	$U_2 = U_1/1,73$	$U_2 < U_1$
Sanftanlauf über Spannungsabsenkung				
Umrichterbetrieb mit variabler Frequenz				

= Vorzugslösung

36.8 Nennspannung von Gleichstrom-Lüftmagneten

Bei der Wahl der Spulenspannung von Gleichstrom-Magneten ist vor allem auf die folgenden Punkte Rücksicht zu nehmen:

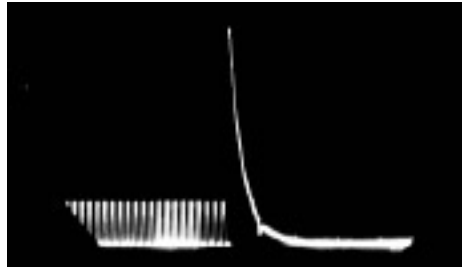
36.8.1 Spannungsspitzen durch Selbstinduktion

Beim Abschalten einer Magnetspule entsteht aus der Energie des Magnetfeldes eine **Abschaltspannungsspitze**, deren Höhe von der Abschaltgeschwindigkeit abhängt:

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

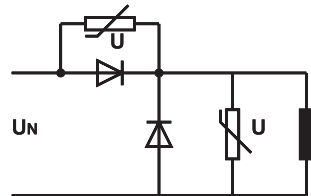
Das Oszillogramm **Bild 36.8.1.1** zeigt einen solchen Abschaltvorgang.

Bild 36.8.1.1
Oszillogramm der Abschaltspannungsspitze eines Gleichstrom-Lüftmagneten



In ungünstigen Fällen können beim Abschalten Induktionsspitzen bis zur **20fachen Bemessungsspannung** auftreten. Es empfiehlt sich daher, die Nennspannung des Magneten möglichst niedrig (z. B. 24 V) zu wählen, sodass die Spannungsspitze (z. B. 480 V) innerhalb der Durchschlagfestigkeit normaler Isolierstoffe bleibt. Bei höheren Spulenspannungen (z. B. 180 V) kann die Spannungsspitze (z. B. 3600 V) gefährlich hoch werden und muss durch besondere Beschaltung mit Widerständen, Kondensatoren, Supressordioden, Zenerdioden oder Varistoren abgebaut werden.

Bild 36.8.1.2
Einweg-Gleichrichtung mit Freilaufdiode und Beschaltung durch spannungs-abhängige Widerstände (Varistoren)



Da diese Spannung der Selbstinduktion nach der Lenz'schen Regel in der Richtung des vorher fließenden Stromes, also in der Durchlassrichtung der Dioden wirkt, stellt sie im Gegensatz zu Spannungsspitzen auf der Wechselstromseite keine Gefährdung für die Dioden dar. Der infolge der Spannungsüberhöhung ansteigende Strom bildet für die Dioden auch keine thermische Gefahr, da die Zeit außerordentlich kurz ist. Lediglich bei extrem hoher Schalthäufigkeit wäre die Stromwärme zu berücksichtigen.

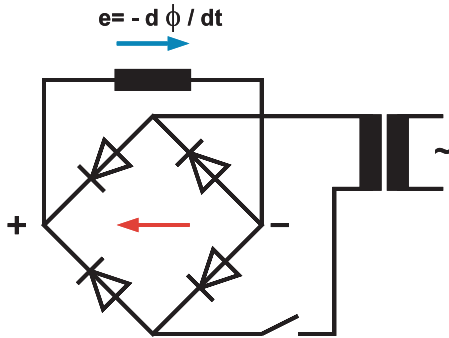


Bild 36.8.1.3
Richtung einer Abschalt-Spannungsspitze im Magnetkreis

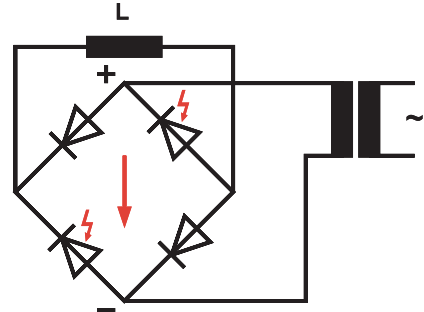


Bild 36.8.1.4
Richtung einer Spannungsspitze auf der Netzseite

36.8.2 Genormte Bemessungs-Gleichspannungen

In DIN IEC 38 »IEC-Normspannungen« sind unter anderem folgende Bemessungswerte für Gleichspannungen genormt 24 V, 36 V, 110 V, 220 V.

Da diese Werte oft als Steuerspannung verfügbar sind, werden die Spulen von Gleichstrom-Lüftmagneten zweckmäßig für eine dieser Bemessungsspannungen gewickelt. Mit Rücksicht auf die Abschalt-Spannungsspitzen gemäß Abschnitt 36.8.1 wird die relativ niedrige **Bemessungsspannung von 24 V** bevorzugt angewendet.

36.8.3 Schaltung der Dioden

Falls die erforderliche Gleichspannung nicht in einem Stuenetz verfügbar ist, muss sie durch besondere Gleichrichter zur Versorgung der Gleichstrom-Lüftmagnete hergestellt werden. Zur Anpassung an die jeweils vorhandene Wechselstrom-Netzspannung sind teilweise Transformatoren notwendig.

Folgende Schaltungen sind besonders häufig.

36.8.3.1 Einphasen-Brückenschaltung mit Dioden und Transformator

Durch die Verwendung von vier Dioden in Brückenschaltung ist es möglich, **beide Halbwellen** des Wechselstromes auszunützen und damit bei einer vertretbaren Wellenlänge von etwa 48% einen relativ hohen arithmetischen Gleichspannungs-Mittelwert von 80% des Effektivwertes der Wechselspannung zu erhalten.

Bei einer Spulenspannung U_{L} von 24 V muss also die Sekundärseite des Transformators für $24/0,8 = 30 \text{ V}$ bemessen sein.

36.8 Nennspannung von Gleichstrom-Lüftmagneten

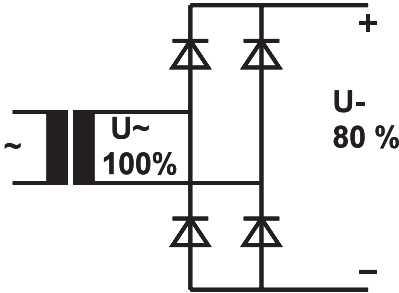


Bild 36.8.3.1.1
Einphasen-Brückenschaltung mit Dioden und Transformator



Bild 36.8.3.1.2
Oszillogramm der Leerlauf-Gleichspannung einer Einphasen-Brückenschaltung

36.8.3.2 Einweg-Schaltung mit Freilaufkreis

Die Einweg-Gleichrichterschaltung schaltet nur **eine Halbwellen**, z. B. nur die positive, auf die angeschlossene Magnetspule durch, während die andere Halbwellen – in diesem Beispiel die negative – völlig unterdrückt wird. Die Magnetspule ist eine ohmsch-induktive Last. Während der Sperrzeit der Gleichrichterdiode fließt der Magnetstrom über den **Freilaufkreis** weiter. Bei den an der Spule anliegenden Halbwellen fließt ein Mischstrom, dessen Welligkeit zudem vom Verhältnis Induktivität zu Widerstand der Spule abhängt. Die Auslegung der Magnetspule auf die Einweg-Gleichrichtung ermöglicht in speziellen Anwendungen eine schnelle Erregung des magnetischen Kreises durch kurzzeitige Vollweg-Gleichrichtung.

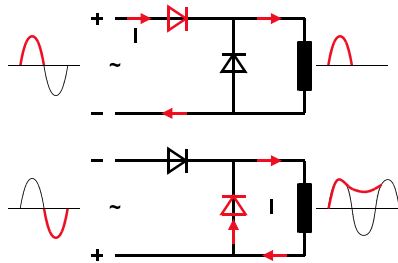


Bild 36.8.3.2.1
Schaltung und Wirkungsweise der Einweg-Schaltung mit Freilaufkreis

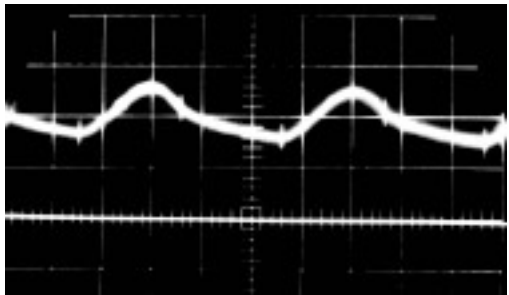


Bild 36.8.3.2.2
Oszillogramm des Stromes in einer Spule bei Speisung aus einer Einweg-Schaltung mit Freilaufkreis

36 Elektrische Speisung des Lüftmagneten

Infolge der Einweg-Gleichrichtung liegt bei dieser Schaltung der arithmetische Gleichspannungs-Mittelwert etwa bei 45% des Effektivwertes der Wechselspannung. Bei direktem Anschluss an 230 V AC erhält man also eine Spulenspannung von 105 V DC, bei 400 V ist die Spule für 180 V auszulegen.

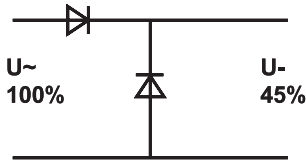


Bild 36.8.3.2.3
Relative Höhe der Gleichspannung bei der Einweg-Schaltung mit Freilaufkreis

36.9 Option Steckanschluss

Die Vorteile des Prinzips »Anbaubremse« für eine möglichst kurze Betriebsunterbrechung beim Service sind mit der Option »Steckanschluss« besonders hoch. Die Bremse kann mit minimalem Zeitaufwand getauscht werden, ohne dass Anschlussarbeiten notwendig sind.

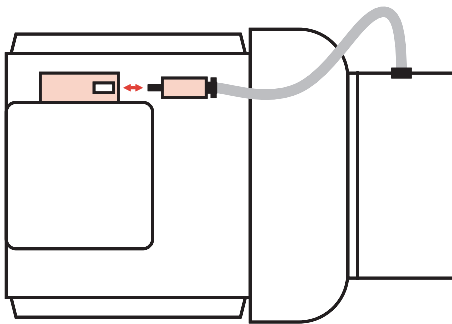


Bild 36.9.1
Prinzip einer Anbaubremse mit der Option Steckanschluss für einen Tausch der Bremse mit geringstem Zeitaufwand; keine Elektrofachkraft notwendig

36.9 Option Steckanschluss

Bild 36.9.2
Motor und Anbaubremse mit der Option
Steckanschluss

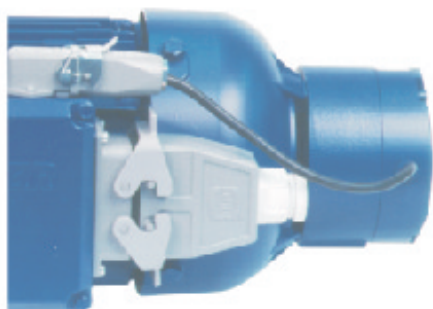
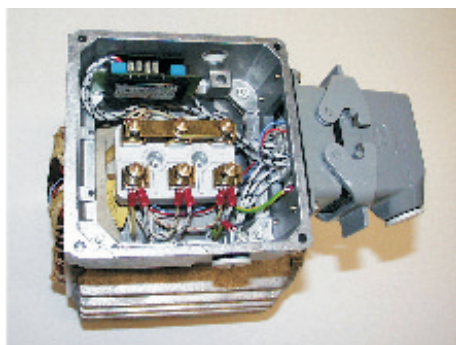


Bild 39.9.3
Klemmenraum mit fabrikfertiger Verdrahtung



37 Ansprechzeit beim Lüften

Bei jedem Schaltvorgang, also beim Lüften und beim Einfallen einer mechanischen Bremse, treten durch **mechanische und elektrische Trägheiten** Ansprechverzögerungen auf. Während die mechanisch bedingten Ansprechzeiten bei einem bestimmten Konstruktionsprinzip nicht zu reduzieren sind, können die magnetisch bedingten Anteile durch schaltungstechnische Maßnahmen teilweise wesentlich herabgesetzt werden. Dies gilt besonders bei Bremsen mit Gleichstrom-Lüftmagneten, deren Feld nach einer Exponentialfunktion auf- und abgebaut wird und die deshalb im Vergleich zu Bremsen mit Wechselstrom-Magneten besonders lange Ansprechzeiten haben.

37.1 Lüften mit WS-Magneten

Wechselstrom-Magnete zeichnen sich durch besonders **schnelle Reaktion** aus, sodass im Allgemeinen auf besondere Schaltmaßnahmen zur Verkürzung der Ansprechzeiten verzichtet werden kann.

Das Oszillogramm im **Bild 37.1.1** zeigt den Einschaltvorgang eines Drehstrom-Asynchronmotors mit angebaute Einscheiben-Federdruckbremse mit WS-Lüftmagnet.

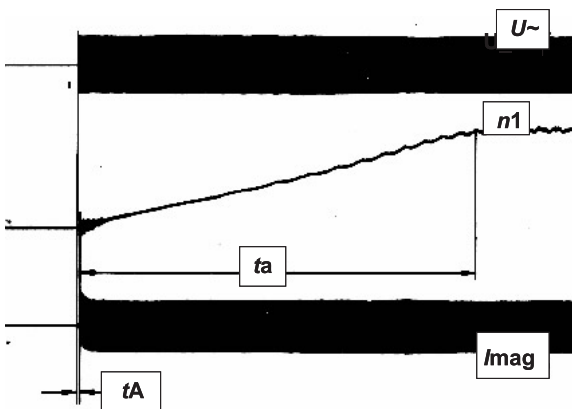


Bild 37.1.1

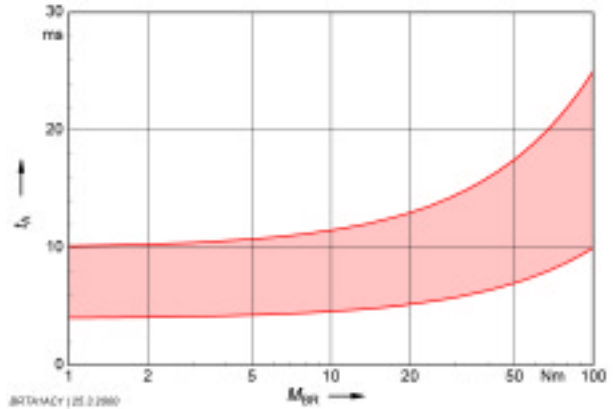
Oszillogramm des Einschaltvorganges bei Verwendung eines WS-Lüftmagneten

- U – Netzspannung
- n_1 – Drehzahl
- t_a – Hochlaufzeit
- I_{magn} – Strom im Lüftmagneten
- t_A – Ansprechzeit

37.1 Lüften mit WS-Magneten

Richtwerte für die Ansprechzeiten beim Lüften von Federdruckbremsen mit Bemessungsbremsmomenten 1...100 Nm mit WS-Lüftmagneten ergeben sich aus **Bild 37.1.2**.

Bild 37.1.2
Richtwerte für die Ansprechzeiten t_A beim Lüften von Federdruckbremsen mit Nennbremsmomenten M_{Br} 1...100 Nm



37.2 Lüften mit GS-Magneten

Der zeitliche Verlauf des Spulenstromes beim Ein- und Abschalten folgt bekanntlich einer Exponentialfunktion, deren Steigung durch die *Zeitkonstante* bestimmt wird:

$$T = \frac{L}{R}$$

T	-	Zeitkonstante
L	-	Induktivität des Stromkreises
R	-	ohmscher Widerstand des Stromkreises

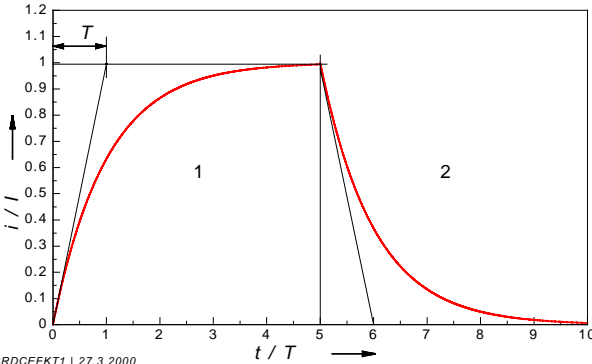


Bild 37.2.1
Theoretischer Stromverlauf beim Einschalten (1) und Ausschalten (2) eines GS-Lüftmagneten

BRDCEFKT1 | 27.3.2000

Die Zeitkonstante tritt mit zunehmender Bremsengröße immer stärker in Erscheinung, und alle Maßnahmen zur Verminderung der Ansprechzeit müssen letzten Endes auf eine **Änderung der Zeitkonstante** hinauslaufen.

Im Oszillogramm **Bild 37.2.2** ist der Einschaltvorgang eines Drehstrom-Asynchronmotors mit angebauter Lamellen-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet gezeigt. Während der mit zunehmender Bremsengröße immer deutlicher ausgeprägten Ansprechzeit t_A ist der Antrieb blockiert oder dreht gegen die geschlossene Bremse durch, sodass eine **zusätzliche** Belastung von Netz, Motor und Bremse auftritt.

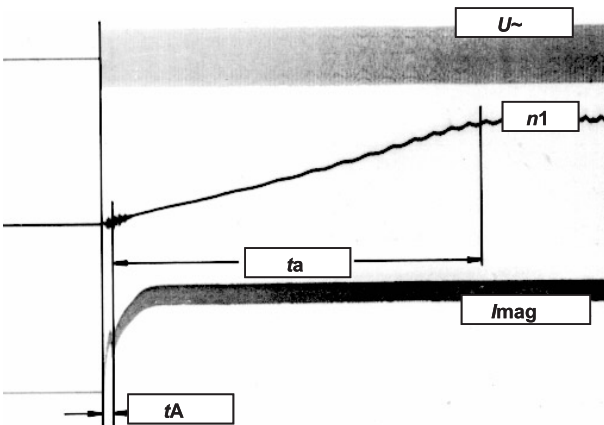


Bild 37.2.2
Oszillogramm des Einschaltvorganges bei Verwendung eines GS-Lüftmagneten

37.2 Lüften mit GS-Magneten

Richtwerte für die Dauer der Ansprechzeit beim Lüften sind in Bild 37.2.3 gezeigt.

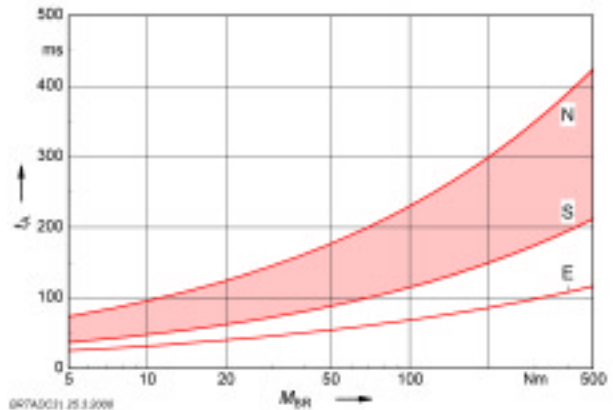


Bild 37.2.3 Richtwerte für die Ansprechzeit t_A beim Lüften von Federdruckbremsen mit GS-Lüftmagneten, Bremsmoment M_{BR}
S – Schaltbremsen mit reduziertem Bremsmoment
N – Standardbremsen mit vollem Bremsmoment
E – Übererregung für verkürzte Ansprechzeit

Eine Verkürzung der Ansprechzeit ist auf elektrischem Wege möglich, indem die Zeitkonstante L/R gemäß Abschnitt 37.2.1 verkleinert wird. Da für eine bestimmte Auslegung des Magneten auch eine zugeordnete Induktivität L erforderlich ist, muss zur Verbesserung der Zeitkonstante der ohmsche Widerstand R durch einen zusätzlichen **Vorwiderstand** erhöht werden.

Um den notwendigen Spulenstrom in voller Höhe zu erreichen, muss gleichzeitig die angelegte Spannung im gleichen Maße gesteigert werden. So kann beispielsweise durch »Schnellerregung« mit einem Vorwiderstand von 200 % des Eigenwiderstandes, also dreifacher Bemessungsspannung, die Ansprechzeit etwa auf die Hälfte verkürzt werden.

Statt der Schnellerregung oder zusätzlich zu dieser kann auch mit einer »Übererregung« gearbeitet werden:

Die Spule wird beim Einschalten zeitlich begrenzt an eine mehrfache **Überspannung** angeschlossen. Der überhöhte Strom bewirkt eine entsprechend vergrößerte Magnetkraft, die den Lüftvorgang beschleunigt. Durch vierfache Übererregung kann die Ansprechzeit beispielsweise auf etwa 20 % reduziert werden.

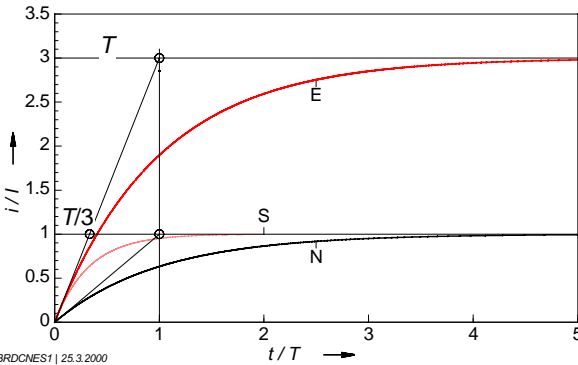


Bild 37.2.4. Vergleich des Stromanstieges beim Einschalten mit Normalerregung (N), Schnellerregung (S) und Übererregung (E)

Das **Prinzipbild 37.2.5** zeigt den Anstieg des Magnetstromes I_1 bei Übererregung mit zweifacher Bemessungsspannung im Vergleich zum Strom bei Normalerregung I_2 . Nach Ablauf der im Gleichrichtergerät MSG fest auf 300 ms eingestellten Übererregungszeit t_{sup} wird auf die Bemessungsspannung umgeschaltet. Die Ansprechzeit bei Übererregung t_{A1} ist in diesem Fall etwa halb so lang wie die normale Ansprechzeit t_{A2} .

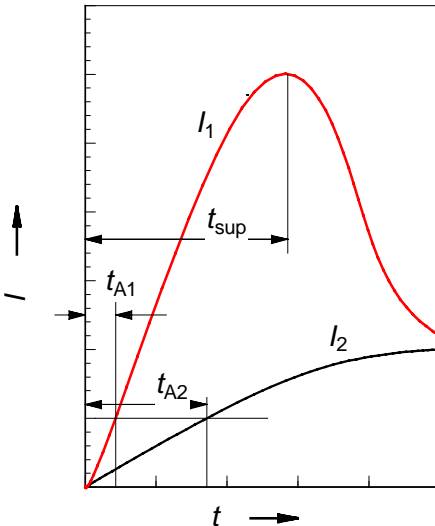


Bild 37.2.5 Magnetstrom I_{mag} und Ansprechzeit t_A bei Übererregung 1 und Normalerregung 2 mit Umschaltung nach der Übererregungszeit t_{sup}

BRISUP1 | 25.3.2000

37.2 Lüften mit GS-Magneten

Bei modernen Übererregungsgleichrichtern werden Zeitverzug und **kontaktlose** Umschaltung auf elektronischem Wege vorgenommen. Im neuen Danfoss-Bauer-Gleichrichter MSG ist die Funktion der Übererregung zusammen mit der elektronischen gleichstromseitigen Unterbrechung (Abschnitt 38.2) integriert. Die Elektronik ersetzt die früher übliche steuerungstechnische Lösung unter Verwendung eines Mikroschalters (**Bild 37.2.6**).

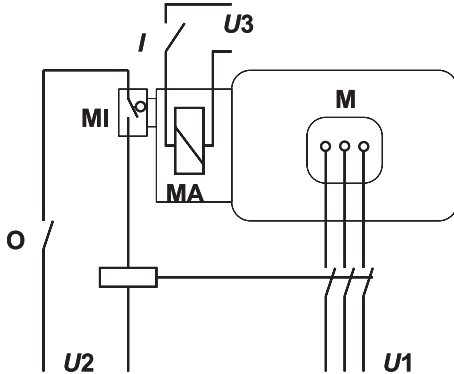


Bild 37.2.6
Schaltungstechnische Eliminierung der Ansprechzeit durch Verwendung einer Bremse mit angebautem Mikroschalter (MI)

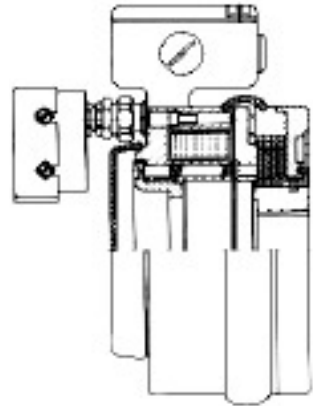


Bild 37.2.7
Lamellen-Federdruckbremse mit angebautem Mikroschalter (Fabrikat BINDER)

37.3 Verlustarbeit bei langer Lüftzeit

Die Ansprechzeit beim **Lüften** einer Bremse wird im Allgemeinen nicht als störend empfunden, weil der Anlaufvorgang für den Betrachter mit dem Beginn der Bewegung anfängt. Tatsächlich können die Vorgänge um den »Zeitpunkt 0« zu einer erheblichen Belastung von Motor und Bremse führen.

37.3.1 Grundsätzliche Unterschiede beim Anlaufvorgang

Bei oberflächlicher Betrachtung stellen sich das Lüften der Bremse und das Anlaufen des Motors als synchrone Vorgänge vereinfacht nach **Bild 37.3.1** dar.

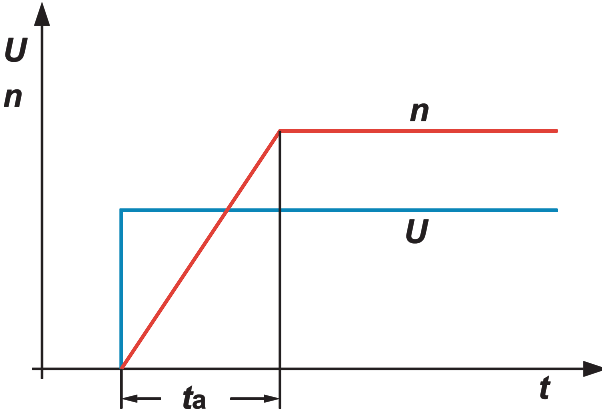


Bild 37.3.1 Vereinfachte Darstellung für gleichzeitiges Lüften der Bremse (Spannung U) und Anlaufen des Motors (Drehzahl n) in der Beschleunigungszeit t_a

Bei näherer Betrachtung der Vorgänge um den »Zeitpunkt 0« sind jedoch zwei Varianten denkbar:

37.3.1.1 Motor wird blockiert

$M_A < (M_L + M_{Br})$

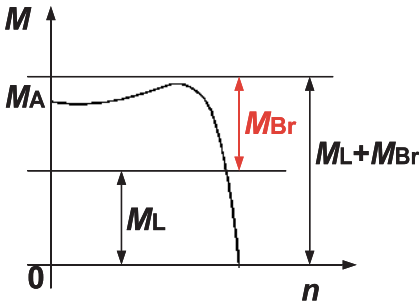


Bild 37.3.1.1.1

Motor blockiert

M_A – Anzugsmoment

M_L – Lastmoment

M_{Br} – Bremsmoment

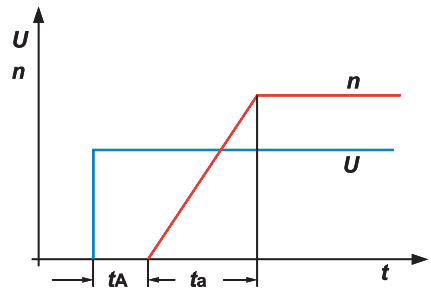


Bild 37.3.1.1.2

Anlauf verzögert sich durch

Ansprechzeit t_A der Bremse

37.3.1.1 Motor wird blockiert

Zusätzliche Belastung :

Motor führt während der Ansprechzeit t_A den Anzugsstrom und wird dadurch zusätzlich thermisch belastet.

37.3.1.2 Bremse wird durchgerissen

$$M_A > (M_L + M_{Br})$$

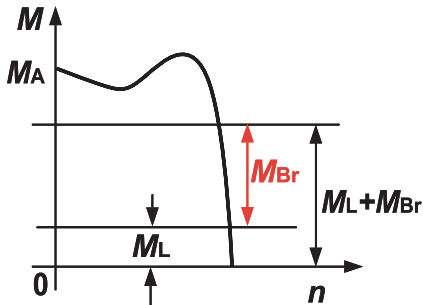


Bild 37.3.1.2.1

Motor reißt Bremse durch

M_A – Anzugsmoment

M_L – Lastmoment

M_{Br} – Bremsmoment

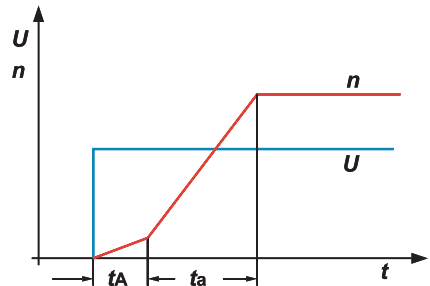


Bild 37.3.1.2.2

Anlauf erfolgt mit dem Einschalten,

aber Bremse wird während der Ansprechzeit t_A durchgerissen

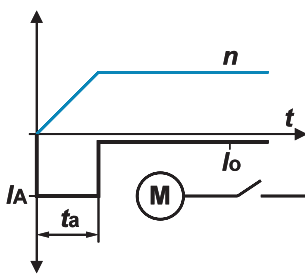
Zusätzliche Belastung :

Bremse wird auch beim Anlauf thermisch belastet und hat Abrieb.

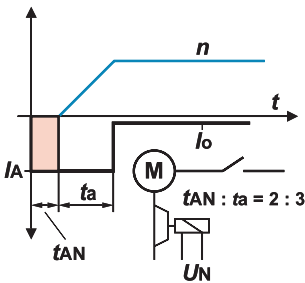
37.4 Thermische Entlastung des Motors

Vor allem bei mittleren und größeren Bremsen, die eine besonders ausgeprägte Ansprechzeit haben, kann die Verkürzung der Ansprechzeit beim Lüften zu einer wesentlichen Entlastung von Motor und Bremse führen.

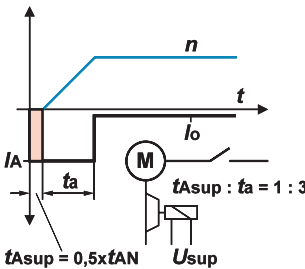
Bild 37.4.1 zeigt, dass die Blockierzeiten im Vergleich zur normalen Anlaufzeit t_a relativ hoch liegen und daher in die **Verlustbilanz** entscheidend eingehen können.



1 ohne Bremse, Hochlaufzeit t_a



2 Bremse mit Normalerregung; Blockierzeit t_{AN}



3 Bremse mit Übererregung; Blockierzeit $t_{A\text{sup}}$

Bild 37.4.1 Vergleich der Blockierzeit beim Lüften

Wenn der Motor nach Abschnitt 37.3.1.1 blockiert wird, so wird er zusätzlich thermisch belastet. Die zulässige Schalthäufigkeit wird vermindert. Für die zahlenmäßige Bewertung dieses Vorganges sind verschiedene Verfahren in Gebrauch. Ein Hersteller gibt im Katalog seine im Versuch bei Normalerregung und bei Übererregung ermittelten thermisch zulässigen Leerschalthäufigkeiten für den Motor an. **Bild 37.4.2** gibt ein Beispiel für die zahlenmäßige Auswirkung einer Verkürzung der Ansprechzeiten. Verglichen sind die Maßzahlen Z_0 für die Leerschalthäufigkeit von Drehstrommotoren beim Betrieb mit Bremsen, die »schnell« (E) oder »normal« (N) gelüftet werden. Diese bei Danfoss Bauer nicht gebräuchliche Berechnungsmethode wird hier gezeigt, um die physikalisch bedingte Auswirkung der Übererregung auf die thermische Belastbarkeit eines Motors deutlich zu machen.

37.4 Thermische Entlastung des Motors

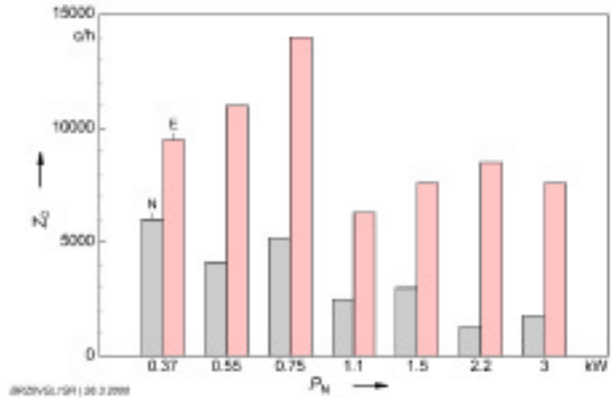


Bild 37.4.2 Vergleich der thermisch zulässigen Leerschalthäufigkeit Z_0 von 4poligen Drehstrommotoren der Bemessungsleistung P_N nach Katalogangaben eines Herstellers
 N – Bremse lüftet mit Normalerregung
 E – Bremse lüftet mit Übererregung

Im Danfoss-Bauer-Berechnungsverfahren wird die Erregung des Lüftmagneten durch einen Faktor K_M in der Formel für die »thermisch gleichwertige Schalthäufigkeit« bewertet.

Bei diesem Berechnungsverfahren wird der Einfluss der Erregungsart nur bei den **Einschalt**vorgängen berücksichtigt, nicht jedoch bei **Umschalt**vorgängen, an denen die Bremse nicht beteiligt ist. Bei üblichen Relationen von Ansprechzeit und Beschleunigungszeit wird die thermische Auswirkung von Normalerregung zu Übererregung etwa 1 : 2 bewertet. Im Bild 37.4.3 ist ein Ausschnitt aus dem BAA-Rechengang für die »thermisch zulässige Schalthäufigkeit von Drehstrommotoren« gezeigt. In diesem Beispiel eines polumschaltbaren Motors trägt die Blockierung des Motors durch die normalgelüftete Bremse 48 % zur thermischen Belastung der Motorwicklung bei. Dieser Wert könnte in dem Beispiel durch Übererregung auf 31 % reduziert werden. Bei dieser Rechnung sind die tatsächlichen Schaltvorgänge entsprechend ihrer thermischen Auswirkung durch einen Rechenfaktor »bewertet«.

Bild 37.4.3 Ausschnitt aus dem Ergebnisfenster beim BAA-Rechengang zur »thermisch zulässigen Schalthäufigkeit von Drehstrommotoren«

BAUER Antriebstechnik thermisch zulässige Schalthäufigkeit			
Motor: die thermische Belastung bei polumschaltbaren Motoren			
Die einzelnen Schaltvorgänge sind mit folgenden Anteilen an der thermischen Gesamtbelastung bewertet			
Seite 1	Einschaltungen 0/1	23 ch	43 %
	Gerechtmachte Parkbremsungen 0/1	50 ch	7 %
	Blockierung durch nicht Bremsung am 0/1	325 ch	48 %
Seite 2	Einschaltungen 0/1	0 ch	0 %
	Max. d. Blockierung 0/1	37 ch	10 %
	Blockierung durch nicht Bremsung am 0/1	0 ch	0 %

38 Ansprechzeit beim Einfallen

Da die »Haltekraft« eines Magneten – das ist die zum **offenhalten** einer Bremse notwendige Kraft – relativ niedrig ist, muss das Magnetfeld weit und daher lange abklingen, bis die Federkraft ausreicht, um die Bremse einfallen zu lassen. Die Ansprechzeiten beim Einfallen sind daher besonders bei den größeren Bremsen recht ausgeprägt und müssen bei anspruchsvollen Anwendungen durch schaltungstechnische Maßnahmen verkürzt werden.

38.1 Einfallen bei WS-Magneten

Bei dem Bremsvorgang gemäß Oszillogramm **Bild 38.1.1** ist der Lüftmagnet an zwei Motorklemmen angeschlossen. Die Remanenz des Motors induziert eine **langsam abklingende** Spannung, die den Magnetstrom zunächst noch weiterfließen lässt. Die Ansprechzeit ist relativ lang.

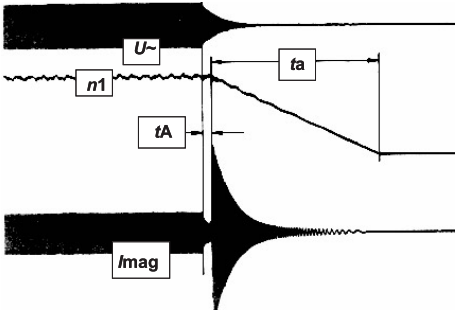


Bild 38.1.1

Oszillogramm des Abschaltvorganges bei Verwendung eines WS-Lüftmagneten ohne Unterbrechung im Magnetkreis

- U – Netzspannung
- n_1 – Drehzahl
- t_a – Bremszeit
- I_{magn} – Strom im Lüftmagneten
- t_A – Ansprechzeit

Durch getrennte Schaltung des Magnet-Stromkreises kann der Magnetstrom sofort unterbrochen und die Ansprechzeit gemäß **Oszillogramm 38.1.2** verkürzt werden.

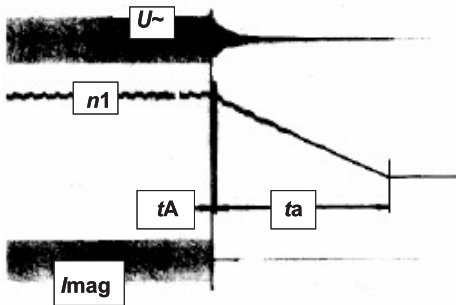


Bild 38.1.2

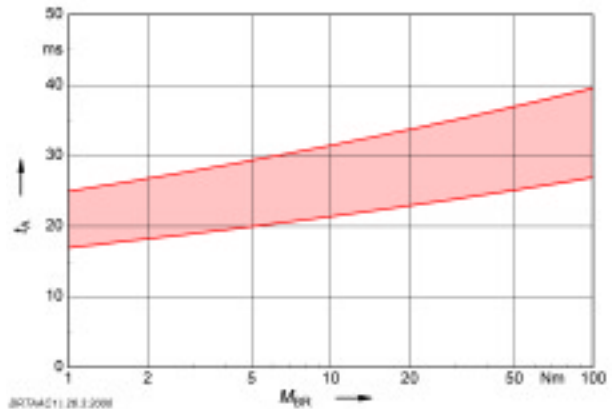
Oszillogramm des Abschaltvorganges bei Verwendung eines WS-Lüftmagneten mit Unterbrechung im Magnetkreis

- U – Netzspannung
- n_1 – Drehzahl
- t_a – Bremszeit
- I_{magn} – Strom im Lüftmagneten
- t_A – Ansprechzeit

38.1 Einfallen bei WS-Magneten

Richtwerte für die Ansprechzeiten beim Einfallen von Federdruckbremsen mit Nennbremsmomenten 1...100 Nm mit WS-Lüftmagneten ergeben sich aus **Bild 38.1.3**.

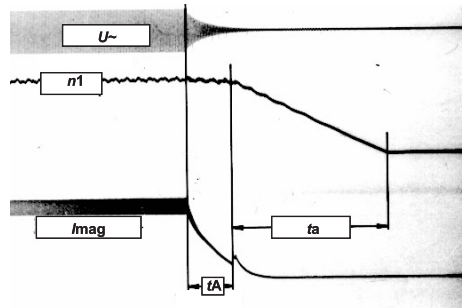
Bild 38.1.3
Richtwerte für die Ansprechzeiten (t_A) beim Einfallen von Federdruckbremsen mit WS- Lüftmagneten mit Unterbrechung des Magnetkreises Nennbremsmomente (M_{Br}) 1...100 Nm



38.2 Einfallen adhF R-L ' f mdsdm

Der Abklingvorgang des Stromes führt gemäß **Oszillogramm 38.2.1** zu einer relativ langen Ansprechzeit, da die »Haltestromstärke« des Gleichstrom-Magneten recht niedrig ist.

Bild 38.2.1
Oszillogramm des Abschaltvorganges bei Verwendung eines GS-Lüftmagneten ohne Unterbrechung im Magnetkreis
 U – Netzspannung
 n_1 – Drehzahl
 t_a – Bremszeit
 I_{magn} – Strom im Lüftmagneten
 t_A – Ansprechzeit



Für eine Verminderung der Ansprechzeit muss der Spulenstrom zusammen mit dem Hauptstromkreis unterbrochen werden. Obwohl die zu schaltenden Gleichströme nicht sehr hoch sind, ist bei einer konventionellen Lösung mit Schützen die Belastbarkeit der verwendeten Kontakte besonders zu beachten, da beim Abschalten von Gleichstrom ein Lichtbogen und Kontaktabbbrand entstehen.

Es sind möglichst mehrere Hilfskontakte in Reihe zu schalten oder besser Hauptkontakte eines Drehstrom- oder Gleichstromschützes zu verwenden.

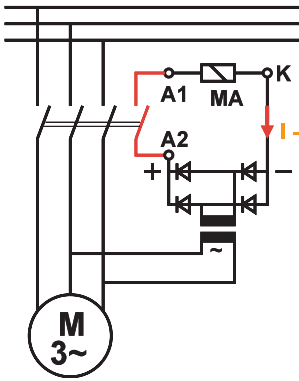


Bild 38.2.2
Schaltbild für die Unterbrechung des GS-Stromkreises für den Lüftmagneten MA

Schaltbild 38.2.2 zeigt die grundsätzliche Schaltung und **Oszillogramm 38.2.3** die Auswirkung der **gleichstromseitigen Unterbrechung** auf die Ansprechzeit.

Die Richtwerte für Nachlaufzeit und Nachlaufweg in den Abschnitten 13 und 14 beinhalten Ansprechzeiten bei gleichstromseitiger Unterbrechung.

Im neuen Danfoss-Bauer-Gleichrichter MSG ist die Funktion der Gleichstrom-Unterbrechung zusammen mit der Übererregung (Abschnitt 37.2) integriert. Die Unterbrechung erfolgt kontaktlos auf elektronischem Weg. Auslöser für das Einfallen der Bremse mit gleichstromseitiger Unterbrechung ist wahlweise

- die Abschaltung der Versorgungsspannung (absichtlich oder unabsichtlich)
- das Unterschreiten einer Stromgrenze in einem Hauptleiter.

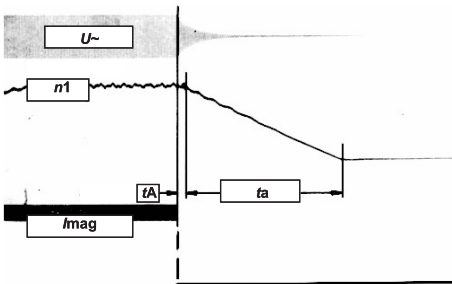
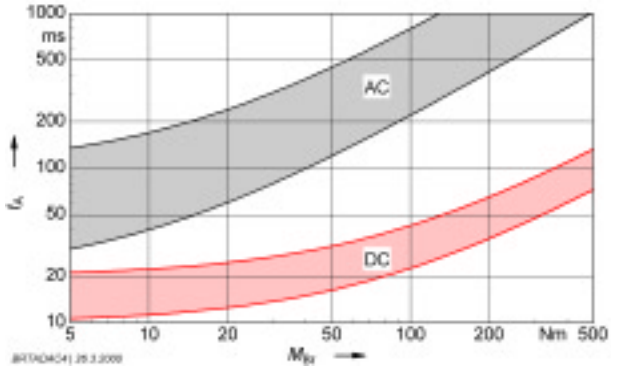


Bild 38.2.3
Oszillogramm des Abschaltvorganges bei Verwendung eines GS-Lüftmagneten mit Unterbrechung im Magnetkreis

- U - Netzspannung
- n_1 - Drehzahl
- t_a - Bremszeit
- I_{magn} - Strom im Lüftmagneten
- t_A - Ansprechzeit

38.2 Einfallsnah

Bild 38.2.4
Richtwerte für die
Ansprechzeit t_A beim
Einfallen von Feder-
druckbremsen mit
GS-Lüftmagneten,
Bremsmoment M_{Br}
AC – wechselstromseitige
Abschaltung
DC – gleichstromseitige
Abschaltung



39 Massenträgheitsmoment der Reibscheiben

Das Massenträgheitsmoment der rotierenden Bremsenteile (Reibscheibe und Mitnehmer) ist in der Regel **vernachlässigbar**, wie die **Tabelle 39.1** und das **Bild 39.2** zeigen.

Größe	.003B	.005A	.008A	.010A	.025A	.050A	.075A	.100A	.150A	
Typ E...	0,01	0,1	0,1	0,185	0,7	1,6	1,6	4,25	4,25	10^{-3} kgm^2
Typ Z...	-	0,2	0,2	0,37	1,4	3,2	3,5	8,5	8,5	10^{-3} kgm^2

Tabelle 39.1 Massenträgheitsmomente der rotierenden Teile von Federdruckbremsen der Typenreihen E ... (Einscheibenbremsen) und Z ... (Zweischeibenbremsen)

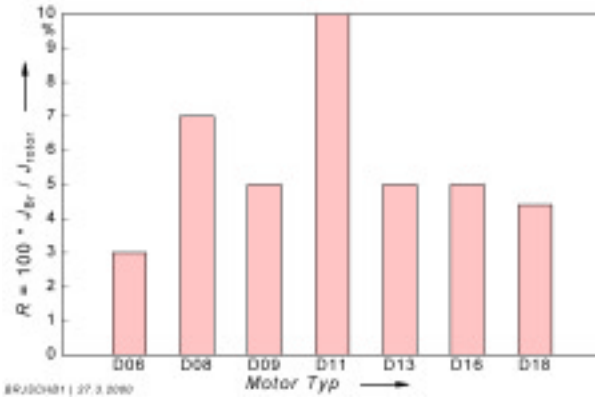


Bild 39.2 Relation der Massenträgheitsmomente von Reibscheiben und Motorläufern für typische Motoren der Typenreihe D06 ... D18 und ihren Standardbremsen

40 Auswahl nach Bremsmoment

Bremsmotoren werden in bedarfsorientierten Größenreihen konstruiert und katalogmäßig angeboten – die Bremsen sind nach **Bremsmoment** optimiert, d. h. sie bieten das höchstmögliche Bemessungsmoment.

Das **Arbeitsvermögen**, d. h. die Fähigkeit, Verzögerungsarbeit zu übernehmen, ist oft ein durch Versuch und Erfahrung ermitteltes Nebenprodukt. Diese Verfahrensweise ist berechtigt, wenn die Bremse – wie meist üblich – als **Haltebremse** eingesetzt wird: Wenn also die Verzögerungsarbeit z. B. durch einen polumschaltbaren Drehstrommotor übernommen und die Bremse vorwiegend zum Festhalten einer Last benötigt wird. Soll die Bremse allerdings betriebsmäßig häufig verzögern, so ist sie – eventuell unter Verzicht auf volle Ausnützung des Bremsmomentes – nach **Bremsarbeit und Lebensdauer** (Abschnitt 41) zu berechnen.

40.1 Erforderliches Bremsmoment

Zur Bestimmung der richtigen Bremsengrößen kann das erforderliche Bremsmoment berechnet werden, sofern alle Daten und Forderungen bekannt sind.

$$M_{Br} = M_a \pm M_L$$

$$M_a = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot t_a}$$

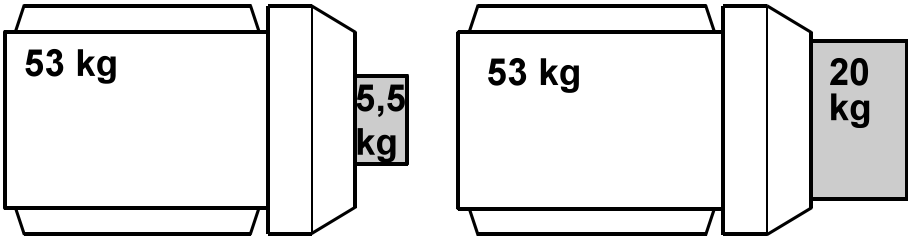
M_{Br} – Bemessungsmoment der Bremse in Nm
 M_a – Verzögerungsmoment in Nm
 M_L – bremsendes oder treibendes Lastmoment in Nm
 J – Massenträgheitsmomente in kgm^2
 n – Drehzahl in r/min
 t_a – Verzögerungszeit in s

Annahmen für Motor und Bremszeit:

$$P_N = 7,5 \text{ kW} \quad n_1 = 1500 \text{ r/min} \quad J_{rot} = 0,029 \text{ kgm}^2$$

$$M_N = 50 \text{ Nm} \quad t_a = 1 \text{ s} \quad M_L = 0$$

Größen- und Gewichtsrelation zum Motor für eine Federdruckbremse bei
 Rechnung nach obiger Formel : Bestimmung nach der nachfolgenden
 Regel :
 $M_a = 4,6 \text{ Nm}$;
 gewählte Bremse: 5 Nm $M_{Br} \geq 0,8 \cdot 50 = 40$; gewählt 50 Nm



Man kann jedoch auch das Bremsmoment nach den folgenden Faustregeln festlegen und dann Schaltarbeit, Nachlaufzeit und Nachlaufweg nachrechnen. Liegen die Rechenwerte innerhalb der verlangten Grenzen, so kann die Bremsengröße beibehalten werden.

Es wird empfohlen, das Bremsmoment nicht wesentlich kleiner oder größer (Faktor min. 0,5 bzw. max. 2) als nach diesen Faustregeln zu wählen, selbst wenn die berechneten Werte für Schaltarbeit, Nachlaufzeit und Nachlaufweg dies erlauben oder fordern würden.

Die zu klein gewählte Bremse hat erhöhten Verschleiß und verminderte Lebensdauer, die zu groß gewählte Bremse kann die mechanischen Übertragungsmittel des Antriebes zu hoch beanspruchen.

40.2 Auslaufbremsung

Regel für die Bremsengröße :

Bremsmoment mindestens gleich 80 % des Bemessungsmomentes des Antriebes.

Das Bemessungsmoment wird berechnet :

$$M = \frac{9550 \cdot P}{n}$$

M – Bemessungsmoment des Motors in Nm
 P – Bemessungsleistung des Motors in kW
 n – Drehzahl in r/min

Bei der Berechnung der nachfolgenden Diagramme wurde ein Bremsmoment an der unteren Grenze der Bemessungsregel ($M_{Br} = 0,8 M_N$) vorausgesetzt.

Bild 40.2.1 zeigt, dass bei Anwendung dieser Regel unter üblichen Antriebsbedingungen für 4polige Drehstrommotoren mit Bemessungsleistungen 1...100 kW Richtwerte für die Nachlaufzeiten von etwa 50 ms...1 s zu erwarten sind: Dies sind akzeptable Werte für die meisten Anwendungen.

Tatsächlich wird wegen der Abstufung der Bemessungsmomente der Bremsen in der Regel $M_{BR} > M_N$ und $Fl < 2$ sein, die tatsächlichen Werte sind also günstiger als die in den Diagrammen gezeigten Werte.

40.2 Auslaufbremsung

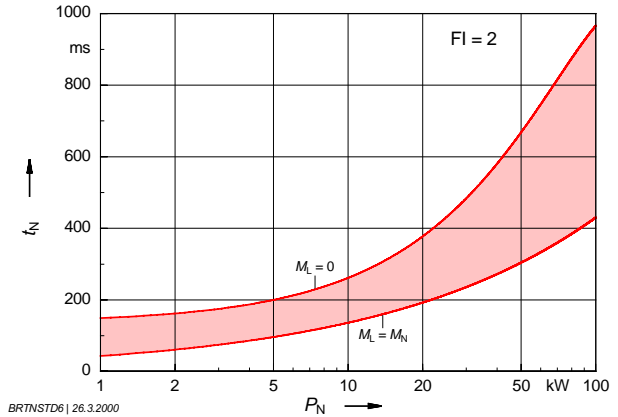


Bild 40.2.1 Richtwerte für die Nachlaufzeit t_N von 4poligen Drehstrommotoren mit Bemessungsleistung P_N bei Auslaufbremsung mit Trägheitsfaktor $FI = 2$

- $M_L = 0$: ohne Unterstützung durch ein Lastmoment
- $M_L = M_N$: mit Unterstützung durch ein Lastmoment
= Bemessungsmoment

Für die gleichen Bedingungen errechnen sich Nachlaufwinkel am Rotor dieser Motoren von etwa 360...5 000 Winkelgraden, was etwa 1...14 Umdrehungen entspricht (**Bild 40.2.2**).

Dieser Nachlaufweg ist an der Antriebsstation durch die meist nachgeschaltete Unter-
setzung reduziert.

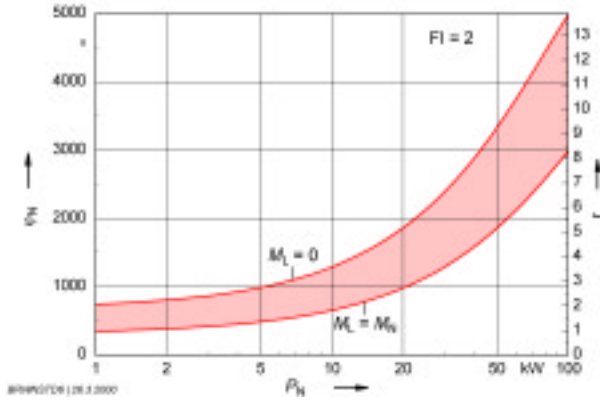


Bild 40.2.2 Richtwerte für den Nachlaufwinkel α_N von 4poligen Drehstrommotoren mit Bemessungsleistung P_N bei

Auslaufbremsung mit Trägheitsfaktor $FI = 2$

$M_L = 0$: Ohne Unterstützung durch ein Lastmoment

$M_L = M_N$: Mit Unterstützung durch ein Lastmoment
= Bemessungsmoment

40.3 Hubbetrieb

Regel für die Bremsengröße:

Bremsmoment gleich doppeltem Bemessungsmoment des Antriebes

Für die Berechnung des Bemessungsmomentes gilt die Formel nach Abschnitt 40.2.

Beim Senkbetrieb wirkt der Antriebsmotor als Generator und sorgt durch seine Bremswirkung für eine gleichförmige Abwärtsbewegung. Sieht man von den Übertragungsverlusten ab, so muss der Antrieb bei Vollast mit Bemessungsmoment bremsen. Würde nach dem Abschalten eine mechanische Bremse mit Bemessungsmoment wirksam, so würde die Abwärtsbewegung unverzüglich fortgesetzt:

40.3 Hubbetrieb

Für eine Abbremsung auf Stillstand ist also ein **zusätzliches** Bremsmoment erforderlich. Von einer für 200 % Bemessungsmoment bemessenen Bremse werden also etwa 100 % »statisch« verbraucht und der Rest kann »dynamisch« zur Verzögerung benützt werden.

Bei der Berechnung der nachfolgenden Diagramme wurde ein Bremsmoment an der unteren Grenze der Bemessungsregel ($M_{BR} = 2 M_N$) vorausgesetzt.

Bild 40.3.1 zeigt, dass bei Anwendung dieser Regel bei **Senkbetrieb** für 4polige Drehstrommotoren mit Bemessungsleistungen 1...100 kW Richtwerte für die Nachlaufzeiten vom etwa 120 ms...800 ms zu erwarten sind: Dies sind akzeptable Werte für die meisten Anwendungsfälle.

Tatsächlich wird wegen der Abstufung der Bemessungsmomente der Bremsen in der Regel $M_{BR} > 2 M_N$ sein, die tatsächlichen Werte sind also günstiger als die im den Diagrammen gezeigten Werte.

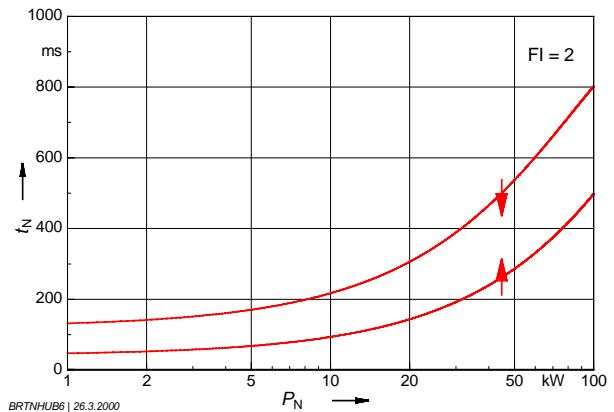


Bild 40.3.1 Richtwerte für die Nachlaufzeit t_N von 4poligen Drehstrommotoren mit Bemessungsleistung P_N bei Trägheitsfaktor $FI = 2$

↓ Senkbetrieb, Last treibend

↑ Hubbetrieb, Last bremsend

40 Auswahl nach Bremsmoment

Für die gleichen Bedingungen errechnen sich Nachlaufwinkel am Rotor dieser Motoren von etwa 500...4000 Winkelgraden, was etwa 1,5...11 Umdrehungen entspricht (**Bild 40.3.2**).

Dieser Nachlaufweg ist an der Antriebsstation durch die meist nachgeschaltete Unterzersetzung reduziert.

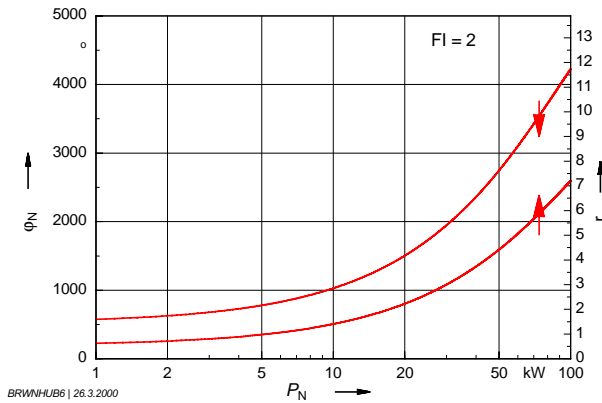


Bild 40.3.2 Richtwerte für den Nachlaufwinkel φ_N von 4poligen Drehstrommotoren mit Bemessungsleistung P_N bei Trägheitsfaktor $FI = 2$
↓ Senkbetrieb, Last treibend
↑ Hubbetrieb, Last bremsend

41 Auswahl nach Bremsarbeit

Neben dem Bremsmoment sind bei der Auswahl einer mechanischen Bremse vor allem die **thermische Belastung** und der **Verschleiß durch die Schaltarbeit** zu beachten. Meist wird in diesem Zusammenhang nur von der Schalthäufigkeit gesprochen, doch ist es mit dieser Kenngröße allein nicht möglich, die tatsächliche Beanspruchung zu beschreiben. Die thermische Belastung ergibt sich vielmehr aus der Schaltarbeit, also der kinetischen Energie, die bei jeder Bremsung auftritt, und der mittleren Schaltzahl pro Stunde, also der Schalthäufigkeit. Die tatsächlich auftretende Belastung soll die Grenzen der thermischen Kapazität einer Bremse, also ihr **Arbeitsvermögen**, nicht übersteigen. Die Reibungselemente erlauben eine begrenzte **Lebensdauer-Schaltarbeit**.

Für die Größe Arbeit oder Energie (Formelzeichen W) ist im internationalen Einheitensystem (SI) wahlweise die Einheiten J oder Nm oder Ws vorgesehen. Es ist $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$.

In dieser Abhandlung und in den technischen Unterlagen der Firma Danfoss Bauer GmbH wird die Einheit J (Joule) bevorzugt, um Verwechslungen mit der Einheit des Drehmomentes (Nm) vorzubeugen.

Um die subjektive Bewertung der für die Bremsung von Antriebsmotoren üblichen Arbeitsvermögen zu erleichtern, wird den folgenden Abschnitten ein Beispiel vorangestellt. Es soll deutlich machen, welche Energie (= Verschleiß- oder Zerstörungsarbeit!) in der rotierenden Masse eines mittleren Elektromotors gespeichert ist und welches Arbeitsvermögen mechanische Bremsen während vieler Millionen Schaltungen aufnehmen müssen.

Annahme : 4poliger Normmotor $P_N = 11 \text{ kW}$
 Leerlaufdrehzahl $n_0 = 1500 \text{ r/min}$
 Massenträgheitsmoment $J_{\text{rot}} = 0,057 \text{ kgm}^2$

Kinetische Energie der rotierenden Läufermasse

$$W_{\text{rot}} = \frac{J_{\text{rot}} \cdot \omega^2}{2} = \frac{J_{\text{rot}} \cdot n^2}{182,5} = \frac{0,057 \cdot 1500^2}{182,5} = 703 \text{ J}$$

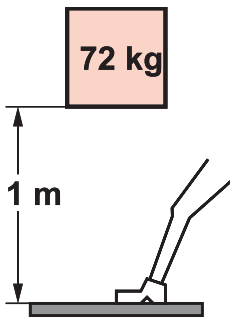
$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Energie der Lage

Zur Veranschaulichung kann diese Energie in eine Masse umgerechnet werden, die auf das »Potential« von 1 m Höhe gehoben wurde:

$$W_{\text{rot}} = W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$

$$m = \frac{W_{\text{rot}}}{g \cdot h} = \frac{703 \text{ J}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m}} = 71,6 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = 71,6 \text{ kg}$$



Umwandlung des »Arbeitsvermögens« im Rotor eines Drehstrommotors 11 kW, 1500 r/min in eine äquivalente »Energie der Lage« für die subjektive Bewertung des »Arbeitsvermögens« von Federdruckbremsen

41.1 Schaltarbeit pro Bremsung

Die kinetische Energie der bewegten Massen wird durch Reibung in Wärme umgesetzt. Sie beträgt

$$W_{\text{rot}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

oder mit den in der technischen Praxis üblichen Größen

$$W_{\text{rot}} = \frac{J \cdot n^2}{182,5}$$

W_{rot} – Arbeit (Energie) in Nm = Ws = J
 J – Massenträgheitsmoment in kgm²
 n – Drehzahl in r/min

41.1 Schaltarbeit pro Bremsung

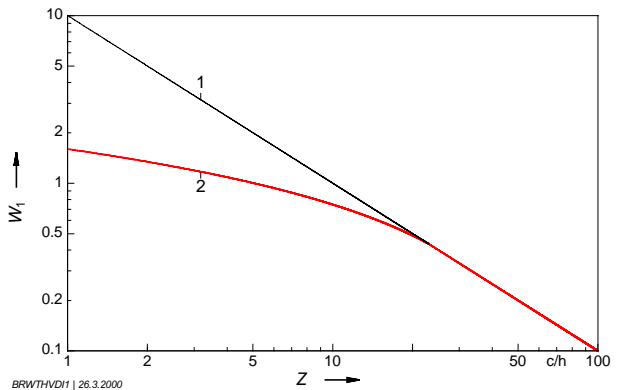
Wird ein extrem großes Massenträgheitsmoment aus hoher Geschwindigkeit abgebremst, so tritt an der Reibfläche ein **Wärmestau** auf, der zu einer Beeinträchtigung der Bremse führen kann. Aus diesem Grunde ist in Sonderfällen das **Arbeitsvermögen pro einzelner Bremsung** gemäß den Herstellerangaben für die jeweiligen Bremsengrößen zu beachten.

In allgemeiner Form ist der Einfluss der Schalthäufigkeit auf die zulässige Schaltarbeit pro Schaltung in der Richtlinie VDI 2241 Blatt 1 behandelt. In Anlehnung an die dort angegebenen Formeln und in vereinfachter, relativer Darstellung ist der Zusammenhang in **Bild 41.1.1** gezeigt:

Die Linie 1 repräsentiert gleichbleibende Gesamtarbeit als Produkt aus Arbeitsvermögen pro Schaltung mal Schalthäufigkeit.

Tatsächlich ausnutzbar sind jedoch nur die Werte nach der Linie 2: Bei **einer** Schaltung pro Stunde also nur etwa 16 % des theoretisch möglichen Wertes.

Bild 41.1.1
Abnahme des Arbeitsvermögens pro Schaltung bei niedriger Schalthäufigkeit pro Stunde
Relative Darstellung in Anlehnung an VDI 2241 Blatt 1
1 – theoretisch nutzbar
2 – tatsächlich nutzbar



Die rechnerische oder experimentelle Festlegung eines Grenzwertes für die einmalige Schaltung ist nicht ganz einfach – entsprechend unterschiedlich sind die Herstellerangaben in Katalogen (**Bild 41.1.2** nach [5.4]).

41 Auswahl nach Bremsarbeit

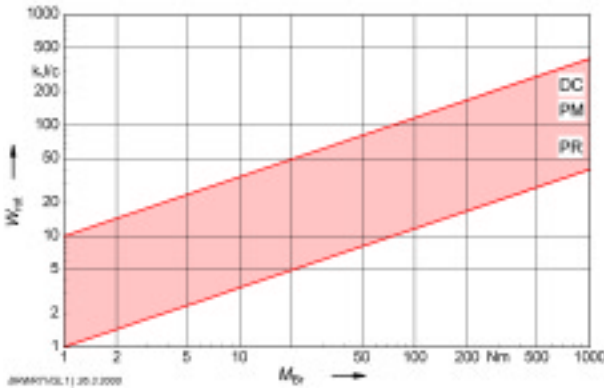


Bild 41.1.2
Streuband der
Katalogangaben für den
Grenzwert W_{rot} bei ein-
maliger Bremsung
DC – mit Gleichstrom-
Lüftmagnet
PM – mit Permanent-
magnet
PR – Polreibbremsen

Eine Nachrechnung für 4polige listenmäßige Motoren mit Standardbremsen zeigt allerdings, dass extrem hohe Fremd-Schwungmassen (ausgedrückt in $FI = \text{Factor of Inertia}$, der das Massenverhältnis im Vergleich zur Rotormasse beschreibt) vorhanden sein müssen, um die Bremse bei einem einmaligen Bremsvorgang zu gefährden. **Bild 41.1.3** zeigt die Grenzwerte FI über der Bemessungsleistung von 4poligen Drehstrommotoren.

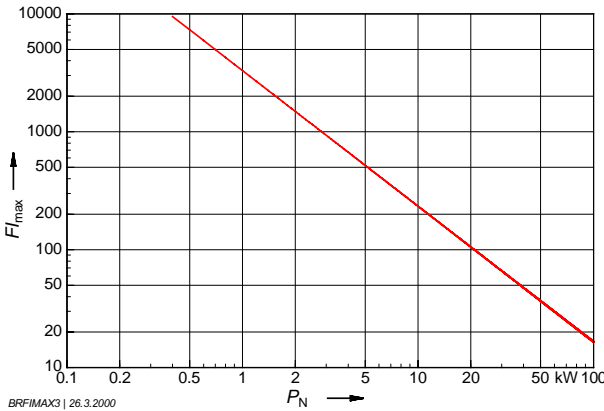


Bild 41.1.3
 FI -Grenzwert FI_{max} bei ein-
maliger Bremsung mit
Standardbremse an 4poli-
gen Drehstrommotoren der
Bemessungsleistung P_N

Aus diesem Diagramm ergibt sich folgende Regel :
Bei üblichen Anwendungsfällen kann bei einmaliger Bremsung auf die Nachrechnung der thermischen Beanspruchung verzichtet werden!

41.2 Thermisch zulässige Schaltarbeit

Bei einer gleichmäßigen Folge von Bremsungen, also einer gewissen mittleren Schalthäufigkeit pro Stunde, steigt die Erwärmung bis zu einem Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Abgabe an. Die zulässige Temperatur soll unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur so liegen, dass weder Spule noch Reibbelag thermisch überfordert sind.

Die thermische Beanspruchung bei reiner Auslaufbremsung ergibt sich aus

$$W_{th} = W \cdot Z$$

W_{th} - thermisch zulässige Schaltarbeit pro Stunde
 W - Schaltarbeit pro Schaltung bei $Fl \leq 2$
 Z - Zahl der Bremsungen pro Stunde

Da es sich um eine **thermische Grenze** handelt, ist für Z der höchste über **einige Stunden** auftretende Mittelwert einzusetzen.

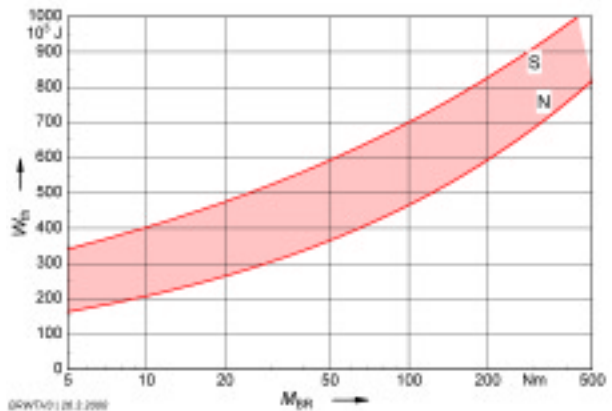
Wird bei Hubbetrieb ein Teil des Bremsmomentes gemäß Abschnitt 9.2 statisch für die Last benötigt, so ist die Rutschzeit und damit die thermische Beanspruchung höher. Es gilt dann

$$W_H = \frac{M_{Br}}{M_{Br} - M_L} \cdot W_{th}$$

$$W_H = f_w \cdot W_{th}$$

- W_H - thermisch zulässige Schaltarbeit pro Stunde bei Hubbetrieb
- W_{th} - thermisch zulässige Schaltarbeit pro Stunde
- M_{Br} - Bremsmoment der Bremse
- M_L - statisches Moment der Last
- f_w - $M_{Br} / (M_{Br} - M_L)$

Bild 41.2.1
 Richtwerte für die thermisch zulässige Schaltarbeit W_{th} von Federdruckbremsen der Reihe Danfoss Bauer 2000
 N - Standardbremsen
 S - Schaltbremsen



Eine Nachrechnung für repräsentative listenmäßige 4polige Motoren mit Standardbremsen hat ein interessantes Ergebnis:

Bis zu einer Bemessungsleistung von etwa 5,5 kW ist die thermisch zulässige Grenz-Schalzhäufigkeit der Standardbremse höher als der entsprechende Grenzwert für den Motor – bei größeren Leistungen kehrt sich die Relation um (vgl. Bild 41.2.2).

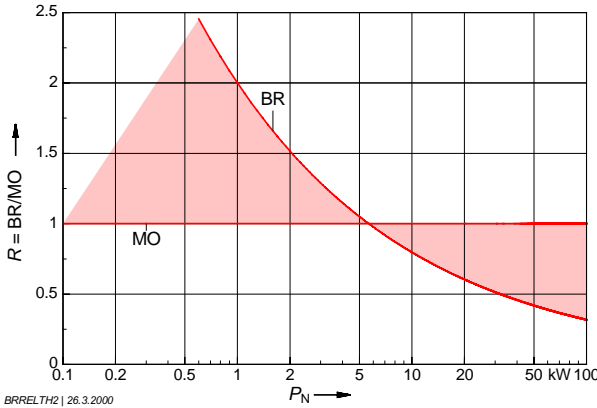


Bild 41.2.2
Relation R der thermisch zulässigen Grenz-Schalzhäufigkeit von 4poligen Motoren (MO) mit Bemessungsleistung P_N und ihren Standard-Bremsen (BR) (Motor = 1 gesetzt)

Aus dem Diagramm ergibt sich folgende Regel :

- **Bei Bemessungsleistungen bis zu etwa 5,5 kW genügt die thermische Nachrechnung des Motors – seine Standardbremse ist nicht gefährdet.**
- **Bei Bemessungsleistungen über etwa 5,5 kW ist die Bremse auf ihre thermische Auslastung nachzurechnen. Wenn der Grenzwert erreicht ist, sollte die Standardbremse durch eine Schaltbremse der Typenreihe mit höherer Schaltkapazität ersetzt werden.**

41.3 Verminderung der mechanischen Schaltarbeit durch elektrische Schaltmaßnahmen

Ohne Anspruch auf allgemeine Gültigkeit zeigt das **Bild 41.2.2**, dass bei kleinen und mittleren Motorleistungen die zulässige Schalzhäufigkeit der zugeordneten Bremsen so hoch liegt, dass sie praktisch kaum ausnutzbar ist und dass in der Regel die Grenze für die Schalzhäufigkeit der Motoren niedriger liegt. Bei den größeren Bemessungsleistungen des dargestellten Bereiches jedoch erlaubt die im Drehmoment passende Bremse relativ niedrige Schaltzahlen, die auch durch Übergang auf die nächste Bremsengröße nicht wesentlich zu steigern sind. Es stellt sich in solchen Fällen die Aufgabe, die **Schaltarbeit** so weit zu **vermindern**, dass das Arbeitsvermögen der Bremse nicht überfordert wird. Nach der Gleichung in Abschnitt 41.1 bietet sich hierzu bei gege-

41.3 Verminderung der mechanischen Schaltarbeit durch elektrische Schaltmaßnahmen

benen Antriebsbedingungen eine Reduzierung der Drehzahl – z. B. durch Polumschaltung – an.

Die Schonung der Bremse ist beträchtlich, da die Beanspruchung **quadratisch** mit der Drehzahl abnimmt, wie **Bild 41.3.1** zeigt.

Bild 41.3.1
Mechanische Rest-Schaltarbeit bei elektrischer Rückschaltung von hoher Drehzahl n_{II} auf niedrige Drehzahl n_I

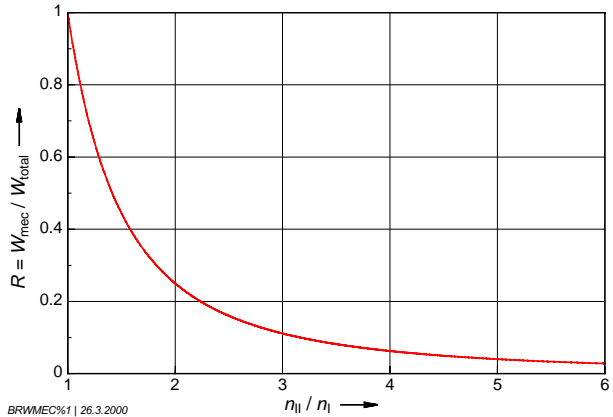
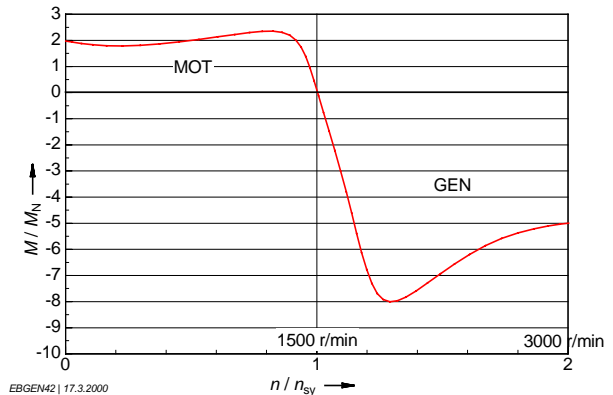


Bild 41.3.2 zeigt den Drehmomentverlauf eines im Verhältnis 1 : 2 polumschaltbaren Drehstrom-Asynchronmotors bei übersynchroner Bremsung.

Bild 41.3.2
Verlauf des generatorischen Bremsmomentes bei Rückschaltung eines polumschaltbaren Motors in Dahlanderschaltung Dreieck/Doppelstern von der hohen auf die niedrige Drehzahl



Bei dieser **Kombination von elektrischer und mechanischer Bremsung** ist zu prüfen, ob die relativ hohen generatorischen Bremsmomente vom Antriebssystem ohne Schaden übertragbar sind. Ferner ist zu beachten, dass die Entlastung der mechanischen Bremse natürlich auf Kosten einer höheren thermischen Beanspruchung des Motors erfolgt (siehe auch [5.3]).

41.4 Schaltarbeit pro Reibungselement

Durch die Summierung der Reibungsarbeit beim Bremsen mit hoher Schalthäufigkeit entsteht an den Reibungselementen (Reibscheibe, Reiblamellen) Verschleiß, der zu einer langsamen Zunahme des Arbeitsluftspaltes führt. Die Entspannung der Druckfedern und die dadurch verursachte Verminderung des Bremsmomentes ist vernachlässigbar. Bei einem Grenzluftspalt – z.B. in der Größenordnung von 1...2 mm – wird jedoch das Magnetfeld so weit geschwächt, dass bei einer weiteren Luftspaltvergrößerung die Zugkraft des Magneten nicht mehr für eine sichere Lüftung ausreicht. Die Sicherheit ist durch diesen Vorgang nicht beeinträchtigt, da die Bremse nach wie vor bremsst und lediglich nicht mehr lüftet. Zur Wiederherstellung des Anfangsluftspaltes – z. B. etwa 0,25 mm – muss, je nach Konstruktionsart, der Luftspalt nachgestellt oder die Brems Scheibe erneuert werden.

Bezeichnet man die Schaltarbeit bis zum Erreichen des Grenzluftspaltes mit W_L , so errechnet sich die **Lebensdauer des Reibungselementes** aus

$$Z_L = \frac{W_L}{W}$$

$$t_L = \frac{Z_L}{Z}$$

Z_L – Zahl der Bremsungen bis Grenzluftspalt erreicht wird
 W_L – Arbeitsvermögen pro Reibelement in Nm = $W_s = J$
 W – Schaltarbeit pro Schaltung in Nm = $W_s = J$
 t_L – Lebensdauer des Reibelementes in Betriebsstunden (h)
 Z – mittlere Zahl der Bremsungen pro Stunde (c/h)

Da es sich um den für den **Verschleiß** maßgebenden Wert handelt, ist für Z der Mittelwert über die **gesamte Gebrauchsdauer** einzusetzen.

Es empfiehlt sich, den so erhaltenen Grenzwert unter Berücksichtigung der tatsächlichen Betriebsverhältnisse durch den Hersteller überprüfen zu lassen. Dies gilt auch für die thermisch zulässige Schalthäufigkeit des Motors und die mechanisch zulässige Schalthäufigkeit eines Getriebes.

Das **Bild 41.4.1** soll deutlich machen, dass die Angaben für die »Lebensdauer« von Bremsen bei den verschiedenen Herstellern erhebliche Unterschiede aufweisen.

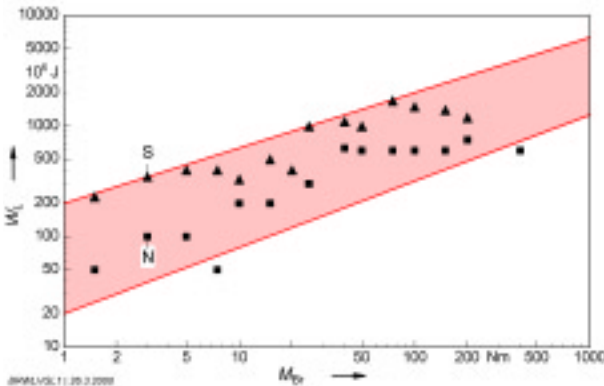
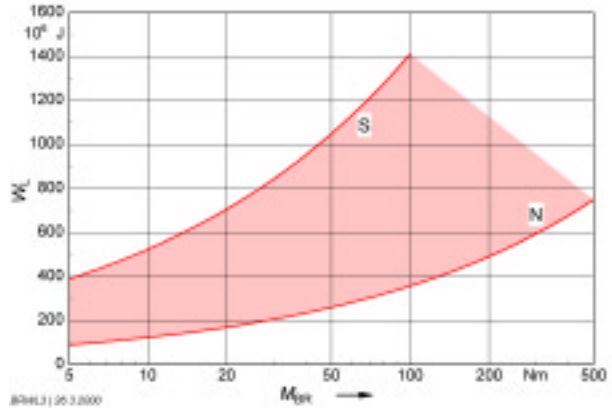


Bild 41.4.1
 Listenangaben von 6 verschiedenen Herstellern für das Arbeitsvermögen W_L von mechanischen Bremsen im Vergleich zu Bremsen der Reihe Danfoss Bauer 2000
 ■ – Standardbremsen N
 ▲ – Schaltbremsen S

41.4 Schaltarbeit pro Reibungselement

Richtwerte für das Arbeitsvermögen von Federdruckbremsen der Reihe Danfoss Bauer 2000 ergeben sich aus **Bild 41.4.2**.

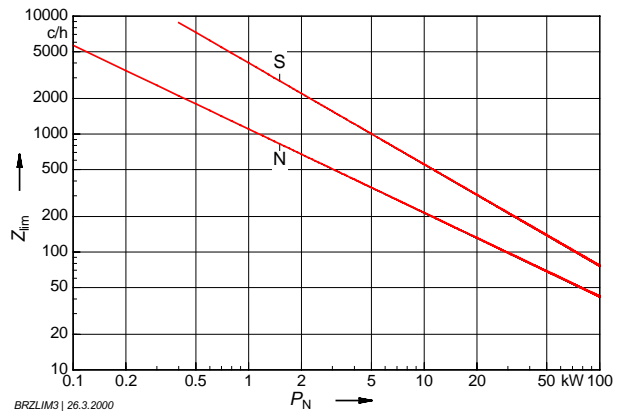
Bild 41.4.2
Richtwerte für die zulässige Schaltarbeit W_L bis zur Auswechslung der Reibbeläge von Federdruckbremsen der Reihe Danfoss Bauer 2000
N – Standardbremsen
S – Schaltbremsen



Im konkreten Einzelfall ist eine **Nachrechnung** unter Verwendung der Werte der tatsächlich vorliegenden Bremse zu empfehlen (vgl. auch Abschnitt 19).

Für gewisse Randbedingungen (z. B. Standzeit-Erwartung $t_L = 4000$ h, Trägheitsfaktor $FI = 1$) lassen sich Richtwerte für die zulässige Schalthäufigkeit aus **Bild 41.4.3** ablesen.

Bild 41.4.3
Richtwerte für die zulässige Schalthäufigkeit Z_{lim} von 4poligen IP65-Motoren bei einer Standzeit-Erwartung des Reibbelages von ca. 4000 h
N – Standardbremsen mit optimalem Bremsmoment
S – Schaltbremsen mit maximalem Arbeitsvermögen



41.5 Reduzierte Federzahl

Durch Verminderung der Zahl der Druckfedern können Bremsmoment und Arbeitsvermögen optimal an die jeweils vorliegenden Betriebsbedingungen angepasst werden.

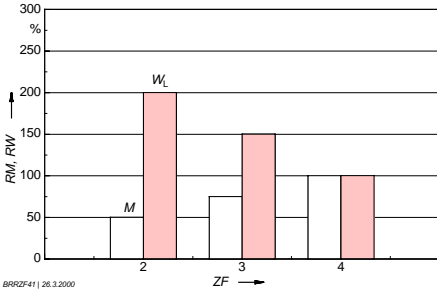


Bild 41.5.1
Bremsen mit
max. 4 Federn

Typenreihe
E003B

BRRZF41 | 26.3.2000

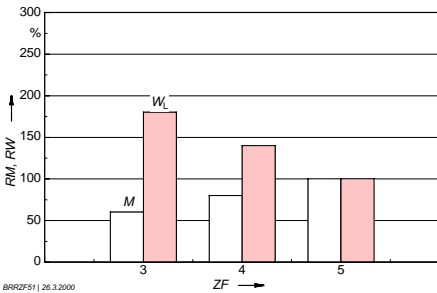


Bild 41.5.2
Bremsen mit
max. 5 Federn

Typenreihen
E008B Z008

BRRZF51 | 26.3.2000

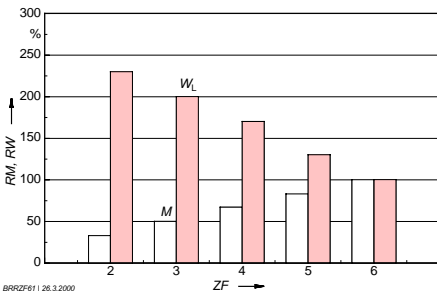


Bild 41.5.3
Bremsen mit
max. 6 Federn

Typenreihen
E005 Z005 E015 Z015
E010 Z010 E025 Z025

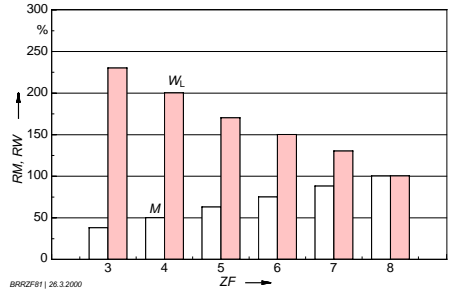
BRRZF61 | 26.3.2000

41.5 Reduzierte Federzahl

Bild 41.5.4
Bremsen mit
max. 8 Federn

Typenreihen

E050	Z050	E100	Z100
E075	Z075	E150	Z150



ZF – Zahl der Druckfedern

RM – Relatives Bremsmoment M

RW – Relative zulässige Schaltarbeit bis zum Tausch W_L

42 Verschleiß

Mechanische Bremsen haben grundsätzlich Verschleiß – das ist in ihrer Arbeitsweise begründet.

Wie viel Verschleiß ist »normal« – und wie wirkt sich der Verschleiß auf die Funktion der Bremse aus?

Die meisten Hersteller geben für ihre Bremsen ein »Arbeitsvermögen« bis zur **Nachstellung** oder bis zum **Tausch der Reibelemente** an. Da die Arbeit pro Bremsung wesentlich von den Trägheitsmomenten bestimmt wird ($W = J^2/2$), kann die Lebensdauer nur dann in Schaltzahlen ausgedrückt werden, wenn die Trägheitsmomente (Massen und Geschwindigkeiten) bekannt sind. Das Berechnungsverfahren ist in Abschnitt 10 erläutert. Für die Instandhaltung ist interessant, wie sich das Ende der Lebensdauer bemerkbar macht und was zur Wiederherstellung des Originalzustandes zu tun ist. Wenn der in **Bild 42.1** gezeigte Luftspalt a durch Verschleiß der Reibscheibe stark ansteigt, dann vergrößert sich der magnetische Widerstand im Magnetkreis. Der magnetische Fluss nimmt ab und quadratisch mit ihm die Lüftkraft: Die Bremse **lüftet** und schließlich überhaupt nicht mehr.

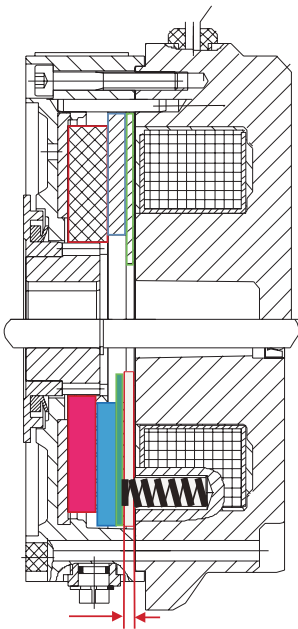


Bild 42.1

Schnittbild einer Einscheiben-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet

oben: Neuzustand

unten: vergrößerter Arbeitsluftspalt

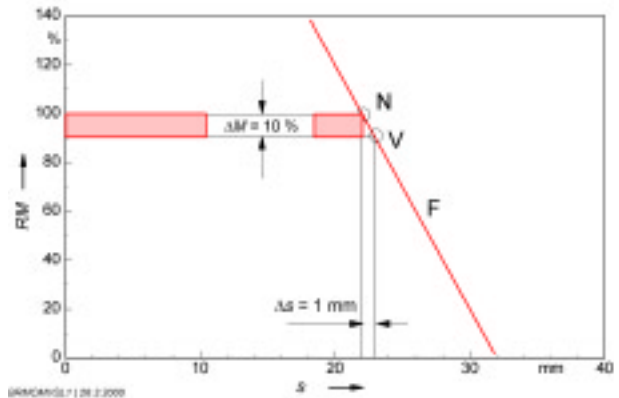
Bei dem in Bild 42.1 gezeigten Beispiel wurde auf Nachstellmöglichkeiten zum Ausgleich des Verschleißes verzichtet. Bei dieser Bremse darf der Luftspalt je nach Bremsengröße 1,5...2 mm erreichen. Die Reibscheibe ist nach Demontage der Bremse relativ leicht zu wechseln – im Fall der **Anbaubremse** in der Werkstatt ohne Zeitdruck, falls eine **Ersatzbremse** zur Verfügung steht.

Da die Federn (F) **vorgespannt** sind, führt die Entspannung um den Abrieb (s) zu einem geringen Nachlassen des Bremsmomentes M um ca. 10...15% (**Bild 42.2**). Die Funktion als Sicherheitsbremse ist also durch den Verschleiß nicht infrage gestellt, und ein »Nachstellen« zum Ausgleich des Bremsmomentes ist bei den meisten Anwendungsfällen nicht erforderlich.

Die Begriffe »Nachstellen« (zum Verschleißausgleich) und »Einstellen« (zur Veränderung des Bremsmomentes) sollten klar getrennt werden.

Bild 42.2

Reduzierung des Bremsmomentes M wegen nachlassender Federkraft (F) vom Neuzustand (N) bis zum Verschleißpunkt (V) infolge Verschleißes Δs



In **Bild 42.3** ist das Prinzip einer Lamellenbremse mit Nachstellmöglichkeit für den Verschleiß gezeigt: Wenn die Gesamtdicke b der Reibelemente (1) um den Verschleiß Δb abnimmt und der Abstand der Ankerplatte (2) vom Magnetgehäuse (3) vergrößert wird, muss der Magnet den erhöhten Luftspalt ($a + \Delta b$) überwinden. Zum Ausgleich soll die »nachstellbare Druckplatte« (4) mit ihrem Gewinde am Außendurchmesser entsprechend nachgestellt werden. Dies ist ein Beispiel für verschiedene konstruktive Lösungsmöglichkeiten bis hin zur »automatischen Selbstnachstellung« über Mini-Gesperre auf präzis bearbeiteten Bolzen: Die Wirksamkeit dieser konstruktiv interessanten Lösungen ist an der praktischen Bewährung unter Einfluss von Korrosion, Temperatur und Verschmutzung zu bewerten. Zur Betätigung der Verschleißnachstellung im gezeigten Beispiel ist die Bremse jedenfalls teilweise zu demontieren, und möglicherweise muss das Gewinde an dem großen Durchmesser gängig gemacht werden.

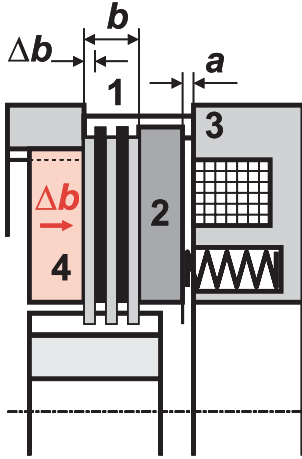


Bild 42.3
Beispiel einer Lamellen-Federdruckbremse mit
Nachstellmöglichkeit zum Ausgleich des durch
Verschleiß Δb vergrößerten Arbeitsluftspaltes a
(nach VDI 2241 Blatt 1)

43 Bremszeit

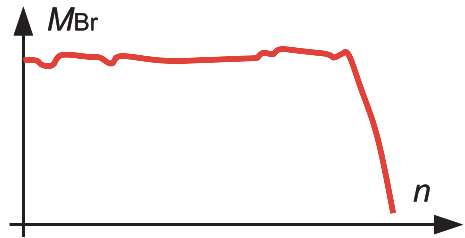
Die reinen Bremszeiten vom Beginn der mechanischen Bremsung bis zum Stillstand werden von der **Bremsverzögerung** bestimmt. Diese ist

$$\alpha = \frac{M_a}{J} \quad \begin{array}{l} \alpha \quad - \quad \text{Winkelverzögerung} \\ M_a \quad - \quad \text{Verzögerungsmoment} \\ J \quad - \quad \text{Massenträgheitsmoment} \end{array}$$

43.1 Verzögerung

Bild 43.1 stellt in vereinfachter Form das mit einem x-y-Schreiber aufgenommene Bremsmoment einer Scheibenbremse über der Drehzahl dar. Es zeigt ein vom Beginn bis zum Ende der Bremsung, also im ganzen Drehzahlbereich, praktisch konstant wirkendes Bremsmoment, sodass auch eine praktisch gleich bleibende Bremsverzögerung zu erwarten ist.

Bild 43.1
Bremsmoment während des Bremsvorganges, aufgenommen mit x-y-Schreiber über der Drehzahl



Unter obiger Voraussetzung wird die Verzögerungszeit oder Bremszeit

$$t_a = \frac{\omega}{\alpha} \quad \begin{array}{l} t_a \quad - \quad \text{Verzögerungszeit} \\ \alpha \quad - \quad \text{Winkelgeschwindigkeit} \end{array}$$

Wir erhalten also die wichtige Grundgleichung in technisch üblichen Einheiten

$$t_a = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot M_a} \quad \begin{array}{l} t_a \quad - \quad \text{Verzögerungszeit in s} \\ J \quad - \quad \text{Massenträgheitsmoment in kgm}^2 \\ n \quad - \quad \text{Drehzahl in r/min} \\ M_a \quad - \quad \text{Verzögerungsmoment in Nm} \end{array}$$

Vor allem bei **Hubbetrieb**, aber auch bei anderen Antriebsarten, ist zu prüfen, ob das Lastmoment die Bremsung unterstützt oder aber ihr entgegenwirkt.
Es ist

$$M_a = M_{Br} \pm M_L$$

M_a – Verzögerungsmoment
 M_{Br} – Nennmoment der Reibungsbremse
 M_L – Bremsendes (+) oder treibendes (-) Lastmoment

Die **Bilder 43.2 und 43.3** zeigen die unterschiedliche Bremswirkung beim Heben oder Senken einer Last.

43.2 Hubbetrieb

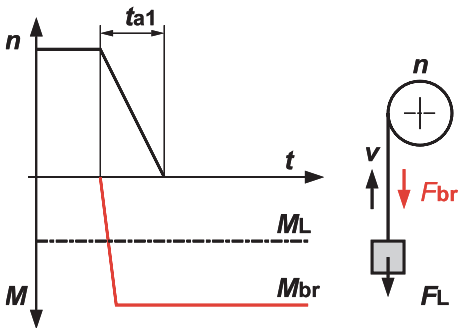


Bild 43.2
Bremsung beim Heben einer Last

Lastmoment M_L und Bremsmoment M_{Br} wirken verzögernd, also resultierendes Verzögerungsmoment beim Heben

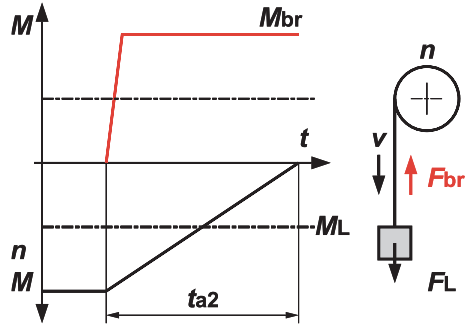
$$M_a = M_{Br} + M_L$$

Damit wird die Bremszeit bei Hubbetrieb

$$t_a = \frac{J \cdot n}{9,55(M_{Br} + M_L)}$$

43.3 Senkbetrieb

Bild 43.3
Bremsung beim Senken einer Last



Lastmoment M_L wirkt beschleunigend, Bremsmoment M_{Br} wirkt verzögernd, also resultierendes Verzögerungsmoment beim Senken

$$M_a = M_{Br} - M_L$$

Damit wird die Bremszeit bei Senkbetrieb

$$t_a = \frac{J \cdot n}{9,55 (M_{Br} - M_L)}$$

t_a - Bremszeit in s
 J - Massenträgheitsmomente in kgm^2
 n - Drehzahl in r/min
 M - Drehmoment in Nm

44 Nachlaufzeit

Der gesamte Nachlauf vom Kommando »Halt« bis zum Stillstand setzt sich aus zwei Hauptanteilen zusammen, für die jeweils mit Toleranzen zu rechnen ist.

44.1 Ansprechzeit

Die Ansprechzeit gemäß Abschnitt 38 ist von den Belastungsverhältnissen unabhängig und praktisch konstant. Dieser Anteil kann relativ groß werden. Er ist bei weg- oder zeitabhängigen Steuerungen relativ leicht zu **eliminieren**, indem das Kommando »Aus« entsprechend vorversetzt wird. Bei extremen Anforderungen an die Haltegenauigkeit sind allerdings auch die Eigenzeiten der Schaltgeräte zu beachten. Nach Angaben eines kompetenten Schaltgeräteherstellers haben wechselstrombetätigte Schütze etwa 10 ms Toleranz bei ihren mechanischen Ausschaltzeiten. Die Streuung der Lichtbogenzeiten bewegt sich in gleicher Größe. Demnach sind Abweichungen von 10...15 ms für die Abschaltzeit eines Schützes nicht zu vermeiden.

Diese Richtwerte gelten für die im Bremsenstromkreis meist verwendeten kleinen Stuerschütze. Werden die Hilfskontakte des Hauptschützes verwendet, so kann der Öffnungsverzug auch höher liegen. Verbindliche Werte sind den technischen Unterlagen der Schaltgeräte-Hersteller zu entnehmen.

Wenn es also auf besonders kurze und eng tolerierte Ansprechzeiten ankommt, ist der **Auswahl der Steuergeräte** besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

44.2 Bremszeit

Die Formeln für die Bremszeit finden sich in Abschnitt 43.

44.3 Nachlaufzeit

$$t_N = t_A + t_a$$

t_N	–	Nachlaufzeit
t_A	–	Ansprechzeit
t_a	–	Bremszeit

Bild 44.3 zeigt ein Anwendungsbeispiel, bei dem es vor allem auf eine möglichst kurze und eng tolerierte Nachlaufzeit ankommt. Das Kommando »Aus« für die Dosierschnecken wird von der Waage gegeben. Jeder unnötige Nachlauf führt zu einer Überfüllung und damit zu Verlustmengen.

44.3 Nachlaufzeit



Bild 44.3 Dosierschnecken mit Füll- und Feingang; Reibungsbremsen mit kurzer Nachlaufzeit verhindern unnötige Überfüllung

45 Nachlaufweg

Der gesamte Nachlaufweg vom Kommando »Halt« bis zum Stillstand setzt sich aus zwei Hauptanteilen zusammen:

- Nachlauf während der **Ansprechzeit** beim Einfallen der Bremse (siehe Abschnitt 7). Dieser Anteil kann vor allem bei größeren Bremsen und bei Verzicht auf Sonderschaltungen sehr ausgeprägt sein. Da in diesem Zeitabschnitt die **volle**, bei Senkbetrieb sogar eine **zunehmende** Geschwindigkeit herrscht, ist der Weganteil entsprechend hoch.
- Nachlauf während der **Bremszeit** (siehe Abschnitt 43). Bei gleichförmiger Verzögerung, die bei mechanischen Bremsen vorausgesetzt werden kann, ist in diesem Abschnitt im Mittel mit der **halben** Geschwindigkeit zu rechnen.

45.1 Translation

Für die Berechnung des Nachlaufweges bei geradliniger Bewegung gilt

$$s_N = t_A \cdot v + \frac{t_a \cdot v}{2}$$

s_N – Nachlaufweg in m
 t_A – Ansprechzeit in s (nach Abschnitt 38)
 t_a – Bremszeit in s (nach Abschnitt 43)
 v – Geschwindigkeit in m/s bei Bremsbeginn

Richtwerte für den Nachlaufweg einer Arbeitsmaschine (Fördereinrichtung) mit einer linearen Geschwindigkeit von 0,1 m/s mit 4poligem Drehstrommotor mit Standardbremse zeigt **Bild 45.1**.

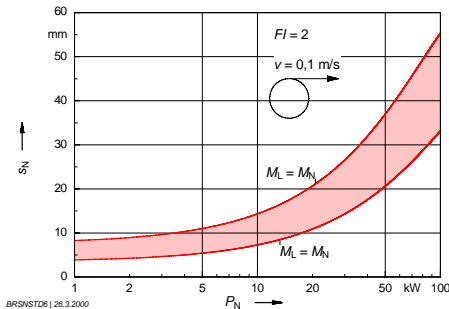


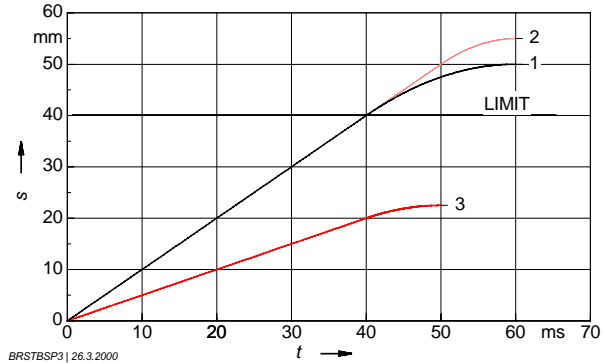
Bild 45.1
 Richtwerte für den Nachlaufweg bei Bremsung aus $v = 0,1$ m/s mit 4poligen Drehstrommotoren mit Standardbremse; $FI = 2$

Zeigt die Rechnung, dass unter Berücksichtigung der Toleranz (Abschnitt 47) der Grenzwert für den Nachlaufweg erreicht oder überschritten wird, so empfiehlt sich eine andere Lösung. Die Vergrößerung des Bremsmomentes verspricht keinen sicheren Erfolg, wenn der Anteil des Bremsweges am Gesamtweg relativ gering ist, da bei einer größeren Bremse mit höherem Bremsmoment auch der Nachlauf während der Ansprechzeit ansteigt.

45.1 Translation

In **Bild 45.2** ist graphisch dargestellt, dass eine **Verminderung der Geschwindigkeit** – z. B. durch Polumschaltung oder durch Frequenzverstellung – die **Positionierung wesentlich verbessert**.

Bild 45.2
Weg-Zeit-Diagramm für
einen Bremsvorgang aus
 $v = 1 \text{ m/s}$



Lösung 1:	$M_{\text{Br}} = 100\%$	$t_A = 40 \text{ ms}$	$t_a = 20 \text{ ms}$	$v = 1 \text{ m/s}$
Lösung 2:	$M_{\text{Br}} = 200\%$	$t_A = 50 \text{ ms}$	$t_a = 10 \text{ ms}$	$v = 1 \text{ m/s}$
Lösung 3:	$M_{\text{Br}} = 100\%$	$t_A = 40 \text{ ms}$	$t_a = 10 \text{ ms}$	$v = 0,5 \text{ m/s}$

45.2 Rotation

Für die Berechnung des Nachlaufweges bei drehender Bewegung in Winkelgraden gilt

$$\varphi_{N1} = 6 \cdot n_1 \cdot t_A + 3 \cdot n_1 \cdot t_a = 3 \cdot n_1 \cdot (2 \cdot t_A + t_a)$$

$$\varphi_{N2} = \frac{\varphi_{N1}}{i} = \varphi_{N1} \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

- φ_{N1} – Nachlaufweg der Läuferwelle in $^\circ$
- φ_{N2} – Nachlaufweg der Arbeitswelle in $^\circ$
- n_1 – Drehzahl der Läuferwelle in r/min
- n_2 – Drehzahl der Arbeitswelle in r/min
- i – Getriebe-Untersetzung
- t_A – Ansprechzeit in s (Abschnitt 38)
- t_a – Bremszeit in s (Abschnitt 43)

Richtwerte für den Nachlaufweg von 4poligen Drehstrommotoren mit Standardbremsen für Auslaufbremsung oder mit vergrößerten Bremsen für Hubbetrieb im Abschnitt 45.1.

46 Vorteile eines Baukastensystems

Im Abschnitt 34 wurde ausführlich dargestellt, welche Vorteile das Prinzip »Anbaubremse« für den **Anwender** bietet. Ein Baukastenprinzip bietet aber auch dem **Planer** einer Maschine oder Anlage den Vorteil, dass er mit der Wahl des Motors nicht nur eine fest zugeordnete, eingebaute Bremse verwenden kann, sondern die freie Auswahl aus mehreren, auf den Anwendungsfall zugeschnittenen Varianten hat. Dies soll am Beispiel der Motorgröße D09 (entspricht der Norm-Achshöhe 90) erläutert werden.

Bild 46.1 zeigt in maßstäblicher Darstellung, dass sechs verschiedene Bremsengrößen angebaut werden können. Größe und Gewicht vermitteln – im Vergleich zum Motor – einen Eindruck der Relationen von Arbeitsvermögen und Preis.

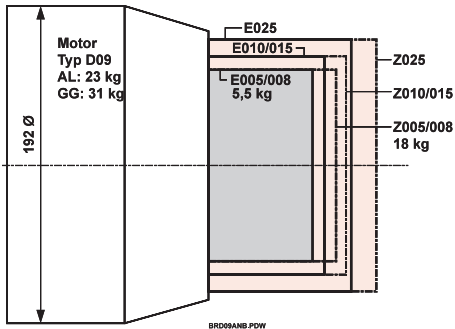
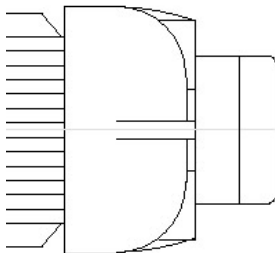
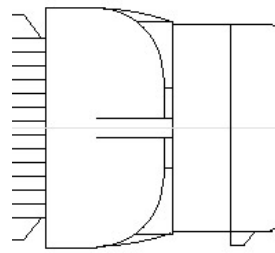


Bild 46.1
Relation von Größe und Gewicht des Motors D09 (AH 90) und seiner sechs anbaubaren Bremsen

Da bei jeder der sechs Bremsen über die Federzahl auch das Bremsmoment gegenüber dem Bemessungsmoment reduziert werden kann, ergeben sich nach **Tabelle 46.3** tatsächlich 40 Auslegungsvarianten, die im Rahmen des Baukastensystems für den Motor D09 geliefert werden können. Diese Tabelle ist ein Auszug aus dem gesamten Fertigungs- und Auswahlprogramm der Danfoss-Bauer-Federdruckbremsen (siehe Anhang A1).



Bremse E 005; 1,5...5 Nm



Bremse Z 025; 25...50 Nm

Bild 46.2 Vergleich der kleinsten und größten Anbaubremse an Motor D09

MOT	BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	ZF
		Nm	W	10 ³ J	10 ³ J	10 ⁶ J	ms	ms	ms	
D09	E..005A2	1,5	25	50	250	230	15	140	22	2
D09	E..005A4	2,5	25	50	250	200	35	110	15	3
D09	E..005A6	3	25	50	250	170	45	100	15	4
D09	E..005A8	4	25	50	250	130	50	100	15	5
D09	E..005A9	5	25	50	250	100	60	100	15	6
D09	E..008A6	4,5	25	50	250	90	60	70	10	3
D09	E..008A8	6	25	50	250	70	70	45	7	4
D09	E..008A9	7,5	25	50	250	50	80	45	7	5
D09	E..010A4	5	45	50	350	400	90	200	10	3
D09	E..010A6	6,5	45	50	350	330	90	200	10	4
D09	E..010A8	8	45	50	350	270	90	200	10	5
D09	E..010A9	10	45	50	350	200	90	200	10	6
D09	E..015A4	7,5	45	50	350	400	90	200	10	3
D09	E..015A6	10	45	50	350	330	90	200	10	4
D09	E..015A8	12	45	50	350	270	90	200	10	5
D09	E..015A9	15	45	50	350	200	90	200	10	6
D09	E..025A4	12,5	70	75	450	600	100	400	20	3
D09	E..025A6	16	70	75	450	500	100	400	20	4
D09	E..025A8	20	70	75	450	400	100	400	20	5
D09	E..025A9	25	70	75	450	300	100	400	20	6
D09	Z..005A2	25	3,3	50	250	350	15	140	22	2
D09	Z..005A4	25	5	50	250	300	35	110	15	3
D09	Z..005A6	25	6,5	50	250	250	45	100	15	4
D09	Z..005A8	25	8	50	250	200	50	100	15	5
D09	Z..005A9	25	10	50	250	150	60	100	15	6
D09	Z..008A6	9	25	50	250	180	60	70	10	3
D09	Z..008A8	12	25	50	250	140	70	45	7	4
D09	Z..008A9	15	25	50	250	100	80	45	7	5
D09	Z..010A4	12,5	45	50	350	600	90	200	15	3
D09	Z..010A6	16	45	50	350	500	90	200	15	4
D09	Z..010A8	20	45	50	350	400	90	200	15	5
D09	Z..010A9	25	45	50	350	300	90	200	15	6
D09	Z..015A4	15	45	50	350	400	90	200	15	3
D09	Z..015A6	20	45	50	350	330	90	200	15	4
D09	Z..015A8	25	45	50	350	270	90	200	15	5
D09	Z..015A9	30	45	50	350	200	90	200	15	6
D09	Z..025A4	25	70	75	450	800	100	400	20	3
D09	Z..025A6	32	70	75	450	670	100	400	20	4
D09	Z..025A8	40	70	75	450	530	100	400	20	5
D09	Z..025A9	50	70	75	450	400	100	400	20	6

Tabelle 46.3 Anbaubare Federdruckbremsen an Motorgröße D09

MOT	-	Motorgröße
BR Typ	-	Bremse Typ
P_{el}	-	Leistungsaufnahme der Magnetspule in W
M_{BR}	-	Bremsmoment in Nm
W_{max}	-	zulässige Schaltarbeit bei einmaliger Bremsung in 10^3 J
W_{th}	-	thermisch zulässige Schaltarbeit pro Stunde in 10^3 J
W_L	-	zulässige Schaltarbeit bis zum Tausch der Reibscheibe(n) in 10^6 J
t_A	-	Ansprechzeit beim Lüften in ms
t_{AC}	-	Ansprechzeit bei Einfallen mit wechselstromseitiger Unterbrechung in ms
t_{DC}	-	Ansprechzeit bei Einfallen mit gleichstromseitiger Unterbrechung in ms
ZF	-	Zahl der Druckfedern
	-	Vorzugstyp der Bremsenauswahl

Es stellt sich die Frage, ob die außerordentlich große Spanne der verfügbaren Nennbremmomente von 1,5...50 Nm für die Motorbaugröße D09 überhaupt **technisch sinnvoll** ist. **Bild 46.4** gibt hierzu eine Antwort:

Die Bemessungsmomente der 4poligen Motoren der Baugröße D09 liegen bei Auslegung für Dauerbetrieb S1 im Bereich 7,5...15 Nm – in der Graphik markiert mir CAT (S1, 2p = 4). In Sonderauslegung für Kurzzeitbetrieb S2 oder Aussetzbetrieb S3/S6 wird ein Motor-Bemessungsmoment von 20 Nm erreicht. Bei Hubbetrieb wird dazu eine Bremse mit 40 Nm benötigt – in der Graphik markiert mit SPEC (S2 HUB). Das untere Ende des benötigten Bereiches wird von einem Positioniermotor mit Drehzahlverhältnis 1 : 6 (Polumschaltung 12/2) markiert. Die kleinste gelistete Motorleistung ist 0,063/0,4 kW, das zugehörige Bemessungsmoment 1,29/1,36 Nm. Für eine weiche Auslaufbremsung sollte das Bremsmoment nicht höher als etwa 1,5 Nm sein.

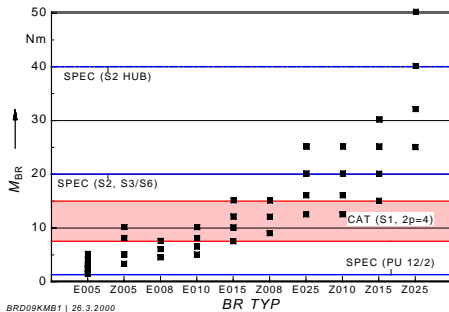


Bild 46.4
Anbaubare Bremsen beim Motortyp D09
Angebot von Bremsen (BR TYP) und
Bremsmoment (M_{Br})
Anforderungen bei der Auslegungsbreite
des Motors

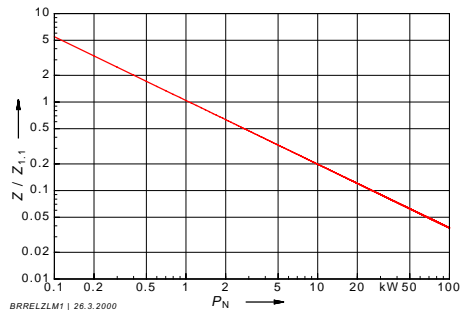
- CAT (S1, 2p=4) – 4polige Katalogtypen für Betriebsart S1
- SPEC (S2, S3/S6) – Sondertypen für Betriebsarten S2, S3 und S6
- SPEC (S2 HUB) – Sondertypen für Betriebsarten S2, S3 und S6, Hubbetrieb
- SPEC (PU 12/2) – Sondertyp polumschaltbar 12/2polig

47 Arbeitsvermögen großer Bremsen

Wird die Größe einer Federdruckbremse nur nach dem erforderlichen Nenn-Bremsmoment bestimmt, so zeigt die Nachrechnung über den bei Getriebemotoren üblichen Leistungsbereich von etwa 0,1 bis 100 kW eine bemerkenswerte Tendenz: Während es nämlich bei Antrieben mit relativ kleiner Nennleistung (etwa unter 10 kW) im Allgemeinen keine Schwierigkeiten bereitet, auch bei hoher Schalthäufigkeit (z. B. einige hundert Schaltungen je Stunde) eine akzeptable Standzeit der Bremse zu erreichen, ist bei **größeren Bemessungsleistungen** Vorsicht geboten.

Bild 47.1 zeigt die relative zulässige Schalthäufigkeit von Bremsen, deren Nennmoment wurde so berechnet, dass sich die gleiche Standzeit oder Lebensdauer der Bremscheiben ergibt. Setzt man die unter dieser Bedingung zulässige Schalthäufigkeit eines Bremsmotors mit Bemessungsleistung 1,1 kW als 1, so lässt ein 0,1-kW-Motor etwa die fünffache Schalthäufigkeit zu. Ein Motor mit Bemessungsleistung 100 kW würde hingegen nur etwa 4% der Schalthäufigkeit des 1,1-kW-Motors erlauben! Dieser große Unterschied erklärt sich aus verschiedenen physikalischen Einflüssen, die sich überlagern: Unter anderem steigt das Massenträgheitsmoment der Rotoren von Drehstrom-Asynchronmotoren überproportional zur Nennleistung an.

Bild 47.1
Relativ zulässige Schalthäufigkeit von Standardbremsen für Motoren der Bemessungsleistung P_N bei gleicher rechnerischer Lebensdauer



Bildet man ein »bezogenes Rotor-Massenträgheitsmoment«, also einen Wert kgm^2/kW , so zeigt **Bild 47.2**, dass der 100-kW-Motor gegenüber dem »Einheitsmotor« mit 1,1 kW etwa die siebenfache Rotormasse benötigt, um 1 kW Bemessungsleistung zu bilden! Diese relativ große Eigenmasse muss bei Schaltbetrieb beschleunigt und verzögert werden und begrenzt die zulässige Schalthäufigkeit. Die **Arbeit verursachende Eigenmasse** des Antriebes **steigt überproportional** an, dagegen nimmt das »Arbeitsvermögen« einer Reihe von Federdruckbremsen bei weitem nicht proportional mit ihrem Nennmoment (also mit der Bemessungsleistung des zugeordneten Motors) zu.

Aus **Bild 41.4.2** ist ersichtlich, dass eine Bremse von 100 Nm nur etwa das dreifache Arbeitsvermögen einer Bremse von 10 Nm aufweist. Dies hängt damit zusammen, dass die Reibfläche (also das zur Verfügung stehende Abriebvolumen) innerhalb einer Bremsenreihe weit weniger ansteigt als das Nennmoment der Bremse.

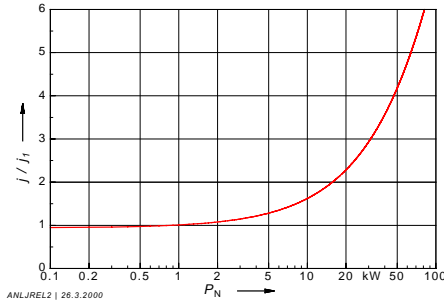


Bild 47.2
Bezogenes Rotor-Massen-
trägheitsmoment

Bild 47.3 zeigt diesen Zusammenhang wiederum in Form bezogener Größen, also unter Verwendung eines Wertes Fläche/Bremsmoment (cm^2/Nm), in Relation zur »Einheitsbremse« 10 Nm. Nach diesem Diagramm geht das je Drehmoment-Einheit verfügbare Verschleißvolumen auf etwa ein Drittel zurück, wenn das Nennmoment der Bremse innerhalb der Baureihe von 10 auf 100 Nm ansteigt.

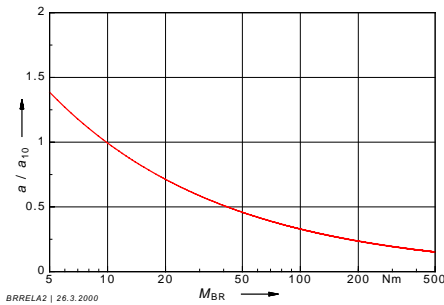


Bild 47.3
Bezogene Reibfläche von Scheiben-
bremsen im Vergleich zur Bremse mit
Nennmoment $M_{BR} = 10 \text{ Nm}$

Diese Betrachtungen zeigen, dass gerade **bei großen Antriebseinheiten eine sorgfältige Nachrechnung der Schaltarbeit notwendig** ist und dass die im Abschnitt 41.3 geschilderten elektrischen **Rückschalhilfen** besonders wichtig sein können. Eine kostengünstige und betriebssichere Lösung ergibt sich auch, wenn das maximal mögliche Bremsmoment einer Baugröße nicht voll ausgenützt wird oder wenn eine Einscheibenbremse bei halbiertem Federdruck, also gleichbleibendem Bremsmoment, zur **Zweischeibenbremse** mit doppeltem Arbeitsvermögen ausgebaut wird.

VI POSITIONIEREN

48 Allgemeines zur Positionierung

Vergleicht man die Lieferanteile der Getriebe-Bremsmotoren, die für das klassische Anwendungsgebiet »Hubantriebe« vorgesehen sind mit der großen Stückzahl von Motoren, die z. B. in der Fördertechnik zum »Positionieren« gebraucht werden, so wird die Bedeutung dieses Anwendungsgebietes deutlich. Dieser Abschnitt befasst sich deshalb mit einigen grundsätzlichen Aspekten und mit gebräuchlichen Lösungen.

Bei der Weiterentwicklung elektrischer Antriebe ist ein deutlicher Trend zu größerer Schalthäufigkeit und zu höheren Anforderungen an die Positioniergenauigkeit zu beobachten. Während früher der Elektromotor durchlaufend betrieben und das Fördergut oder Werkzeug mit mechanischen Systemen geschaltet und schrittweise bewegt wurde, kann heute der Bremsmotor direkt **takten und positionieren**.

Besonders ausgeprägt ist diese Entwicklung bei Servoantrieben und Schrittmotoren, wie sie in der modernen Handhabungstechnik benötigt werden. Aber auch in der Peripherie solcher »Roboter« werden Positionierantriebe eingesetzt.

Bremsen und Positionieren – das sind also wichtige Teilaufgaben, die elektrischen Antrieben im Rahmen der Automatisierung und Rationalisierung übertragen wurden.

Bei sehr hohen Geschwindigkeiten und extremen Anforderungen an die Haltegenauigkeit werden Motoren mit **stufenlos einstellbarer Drehzahl** eingesetzt – statt Gleichstrom-Nebenschlussmotoren mit verstellbarer Ankerspannung heute vorzugsweise Drehstrom-Umrichter motoren mit Frequenzverstellung über einen statischen Umrichter. Die Geschwindigkeit kann von einem Sollwertgeber bis zum Stillstand »geführt« werden. Der Aufwand für diese moderne Lösung ist bei Berücksichtigung der Gesamtkosten gerechtfertigt.

Ein abnehmendes Verwendungsfeld bleibt für die konventionelle Lösung mit einem polumschaltbaren Drehstrommotor mit **zwei festen Drehzahlstufen** im Verhältnis maximal 10 : 1, die über konventionelle Komponenten der Schaltgerätetechnik angesteuert werden.

Die Rückschaltung von der hohen auf die niedrige Drehzahl erfolgt durch generatorische Bremsung, wobei die Positioniergeschwindigkeit ohne jeglichen Aufwand für eine Steuerung oder Regelung mit sehr engen Toleranzen erreicht wird. Die Umschaltzeiten und -wege sind extrem niedrig, was im Sinne der Rationalisierung sehr erwünscht ist, oftmals jedoch mit Rücksicht auf empfindliches Transportgut zu unerwünscht hohen Verzögerungen und damit zu einem nicht ganz ruckfreien Fahrverhalten führt – siehe hierzu Abschnitt 2.

Aus der Positioniergeschwindigkeit wird mit einer angebauten Federdruckbremse mechanisch gebremst – diese Bremse wirkt bei eventuellem Stromausfall als Sicherheitsbremse und hält die Last fest.

Da die Bewegungen in der Transport- und Handhabungstechnik mit relativ niedrigen Geschwindigkeiten – in den meisten Fällen unter etwa 1,5 m/s – ablaufen, werden entsprechend niedrige Drehzahlen an der Antriebsstation benötigt, wie sie von Drehstrom-Normmotoren nicht direkt zur Verfügung gestellt werden können. Dem Elek-

tromotor muss daher ein Untersetzungsgetriebe nachgeschaltet werden, das zur Vereinfachung des Anbaus und aus Platzgründen zweckmäßig mit dem Motor zu einer Einheit – dem Getriebemotor – integriert ist.

Polumschaltbare Positionier-Getriebemotoren und Umrichter-Getriebemotoren werden in der Fördertechnik und in Handhabungsgeräten verwendet.

Die **Bilder 48.1 bis 48.3** zeigen drei der vielen Anwendungsmöglichkeiten.



Bild 48.1
Vertikalförderer für Pkw-Aufbauten
Motor polumschaltbar 1 : 6; mit
Federdruckbremse und (abgedecktem)
Vierkant-Wellenende zum Einrichten;
Reserve-Antrieb vorbereitet
(Hersteller: STOTZ KRÄMER GmbH)



Bild 48.2
Elektro-Hängebahn (EHB) mit 1 : 4
polumschaltbaren Getriebemotoren
(Hersteller : TRANSLIFT WHYLEN)

Bild 48.3
Palettierautomat für Zementsäcke
Kegelrad-Getriebemotoren mit
Zwangssynchronisation der vier
Antriebsstationen; polumschaltbar 1 : 6
(Hersteller: BEUMER)



49 Toleranzen

Die Nachlaufkonstanz wird auf Ausstellungen und Messen oft demonstriert, indem von einer mit dem Rotor umlaufenden Lochscheibe magnetische oder optische Impulse auf einen elektronischen Zähler gegeben werden. Die Toleranz bleibt während der Beobachtungszeit meist im Bereich von einigen Promille. Man sollte sich die kritische Frage stellen, weshalb unter den konstanten Bedingungen der kurzen Beobachtungszeit überhaupt nennenswerte Abweichungen auftreten sollen: Einlaufzustand und Temperatur der Reibbeläge sowie alle anderen Randbedingungen geben dazu keinen Anlass. Für die Funktion eines Antriebssystems kann jedoch entscheidend sein, wie sich die Nachlauf toleranz im **Laufe der Standzeit** der Bremse – also unter den stark wechselnden Bedingungen von z.B. Rautiefe, Abrieb, Temperatur, Luftfeuchte verändert. Berücksichtigt man alle Einflüsse, so ist aus Sicherheitsgründen mit einer **Toleranz für Bremsmoment und Bremsweg von etwa $\pm 25\%$** zu rechnen. Diese relativ große Toleranz wird verständlicher, wenn man bedenkt, welche Parameter auf eine Reibpaarung einwirken (siehe Abschnitt 49.2).

49.1 Antrieb

Für die synchrone Drehzahl eines Drehstrom-Asynchron-Motors gilt bekanntlich

$$n_{\text{sy}} = \frac{60 \cdot f}{p}$$

n_{sy}	–	Synchrondrehzahl in r/min
f	–	Frequenz in Hz
p	–	Polpaarzahl

Da die Frequenz der öffentlichen Versorgungsnetze fast keine Abweichung vom Sollwert 50 Hz aufweist, ist auch die Synchron-Drehzahl praktisch konstant. Die tatsächliche Drehzahl ändert sich um den lastabhängigen Schlupf: Bei motorischem Betrieb ist sie geringer, bei generatorischem Betrieb höher als die Synchron-Drehzahl. **Bild 49.1.1** zeigt die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie mit den hier relevanten Werten.

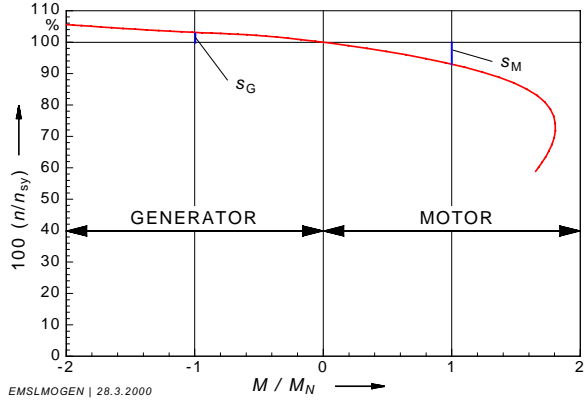
49.1 Antrieb

Bild 49.1.1

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie im Motor- und Generatorbereich

s_G – Schlupf als Generator

s_M – Schlupf als Motor jeweils bei Bemessungsmoment

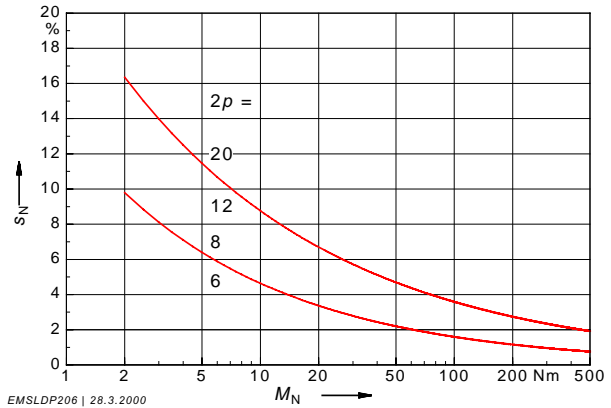


Die Höhe des Bemessungsschlupfes ist von Größe und Polzahl eines Motors abhängig; **Bild 49.1.2** gibt Richtwerte für Positioniermotoren.

Setzt man den Schlupf im Generatorbetrieb gleich dem Schlupf im Motorbetrieb – er ist tatsächlich etwas geringer – so beträgt die maximale Drehzahlabweichung unter Berücksichtigung von Belastungsschwankungen (Leerlauf – Bemessungslast) und Drehmomentwechsel (treibend – getrieben) etwa +2 bis +30%.

Bild 49.1.2

Richtwerte für den Bemessungsschlupf s_N von Positioniermotoren mit verschiedenen Bemessungsmomenten M_N und Polzahlen $2p$



49.2 Mechanische Bremse

Nach der Veröffentlichung [5.6] ist das Bremsmoment abhängig von:

- Temperatur
- Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme, Wärmeausdehnungskoeffizient, Dichte
- Gleitgeschwindigkeit
- Druck
- Dauer der Beanspruchung wie Beanspruchungsfrequenz (Schalthäufigkeit), Intervalldauer
- Oberflächenzustand wie Oberflächengüte, Härte
- Spannungszustand
- chemische und elektrostatische Einflüsse wie Massenanziehung, Kaltverschweißung, molekulare Wechselwirkung
- Umwelteinflüsse wie Nässe, Verschmutzung
- Bremssystem (mit oder ohne Selbstverstärkung).

Nach Untersuchungen [5.5] kann der Reibwert je nach Werkstoff, Rauhtiefe und Gleitgeschwindigkeit zwischen 0,3 und 0,45, also um mehr als 30%, schwanken (vgl. **Bild 49.2**).

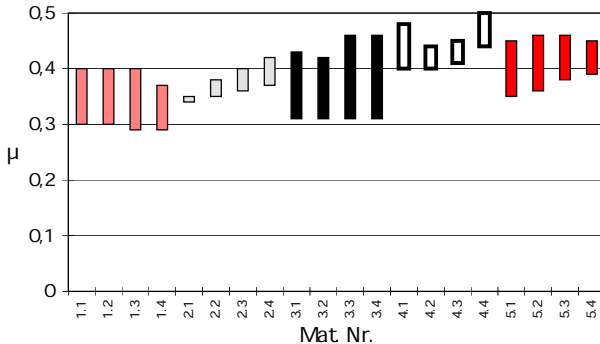


Bild 49.2
Schwankung der Reibungskennzahl μ bei fünf verschiedenen Werkstoffen (1.x ... 5.x) und vier Rautiefen Rz (x.1 ... x.4)

49.3 Steuerung

Bei der **wegabhängigen Steuerung** werden die Impulse von Sensoren oder anderen Kontrolleinrichtungen, die an der vorgegebenen Fahrstrecke fest angebracht sind, erfasst und steuerungstechnisch verarbeitet. Dadurch wird die Steuerungsfunktion immer exakt an der gleichen Stelle eingeleitet.

Eine wegabhängige Steuerung sollte bei Positionierantrieben immer dann eingesetzt werden, wenn Haltegenauigkeit gefordert wird.

49.3 Steuerung

Die Streubreite hängt somit nur von der Toleranz der eingesetzten Bauteile ab, die in den Abschnitten 49.3.1 bis 49.3.2 beschrieben werden.

Bei der **zeitabhängigen Steuerung** werden die Impulse mit Zeitgliedern (z. B. Zeitrelais) steuerungstechnisch verarbeitet. Aus dem vorgegebenen v - t -Diagramm werden einzelne Zeitabschnitte für den Fertigungsablauf errechnet und auf die Zeitglieder übertragen. Da diese mit Toleranzen behaftet sind, kann die Steuerungsfunktion nicht immer an der gleichen Stelle erfolgen.

Werden die Zeitabschnitte seriell abgearbeitet, kann die Streuung beim Halten zu groß werden.

Bei sehr hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit können die durch die Steuerung verursachten Toleranzen nicht vernachlässigt werden.

49.3.1 Ansprechzeiten von Schützen

Bei den Schützen sind zwei Betätigungsformen zu unterscheiden:

- Wechselstrombetätigte Schütze werden vorwiegend in der konventionellen Steuerungstechnik eingesetzt. Bei mittleren Größen beträgt ihre Ansprechzeit beim Schließen ca. 10...20 ms (Streuung ca. 10 ms). Die Ansprechzeit beim Öffnen ist ca. 5...14 ms (Streuung ca. 9 ms).
- Gleichstrombetätigte Schütze werden häufig im Zusammenhang mit der SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) verwendet. Bei mittleren Schützengrößen beträgt ihre Ansprechzeit beim Schließen ca. 40...55 ms (Streuung ca. 15 ms) und beim Öffnen ca. 6...10 ms (Streuung ca. 4 ms).

Für beide Betätigungsarten ist zusätzlich mit einer Lichtbogenzeit von ca. 5 ... 10 ms zu rechnen. Die Gesamtausschaltzeit ergibt sich aus der Addition der Ansprechzeit beim Öffnen und der Lichtbogenzeit.

Die genannten Richtwerte gelten für Schütze, die für Motoren mit einer Bemessungsleistung von etwa 5,5 kW geeignet sind. Verbindliche Werte sind den Datenblättern der Schaltgerätehersteller zu entnehmen.

49.3.2 Näherungsschalter

Bei berührungslosen kapazitiven oder induktiven Näherungsschaltern treten Toleranzen auf, die **gerätebezogene** Ursachen haben können; z. B. die Schalthysterese, die Reproduzierbarkeit sowie Temperatur- und Spannungsabhängigkeit der Näherungsschalter. Bei den kapazitiven Näherungsschaltern ist noch zusätzlich die Abhängigkeit von der Luftfeuchte zu beachten.

Anlagenbezogene Toleranzen sind abhängig von der Präzision einer Anlage. So können z. B. bei einer Rollentransportbahn durch verbogene Anfahrlineale oder durch Differenzen in den Abständen zwischen der aktiven Fläche der Näherungsschalter und des Anfahrlineals die Positionen nur ungenau angefahren werden. In **Bild 49.3.2** ist diese Problematik in vereinfachter Form dargestellt.

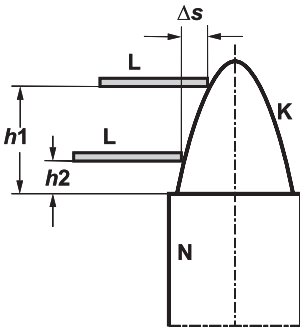


Bild 49.3.2

Auswirkung von unterschiedlichen Abständen h_1 und h_2 des Anfahrlineals (L) auf das Erreichen der Ansprechkontur (K) eines Näherungsschalters (N); hieraus ergibt sich eine Differenz Δs des Ansprechpunktes

49.3.3 Zeitrelais

Die Toleranzen der Zeitrelais sind temperatur- und spannungsabhängig. Die Hersteller geben unterschiedliche Toleranzen an, deshalb sollten im konkreten Fall die Werte für ein bestimmtes Produkt den technischen Datenblättern entnommen werden. Die Wiederholgenauigkeit eines eingestellten Wertes ist bei den meisten Herstellern mit einer Toleranz von $\pm 0,5\%$ bis $\pm 1\%$ angegeben.

49.4 SPS (Speicherprogrammierbare Steuerungen)

Wird bei einer Maschinensteuerung eine speicherprogrammierbare Steuerung eingesetzt, muss mit einer **zusätzlichen Steuerung** gerechnet werden, wenn die Steuerung nicht auf kurze Steuerzeiten ausgelegt ist.

Die Streubreite hängt von mehreren Einflüssen ab:

- An welcher Stelle im Ablauf des Anwenderprogrammes befindet sich der Adressenzähler zum Zeitpunkt des Steuerimpulses?
- Zahl der Anweisungen im Anwenderprogramm, d. h., wie lang ist die Zykluszeit?

Die Zykluszeit ist also eine wichtige Einflussgröße für die Beurteilung der Positioniergenauigkeit. Bei Kompaktgeräten mit einer Speicherkapazität von max. 1 K = 1024 Anweisungen waren Zykluszeiten von ca. 30 bis 75 ms üblich. Moderne Geräte benötigen nur noch etwa 1...2 μ s pro Anweisung, d. h., für 1024 Anweisungen ergibt sich eine Zykluszeit von nur noch etwa 1...2 ms.

An einem Zahlenbeispiel soll diese technische Entwicklung und ihre Folgen aufgezeigt werden: Eine SPS-Steuerung mit einem Anwenderprogramm von 860 Anweisungen steuert einen Verschiebewagen mit einer Fahrgeschwindigkeit von 10 m/min. Unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten ergeben sich Fahrabschnitte mit unterschiedlicher Steuerung.

In **Bild 49.4** sind drei Möglichkeiten aufgezeigt. Bei der Berechnung des Weges wurde die annähernd konstante Einschalt- und Ausschaltverzögerungszeit der SPS-Steuerung mit ca. 6 ms berücksichtigt.

49.4 SPS (Speicherprogrammierbare Steuerungen)

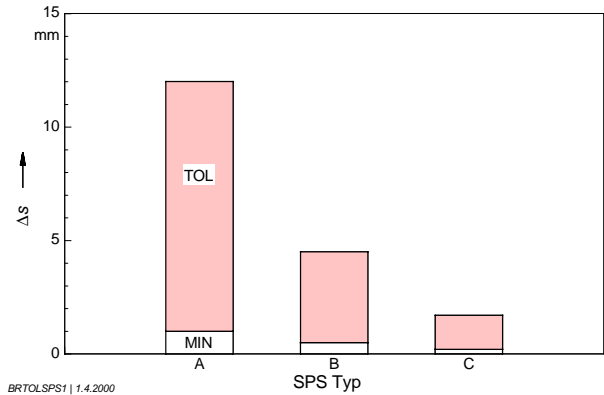


Bild 49.4 Wegtoleranzen s , verursacht durch SPS-Steuerungen mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten für ein Programmbeispiel mit 860 Anweisungen

- TOL – Toleranz im Bremsweg
- MIN – kleinster Bremsweg
- A – Kompakt-SPS-Steuerung mit Bearbeitungszeit 75 ms / 1 K
- B – SPS-Steuerung mit Bearbeitungszeit 20 ms
- C – SPS-Steuerung mit Bearbeitungszeit 2 ms

Die Reaktionszeit einer SPS-Steuerung ist die zeitliche Verzögerung zwischen der binären Veränderung am Eingang und der Reaktion am zugehörigen Ausgang. Sie umfasst die Bearbeitungszeit für die Anzahl der Anweisungen und die Einschalt- und Ausschaltverzögerungszeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen:

Bei Verwendung von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) können bei relativ »schnellen« Geräten zusätzliche Zeiten (bedingt durch Zykluszeit und Reaktionszeit) von etwa 5...30 ms, bei »langsamen« Modellen bis zu 75 ms hinzukommen. Wenn es also auf besonders kurze und eng tolerierte Ansprechzeiten ankommt, ist der Auswahl der Steuergeräte besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

50 Getriebelose

Bei extremen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit ist auch der Einfluss des Flankenspiels zu berücksichtigen. Um ein Klemmen der Verzahnung, also Fressen der Zahnflanken und extreme Lagerbelastung, sicher zu vermeiden, muss zwischen den Zähnen ein Mindest-Flankenspiel vorhanden sein. Die Größe dieses Drehflankenspiels im Teilkreis beträgt, unabhängig von der Qualität der Bearbeitung und im hier behandelten Größenbereich auch fast unabhängig vom Teilkreisdurchmesser oder Modul, etwa 0,1...0,2 mm. Für die folgenden Überlegungen wird mit einem **Flankenspiel $S = 0,15\text{ mm}$** gerechnet.

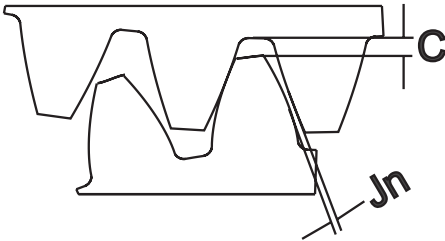


Bild 50
Definition von Kopfspiel C und Flankenspiel j_N nach DIN 3960 ($S = j_N$)

50.1 Richtwerte für übliche Getriebe

Bei hoher Verzahnungsqualität sind die in **Bild 50.1.1** gezeigten Mindestwerte für das Eingriffs-Flankenspiel j_N festgelegt

Bei Auftragung über dem Achsabstand AA wird deutlich, dass das Flankenspiel weit weniger zunimmt als eine lineare Funktion (LIN). Daher sind bei relativ kleinen Getrieben erheblich größere Verdrehwinkel innerhalb der Lose zu erwarten als bei größeren Getrieben.

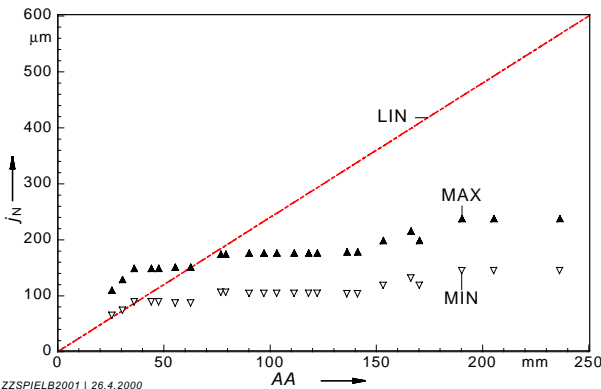
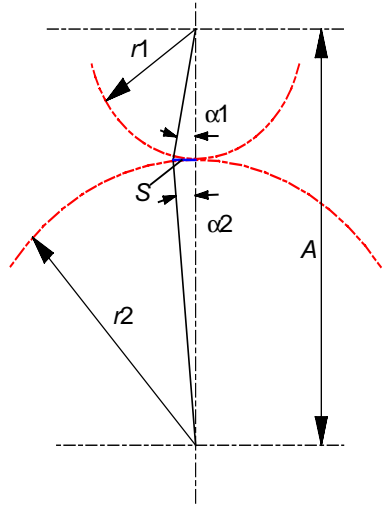


Bild 50.1.1
Genormte Mindestwerte für das Flankenspiel j_N in Abhängigkeit vom Achsabstand AA

50.1 Richtwerte für übliche Getriebe

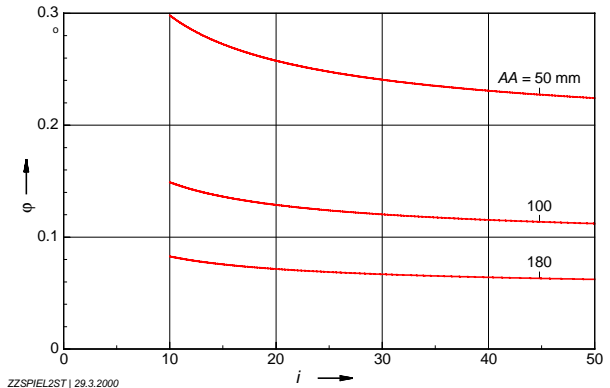
Für die umfangreiche Berechnung ist es zweckmäßig, die Teilkreisradien von Ritzel und Rad (r_1 und r_2) in Abhängigkeit vom Achsabstand (A) und der Untersetzung (i) auszudrücken (**Bild 50.1.2**).

Bild 50.1.2
Vereinfachte geometrische Darstellung der Auswirkung des Zahnspiels S auf die Verdrehwinkel an Ritzel α_1 und Rad α_2



Aus den Ableitungen in [5.2] ergibt sich, dass der Verdrehwinkel sehr stark vom Achsabstand (also von der Getriebegröße) abhängig ist, wobei sich die Lose bei kleinen Getrieben relativ stärker auswirkt als bei großen. Der Einfluss der Untersetzung ist relativ gering (**Bild 50.1.3**).

Bild 50.1.3
Richtwerte für den Verdrehwinkel (φ) an der Arbeitwelle von 2stufigen Stirnradgetrieben in Abhängigkeit von Untersetzung i und Achsabstand AA



Bei überschlägigen Rechnungen kann für den Verdrehwinkel an der Arbeitswelle bei blockierter Läuferwelle mit folgenden Richtwerten – unabhängig von der Untersetzung – gerechnet werden:

- **kleine Getriebe:** ca. $0,3^\circ$
- **mittlere Getriebe:** ca. $0,15^\circ$
- **große Getriebe:** ca. $0,1^\circ$

50.2 Auswirkung auf lineare Bewegung

Unter Verwendung dieser Richtwerte lassen sich die im **Bild 50.2** dargestellten Auswirkungen auf eine lineare Bewegung, abhängig vom Wirkdurchmesser der Übertragungsmittel, errechnen.

Bei üblichen Wirkdurchmessern der Übertragungsmittel (unter etwa 250 mm) bleiben die Toleranzen infolge Flankenspiels unter etwa 0,5 mm, also in sehr engen Grenzen.

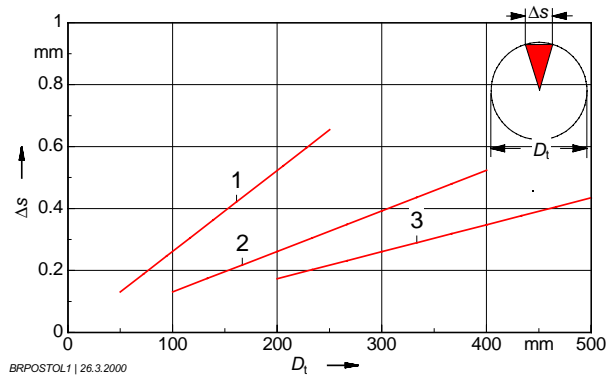


Bild 50.2 Auswirkung des Flankenspiels auf die Abweichung s einer Position, abhängig vom Wirkdurchmesser des Übertragungsmittels D_t ; gültig für alle Untersetzungen

- 1 kleinere Getriebe
- 2 mittlere Getriebe
- 3 größere Getriebe im

Fertigungsbereich Danfoss Bauer

51 Drehzahlverhältnis 1 : 2 (Dahlanderschaltung)

Polumschaltung im Verhältnis 1 : 2 wird besonders häufig angewandt, weil hier durch ein einfaches Umlegen von Schaltverbindungen zwischen den Anschlussklemmen die Stromrichtung in Teilsträngen der Wicklung so verändert wird, dass sich zwei im Verhältnis 1 : 2 stehende Drehfeldgeschwindigkeiten ergeben. Diese Schaltungsart wird nach dem Erfinder als »Dahlanderschaltung« bezeichnet.

Im Gegensatz zu zwei getrennten Wicklungen (Abschnitt 52) ist bei beiden Drehzahlen die ganze Nutfüllung voll aktiv – es ergibt sich also eine relativ hohe Modellausnutzung. Dieser Vorteil ist zwar auch bei Sonderschaltungen vorhanden, doch benötigen diese entweder eine sehr hohe Klemmenzahl oder eine sehr komplizierte, vielfach unterteilte Wicklung. Die Dahlanderschaltung ist eine relativ billige Lösung für die Drehzahlabstufung, wenn auch allerdings nur im Verhältnis 1 : 2, was hohen Ansprüchen an die Positioniergenauigkeit nicht genügt.

51.1 Äußere und innere Strom- und Feldrichtungen bei der Dahlanderschaltung

In stark vereinfachter Form ist in **Bild 51.1** gezeigt, wie sich durch eine einfache Änderung der Klemmenschaltung die Strom- und Durchflutungsrichtung in den jeweiligen Halbsträngen pro Wicklungsstrang umkehren und wie eine andere Feldverteilung (Polzahl) zustande kommt.

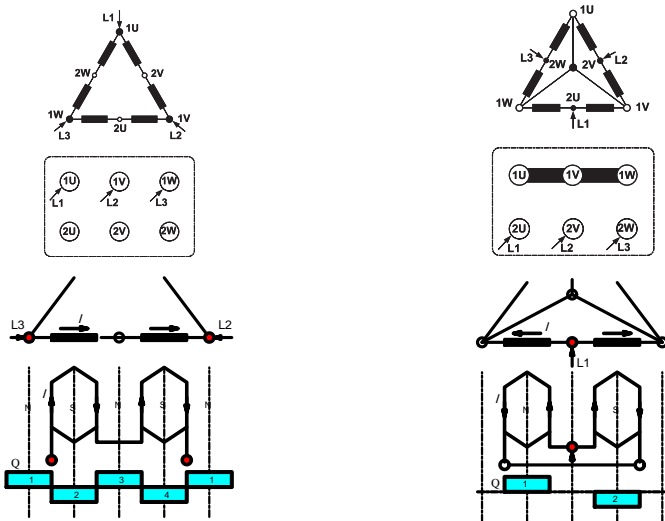


Bild 51.1 Vereinfachte Darstellung der Klemmenschaltung sowie der Richtung von Strom I und magnetischer Durchflutung Θ bei Dahlanderschaltung Dreieck/Doppelstern für 4/2 Pole

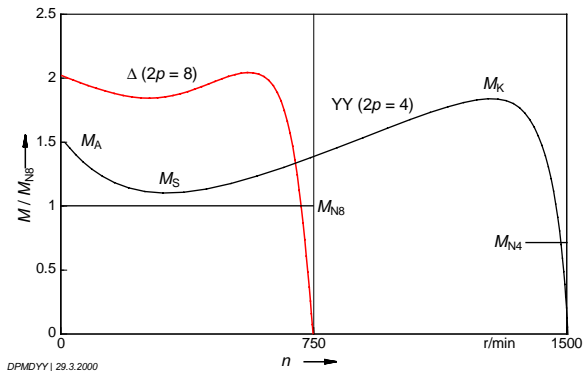
51.2 Modellausnützung bei Dahlanderschaltung

Die starre Umschaltmöglichkeit nach Abschnitt 51.1 erlaubt nur eine sehr unvollkommene Anpassung der Wicklung an die Auslegung, die für jede einzelne Polzahl optimal wäre. Auch die Paketabmessungen – also Läuferdurchmesser und Rückenhöhe bei gegebenem Außendurchmesser – können nur ein Kompromiss zwischen den gegenläufigen Anforderungen der beiden Polzahlen sein. Schließlich ist die Wicklung bei der niedrigen Polzahl relativ stark geseht, hat also einen schlechten Wickelfaktor. Aufgrund dieser Gegebenheiten liegt die Modellausnützung bei polumschaltbaren Motoren nur etwa bei 60...80% der Leistung eines vergleichbaren Motors mit fester Drehzahl.

51.3 Relative Höhe der Drehmomentkennlinien

Bei der Dahlanderschaltung ist die relative Höhe des magnetischen Flusses und damit die Drehmoment-Kennlinie bei den beiden Polzahlen fest vorgegeben. Das Beispiel in **Bild 51.3.1** zeigt, dass die Absolutwerte der Drehmomente in der YY-Schaltung (hohe Drehzahl) meist etwas niedriger liegen als in der Δ -Schaltung (niedrige Drehzahl).

Bild 51.3.1
 Beispiel für die relative Höhe der Drehmomentkennlinien bei Dahlanderschaltung
 $\Delta(2p = 8)$: Dreieckschaltung für hohe Polzahl (z.B. 8 – niedrige Drehzahl)
 YY ($2p = 4$): Doppelsternschaltung für niedrige Polzahl (z.B. 4 – hohe Drehzahl)



Mit Rücksicht auf einen sicheren Anlauf und auf die notwendige Überlastbarkeit (Verhältnis Kippmoment/Bemessungsmoment M_K/M_N) muss das Bemessungsdrehmoment bei der hohen Drehzahl (im Beispiel bei der 4poligen Kennlinie M_{N4}) gegenüber der Grundschtaltung (im Beispiel 8polig, M_{N8} etwas reduziert werden. Aus thermischen Gründen fällt diese Reduktion meist etwas stärker aus, als es von den Drehmomentkennlinien her erforderlich wäre. Damit ergibt sich für polumschaltbare Drehstrom-Getriebemotoren in den üblichen Polzahlen bei Dahlanderschaltung etwa folgende Leistungs- und Drehmoment-Abstufung bei Modellausnützung in den von den VDE-Bestimmungen gezogenen Grenzen:

51.3 Relative Höhe der Drehmomentkennlinien

Polumschaltung Δ/YY	Relative Drehmomente		Relative Leistungen	
	niedrige Drehzahl	hohe Drehzahl	niedrige Drehzahl	hohe Drehzahl
4/2	100%	ca. 65%	100%	ca. 130%
8/4	100%	ca. 75%	100%	ca. 150%
12/6	100%	ca. 75%	100%	ca. 150%

Tabelle 51.3.2 Richtwerte für die Abstufung von Drehmoment und Leistung bei polumschaltbaren Drehstrommotoren in Dahlanderschaltung Δ/YY bei voller thermischer Modellausnutzung

Während bei Drehstrom-Normmotoren (ohne Getriebe) im Allgemeinen die maximal zulässige thermische Grenzleistung in den Katalogen erscheint, muss dies bei Getriebemotoren nicht immer die preislich günstigste Lösung sein.

Setzt man das Drehmoment bei hoher Drehzahl als 100%, so beträgt das Drehmoment bei der niedrigen Drehzahl bei einem 4/2poligen Motor etwa 150% ($1/0,65 = 1,5$).

Das Getriebe muss für diese 150% Drehmoment bemessen werden.

Bei langsam laufenden Antrieben kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Drehmomentbedarf vorwiegend zur Überwindung von Reibung oder Hublast dient, also bei beiden Drehzahlen (Geschwindigkeiten) etwa gleich groß ist.

Das Drehmoment-Angebot in der niedrigen Drehzahl (150%) ist also viel zu hoch. Das Getriebe könnte für 100% Drehmoment bemessen und damit preisgünstiger werden.

In Danfoss-Bauer-Katalogen wird daher folgende preisgünstigere Abstufung der polumschaltbaren Motoren angeboten:

Polumschaltung Δ/YY	Relative Drehmomente		Relative Leistungen	
	niedrige Drehzahl	hohe Drehzahl	niedrige Drehzahl	hohe Drehzahl
4/2	100%	ca. 100%	100%	ca. 200%
8/4	100%	ca. 100%	100%	ca. 200%

Tabelle 51.3.3 Abstufung von Drehmoment und Leistung bei polumschaltbaren Drehstrom-Getriebemotoren in Dahlanderschaltung mit preisgünstiger Getriebeausnutzung für konstantes Moment

52 Andere Drehzahlverhältnisse (getrennte Wicklungen)

Für zwei Drehzahlen, die vom Verhältnis 1 : 2 abweichen, werden meist zwei getrennt in einen Stator eingelegte Wicklungen verwendet. Der wickeltechnische Aufwand an Einlegearbeit, Schaltverbindungen und Isolierung (Spule gegen Spule und Wicklung gegen Wicklung) ist groß.

Eine maschinelle Bewicklung ist meist nicht möglich; der Anteil an Handarbeit (also der Lohnkostenanteil) ist relativ hoch.

Trotz dieses großen Aufwandes und trotz der ungünstigen Modellausnutzung sind polumschaltbare Motoren mit zwei getrennten Wicklungen sehr verbreitet: Sie bieten im Vergleich zu einem Schaltgetriebe die wesentlich einfachere Mechanik und die elegantere (elektrische) Steuerungsmöglichkeit.

Sonderschaltungen, bei denen der volle Nutraum ausgenützt wird, haben sich wegen der noch komplizierteren Wickeltechnik nicht allgemein durchsetzen können; vgl. [5.2].

52.1 Klemmenschtaltung

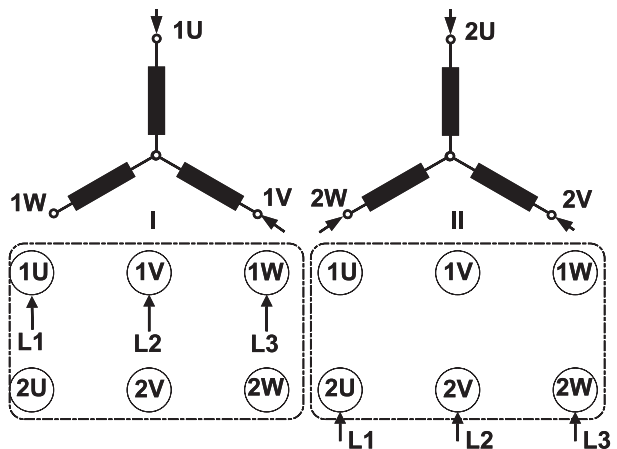
Bei Motoren mit zwei getrennten Wicklungen verschiedener Polzahl sind die Netzan-schlüsse wahlweise an die beiden Wicklungen zu legen.

Die Wicklungen sind im Normalfall im Motorinnern in Stern geschaltet und mit drei Enden ausgeführt.

Eine zusätzliche Spannungsumschaltung Δ/Y ist zwar grundsätzlich möglich, wird aber auf Sonderfälle beschränkt, da 12 Anschlussklemmen und ein in der Regel vergrößerter Klemmenkasten erforderlich sind.

Bild 52.1

Schaltung für zwei getrennte Wicklungen, zwei Drehzahlen I und II



52.2 Ausführbare Drehzahlverhältnisse

Für die ausführbaren Polzahlen gibt es physikalische und fertigungstechnische Grenzen: Die niedrigste Polzahl ist 2 (3000 r/min). Die höchste mit vertretbarem Aufwand noch ausführbare Polzahl ist von der Baugröße des Motors abhängig. Für eine Drehstrom-Einschichtwicklung gilt:

$$\text{Spulenzahl} = 1,5 \cdot \text{Polzahl}$$

Damit wird die

$$\text{Mindestnutzahl} = 2 \cdot \text{Spulenzahl} = 3 \cdot \text{Polzahl}$$

Polzahl	8	12	16	20
Mindestnutzahl	24	36	48	60

Tabelle 52.2.1 Mindestnutzahl in Abhängigkeit von der Polzahl

Bei kleinen Ständerbohrungen ergibt sich das Problem, die Mindestnutzahl auf dem vorhandenen Umfang unterzubringen, d. h. zu stanzen, zu isolieren, zu bewickeln.

Bild 52.2.2 soll die räumlichen Verhältnisse beispielhaft darstellen.



Bild 52.2.2

Statorschnitt eines Motors der Baugröße 80, Läuferdurchmesser 70 mm, 48 Nuten

52.2 Ausführbare Drehzahlverhältnisse

Für Danfoss-Dauer-Drehstrommotoren wurden aus den vorgenannten, fertigungstechnisch bedingten Gründen folgende Höchst-Polzahlen festgelegt.

Danfoss Bauer Typ	Entsprechende IEC-Achshöhe	Maximale Polzahl
D05.	56	8
D06.	63	12
D08..	80	12
D09..	90	12
D11..	112	16
D13..	132	20
D16..	160	20
D18..	180	20
DNF22	225	20
DNF25	250	20
DNF28	280	20

Tabelle 52.2.3 Maximal ausführbare Polzahl von Danfoss-Bauer-Drehstrommotoren in Abhängigkeit vom Typ (Achshöhe)

Die Polzahlen 10, 14 und 18 – die sich im Bereich von 2 bis 20 Polen theoretisch anbieten – werden nicht benützt, da sie bei anderen Polzahlen keine günstige Wicklungsanordnung erlauben.

Damit ergeben sich die folgenden Drehzahlverhältnisse:

Polzahlen	Synchr. Motordrehzahlen in r/min bei 50 Hz	Drehzahlverhältnis
8/6	750/1000	1 : 1,33
6/4	1000/1500	1 : 1,5
12/8	500/750	1 : 1,5
6/2	1000/3000	1 : 3
12/4	500/1500	1 : 3
8/2	750/3000	1 : 4
16/4	375/1500	1 : 4
20/4	300/1500	1 : 5
12/2	500/3000	1 : 6
16/2	375/3000	1 : 8
20/2	300/3000	1 : 10

Tabelle 52.2.4 Ausführbare Polzahlen, Drehzahlen und Drehzahlverhältnisse im Bereich der Polzahlen 2...20 (eingeschränkte Anwendung je nach Typgröße gemäß Tabelle 52.2.3 beachten)

Bei Positioniermotoren sind Drehzahlverhältnisse nach **Bild 52.2.5** üblich.

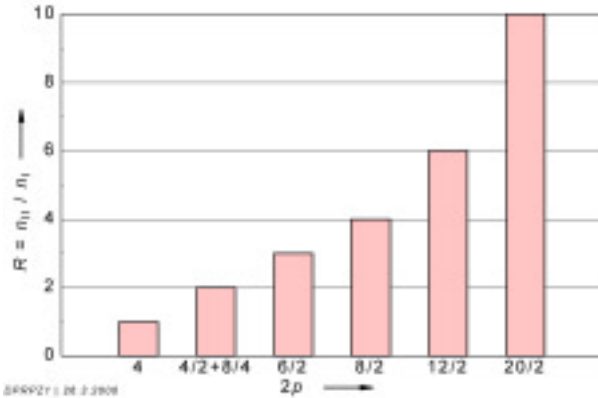


Bild 52.2.5
Drehzahlverhältnis R von polumschaltbaren Positioniermotoren mit zwei Drehzahlen; Dahlanderschaltung oder zwei getrennte Wicklungen

52.3 Modellausnützung bei getrennten Wicklungen

Während die Paketabmessungen und Nutformen eintouriger Motoren für die jeweilige Polzahl optimiert werden können, muss bei zwei getrennten Wicklungen (2 Polzahlen) ein Kompromiss eingegangen werden. Außerdem bleibt jeweils etwa die Hälfte des Wickelraumes in der Nut ungenützt. Die Modellausnützung ist daher im Vergleich zum eintourigen Motor relativ niedrig.

Polumschaltung	Leistung bei hoher Drehzahl
6/2	ca. 70...90%
8/2	ca. 70...90%
12/2	ca. 55...75%
16/2	ca. 30...60%
20/2	ca. 30...60%

Tabelle 52.3 Richtwerte für die Modellausnützung bei 2 getrennten Wicklungen im Vergleich zu 4poligen Motoren gleicher Modellgröße

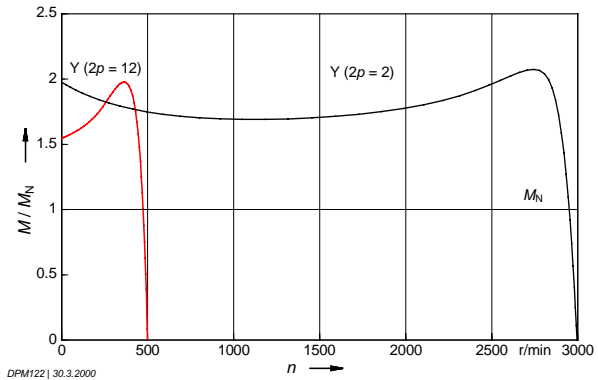
52.4 Relative Höhe der Drehmoment-Kennlinien

Die relative Höhe der Drehmomentkennlinien ist für die beiden Polzahlen – im Gegensatz zu der starren Kopplung bei der Dahlanderschaltung – in weiten Grenzen frei wählbar. Listenmäßige Motoren mit zwei getrennten Wicklungen sind für konstantes Bemessungsmoment bei beiden Drehzahlstufen ausgelegt.

Polzahl	Relative Überlastbarkeit bei			
	niedriger Drehzahl		hoher Drehzahl	
	M_A/M_N	M_K/M_N	M_A/M_N	M_K/M_N
6/2	1,6 ... 2,1	2,0 ... 2,2	1,8 ... 2,3	2,0 ... 2,8
8/2	1,6 ... 2,1	1,9 ... 2,1	1,8 ... 2,3	2,0 ... 2,8
12/2	1,6 ... 1,9	1,8 ... 1,8	1,8 ... 2,6	2,0 ... 2,8

Tabelle 52.4.1 Richtwerte für die relative Überlastbarkeit von polumschaltbaren Motoren mit zwei getrennten Wicklungen

Bild 52.4.2
Beispiel für die relative Höhe der Drehmomentkennlinien bei zwei getrennten Wicklungen



Das Beispiel zeigt in typischer, wenn auch nicht allgemein gültiger Form, dass die Drehmoment-Überlastbarkeit (Anzugsmoment und Kippmoment) bei der niedrigen Polzahl (hohen Drehzahl) meist etwas höher ist als bei der unteren Drehzahlstufe.

52.5 Kostenvergleich

Der folgende Kostenvergleich bezieht sich auf Getriebemotoren mit einer Drehzahl von etwa 100 r/min in der höchsten Drehzahlstufe. Auch die Nennleistung ist auf die höchste Drehzahlstufe bezogen. Der Vergleich kann nur einen groben **Anhaltspunkt** für die relativen Kosten des Antriebes geben; die Kostenanteile der Steuer- und Schaltgeräte sind nicht eingeschlossen.

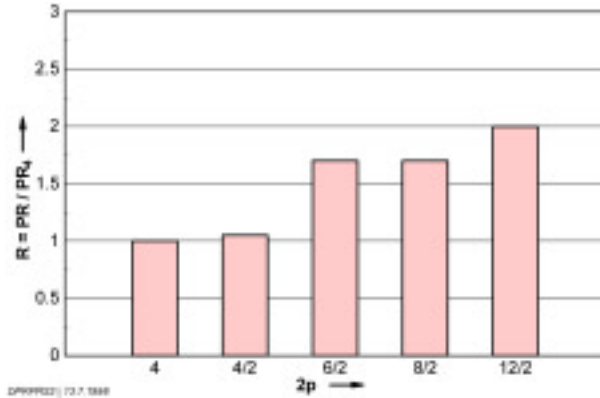


Bild 52.5.2
Richtwerte für die Kosten von polumschaltbaren Getriebemotoren mit Drehzahlverhältnis 1 : 2 (4/2polig), 1 : 3 (6/2polig), 1 : 4 (8/2polig), 1 : 6 (12/2polig) im Vergleich zu einem Getriebemotor mit einer festen Drehzahl (4polig).

53 Möglichkeiten und Grenzen der Polumschaltung

Das **Bild 53.1** gibt Anhaltswerte für die Gesamt-Nachlaufumdrehungen des Rotors eines 8/2poligen Positioniermotors bei Auslaufbremsung. Die Bedingungen sind bewusst ungünstig angenommen:

- Trägheitsfaktor $FI = 2$
- Bremsmoment gleich Bemessungsmoment des Motors
- Keine unterstützende Bremswirkung der Last.

Das Diagramm kann eine Nachrechnung für den konkreten Einzelfall nicht ersetzen; es zeigt aber deutlich, dass der Gesamtnachlauf bei Verwendung der Positionierdrehzahl (I) etwa im Verhältnis 8:1 zurückgeht, während das Drehzahlverhältnis nur 4 : 1 (8/2polig) ist.

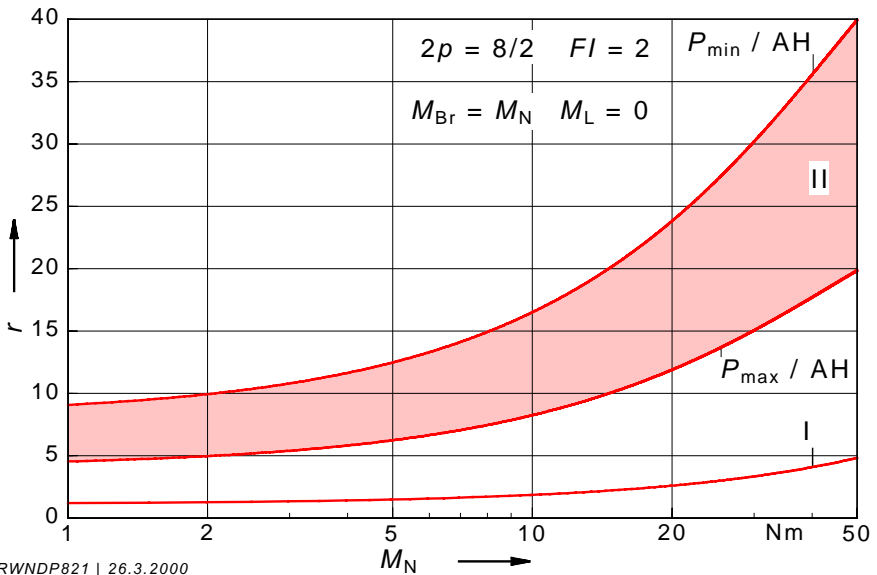


Bild 53.1 Gesamt-Nachlaufumdrehungen r am Rotor von 8/2poligen Positioniermotoren mit Bemessungsmomenten M_N ; Bremsung aus hoher (II) oder niedriger (I) Drehzahl

P_{\min} / AH – kleinste Leistung innerhalb einer Achshöhe

P_{\max} / AH – größte Leistung innerhalb einer Achshöhe

Im **Bild 53.2** ist gezeigt, wie sich der Einfluss der Polzahl – also die Wahl der Positionier-Geschwindigkeit – auf die Verkürzung des Gesamt-Nachlaufes auswirkt.

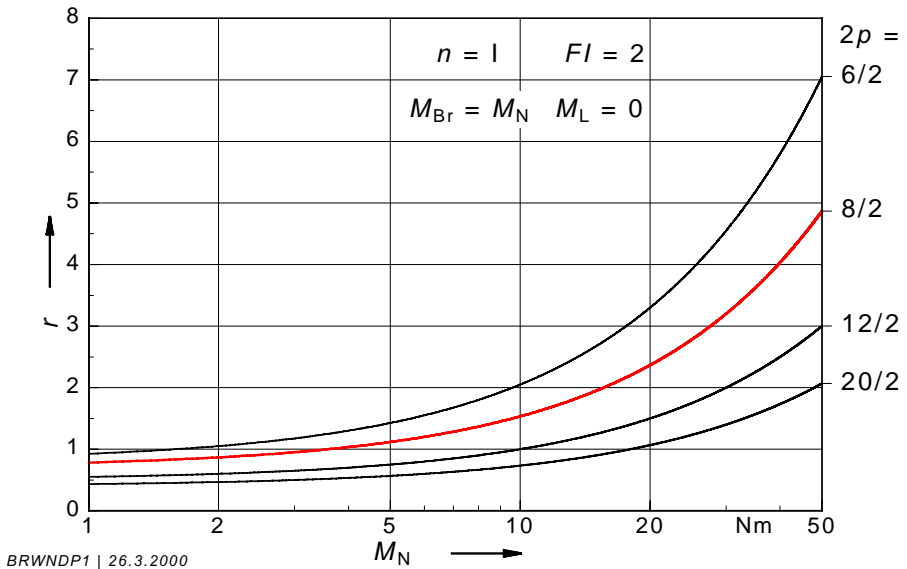


Bild 53.2 Gesamt-Nachlaufumdrehungen r am Rotor von Positioniermotoren mit Bemessungsmomenten M_N bei verschiedenen Polzahl-Verhältnissen $2p$ jeweils bei Bremsung aus der niedrigen Drehzahl und $Fl = 2$

Für eine grobe Abschätzung lässt sich das Bild 53.2 weiter vereinfachen: Unabhängig von der Polzahl, bei welcher der Motor in der Positionier-Geschwindigkeit arbeitet, gilt **Bild 53.3**. Es zeigt den Nachlaufweg als Prozentsatz p des Weges, der in Positionier-Geschwindigkeit innerhalb einer Sekunde zurückgelegt wird. Damit lässt sich rechnen:

$$s_N = \frac{p \cdot v}{100}$$

s_N	-	Nachlaufweg in m
p	-	Prozentsatz aus Diagramm 53.3
v	-	Positionier-Geschwindigkeit in m/s

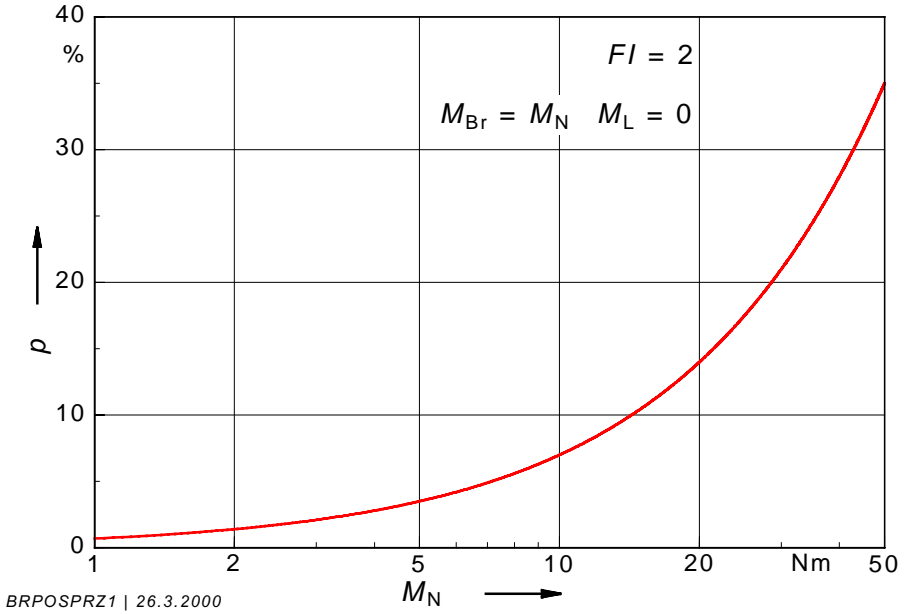


Bild 53.3 Richtwert für den Nachlaufweg (Erläuterungen im Text)

54 UmrichterMotoren

Je höher die Arbeitsgeschwindigkeit und je geringer die zulässige Haltetoleranz, umso größer muss das Drehzahlverhältnis gewählt werden. In **Bild 54.1** sind Erfahrungswerte genannt, die allerdings eine Nachrechnung im Einzelfall nicht ersetzen können.

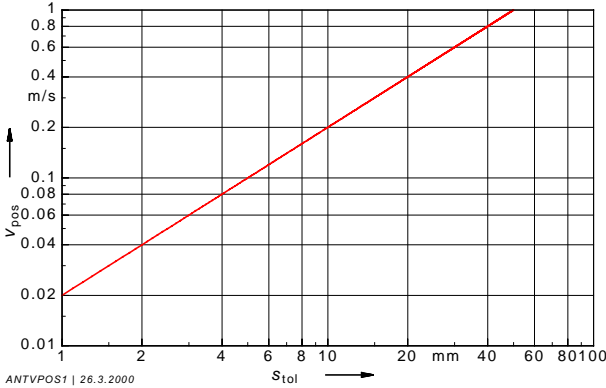


Bild 54.1
Richtwerte für die Positioniergeschwindigkeit v_{pos} in Abhängigkeit von der erwarteten Haltetoleranz S_{tol}

Bild 54.2 zeigt die Grenzen der Antriebssysteme:

- Drehzahlverhältnisse $R \leq 4$ erlauben die konventionelle Lösung mit Polumschaltung PU.
- Drehzahlverhältnisse $R > 10$ erfordern in der Regel die Lösung Variable Frequenz VF.
- Im Bereich $4 < R \leq 10$ konkurrieren die beiden Lösungen mit technischen Vorteilen für VF und geringen Preisvorteilen für PU.

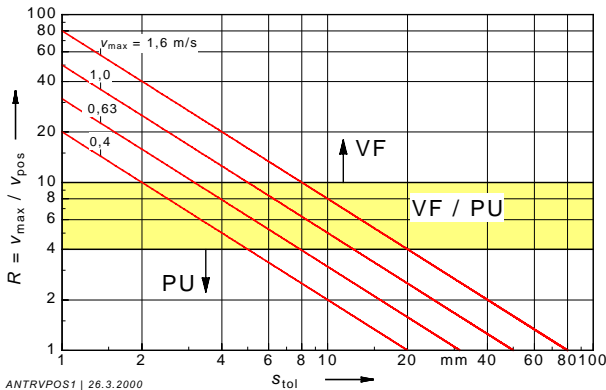


Bild 54.2
Anwendungsgrenzen in Abhängigkeit von der erwarteten Haltetoleranz S_{tol} und der Arbeitsgeschwindigkeit v_{max}
PU – Polumschaltung
VF – variable Frequenz

Nicht nur im Übergangsbereich sind für die Entscheidung neben den technischen Gesichtspunkten auch die Kosten massgebend. Die Entwicklung einer kompakten, im Motor-Klemmenkasten integrierten Lösung (**Bild 54.4**) erleichtert im gerade für die Fördertechnik interessanten Leistungsbereich bis 3 kW die Entscheidung für die Umrichterspeisung, wie **Bild 54.3** zeigt.

Diesem Preisvergleich liegen folgende Annahmen zugrunde, die im Einzelfall entsprechend modifiziert, aber bezüglich der Schalt- und Steuergeräte nicht vergessen werden sollten:

- Drehzahlverhältnis 1:6
- Relative Einschaltdauer (*ED*) 60% bei VF und 25/75% bei PU
- Thermischer Motorschutz (TMS) durch Thermistoren (Auslösegerät gehört zur Serienausstattung des Umrichters)
- Schaltschütze für die Polumschaltung (beim Umrichter nicht erforderlich)
- Verdrahtungs- und Installationskosten wurden nicht berücksichtigt (bei PU höher als bei VF).

Bild 54.3
Richtwerte für den relativen Preis (*RPR*) bei den Antriebslösungen mit Polumschaltung (PU) und integriertem Umrichter (VF) Randbedingungen siehe Text

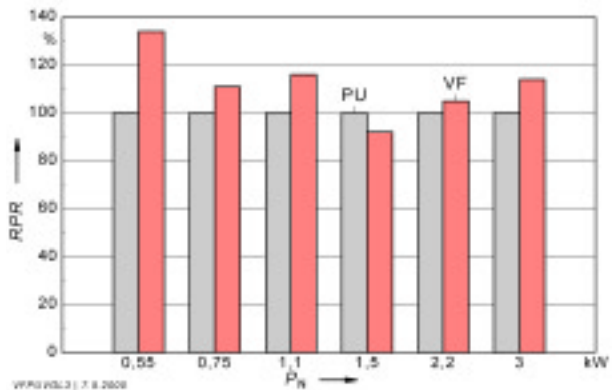




Bild 54.4

»Eta K«

Drehstrom-Getriebemotor
mit angebautem Frequenz-
Umrichter als Kompakt-
antrieb Bemessungsleis-
tungen P_N bis 7,5 kW
Integrierte Schutzeinrich-
tung gegen Überlast,
Überstrom, Phasenausfall,
Über- oder Unterspan-
nung. Thermische
Überwachung von Motor
und Umrichter. Steckbar
mit Motorteil verbunden.
Schutzart IP65.

55 Positionierregelung mit Frequenzumrichtern

Bei den klassischen Positioniersystemen mit PU-Motoren oder Frequenzumrichterantrieben sind übergeordnete SPS-Steuerungen oder externe Positioniercontroller für die Bewegungssteuerung erforderlich. Aufgrund der rasanten Entwicklung der Digitaltechnik können heute moderne Frequenzumrichter mit Zusatzfunktionalität die Regelungsaufgabe autark abarbeiten. Hierzu wird lediglich ein übergeordneter Lageregelkreis im Frequenzumrichter implementiert; die Istwertsignale erhält der Umrichter durch direkten Anschluss eines Encoders oder Absolutwertgebers.

Anwendungsvorteile sind zum einen die Verkürzung der Taktzeiten, da auf den Betrieb mit Schleiddrehzahl verzichtet werden kann. Zum anderen kann auf Näherungsschalter für die Vorgabe der Schaltzeitpunkte für Rampenfahrt und Schalten der Bremse verzichtet werden. Die erreichbare Positioniergenauigkeit ist abhängig vom verwendeten Gebersystem und liegt deutlich höher als bei den klassischen Systemen in der Größenordnung des Getriebespiels. Die übergeordnete Steuerung wird zusätzlich noch von einem erheblichen Rechenaufwand und auch Hardwareaufwand entlastet und kann dadurch deutlich kostengünstiger realisiert werden.

55.1 Beispiel einer Indexpositionierung mit Applikationscontroller

Zur Kapazitätssteigerung und Vereinfachung des Steuersystems einer Palettiermaschine, die Kisten mit Flaschen stapelt, werden Danfoss VLT-Serie 5000-Frequenzumrichter mit integrierter Bewegungssteuerung eingesetzt. Die Kisten werden mit einem Packgreifer entladen. Die vertikalen und horizontalen Bewegungen des Greifers werden von zwei VLT®-Serie 5000-Antrieben gesteuert, die Rückführungssignale von zwei Encodern erhalten (**Bild 55.1**). Diese Lösung bietet u.a. folgende Vorteile:

- Höhere Leistung durch die höhere Dynamik der Palettiermaschine
 - Schonende Produktbewegung mit hoher Genauigkeit
 - Einfache Verdrahtung und Programmierung: Der VLT®-Serie 5000-Antrieb ist ein intelligenter Antrieb, der eine Gesamtsteuerung der Anwendung ermöglicht. Somit erübrigt sich u.U. eine SPS-Steuerung oder ein ähnliches externes Steuergerät
 - Kompaktes Design erfordert weniger Platz auf der Montageplatte
 - Kommunikation über integrierbare Feldbusanschaltung
- Die Indexpositionierung ist eine ideale Lösung für Palettiermaschinen in vielen Branchen. Außerdem eignet sie sich z. B. für:
- Schalttische
 - Entpalettiermaschinen
 - Lagersysteme
 - Pick-and-Place-Systeme.

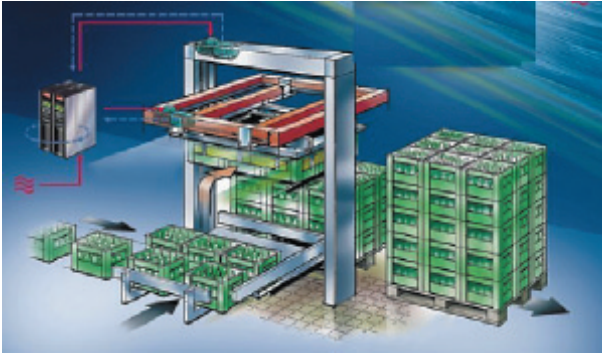


Bild 55.1
Schematische Darstellung
der Anwendung von
Umrichtermotoren mit
SynchPos-Steuerung zur
Positionierung in einer
Palettiermaschine

ANHANG

A1 Technische Daten von Federdruckbremsen

Die Daten für Federdruckbremsen der Reihe Danfoss Bauer 2000 entsprechen dem technischen Stand 04.2000. Änderungen durch technische Weiterentwicklung sind vorbehalten. Im konkreten Einzelfall erhalten Sie den aktuellen Stand von den technischen Abteilungen des Stammhauses oder von Ihrem zuständigen Technischen Außenbüro.

Erläuterung der Abkürzungen in den nachstehenden Tabellen:

MOT	– Motorgröße
MOTmin	– kleinste kombinierbare Motorgröße
MOTmax	– grösste kombinierbare Motorgröße
BR Typ	– Bremse Typ
P_{el}	– Leistungsaufnahme der Magnetspule in W
M_{BR}	– Bremsmoment in Nm
W_{max}	– zulässige Schaltarbeit bei einmaliger Bremsung in 10^3 J
W_{th}	– thermisch zulässige Schaltarbeit pro Stunde in 10^3 J
W_L	– zulässige Schaltarbeit bis zum Tausch der Reibscheibe(n) in 10^6 J
t_A	– Ansprechzeit beim Lüften in ms)
t_{AC}	– Ansprechzeit bei Einfallen mit wechselstromseitiger Unterbrechung in ms
t_{DC}	– Ansprechzeit bei Einfallen mit gleichstromseitiger Unterbrechung in ms
ZF	– Zahl der Druckfedern
	– Vorzugstyp der Bremsenauswahl

A1.1 Auswahl nach Motorgröße

MOT	BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	ZF
		Nm	W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms	
D04	E..003B4	1,5	18	1,5	140	170	20	150	21	2
D04	E..003B7	2,2	18	1,5	140	130	25	125	16	3
D04	E..003B9	3	18	1,5	140	85	30	100	12	4
D05	E..003B4	1,5	18	1,5	140	170	20	150	21	2
D05	E..003B7	2,2	18	1,5	140	130	25	125	16	3
D05	E..003B9	3	18	1,5	140	85	30	100	12	4
D06	E..003B4	1,5	18	1,5	140	170	20	150	21	2
D06	E..003B7	2,2	18	1,5	140	130	25	125	16	3
D06	E..003B9	3	18	1,5	140	85	30	100	12	4
D08	E..005A2	1,5	25	50	250	230	15	140	22	2
D08	E..005A4	2,5	25	50	250	200	35	110	15	3
D08	E..005A6	3	25	50	250	170	45	100	15	4
D08	E..005A8	4	25	50	250	130	50	100	15	5
D08	E..005A9	5	25	50	250	100	60	100	15	6
D08	E..008A6	4,5	25	50	250	90	60	70	10	3
D08	E..008A8	6	25	50	250	70	70	45	7	4
D08	E..008A9	7,5	25	50	250	50	80	45	7	5
D08	Z..005A2	3,3	25	50	250	350	15	140	22	2
D08	Z..005A4	5	25	50	250	300	35	110	15	3
D08	Z..005A6	6,5	25	50	250	250	45	100	15	4
D08	Z..005A8	8	25	50	250	200	50	100	15	5
D08	Z..005A9	10	25	50	250	150	60	100	15	6
D08	Z..008A6	9	25	50	250	180	60	70	10	3
D08	Z..008A8	12	25	50	250	140	70	45	7	4
D08	Z..008A9	15	25	50	250	100	80	45	7	5
D09	E..005A2	1,5	25	50	250	230	15	140	22	2
D09	E..005A4	2,5	25	50	250	200	35	110	15	3
D09	E..005A6	3	25	50	250	170	45	100	15	4
D09	E..005A8	4	25	50	250	130	50	100	15	5
D09	E..005A9	5	25	50	250	100	60	100	15	6
D09	E..008A6	4,5	25	50	250	90	60	70	10	3
D09	E..008A8	6	25	50	250	70	70	45	7	4
D09	E..008A9	7,5	25	50	250	50	80	45	7	5
D09	E..010A4	5	45	50	350	400	90	200	10	3
D09	E..010A6	6,5	45	50	350	330	90	200	10	4
D09	E..010A8	8	45	50	350	270	90	200	10	5
D09	E..010A9	10	45	50	350	200	90	200	10	6
D09	E..015A4	7,5	45	50	350	400	90	200	10	3
D09	E..015A6	10	45	50	350	330	90	200	10	4
D09	E..015A8	12	45	50	350	270	90	200	10	5
D09	E..015A9	15	45	50	350	200	90	200	10	6
D09	E..025A4	12,5	70	75	450	600	100	400	20	3
D09	E..025A6	16	70	75	450	500	100	400	20	4
D09	E..025A8	20	70	75	450	400	100	400	20	5
D09	E..025A9	25	70	75	450	300	100	400	20	6
D09	Z..005A2	3,3	25	50	250	350	15	140	22	2
D09	Z..005A4	5	25	50	250	300	35	110	15	3
D09	Z..005A6	6,5	25	50	250	250	45	100	15	4
D09	Z..005A8	8	25	50	250	200	50	100	15	5
D09	Z..005A9	10	25	50	250	150	60	100	15	6

Anhang

MOT	BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	ZF
		Nm	W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms	
D09	Z..008A6	9	25	50	250	180	60	70	10	3
D09	Z..008A8	12	25	50	250	140	70	45	7	4
D09	Z..008A9	15	25	50	250	100	80	45	7	5
D09	Z..010A4	12,5	45	50	350	600	90	200	15	3
D09	Z..010A6	16	45	50	350	500	90	200	15	4
D09	Z..010A8	20	45	50	350	400	90	200	15	5
D09	Z..010A9	25	45	50	350	300	90	200	15	6
D09	Z..015A4	15	45	50	350	400	90	200	15	3
D09	Z..015A6	20	45	50	350	330	90	200	15	4
D09	Z..015A8	25	45	50	350	270	90	200	15	5
D09	Z..015A9	30	45	50	350	200	90	200	15	6
D09	Z..025A4	25	70	75	450	800	100	400	20	3
D09	Z..025A6	32	70	75	450	670	100	400	20	4
D09	Z..025A8	40	70	75	450	530	100	400	20	5
D09	Z..025A9	50	70	75	450	400	100	400	20	6
D11	E..010A4	5	45	50	350	400	90	200	10	3
D11	E..010A6	6,5	45	50	350	330	90	200	10	4
D11	E..010A8	8	45	50	350	270	90	200	10	5
D11	E..010A9	10	45	50	350	200	90	200	10	6
D11	E..015A4	7,5	45	50	350	400	90	200	10	3
D11	E..015A6	10	45	50	350	330	90	200	10	4
D11	E..015A8	12	45	50	350	270	90	200	10	5
D11	E..015A9	15	45	50	350	200	90	200	10	6
D11	E..025A4	12,5	70	75	450	600	100	400	20	3
D11	E..025A6	16	70	75	450	500	100	400	20	4
D11	E..025A8	20	70	75	450	400	100	400	20	5
D11	E..025A9	25	70	75	450	300	100	400	20	6
D11	E..050A4	25	115	100	600	1000	150	450	25	4
D11	E..050A5	30	115	100	600	880	150	450	25	5
D11	E..050A7	37	115	100	600	750	150	450	25	6
D11	E..050A8	45	115	100	600	630	150	450	25	7
D11	E..050A9	50	115	10	600	500	150	450	25	8
D11	E..075A7	56	115	100	600	750	200	500	30	6
D11	E..075A8	65	115	100	600	630	200	500	30	7
D11	E..075A9	75	115	100	600	500	200	500	30	8
D11	Z..010A4	12,5	45	50	350	600	90	200	15	3
D11	Z..010A6	16	45	50	350	500	90	200	15	4
D11	Z..010A8	20	45	50	350	400	90	200	15	5
D11	Z..010A9	25	45	50	350	300	90	200	15	6
D11	Z..015A4	15	45	50	350	400	90	200	15	3
D11	Z..015A6	20	45	50	350	330	90	200	15	4
D11	Z..015A8	25	45	50	350	270	90	200	15	5
D11	Z..015A9	30	45	50	350	200	90	200	15	6
D11	Z..025A4	25	70	75	450	800	100	400	20	3
D11	Z..025A6	32	70	75	450	670	100	400	20	4
D11	Z..025A8	40	70	75	450	530	100	400	20	5
D11	Z..025A9	50	70	75	450	400	100	400	20	6
D11	Z..050A3	38	115	100	600	1100	150	450	25	3
D11	Z..050A4	50	115	100	600	1000	150	450	25	4
D11	Z..050A5	60	115	100	600	880	150	450	25	5

Anhang

MOT	BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	ZF
		Nm	W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms	
D11	Z..050A7	75	115	100	600	750	150	450	25	6
D11	Z..050A8	90	115	100	600	630	150	450	25	7
D11	Z..050A9	100	115	100	600	500	150	450	25	8
D11	Z..075A3	56	115	100	600	1400	200	500	30	3
D11	Z..075A4	75	115	100	600	1200	200	500	30	4
D11	Z..075A7	110	115	100	600	900	200	500	30	6
D11	Z..075A8	130	115	100	600	750	200	500	30	7
D11	Z..075A9	150	115	100	600	600	200	500	30	8
D13	E..050A4	25	115	100	600	1000	150	450	25	4
D13	E..050A5	30	115	100	600	880	150	450	25	5
D13	E..050A7	37	115	100	600	750	150	450	25	6
D13	E..050A8	45	115	100	600	630	150	450	25	7
D13	E..050A9	50	115	10	600	500	150	450	25	8
D13	E..075A7	56	115	100	600	750	200	500	30	6
D13	E..075A8	65	115	100	600	630	200	500	30	7
D13	E..075A9	75	115	100	600	500	200	500	30	8
D13	E..100A5	60	135	150	700	1100	250	800	50	5
D13	E..100A7	75	135	150	700	900	250	800	50	6
D13	E..100A8	90	135	150	700	750	250	800	50	7
D13	E..100A9	100	135	150	700	600	250	800	50	8
D13	E..150A7	110	135	150	700	900	300	900	60	6
D13	E..150A8	130	135	150	700	750	300	900	60	7
D13	E..150A9	150	135	150	700	600	300	900	60	8
D13	Z..050A3	38	115	100	600	1100	150	450	25	3
D13	Z..050A4	50	115	100	600	1000	150	450	25	4
D13	Z..050A5	60	115	100	600	880	150	450	25	5
D13	Z..050A7	75	115	100	600	750	150	450	25	6
D13	Z..050A8	90	115	100	600	630	150	450	25	7
D13	Z..050A9	100	115	100	600	500	150	450	25	8
D13	Z..075A3	56	115	100	600	1400	200	500	30	3
D13	Z..075A4	75	115	100	600	1200	200	500	30	4
D13	Z..075A7	110	115	100	600	900	200	500	30	6
D13	Z..075A8	130	115	100	600	750	200	500	30	7
D13	Z..075A9	150	115	100	600	600	200	500	30	8
D13	Z..100A3	75	135	150	700	1700	250	800	50	3
D13	Z..100A4	100	135	150	700	1500	250	800	50	4
D13	Z..100A7	150	135	150	700	1100	250	800	50	6
D13	Z..100A8	180	135	150	700	940	250	800	50	7
D13	Z..100A9	200	135	150	700	750	250	800	50	8
D13	Z..150A3	150	135	150	700	1400	300	900	60	3
D13	Z..150A4	200	135	150	700	1200	300	900	60	4
D13	Z..150A7	300	135	150	700	900	300	900	60	6
D13	Z..150A8	350	135	150	700	750	300	900	60	7
D13	Z..150A9	400	135	150	700	600	300	900	60	8
D16	E..050A4	25	115	100	600	1000	150	450	25	4
D16	E..050A5	30	115	100	600	880	150	450	25	5
D16	E..050A7	37	115	100	600	750	150	450	25	6
D16	E..050A8	45	115	100	600	630	150	450	25	7
D16	E..050A9	50	115	10	600	500	150	450	25	8
D16	E..075A7	56	115	100	600	750	200	500	30	6

Anhang

MOT	BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	ZF
		Nm	W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms	
D16	E..075A8	65	115	100	600	630	200	500	30	7
D16	E..075A9	75	115	100	600	500	200	500	30	8
D16	E..100A5	60	135	150	700	1100	250	800	50	5
D16	E..100A7	75	135	150	700	900	250	800	50	6
D16	E..100A8	90	135	150	700	750	250	800	50	7
D16	E..100A9	100	135	150	700	600	250	800	50	8
D16	E..150A7	110	135	150	700	900	300	900	60	6
D16	E..150A8	130	135	150	700	750	300	900	60	7
D16	E..150A9	150	135	150	700	600	300	900	60	8
D16	Z..050A3	38	115	100	600	1100	150	450	25	3
D16	Z..050A4	50	115	100	600	1000	150	450	25	4
D16	Z..050A5	60	115	100	600	880	150	450	25	5
D16	Z..050A7	75	115	100	600	750	150	450	25	6
D16	Z..050A8	90	115	100	600	630	150	450	25	7
D16	Z..050A9	100	115	100	600	500	150	450	25	8
D16	Z..075A3	56	115	100	600	1400	200	500	30	3
D16	Z..075A4	75	115	100	600	1200	200	500	30	4
D16	Z..075A7	110	115	100	600	900	200	500	30	6
D16	Z..075A8	130	115	100	600	750	200	500	30	7
D16	Z..075A9	150	115	100	600	600	200	500	30	8
D16	Z..100A3	75	135	150	700	1700	250	800	50	3
D16	Z..100A4	100	135	150	700	1500	250	800	50	4
D16	Z..100A7	150	135	150	700	1100	250	800	50	6
D16	Z..100A8	180	135	150	700	940	250	800	50	7
D16	Z..100A9	200	135	150	700	750	250	800	50	8
D16	Z..150A3	150	135	150	700	1400	300	900	60	3
D16	Z..150A4	200	135	150	700	1200	300	900	60	4
D16	Z..150A7	300	135	150	700	900	300	900	60	6
D16	Z..150A8	350	135	150	700	750	300	900	60	7
D16	Z..150A9	400	135	150	700	600	300	900	60	8
D18	E..100A5	60	135	150	700	1100	250	800	50	5
D18	E..100A7	75	135	150	700	900	250	800	50	6
D18	E..100A8	90	135	150	700	750	250	800	50	7
D18	E..100A9	100	135	150	700	600	250	800	50	8
D18	E..150A7	110	135	150	700	900	300	900	60	6
D18	E..150A8	130	135	150	700	750	300	900	60	7
D18	E..150A9	150	135	150	700	600	300	900	60	8
D18	Z..100A3	75	135	150	700	1700	250	800	50	3
D18	Z..100A4	100	135	150	700	1500	250	800	50	4
D18	Z..100A7	150	135	150	700	1100	250	800	50	6
D18	Z..100A8	180	135	150	700	940	250	800	50	7
D18	Z..100A9	200	135	150	700	750	250	800	50	8
D18	Z..150A3	150	135	150	700	1400	300	900	60	3
D18	Z..150A4	200	135	150	700	1200	300	900	60	4
D18	Z..150A7	300	135	150	700	900	300	900	60	6
D18	Z..150A8	350	135	150	700	750	300	900	60	7
D18	Z..150A9	400	135	150	700	600	300	900	60	8

A1.2 Auswahl nach Bremsengröße

BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	MOTmin	MOTmax	ZF
	Nm	W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms			
E..003B4	1,5	18	1,5	140	170	20	150	21	D04	D06	2
E..003B7	2,2	18	1,5	140	130	25	125	16	D04	D06	3
E..003B9	3	18	1,5	140	85	30	100	12	D04	D06	4
E..005A2	1,5	25	50	250	230	15	140	22	D08	D09	2
E..005A4	2,5	25	50	250	200	35	110	15	D08	D09	3
E..005A6	3	25	50	250	170	45	100	15	D08	D09	4
E..005A8	4	25	50	250	130	50	100	15	D08	D09	5
E..005A9	5	25	50	250	100	60	100	15	D08	D09	6
E..008A6	4,5	25	50	250	90	60	70	10	D08	D09	3
E..008A8	6	25	50	250	70	70	45	7	D08	D09	4
E..008A9	7,5	25	50	250	50	80	45	7	D08	D09	5
E..010A4	5	45	50	350	400	90	200	10	D09	D11	3
E..010A6	6,5	45	50	350	330	90	200	10	D09	D11	4
E..010A8	8	45	50	350	270	90	200	10	D09	D11	5
E..010A9	10	45	50	350	200	90	200	10	D09	D11	6
E..015A4	7,5	45	50	350	400	90	200	10	D09	D11	3
E..015A6	10	45	50	350	330	90	200	10	D09	D11	4
E..015A8	12	45	50	350	270	90	200	10	D09	D11	5
E..015A9	15	45	50	350	200	90	200	10	D09	D11	6
E..025A4	12,5	70	75	450	600	100	400	20	D09	D11	3
E..025A6	16	70	75	450	500	100	400	20	D09	D11	4
E..025A8	20	70	75	450	400	100	400	20	D09	D11	5
E..025A9	25	70	75	450	300	100	400	20	D09	D11	6
E..050A4	25	115	100	600	1000	150	450	25	D11	D16	4
E..050A5	30	115	100	600	880	150	450	25	D11	D16	5
E..050A7	37	115	100	600	750	150	450	25	D11	D16	6
E..050A8	45	115	100	600	630	150	450	25	D11	D16	7
E..050A9	50	115	10	600	500	150	450	25	D11	D16	8
E..075A7	56	115	100	600	750	200	500	30	D11	D16	6
E..075A8	65	115	100	600	630	200	500	30	D11	D16	7
E..075A9	75	115	100	600	500	200	500	30	D11	D16	8
E..100A5	60	135	150	700	1100	250	800	50	D13	D18	5
E..100A7	75	135	150	700	900	250	800	50	D13	D18	6
E..100A8	90	135	150	700	750	250	800	50	D13	D18	7
E..100A9	100	135	150	700	600	250	800	50	D13	D18	8
E..150A7	110	135	150	700	900	300	900	60	D13	D18	6
E..150A8	130	135	150	700	750	300	900	60	D13	D18	7
E..150A9	150	135	150	700	600	300	900	60	D13	D18	8
Z..005A2	3,3	25	50	250	350	15	140	22	D08	D09	2
Z..005A4	5	25	50	250	300	35	110	15	D08	D09	3
Z..005A6	6,5	25	50	250	250	45	100	15	D08	D09	4
Z..005A8	8	25	50	250	200	50	100	15	D08	D09	5
Z..005A9	10	25	50	250	150	60	100	15	D08	D09	6
Z..008A6	9	25	50	250	180	60	70	10	D08	D09	3
Z..008A8	12	25	50	250	140	70	45	7	D08	D09	4
Z..008A9	15	25	50	250	100	80	45	7	D08	D09	5

Anhang


BR Typ	M_{BR}	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	MOTmin	MOTmax	ZF
	Nm	W	10^3 J3	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms			
Z..010A4	12,5	45	50	350	600	90	200	15	D09	D11	3
Z..010A6	16	45	50	350	500	90	200	15	D09	D11	4
Z..010A8	20	45	50	350	400	90	200	15	D09	D11	5
Z..010A9	25	45	50	350	300	90	200	15	D09	D11	6
Z..015A4	15	45	50	350	400	90	200	15	D09	D11	3
Z..015A6	20	45	50	350	330	90	200	15	D09	D11	4
Z..015A8	25	45	50	350	270	90	200	15	D09	D11	5
Z..015A9	30	45	50	350	200	90	200	15	D09	D11	6
Z..025A4	25	70	75	450	800	100	400	20	D09	D11	3
Z..025A6	32	70	75	450	670	100	400	20	D09	D11	4
Z..025A8	40	70	75	450	530	100	400	20	D09	D11	5
Z..025A9	50	70	75	450	400	100	400	20	D09	D11	6
Z..050A3	38	115	100	600	1100	150	450	25	D11	D16	3
Z..050A4	50	115	100	600	1000	150	450	25	D11	D16	4
Z..050A5	60	115	100	600	880	150	450	25	D11	D16	5
Z..050A7	75	115	100	600	750	150	450	25	D11	D16	6
Z..050A8	90	115	100	600	630	150	450	25	D11	D16	7
Z..050A9	100	115	100	600	500	150	450	25	D11	D16	8
Z..075A3	56	115	100	600	1400	200	500	30	D11	D16	3
Z..075A4	75	115	100	600	1200	200	500	30	D11	D16	4
Z..075A7	110	115	100	600	900	200	500	30	D11	D16	6
Z..075A8	130	115	100	600	750	200	500	30	D11	D16	7
Z..075A9	150	115	100	600	600	200	500	30	D11	D16	8
Z..100A3	75	135	150	700	1700	250	800	50	D13	D18	3
Z..100A4	100	135	150	700	1500	250	800	50	D13	D18	4
Z..100A7	150	135	150	700	1100	250	800	50	D13	D18	6
Z..100A8	180	135	150	700	940	250	800	50	D13	D18	7
Z..100A9	200	135	150	700	750	250	800	50	D13	D18	8
Z..150A3	150	135	150	700	1400	300	900	60	D13	D18	3
Z..150A4	200	135	150	700	1200	300	900	60	D13	D18	4
Z..150A7	300	135	150	700	900	300	900	60	D13	D18	6
Z..150A8	350	135	150	700	750	300	900	60	D13	D18	7
Z..150A9	400	135	150	700	600	300	900	60	D13	D18	8

A1.3 Auswahl nach Bremsmoment

M_{BR}	BR Typ	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	MOTmin	MOTmax	ZF
Nm		W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms			
1,5	E..003B4	18	1,5	140	170	20	150	21	D04	D06	2
1,5	E..005A2	25	50	250	230	15	140	22	D08	D09	2
2,2	E..003B7	18	1,5	140	130	25	125	16	D04	D06	3
2,5	E..005A4	25	50	250	200	35	110	15	D08	D09	3
3	E..003B9	18	1,5	140	85	30	100	12	D04	D06	4
3	E..005A6	25	50	250	170	45	100	15	D08	D09	4
3,3	Z..005A2	25	50	250	350	15	140	22	D08	D09	2
4	E..005A8	25	50	250	130	50	100	15	D08	D09	5
4,5	E..008A6	25	50	250	90	60	70	10	D08	D09	3
5	E..005A9	25	50	250	100	60	100	15	D08	D09	6
5	E..010A4	45	50	350	400	90	200	10	D09	D11	3
5	Z..005A4	25	50	250	300	35	110	15	D08	D09	3
6	E..008A8	25	50	250	70	70	45	7	D08	D09	4
6,5	E..010A6	45	50	350	330	90	200	10	D09	D11	4
6,5	Z..005A6	25	50	250	250	45	100	15	D08	D09	4
7,5	E..008A9	25	50	250	50	80	45	7	D08	D09	5
7,5	E..015A4	45	50	350	400	90	200	10	D09	D11	3
8	E..010A8	45	50	350	270	90	200	10	D09	D11	5
8	Z..005A8	25	50	250	200	50	100	15	D08	D09	5
9	Z..008A6	25	50	250	180	60	70	10	D08	D09	3
10	E..010A9	45	50	350	200	90	200	10	D09	D11	6
10	E..015A6	45	50	350	330	90	200	10	D09	D11	4
10	Z..005A9	25	50	250	150	60	100	15	D08	D09	6
12	E..015A8	45	50	350	270	90	200	10	D09	D11	5
12	Z..008A8	25	50	250	140	70	45	7	D08	D09	4
12,5	E..025A4	70	75	450	600	100	400	20	D09	D11	3
12,5	Z..010A4	45	50	350	600	90	200	15	D09	D11	3
15	E..015A9	45	50	350	200	90	200	10	D09	D11	6
15	Z..008A9	25	50	250	100	80	45	7	D08	D09	5
15	Z..015A4	45	50	350	400	90	200	15	D09	D11	3
16	E..025A6	70	75	450	500	100	400	20	D09	D11	4
16	Z..010A6	45	50	350	500	90	200	15	D09	D11	4
20	E..025A8	70	75	450	400	100	400	20	D09	D11	5
20	Z..010A8	45	50	350	400	90	200	15	D09	D11	5
20	Z..015A6	45	50	350	330	90	200	15	D09	D11	4
25	E..025A9	70	75	450	300	100	400	20	D09	D11	6
25	E..050A4	115	100	600	1000	150	450	25	D11	D16	4
25	Z..010A9	45	50	350	300	90	200	15	D09	D11	6
25	Z..015A8	45	50	350	270	90	200	15	D09	D11	5
25	Z..025A4	70	75	450	800	100	400	20	D09	D11	3
30	E..050A5	115	100	600	880	150	450	25	D11	D16	5
30	Z..015A9	45	50	350	200	90	200	15	D09	D11	6
32	Z..025A6	70	75	450	670	100	400	20	D09	D11	4
37	E..050A7	115	100	600	750	150	450	25	D11	D16	6
38	Z..050A3	115	100	600	1100	150	450	25	D11	D16	3
40	Z..025A8	70	75	450	530	100	400	20	D09	D11	5
45	E..050A8	115	100	600	630	150	450	25	D11	D16	7

M_{BR}	BR Typ	P_{el}	W_{max}	W_{th}	W_L	t_A	t_{AC}	t_{DC}	MOTmin	MOTmax	ZF
Nm		W	10^3 J	10^3 J	10^6 J	ms	ms	ms			
50	E..050A9	115	10	600	500	150	450	25	D11	D16	8
50	Z..025A9	70	75	450	400	100	400	20	D09	D11	6
50	Z..050A4	115	100	600	1000	150	450	25	D11	D16	4
56	E..075A7	115	100	600	750	200	500	30	D11	D16	6
56	Z..075A3	115	100	600	1400	200	500	30	D11	D16	3
60	E..100A5	135	150	700	1100	250	800	50	D13	D18	5
60	Z..050A5	115	100	600	880	150	450	25	D11	D16	5
65	E..075A8	115	100	600	630	200	500	30	D11	D16	7
75	E..075A9	115	100	600	500	200	500	30	D11	D16	8
75	E..100A7	135	150	700	900	250	800	50	D13	D18	6
75	Z..050A7	115	100	600	750	150	450	25	D11	D16	6
75	Z..075A4	115	100	600	1200	200	500	30	D11	D16	4
75	Z..100A3	135	150	700	1700	250	800	50	D13	D18	3
90	E..100A8	135	150	700	750	250	800	50	D13	D18	7
90	Z..050A8	115	100	600	630	150	450	25	D11	D16	7
100	E..100A9	135	150	700	600	250	800	50	D13	D18	8
100	Z..050A9	115	100	600	500	150	450	25	D11	D16	8
100	Z..100A4	135	150	700	1500	250	800	50	D13	D18	4
110	E..150A7	135	150	700	900	300	900	60	D13	D18	6
110	Z..075A7	115	100	600	900	200	500	30	D11	D16	6
130	E..150A8	135	150	700	750	300	900	60	D13	D18	7
130	Z..075A8	115	100	600	750	200	500	30	D11	D16	7
150	E..150A9	135	150	700	600	300	900	60	D13	D18	8
150	Z..075A9	115	100	600	600	200	500	30	D11	D16	8
150	Z..100A7	135	150	700	1100	250	800	50	D13	D18	6
150	Z..150A3	135	150	700	1400	300	900	60	D13	D18	3
180	Z..100A8	135	150	700	940	250	800	50	D13	D18	7
200	Z..100A9	135	150	700	750	250	800	50	D13	D18	8
200	Z..150A4	135	150	700	1200	300	900	60	D13	D18	4
300	Z..150A7	135	150	700	900	300	900	60	D13	D18	6
350	Z..150A8	135	150	700	750	300	900	60	D13	D18	7
400	Z..150A9	135	150	700	600	300	900	60	D13	D18	8

Erläuterung der Abkürzungen in den vorstehenden Tabellen:

- MOT – Motorgröße
- MOTmin – kleinste kombinierbare Motorgröße
- MOTmax – grösste kombinierbare Motorgröße
- BR Typ – Bremse Typ
- P_{el} – Leistungsaufnahme der Magnetspule in W
- M_{BR} – Bremsmoment in Nm
- W_{max} – zulässige Schaltarbeit bei einmaliger Bremsung in 10^3 J
- W_{th} – thermisch zulässige Schaltarbeit pro Stunde in 10^3 J
- W_L – zulässige Schaltarbeit bis zum Tausch der Reibscheibe(n) in 10^6 J
- t_A – Ansprechzeit beim Lüften in ms
- t_{AC} – Ansprechzeit bei Einfallen mit wechselstromseitiger Unterbrechung in ms
- t_{DC} – Ansprechzeit bei Einfallen mit gleichstromseitiger Unterbrechung in ms
- ZF – Zahl der Druckfedern
-  – Vorzugstyp der Bremsenauswahl

Literaturhinweise

zu Teil II:

- 2.1 IEC 60034-1
Rotating electrical machines; Part 1: Rating and performance
- 2.2 DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1)
Drehende elektrische Maschinen; Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten
- 2.3 IEC 60034-12
Rotating electrical machines; Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors with voltages up to and including 690 V
- 2.4 NEMA MG1
Motors and generators
- 2.5 National Electrical Code (NEC) Handbook
NFPA USA (1993)
- 2.6 *Rentzsch, H.:*
Elektromotoren
ABB Handbuch (1992)
- 2.7 *Falk, K.:*
Der Drehstrommotor – Ein Lexikon für die Praxis
VDE Verlag Berlin Offenbach (1997)
- 2.8 *Kümmel, F.:*
Elektrische Antriebstechnik
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York (1971)
- 2.9 *Greiner, H.:*
Auswahl von Rollgangs-Antrieben
Sonderdruck SD 887 der Fa. Danfoss Bauer GmbH
- 2.10 *Vogel, J.:*
Elektrische Antriebstechnik
Hüthig Verlag Heidelberg (1998)
- 2.11 *Greiner, H.:*
Schutzmaßnahmen bei Drehstrom-Getriebemotoren
Publikation der Danfoss Bauer GmbH (2000)
- 2.12 *Seifert, D.; Strangmüller, Th.:*
Stoßmoment und Stoßstrom der Asynchronmaschine
etz Archiv Bd. 11 (1989) Nr. 9

- 2.13 *Wüthrich, W.:*
Übersicht über die Einschaltmomente bei Asynchronmotoren im Stillstand
ETZ-A Bd. 88 (1967) Nr. 22

zu Teil III + IV:

- 3.1 *Fischer, R.:*
Elektrische Maschinen
Carl Hanser Verlag München Wien (1995)
- 3.2 *Geisweid, R.:*
Elektrotechnik und elektrische Antriebe
Springer-Verlag Heidelberg Berlin New York (1973)
- 3.3 Danfoss A/S:
Wissenswertes über Frequenzumrichter (1997)
- 3.4 *Bedenke, H.J.; Pfassek, R.; Rothenbach, G.; Vaske, P.:*
Elektrische Antriebe und Steuerungen
B.G. Teubner Stuttgart (1969)

zu Teil V + VI:

- 5.1 *Greiner, H.:*
Elektrische Antriebe mit Getriebe-Motoren
Sonderdruck SD 496 der Fa. Danfoss Bauer GmbH
- 5.2 *Greiner, H.:*
Bremsen und Positionieren mit polumschaltbaren Getriebe-Motoren
Sonderdruck SD 2688 der Fa. Danfoss Bauer GmbH
- 5.3 *Greiner, H.:*
Anlauf und elektrodynamische Auslaufbremsung bei Käfigläufer-Motoren
Sonderdruck SD 3095 der Fa. Danfoss Bauer GmbH
- 5.4 Technische Akademie Esslingen:
Bremsen und Positionieren mit Drehstromantrieben
Unterlagen zum TAE-Lehrgang 20281/64.110
- 5.5 *Severin, D.; Musiol, F.:*
Der Reibungsmechanismus in Sicherheitsbremsen von Kranen
DHF 1/2-89

Literaturhinweise

- 5.6 *Weiss, U.:*
Reibungsbremsen und ihre Innovationsgrenzen
Der Konstrukteur 12/1978
- 5.7 VDI-Richtlinie VDI 2241 Blatt 1:
Schaltbare fremdbetätigte Reibkupplungen und -bremsen

Stichwortverzeichnis

A	Abschnitt
Abgrenzung PU / VF	54
Achsabstand	50
AC-Magnet	33
Anbaubremse	34
Anlasseinrichtung (Anschlussbild der Bremse)	36.5
Anlasstransformator (Anschlussbild der Bremse)	36.5
Anlasstransformator (Sanftanlauf)	9
Anlauf (Allgemeines)	II
Anlauf mit unterteilter Wicklung	8
Anlauf über Vorwiderstände	10
Anlauf und elektrische Bremsung (Allgemein)	1
Anlauf und elektrische Bremsung (Einführung)	I
Anlaufklassen	18.4
Anlaufkupplungen	15
Anlaufschaltung, elektronische	11
Anlaufverhalten nach IEC 60034-12	18.1
Anlaufverhalten, Klassifizierung	18
Anlaufvorgang (grundsätzliche Unterschiede)	37.3.1
Anlaufzeit	17
Anlaufzeit, Ermittlung	17
Anschluss (Anlasseinrichtungen)	36.5
Anschluss (Betrieb am Umrichter)	36.6
Anschluss (Fallbeispiele)	36.7
Anschluss (Polumschaltung)	36.4
Anschluss (Spannung 1 : 1,73)	36.2
Anschluss (Spannung 1 : 2)	36.3
Ansprechzeit	44.1
Ansprechzeit (Schaltschütz)	49.3.1
Ansprechzeit beim Einfallen	38
Ansprechzeit beim Lüften	37
Arbeitsvermögen	42
Arbeitsvermögen großer Bremsen	47
Aufteilung des Drehmomentes nach Masse	30
Ausführungsbeispiele (Bremsen)	35
Auslaufbremsung	40.2
Auslaufversuch	28.3
B	
Backen	33
Backen-Federdruckbremse mit WS-Lüftmagnet	35.8
Band	33
Baukastensystem	46

Stichwortverzeichnis

Bemessung der GS-Bremse	22.3
Berechnung (Bremszeit und Bremsweg)	23.3
Beschleunigungszeit	17
Beurteilungskriterien für Sanftanlauf	2
bewegte Massen als Trägheitsmasse	31
Bremsarbeit (Auswahl)	41
Bremskraft	33
Bremsmoment (Auswahl)	40
Bremsmoment (erforderlich)	40.1
Bremsmomente bei PU	23.1
Bremsmotor	32
Bremssystem	33
Bremssysteme, Einteilung	33
Bremsweg	22.3
Bremszeit	22.3,
Code Letter nach NEMA	18.2

D

Dahlanderschaltung	36.4
Dahlanderschaltung (Modellausnutzung)	51.2
Dahlanderschaltung (Prinzip)	51.1
Dämpfung der Bremsmomente	23.2
Daten der Bremsen	A1
DC-Magnet	33
Dioden	36
Dioden (Schaltung)	36.8.3
Direkteinschaltung	5
Drehmomentaufteilung nach Massenanteilen	30
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Last	4
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie des Motors	3
Drehmomentkennlinien (relative Höhe)	52.4
Drehpendel	28.1
Drehrichtungswechsel aus vollem Lauf	20
Drehtisch	32
Drehwerk	32
Drehzahlverhältnis $\neq 1 : 2$	52
Drehzahlverhältnis $= 1 : 2$	51
Drehzahlverhältnisse (ausführbar)	52.2
Drehzahlverhältnisse (Getrennte Wicklungen)	52
Dreieckschaltung	36.1
dreiphasige Vorwiderstände	10.1
Druckplatte	35

E

Einbaubremse	34
--------------	----

Stichwortverzeichnis

Einfallen bei GS-Magneten	38.2
Einfallen bei WS-Magneten	38.1
Einphasen-Brückenschaltung	36.8.3
einphasiger Vorwiderstand (KUSA-Widerstand)	10.2
Einscheiben-Federdruckbremse an der Lüfterhaube	35.3
Einscheiben-Federdruckbremse mit DS-Lüftmagnet am Lagerschild	35.10
Einscheiben-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet am Lagerschild	35.1
Einscheiben-Federdruckbremse Reihe ABR an der Lüfterhaube	35.5
Einscheiben-Federdruckbremse Reihe FBR an der Lüfterhaube	35.6
Einstellen, Bremsmoment	42
elektrische Speisung des Lüftmagneten	36
elektrodynamische Auslaufbremsung (allgemein)	III
elektrodynamische Bremsung (allgemein)	1
elektrodynamische Bremsung, therm. Bewertung	25
Elektromagnet	33
elektronische Anlaufschaltung	11
elektronische Gleichstrom-Bremsgeräte	22.5
elektronische Sanfrückschaltung SPR	23.5
Energie der Lage	41
Exponentialfunktion	37.2

F

Fahrwerk	32
Feder	33
Federdruckbremse	33, 33.2
Federdruckbremsen (technische Daten)	A1
F_I (Trägheitsfaktor)	29
Flankenspiel	50
Fliehkraftkupplungen	15.1
Freilaufkreis	36.8.3
Frequenzanlauf	12
frequenzgeführter Anlauf	12
Frequenzsteuerung	24
Frequenzsteuerung (thermische Bewertung)	25.6

G

Gebrauchsdauer	41.4
Gegendrehfeldbremsung	21
Gegendrehfeldbremsung (thermische Bewertung)	25.3
Gegenstrombremsung	21
generatorische Bremsung	19
generatorische Bremsung am Umrichter	24
getrennte Wicklungen	36.4
getrennten Wicklungen (Modellausnutzung)	52.3
Getriebebelastung nach Massenanteilen	30

Stichwortverzeichnis

Getriebelose (lineare Bewegung)	50.2
Getriebelose (Richtwerte)	50.1
Gleichspannung (Bemessungswerte)	36.8.2
Gleichstrom-Auslaufbremsung	22
Gleichstrombremsung	22
Gleichstrom-Lüftmagnete, (Bemessungswerte)	36.8
Gleichstromseitige Unterbrechung	38
Grenzluftspalt	41.4
GS-Auslaufbremsung (therm. Bewertung)	25.4

H

Handhabungstechnik	48
Hochlaufzeit	17
Hubbetrieb (Auswahl der Bremse)	40.3
Hubbetrieb (Bremszeit)	43.2
Hubwerk	32
hydrodynamische Kupplungen	15.2

I

Induktionskupplungen	15.3
Instandsetzung	34

K

Kegel	33
Kegel-Federdruckbremse mit Lüftung durch Motorfeld	35.7
kinetische Energie	41.1
Kippen auf Förderband	2.2
Klassifizierung des Anlaufverhaltens	18
Klemmschaltung (PU getrennte Wicklungen)	52.1
Konusläufer	35
Kostenvergleich (PU)	52.5
KUSA-Verfahren	10.2

L

Lamellen	33
Lamellen-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet	35.9
Lastkennlinie	4
Läufermasse	26
Lebensdauer	41.4
Leerschalthäufigkeit (Einfluss der Lüftzeit)	37.4
Leerschalthäufigkeit Z_0	16.2.1
Linearbewegung als Tangente am Kreis	31.3
Lüften mit GS-Magneten	37.2

Stichwortverzeichnis

Lüften mit WS-Magneten	37.1
Lüftkraft	33
Luftspalt	42

M

Magnetbremse	33.2
Magnetgehäuse	35
Malteserkreuz	32
Massenträgheitsmoment (experimentell)	28
Massenträgheitsmoment (Reibscheiben)	39
Massenträgheitsmoment (Rotation)	31.1
Massenträgheitsmoment (Translation)	31.2
Massenträgheitsmoment des Rotors	26
Massenträgheitsmoment für Sanftanlauf	13
Massenträgheitsmoment homogener Körper	27
Massenträgheitsmoment zyl. Stahlkörper	26.3
Massenträgheitsmomente (allgemein)	IV
Mitnehmer	35
Motorfeld	33
Motorkennlinie	3

N

Nachlaufweg	45
Nachlaufweg (Rotation)	45.2
Nachlaufweg (Translation)	45.1
Nachlaufweg beim Positionieren	53
Nachlaufwinkel	40.3
Nachlaufzeit	44.1, 44.3
Nachstellen	42
Nachstellmöglichkeit	42
Näherungsschalter	49.3.2
NEMA-Klassifizierung (Drehmoment)	18.3

P

Part-winding-starting	8
Pendeln einer Last	2.3
Permanentmagnet	33
polumschaltbare Positioniermotoren	52
Polumschaltung	23
Polumschaltung (Anschluss der Bremse)	36.4
Polumschaltung (Möglichkeiten und Grenzen)	53
Polumschaltung (thermische Bewertung)	25.5
Polumschaltung (unterteilter Anlauf)	6
Polzahl (maximal bei PU)	52.2

Stichwortverzeichnis

Positioniergeschwindigkeit (Richtwert)	54
Positionierung (allgemein)	48
potentielle Energie	41

R

Reibfläche	33
Reibungskennzahl	49.2
Reibziffer	49.2
Remanenz	38.1
Reservehaltung	34
Reversierung	20
Reversierung (thermische Bewertung)	25.2
Rotationsweg	45
Rotor-Massenträgheitsmoment	26
Rückschaltempfehlung	23.4
Rutschen auf Förderband	2.1

S

Sanftanlauf	36.5
sanftes Anlaufen und Bremsen (Kriterien)	2
Schaltarbeit	41
Schaltarbeit (Verminderung)	41.3
Schaltarbeit pro Bremsung	41.1
Schaltarbeit pro Reibungselement	41.3
Schaltbetrieb (überwiegende Beschleunigung)	16.2
Schaltbetrieb (überwiegende Leistungsabgabe)	16.2
Schaltbetrieb, (thermische Bewertung)	16
Schalt-Betriebsarten (Kennzeichnung)	16.1
Schaltpause	36.8.3
Schaltplan der GS-Bremsung	22.2, 22.4
Scheibe	33
Schlupfläufer	14
Schnellerregung	37.2
schwerer Lüfter für Sanftanlauf	13
Selbstnachstellung	42
Senkbetrieb	43.3
Sicherheitsbremse	33.2
Sonderläufer mit erhöhtem Schlupf	14
Spannungsspitzen	36.8.1
Spannungsumchaltung	36.2
Spule	35
Stabpendel	28.2
Ständeranlasser	36.5
Steckanschluss	36.9
Stern-Dreieck-Anlauf	7

Stichwortverzeichnis

Sternschaltung	36.1
Steuerung (wegabhängig)	49.3
Steuerung (zeitabhängig)	49.3
Stoppmotor	32

T

Takten	48
Technische Daten von Federdruckbremsen	A1
Teilwicklungsanlauf	8
Tellerfeder	33
thermisch gleichwertige Schalthäufigkeit Z_{th}	16.2.3
thermisch zulässige Schaltarbeit	41.2
thermische Bewertung der Bremsverfahren	25
thermische Bewertung des Schaltbetriebes	16
thermische Entlastung des Motors	37.4
Toleranzen	49
Toleranzen (Ansprechzeiten von Schützen)	49.3.1
Toleranzen (Antrieb)	49.1
Toleranzen (mechanische Bremse)	49.2
Toleranzen (Näherungsschalter)	49.3.2
Toleranzen (SPS)	49.4
Toleranzen (Steuerung)	49.3
Toleranzen (Zeitrelais)	49.3.3
Trägheitsfaktor Fl	29
Trägheitsmasse (experimentelle Ermittlung)	28
Trägheitsmasse homogener Körper	27
Trägheitsmasse, experimentelle Ermittlung	28
Transformator beim Einschalten	9
Translationsweg	45
Trommel	33
Typprüfung bei Schaltbetrieb	16.2.4

U

Übererregung	37.2
Übergangsverhalten	2.4
übersynchrone Bremsung (therm. Bewertung)	25.1
übersynchrone generatorische Bremsung	19
Umrichterbetrieb	36.6
Umrichtermotoren	54
Umwertung bewegter Massen	31
Unterteilter Anlauf bei Polumschaltung	6

V

variable Frequenz	36.6
-------------------	------

Stichwortverzeichnis

Verdrehwinkel	50
Verlustrarbeit bei langer Lüftzeit	37.3
Verluste bei elektrodynamischen Bremsverfahren	25
Verschleiß	42
Verzögerung	43.1
Verzögerungszeit	43.1
Vorwiderstände	10

W

Wartung	34
Welligkeit	36.8.3

Z

Zeitkonstante	37.2
Zeitrelais	49
zulässige Betriebsschalthäufigkeit Z_{lim}	16.2.2
Zusatz-Schwungmasse	13
Zweiflächen	33
Zweischeiben-Federdruckbremse an der Lüfterhaube	35.4
Zweischeiben-Federdruckbremse mit GS-Lüftmagnet am Lagerschild . . .	35.2