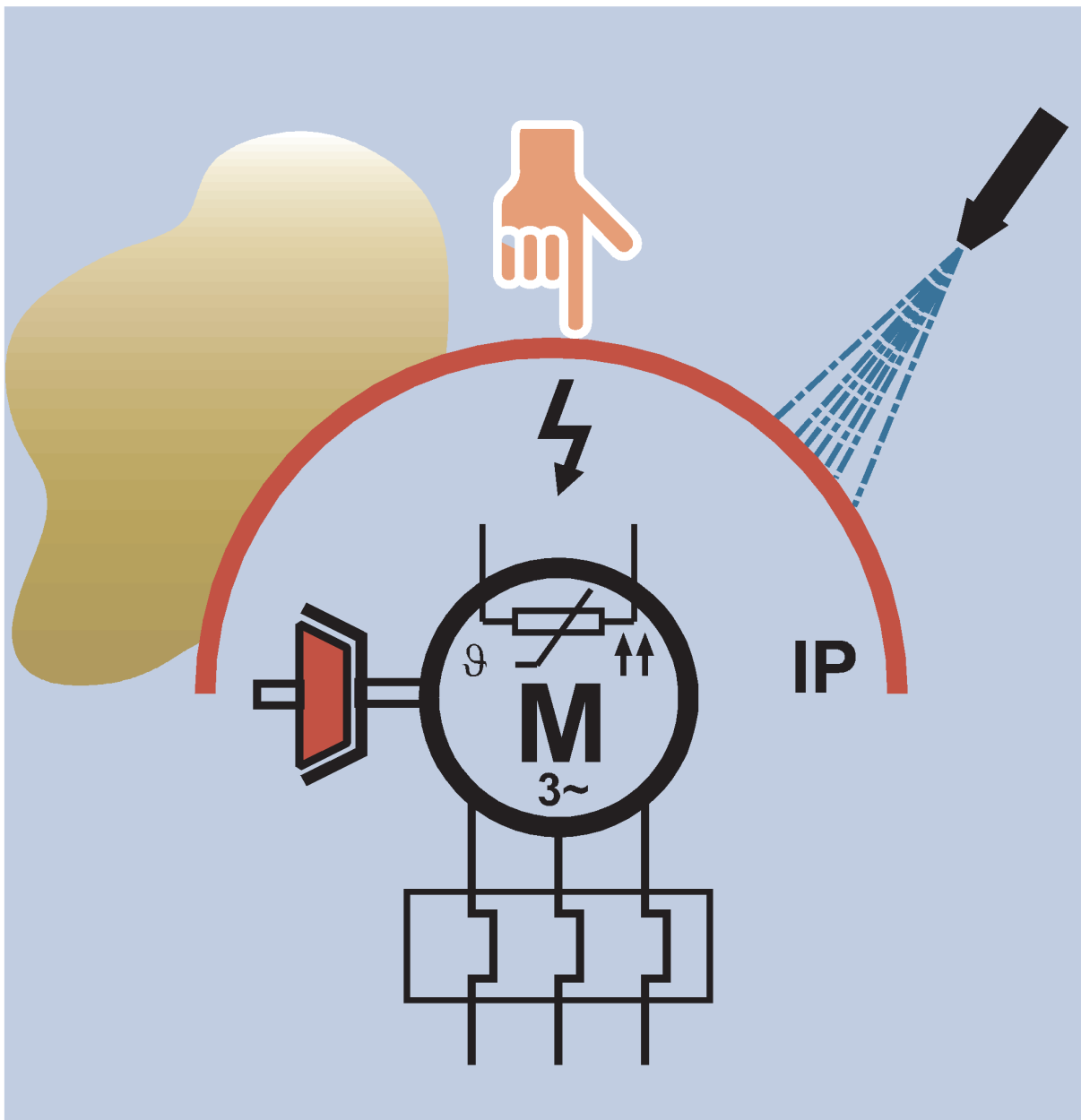


Schutzmaßnahmen bei Drehstrom-Getriebemotoren

Schutz gegen Berührung,
Umgebungseinflüsse, elektrische
und mechanische Überlastung



Helmut Greiner

Schutzmaßnahmen
bei Drehstrom-Getriebemotoren



Helmut Greiner

Schutzmaßnahmen bei Drehstrom-Getriebemotoren

Schutz gegen Berührung, Umgebungseinflüsse,
elektrische und mechanische Überlastung

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 und ist jetzt für Danfoss Bauer GmbH 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.

© 2004 Danfoss Bauer GmbH, Esslingen

Printed in Germany

Gesamtherstellung: DRUCK UND MEDIEN GMBH+CO., Riederich

VORWORT

Drehstrom-Käfigläufermotoren sind in der elektrischen Antriebstechnik erste Wahl. Sie sind robust und brauchen wenig Wartung. Mit einem statischen Frequenzumrichter ist ihre Drehzahl verstellbar oder regelbar – diese Motorenart dringt daher zunehmend auch in Anwendungsgebiete ein, die bisher dem Gleichstrom-Nebenschlussmotor vorbehalten waren.

Bei der konsequenten Fortentwicklung des »Einzelantriebes« wird der Elektromotor nicht nur verstärkt den natürlichen oder vom Arbeitsprozess ausgehenden Umgebungsbedingungen ausgesetzt – er muss auch zunehmend Aufgaben übernehmen, die früher mechanisch gelöst wurden: Takten und Positionieren, Stellen und Regeln u.v.a.m.

Um Produktionsausfälle und Reparaturkosten weitgehend zu vermindern, hat der »Schutz des Antriebsmotors« bei Planung, Installation und Betrieb einen hohen Stellenwert.

Auf elektrische Maschinen können am Aufstellungsort sehr unterschiedliche Umgebungseinflüsse einwirken. Die Wahl der richtigen IP-Schutzart ist wichtig, aber allein nicht ausreichend. Begriffe wie »Kondenswasser«, »Aufstellung im Freien« und »Tropentauglichkeit« stehen stellvertretend für die verschiedenen Anforderungen.

Bei vielen Überlastungsursachen, z. B. mechanischer Überlast, Überspannung, Unterspannung, Schalthäufigkeit, Blockierung, Zweileiter-Netzanschluss, führt eine erhöhte Stromaufnahme zu abnormaler Wicklungserwärmung. In anderen Fällen jedoch kann die Wicklung auch bei normaler Stromaufnahme gefährdet werden: Überhöhte Raumtemperatur, verminderte Kühlluftzufuhr oder Umrichterbetrieb bei niedriger Frequenz. Von den verschiedenen Verfahren zum Schutz der Motorwicklung ist daher je nach Gefahrenquelle und gefordertem Schutzzumfang das geeignete auszusuchen; gewisse Betriebsbedingungen können sogar eine Kombination von zwei verschiedenen Schutzeinrichtungen notwendig machen.

Im Gegensatz zur thermischen Überlastung der Motorwicklung genügen für eine Überbeanspruchung der mechanischen Übertragungsmittel (Wellen, Lager, Kupplungen, Getriebe) oft schon kurzzeitige und stoßartige Drehmomentspitzen. Die Spitzenwerte können durch dynamische Vorgänge erheblich über den vom Motor erzeugten Maximalmomenten liegen. Diese Überlastungsart ist auf elektrischem Wege nicht zu erfassen und erfordert daher besondere Vorkehrungen schon bei der Planung und Auswahl der Übertragungsmittel.

Das Buch spiegelt langjährige praktische Erfahrungen wider – es wendet sich an den Praktiker der Antriebstechnik.

Aichschieß, im April 2004

Helmut Greiner

INHALTSVERZEICHNIS

- 1 Drehstrommotoren und Getriebemotoren in der Antriebstechnik**
 - 1.1 Anteil der Drehstrommotoren
 - 1.2 Anteil der Getriebemotoren

- 2 Berührungsschutz**
 - 2.1 Direktes Berühren
 - 2.1.1 Gefährliche aktive Teile
 - 2.1.2 Gefährliche mechanische Teile
 - 2.1.3 Kinderfinger
 - 2.2 Indirektes Berühren
 - 2.2.1 Schutzleiter
 - 2.2.2 Potentialausgleich
 - 2.3 Umrichterspeisung

- 3 IP-Schutzarten (IP-Code)**
 - 3.1 Berührungsschutz im IP-Code
 - 3.1.1 Fakultativer Zusatzbuchstabe
 - 3.1.2 Prüfsonden
 - 3.1.3 Prüfung auf Berührungsschutz nach Zusatzbuchstaben
 - 3.1.4 Prüfung auf Berührungsschutz nach der ersten Kennziffer
 - 3.2 Fremdkörperschutz
 - 3.2.1 Grobe Fremdkörper
 - 3.2.2 Staub
 - 3.2.2.1 Prüfung auf Staubschutz
 - 3.2.2.2 Abdichtung am Klemmenkasten
 - 3.2.2.3 Abdichtung der Wälzlager
 - 3.2.2.4 Verminderung der Kühlwirkung
 - 3.2.2.5 Staubexplosionsschutz
 - 3.3 Wasserschutz
 - 3.4 Umstellung der Einführungsgewinde von Pg auf metrisch
 - 3.4.1 Abstufung der Nenngößen und Dichtbereich
 - 3.4.2 Austauschbarkeit bei maximalem Kabeldurchmesser
 - 3.4.3 Einführung in den Anschlußkasten von Normmotoren

- 4 Umgebungsbedingungen**
 - 4.1 Wärmeklasse
 - 4.2 Umgebungstemperatur
 - 4.2.1 Ausgangslage nach den Normen
 - 4.2.2 Maßnahmen bei hohen Umgebungstemperaturen
 - 4.2.3 Maßnahmen bei tiefen Umgebungstemperaturen
 - 4.3 Aufstellungshöhe
 - 4.4 Spritzwasser, Überflutung
 - 4.4.1 Aufstellung an Deck – Zusatzbuchstaben S und M
 - 4.4.2 Wettergeschützte Maschinen – Zusatzbuchstabe W
 - 4.4.3 Vereisung
 - 4.4.4 Strahlwasser
 - 4.4.5 Hochdruckreinigung und Reinigungszusätze
 - 4.4.6 Dauerberieselung
 - 4.4.7 Vorübergehende Überflutung
 - 4.4.8 Mindestschutzarten nach den Errichtungsbestimmungen
 - 4.5 Kondenswasser
 - 4.5.1 Physikalischer Vorgang
 - 4.5.2 Kondenswassermenge

- 4.5.3 Größe und Lage von Kondenswasserlöchern
- 4.5.4 Schutz gegen Kondenswasser
- 4.5.5 Abgrenzung Kondenswasser – Fremdwasser – Ausscheidung
- 4.6 Feuchtigkeit, Tropen, Termiten
 - 4.6.1 Feuchtigkeit
 - 4.6.2 Tropen
 - 4.6.3 Schimmelpilze
 - 4.6.4 Termiten
 - 4.6.5 Isolationswiderstand
- 4.7 Aufstellung im Freien
 - 4.7.1 Bezüge in den Schutzart-Normen
 - 4.7.2 Hinweise in den Errichtungsbestimmungen
 - 4.7.3 Unterschiede nach Art des Betriebsmittels
- 4.8 Stoß, Schwingungen, Schock
 - 4.8.1 Stoß
 - 4.8.2 Schwingungen
 - 4.8.3 Schock
- 4.9 Explosionsschutz

5 Überlastungsarten für den Motor

- 5.1 Arbeitsmaschine
 - 5.1.1 Erhöhter Leistungsbedarf
 - 5.1.2 Blockierung
- 5.2 Netz
 - 5.2.1 Toleranzen nach Norm
 - 5.2.1.1 Netzspannung nach DIN IEC 60038
 - 5.2.1.2 Zulässige Spannungsschwankungen für elektrische Maschinen
 - 5.2.2 Betriebsverhalten bei Spannungsänderung
 - 5.2.3 Spannungsspitzen
 - 5.2.3.1 Selbstinduktion einer Magnetspule
 - 5.2.3.2 Schaltspannung bei Pulsumrichtern
 - 5.2.3.3 Maßnahmen beim Isoliersystem
 - 5.2.4 Zweileiterbetrieb
 - 5.2.4.1 Ursachen für den Zweileiterbetrieb
 - 5.2.4.2 Auswirkungen auf Stromaufnahme und Wicklungserwärmung
 - 5.2.4.3 Auswirkungen auf die Ströme in den Wicklungssträngen
 - 5.2.4.4 Typische Schadensbilder von Drehstrom-Ständerwicklungen
 - 5.2.4.5 Ansprechwerte von Bimetallauslösern
 - 5.2.4.6 Phasenausfallempfindlichkeit von Motorschutzrelais
 - 5.2.4.7 Phasenausfallschutz bei Zündschutzart »e«
 - 5.2.4.8 Zusammenfassung zur Phasenausfallempfindlichkeit
- 5.3 Betriebsarten
 - 5.3.1 Einteilung
 - 5.3.2 Dauerbetrieb S1
 - 5.3.3 Kurzzeitbetrieb S2
 - 5.3.4 Temperaturverlauf bei S3
 - 5.3.5 Aussetz-Schaltbetrieb S4
 - 5.3.6 Drehrichtungs-Umschaltung
 - 5.3.7 Drehzahl-Umschaltung
 - 5.3.8 Elektrodynamische Auslaufbremsung
 - 5.3.8.1 Übersynchrone, generatorische Bremsung
 - 5.3.8.2 Gegendrehfeldbremsung
 - 5.3.8.3 Gleichstrom-Auslaufbremsung
 - 5.3.8.4 Polumschaltung
 - 5.3.9 Mechanische Bremsung

- 5.3.10 Frequenzgeführte Drehzahländerung
 - 5.3.10.1 Anlauf
 - 5.3.10.2 Bremsung
- 5.4 Kühlung
 - 5.4.1 Kühlmitteltemperatur
 - 5.4.2 Behinderung der Kühlluftzufuhr
 - 5.4.3 Niedrige Drehzahl
- 5.5 Antriebe für Hebezeuge
 - 5.5.1 Wicklungsschutz
 - 5.5.2 Drehfeldüberwachung
 - 5.5.3 Senkbremsung
 - 5.5.4 Phasenausfallempfindlichkeit
 - 5.5.5 Überdrehzahlschutz
- 6 Schutz der Motorwicklung**
 - 6.1 Stromabhängige Überstromauslöser
 - 6.1.1 Schmelzsicherungen
 - 6.1.2 Stromabhängig verzögerte thermische Überstromauslöser
 - 6.2 Thermischer Motorschutz durch Thermistoren (TMS)
 - 6.2.1 Wirkungsweise des Thermistor-Motorschutzes
 - 6.2.2 Einbau der Temperaturfühler
 - 6.2.2.1 Oberflächenbelüftete Maschinen (z. B. IC411, IC416)
 - 6.2.2.2 Durchzugbelüftete Maschinen (z. B. IC01, IC06)
 - 6.2.2.3 Einbettung in den Wickelkopf
 - 6.2.2.4 Nachträgliche Anbringung am Wickelkopf
 - 6.2.3 Temperaturverlauf in Wicklung und Fühler
 - 6.2.3.1 Langsamer Temperaturanstieg (z. B. Betriebsart S1)
 - 6.2.3.2 Rascher Temperaturanstieg
 - 6.2.4 Einfluß der Ankoppelungszeit T_K
 - 6.2.5 Einfluß der Stromdichte
 - 6.2.6 Wahl der Nennansprechtemperatur NAT
 - 6.3 Thermoschutzschalter
 - 6.4 Widerstandsthermometer
 - 6.5 Elektronische Überlastrelais
 - 6.6 Überlastungsarten und ihre Schutzmöglichkeiten
- 7 Aufstellung**
 - 7.1 Aufstellungsort
 - 7.2 Bauform und Aufstellung
 - 7.3 Ausrichtung
 - 7.4 Befestigung
- 8 Wahl der Übertragungsmittel**
 - 8.1 Kupplungen
 - 8.2 Rechenbeispiel für überhöhte Radialbelastung
 - 8.3 Zugmittel mit Radialkraft (Querkraft)
 - 8.3.1 Querkraftbelastung der Arbeitswelle
 - 8.3.2 Höhe und Richtung der Querkraft
 - 8.4 Antriebselemente mit formschlüssiger Kraftübertragung
 - 8.4.1 Kettenantrieb
 - 8.4.2 Antrieb über Stirn-Zahnräder
 - 8.5 Antriebselemente mit reibschlüssiger Kraftübertragung
 - 8.5.1 Riemenantrieb
 - 8.5.2 Antrieb über Reibrad

- 8.6 Belastbarkeit der Arbeitswellenlager
 - 8.6.1 Richtwerte für zulässige Bemessungs-Radialkraft
 - 8.6.2 Einfluss der Drehzahl
 - 8.6.3 Kraftangriff auf der Wellenstumpflänge
- 8.7 Polygoneffekt bei Kettenrädern
- 8.8 Drehrichtung und Krafrichtung
- 8.9 Optimale Gestaltung des Getriebegehäuses
- 8.10 Computerunterstützung bei der Auswahl
- 8.11 Zusammenfassung
- 8.12 Aufziehen der Übertragungsmittel
- 8.13 Wuchtung von Motoren und Verbundteilen
 - 8.13.1 Übliche Passfedervereinbarungen
 - 8.13.2 Neue internationale Festlegungen
 - 8.13.3 Kennzeichnung und Liefervereinbarung
 - 8.13.4 Mögliche Montagefehler
- 9 Wälzlagerschmierung**
 - 9.1 Schmierstoffsorte
 - 9.2 Schmierfrist
 - 9.2.1 Schmierfrist nach Angaben der Wälzlagerhersteller
 - 9.2.2 Schmierfrist nach Anforderungen des VIK
 - 9.2.3 Schmierfrist nach Entwurf für Betriebsart S1
 - 9.3 Temperaturbereich
 - 9.4 Belastbarkeit
 - 9.5 Nachschmiereinrichtung
 - 9.6 Verträglichkeit
 - 9.7 Lagerabdichtung
- 10 Getriebeschmierung**
 - 10.1 Penetration von Getriebefließfetten
 - 10.2 Viskosität
 - 10.3 Hochdruckeigenschaften von Schmierstoffen
 - 10.4 Alterungsbeständigkeit von Schmierstoffen
 - 10.5 Schmierfrist
 - 10.6 Synthetische Schmierstoffe
 - 10.7 Schmierstoffmenge
 - 10.7.1 Schmierstoffpegel
 - 10.7.2 Schmierstoffbedeckung als Zündschutzart »k«
 - 10.8 Schmierstoffwechsel
 - 10.9 Schmierstoffsorte
 - 10.10 Dichtungen
 - 10.10.1 Passflächen
 - 10.10.2 Radial-Wellendichtringe
 - 10.10.3 Dichtstelle zwischen Motor und Getriebe
 - 10.10.4 Konstruktive Ausführung der Dichtung an der Läuferwelle
 - 10.10.5 Prüfung von Wellendichtringen
 - 10.10.6 Temperatur-Einsatzbereiche von Wellendichtringen
 - 10.10.7 Anwendungsbeispiel

- 11 Langzeitige mechanische Überlastung**
 - 11.1 Drehmomentüberlastung wegen flacher Stromkennlinie
 - 11.2 Überwachung durch Temperaturfühler
 - 11.2.1 Motoren mit großen thermischen Reserven
 - 11.2.2 Betrieb bei niedrigen Umgebungstemperaturen
 - 11.3 Radiale Wellenbelastung
 - 11.4 Axiale Wellenbelastung

- 12 Kurzzeitige, kontrollierte Drehmomentstöße**
 - 12.1 Definition
 - 12.2 Mechanische Bauteile des Motors
 - 12.3 Getriebe und andere mechanische Übertragungsmittel
 - 12.4 Service Factor für Motoren

- 13 Extreme Drehmomentspitzen**
 - 13.1 Mechanische Abgabe und elektrische Aufnahme
 - 13.2 Formen mechanischer Energie
 - 13.3 Schwungradenergie = Schadenspotential
 - 13.3.1 Rechenbeispiel
 - 13.3.2 Richtwerte für Arbeitsvermögen und Schadenspotential
 - 13.4 Mechanischer Überlastungsschutz
 - 13.5 Stoßverstärkende Übertragungsmittel
 - 13.5.1 Leer-Hochlaufzeit
 - 13.5.2 Leer-Hochlaufweg
 - 13.5.3 Versuchsergebnisse
 - 13.6 Stoßdämpfende Übertragungsmittel
 - 13.7 Beispiele für die Klassifizierung von Übertragungsmitteln
 - 13.7.1 Stoßdämpfend
 - 13.7.2 Stoßneutral
 - 13.7.3 Stoßverstärkend
 - 13.8 Schalten in Phasenopposition
 - 13.9 Stern-Dreieckschaltung kein Sanftanlauf

- 14 Schutzmöglichkeiten für mechanische Bauteile**

- 15 Schutzmöglichkeiten für Getriebe und Motoren**

Literaturverzeichnis

Stichwortverzeichnis

1 Drehstrommotoren und Getriebemotoren in der Antriebstechnik

Drehstrom-Asynchronmotoren mit Käfigläufer sind in der elektrischen Antriebstechnik erste Wahl. Sie verdanken ihren guten Ruf vor allem der robusten Bauweise und dem geringen Wartungsaufwand. Bei Verwendung eines statischen Frequenzumrichters ist ihre Drehzahl verstellbar oder regelbar – diese Motorenart dringt daher zunehmend auch in Anwendungsgebiete ein, die bisher dem Gleichstrom-Nebenschlussmotor vorbehalten waren.

Bei der konsequenten Fortentwicklung des **Einzelantriebs** wird der Elektromotor nicht nur verstärkt den natürlichen oder vom Arbeitsprozess ausgehenden Umgebungsbedingungen ausgesetzt – er muss auch zunehmend Aufgaben übernehmen, die früher mechanisch gelöst wurden: Takten und Positionieren, Stellen und Regeln seien stellvertretend für die Ansprüche genannt.

Um Produktionsausfälle und Reparaturkosten weitgehend zu vermindern, muss dem Schutz des Antriebsmotors bei Planung, Installation und Betrieb besonderes Gewicht beigemessen werden.

In den folgenden beiden Abschnitten wird gezeigt, weshalb sich die Betrachtung auf Drehstrommotoren beschränkt, aber Getriebemotoren einschließt.

1.1 Anteil der Drehstrommotoren

Der Drehstrom-Asynchronmotor mit Käfigläufer kann als der **Industrieantrieb** bezeichnet werden.

Er stellt etwa 70 % aller industriellen Antriebe (Bilder 1.1.1 und 1.1.2); etwa 25 Mio. Antriebe dieser Art sind in Deutschland im Einsatz.

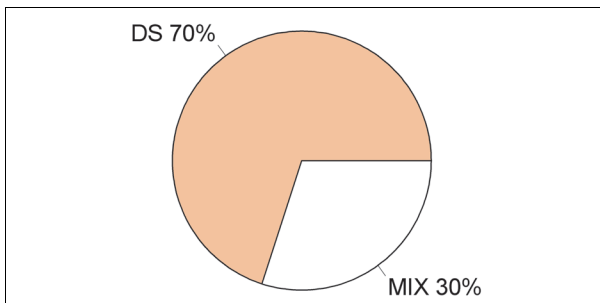


Bild 1.1.1
Industrielle Antriebe in Deutschland
DS Drehstrommotoren
MIX andere Motorenarten

Quelle : SIEMENS

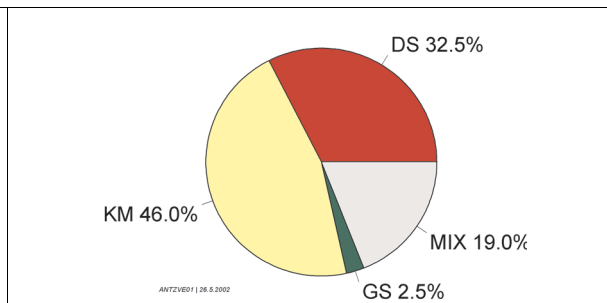


Bild 1.1.2
Wert der Produktion 2001 in Deutschland
DS Drehstrommotoren
GS Gleichstrommotoren
KM Kleinmotoren
MIX andere Motorenarten
Quelle : ZVEI Jahresbericht 2001

Die Vorteile dieser Antriebsart sind unübersehbar; sie sind zwangsläufig verbunden mit der Festlegung auf folgende **Drehzahl**:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} - \Delta n$$

- n Drehzahl bei Belastung in r/min
- f Netzfrequenz in Hz
- p Polpaarzahl (meist zwischen 1 und 6)
- Δn Schlupfdrehzahl in r/min

Je nach Polpaarzahl und Schlupf unterscheiden sich die tatsächlichen Drehzahlen (Tabelle 1.1.3).

Tabelle 1.1.3 Übliche Drehzahlen von Drehstrom-Asynchronmotoren

Polzahl	Synchrondrehzahl in r/min		Bemessungsdrehzahl in r/min			
	bei 50 Hz	bei 60 Hz	bei 50 Hz		bei 60 Hz	
2	3000	3600	2750 ... 2980	3200 ... 3520		
4	1500	1800	1300 ... 1450	1600 ... 1760		
6	1000	1200	830 ... 990	1020 ... 1170		
8	750	900	650 ... 740	780 ... 870		
12	500	600	440 ... 485	530 ... 590		

1.2 Anteil der Getriebemotoren

Die technisch und wirtschaftlich optimalen Drehzahlen der üblichen Elektromotoren (z. B. 1500 r/min bei einem 4poligen Drehstrom-Asynchronmotor) sind für die meisten Anwendungen der industriellen Antriebstechnik zu hoch (Bild 1.2.1). Die zwangsläufig benötigten Untersetzungsgetriebe werden zweckmäßig mit dem Motor zu einer Einheit vereinigt. In der Regel bietet der Getriebemotor gegenüber offenen oder getrennten Untersetzungen höheren Wirkungsgrad, besseren Unfallschutz, geringeren Raumbedarf und einfachere Montage. Da das Getriebe nicht nur die Drehzahl reduziert, sondern im Gegensatz zu fast allen rein elektrischen oder elektronischen Methoden (z. B. Gleichstrommotoren oder umrichter gespeiste Motoren) auch das Drehmoment steigert, werden Getriebemotoren auch weiterhin zunehmend in den Betrieben und Werkstätten zur Installation und Instandhaltung anzutreffen sein.

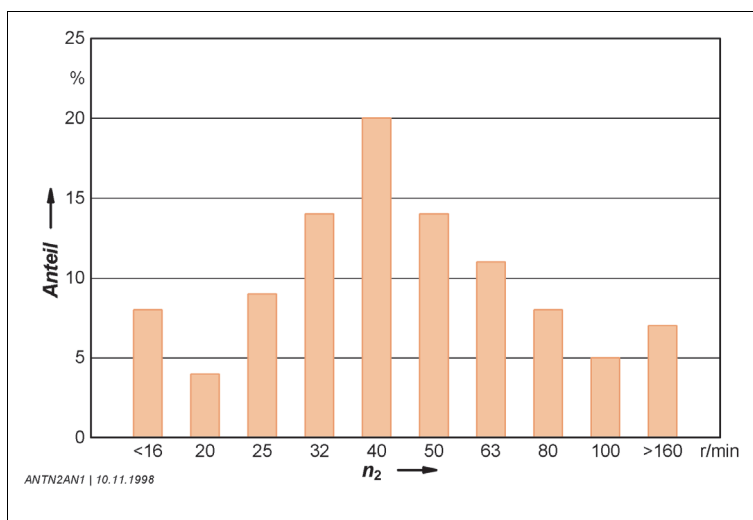


Bild 1.2.1 Drehzahlstatistik als Beispiel für den Drehzahlbedarf in der industriellen Antriebstechnik [2.4]

Der Anteil der Getriebemotoren an der Gesamtzahl aller installierten und in Betrieb befindlichen elektrischen Antriebe ist in den verschiedenen Branchen recht unterschiedlich. In den Werken der Großchemie, wo das hydraulische und pneumatische Fördern dominiert, liegt er »nur« bei etwa 15 ... 30 %. In der Automobilindustrie mit ihrer hochrationalisierten Förder- und Handhabungstechnik machen die Getriebemotoren dagegen schon etwa 50 ... 75 % aller eingesetzten und bevorrateten Antriebe aus (Bild 1.2.2).

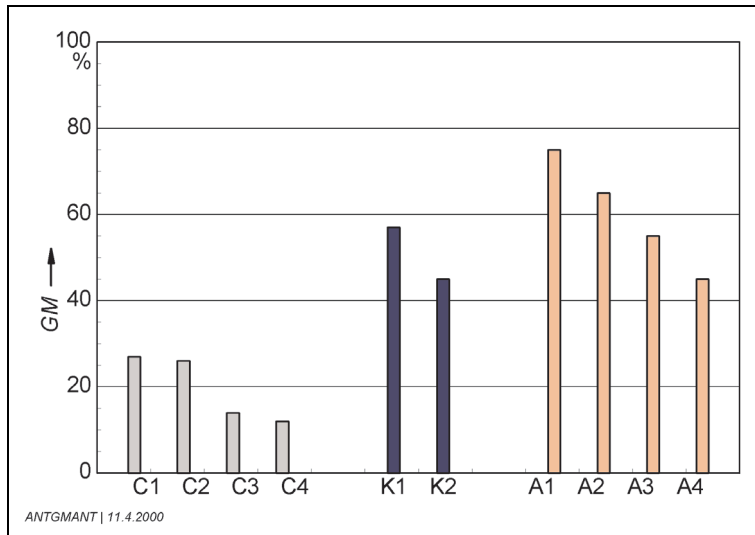


Bild 1.2.2
Anteil der Getriebemotoren (GM) an der Gesamtzahl aller elektrischen Antriebe in Werken der Automobilindustrie (A1 ... A4), Elektrizitätswirtschaft (einschließlich Stellantriebe) (K1, K2) chemischen Industrie (C1 ... C4)

Quelle: [2.5]

2 Berührungsschutz

Im Gesamtkonzept für den **Schutz gegen elektrischen Schlag** [2.17] hat der Berührungsschutz eine wichtige Funktion.

2.1 Direktes Berühren

Bei drehenden elektrischen Maschinen wird der Schutz gegen direktes Berühren meist durch ein Gehäuse erreicht, das den Zugang zu gefährlichen Teilen verhindert. Obwohl der IP-Code seit der Neufassung der Norm [1.1], [2.1] die Möglichkeit bietet, den Berührungsschutz durch Abstände oder Abdeckungen – ausgewiesen durch die Zusatzbuchstaben A, B, C oder D – zu realisieren, wird bei drehenden elektrischen Maschinen traditionell der Berührungsschutz durch die Einhaltung von kleinen Öffnungsweiten erreicht. Für Fremdkörper- und Berührungsschutz kommen also die gleichen Kennziffern und Prüfmethode zur Anwendung.

Personen sind zu schützen gegen

- Berühren von gefährlichen aktiven Teilen mit Niederspannung (Bemessungsspannung \leq AC 1000 V),
- Berühren von gefährlichen mechanischen Teilen (glatte drehende Wellen gelten als nicht gefährlich),
- Annäherung unter ausreichendem Abstand an gefährliche aktive Teile mit Hochspannung innerhalb eines Gehäuses (Bemessungsspannung $>$ AC 1000 V).

2.1.1 Gefährliche aktive Teile

Teile, die einen elektrischen Schlag geben können (z. B. blanke, spannungsführende Klemmen), müssen durch ein Gehäuse umhüllt oder abgedeckt sein, das im Normalfall **fingersicher** ist – also dem Schutzgrad IP2X (fakultativ IPXXB; s. Abschnitt 3) entspricht. Bei drehenden elektrischen Maschinen wird der Anschlussraum auch bei offener, durchzugbelüfteter Bauart meist mindestens im Schutzgrad IP4X oder IP5X ausgeführt.

2.1.2 Gefährliche mechanische Teile

Bei drehenden elektrischen Maschinen müssen auch die sich bewegenden Teile (z. B. das Lüfterrad) in die Schutzbetrachtung einbezogen werden.

Im Gegensatz zum Klemmenkasten muss bei der Abdeckung des Lüfters die maximal zulässige Öffnungsweite ausgenutzt werden, um den zur Kühlung erforderlichen Luftdurchsatz zu ermöglichen.

Die Flügel oder Speichen von Lüftern außerhalb des Gehäuses (**Außenlüfter**) müssen durch eine Abdeckung gegen direktes Berühren geschützt werden (Bild 2.1.2.2), welche die Anforderungen nach Tabelle 2.1.2.1 erfüllt.

Tabelle 2.1.2.1 Abdeckung von Außenlüftern

Schutzart der Maschine	Prüfung der Lüfterabdeckung mit
IP0X und IP1X	Kugel mit 50 mm Durchmesser
IP2X bis IP5X	Prüffinger

Für die Prüfung ist der Läufer von Hand langsam zu drehen. Glatte Wellen und ähnliche Teile werden als ungefährlich betrachtet. Bei gewissen Anwendungen (wie Landwirtschafts- oder Haushaltsgeräte) können weitergehende Maßnahmen für den Schutz gegen zufälliges Berühren notwendig sein.

Bei bestimmungsgemäßer Verwendung nach DIN 31000 / VDE 1000 »Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse« sind die folgenden Schutzarten zum Schutz gegen Berühren und gegen Gefährdung durch sich bewegende Teile üblich:

- IP0X bei Verwendung in **abgeschlossenen elektrischen Betriebsstätten** (Schutzart IP 0X ist nicht zulässig für gefährliche sich bewegende Teile; diese müssen gegen unbeabsichtigtes Berühren geschützt sein),
- IP1X bei Verwendung in **elektrischen Betriebsstätten**,
- IP2X in allen **übrigen Fällen**.

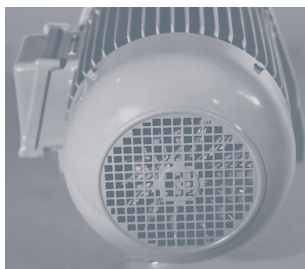


Bild 2.1.2.2

Lüfterhaube eines Drehstrommotors

Am Eintrittsgrill genügt der Schutzgrad IP2X mit 12 mm Maschenweite; meist wird jedoch eine Maschenweite von 8 mm x 8 mm ausgeführt.

Für bestimmte Anwendungen sind in den dafür gültigen Normen oder in anderen technischen Regeln weitergehende Anforderungen enthalten, oder es ist festgelegt, wie durch Maßnahmen besonderer Art eine Gefährdung vermieden wird.

Errichtungsbestimmungen, wie z. B. Normen der Reihe DIN VDE 0100, zeigen auf, wie durch Maßnahmen besonderer Art eine Gefährdung vermieden wird, z. B. durch **zusätzliche Abdeckungen**, **Abstandshalter** oder **Abschrankungen** bzw. Einbau in ein Gehäuse.

2.1.3 Kinderfinger

Für **industrielle** Betriebsmittel – z. B. Elektromotoren – gilt derzeit noch der Grundsatz, dass nur **unterwiesene Personen** damit arbeiten. Der Berührungsschutz ist daher am Finger eines Erwachsenen orientiert. Die Lufteintrittsöffnungen eines Elektromotors können daher Schlitze bzw. runde oder quadratische Löcher mit bis zu 12 mm Weite haben. Da früher für explosionsgeschützte Motoren nur eine Öffnungsweite von 8 mm x 8 mm zugelassen war, wurde meist einheitlich mit einer Maschenweite von 8 mm konstruiert (s. Bild 2.1.2.2). Motoren mit derartigen Lüfterhauben dringen aber zunehmend in den Bereich der **Laienwendungen** vor, z. B. als Antriebe für Hochdruck-Strahlgeräte, Gartenhäcksler, Betonmischer. Bild 2.1.3.1 zeigt, dass bei den genormten, am Erwachsenenfinger ausgerichteten Sicherheitsabständen ein Schutz gegen das **absichtliche Berühren durch Kinder** nicht gewährleistet ist.

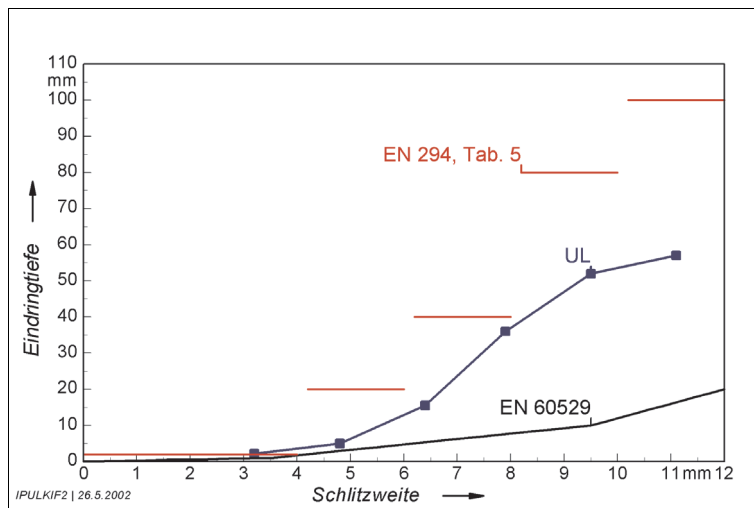


Bild 2.1.3.1
Vergleich von
Sicherheitsabständen und
Eindringtiefen

EN 60529	Eindringtiefe des Prüffingers nach EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1 für IP2X oder IPXXB
EN 294, Tab. 5	Sicherheitsabstände, die in der Norm DIN EN 294 hinter Schlitzweiten für Personen ab 3 Jahre vorgeschrieben sind
UL	Eindringtiefen (oberer Grenzwert), die durch »Underwriters Laboratories« bei Versuchen mit 100 Kindern im Alter zwischen 3 und 10 Jahren ermittelt wurden

In den Normen für die Schutzart elektrischer Maschinen (DIN VDE 0530 Teil 5 [1.18]) wird im Abschnitt 5.3 auf die Gefährdung von Kindern für die Abdeckung des Außenlüfters hingewiesen:

"Bei gewissen Anwendungen (wie Landwirtschafts- oder Haushaltsgeräte) können weitergehende Maßnahmen für den Schutz gegen zufälliges oder absichtliches Berühren notwendig sein."

Bild 2.3 zeigt, wie eine **solche weitergehende Maßnahme** aussehen kann.

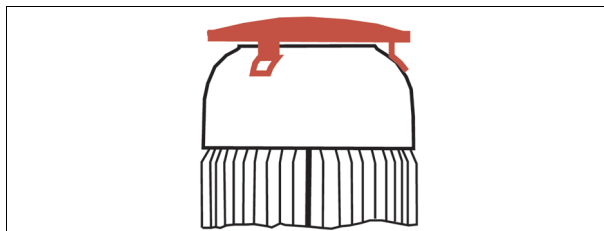


Bild 2.1.3.2
Zusätzliche Abdeckung für erhöhten
Berührungsschutz an der Lüfterhaube
eines geschlossenen,
oberflächenbelüfteten Elektromotors

Im internationalen Normenkomitee TC 70 laufen auf Anstoß durch das ACOS (Advisory Committee on Safety = Beratendes Komitee für Sicherheit) Arbeiten zur Festlegung der Maße eines genormten Kinderfingers, mit dem dann – nach entsprechender Erweiterung der Normen betroffener elektrischer Betriebsmittel – der Schutz gegen Berühren durch Kinder geprüft werden muss.

Zusammenfassung

Erhöhte Anforderungen an den Schutz gegen Zugang zum Außenlüfter eines Elektromotors, die über die genormte Fingersicherheit hinausgehen, sind dem Hersteller mitzuteilen. Der Berührungsschutz für die freie Welle und darauf angebrachte Übertragungselemente (Kupplungen, Riemenscheiben, Kettenräder) fällt grundsätzlich in die Zuständigkeit des Konstrukteurs oder Errichters der Anlage. Die gilt auch für ein eventuelles zweites Wellenende auf der Lüfterseite des Motors.

2.2 Indirektes Berühren

2.2.1 Schutzleiter

Für den **Schutz gegen elektrischen Schlag unter Fehlerbedingungen** oder **Fehlerschutz** werden bei elektrischen Maschinen überwiegend die **Schutzleiter-Schutzmaßnahmen** angewendet.

Die konstruktiven Anforderungen an die in der Regel im Innern des Anschlussraumes vorzusehende Erdungsklemme sind im Hauptabschnitt 13 von DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1 [1.6] vorgeschrieben:

Maschinen müssen mit Vorrichtungen zum Anschließen eines **Erdungsleiters** oder eines **Schutzleiters**, die als solche durch ein entsprechendes Symbol oder eine Beschriftung gekennzeichnet sind, ausgestattet sein. Diese Anforderung gilt nicht für Maschinen mit zusätzlicher Isolierung, Maschinen mit Bemessungsspannungen bis und einschließlich AC 50 V oder DC 120 V (s. DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411 und IEC 60449) oder Maschinen, die zur Montage in Anlagen mit zusätzlicher Isolierung bestimmt sind.

Bei Maschinen mit Bemessungsspannungen größer als AC 50 V oder DC 120 V, aber nicht mehr als AC 1000 V oder DC 1500 V muss die Anschlussklemme für den Erdungs- bzw. Schutzleiter in der Nähe der Außenleiter-Anschlussklemme im Innern eines Anschlusskastens, falls ein solcher vorgesehen ist, angeordnet sein. Maschinen mit Bemessungsleistungen über 100 kW müssen zusätzlich eine auf dem Gehäuse montierte **Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme** haben.

Maschinen für Bemessungsspannungen größer als AC 1000 V oder DC 1500 V müssen eine auf dem Gehäuse angeordnete Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme, z. B. eine Eisenlasche, besitzen und darüber hinaus eine Vorrichtung im Inneren des Anschlusskastens zum Anschließen eines leitfähigen Kabelmantels, falls dafür Bedarf besteht.

Die Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme muss so ausgeführt sein, dass eine gut leitende Verbindung mit dem Erdungs- bzw. Schutzleiter ohne Beschädigung des Leiters oder der Klemme sichergestellt ist. Berührbare, nicht zum Betriebsstromkreis gehörende leitfähige Teile müssen untereinander und mit der Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme elektrisch gut leitend verbunden sein. Wenn alle Lager und die Läuferwicklung der Maschine isoliert sind, muss die Welle mit der Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme elektrisch verbunden sein, es sei denn, Hersteller und Käufer vereinbaren andere Schutzmaßnahmen.

Ist eine Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme im Anschlusskasten vorgesehen, so muss vorausgesetzt werden, dass der Erdungs- bzw. Schutzleiter aus demselben Metall besteht wie die stromführenden Leiter. Ist eine Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme auf dem Gehäuse vorgesehen, so kann der Erdungs- bzw. Schutzleiter – nach vorheriger Vereinbarung – aus einem anderen Metall (z. B. Stahl) sein. In diesem Fall muss der Leitfähigkeit des Leiters bei der Bemessung der Klemme entsprechend Rechnung getragen werden.

Die Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme muss so ausgeführt sein, dass sie einen Erdungs- bzw. Schutzleiter des in Tabelle 2.2.1.1 angegebenen Querschnitts aufnehmen kann. Wenn ein Erdungs- bzw. Schutzleiter verwendet wird, dessen Querschnitt größer ist als in der Aufstellung angegeben, so empfiehlt es sich, den Querschnitt dieses Leiters einem der anderen aufgeführten Werte möglichst anzunähern.

Tabelle 2.2.1.1 Querschnitte der Erdungsleiter
(Auszug für Normmotoren bis Achshöhe 280)

Stromführender Leiter (mm ²)	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
Erdungs- oder Schutzleiter (mm ²)	4	6	10	16	25	25	25	35	50	70

Bei anderen Querschnitten stromführender Leiter muss der Mindestquerschnitt des Erdungs- bzw. Schutzleiters mindestens gleichwertig sein:

- demjenigen des stromführenden Leiters bei Leiterquerschnitten bis 25 mm²,
- 25 mm² bei Leiterquerschnitten zwischen 25 mm² und 50 mm²,
- 50 % des Querschnitts des stromführenden Leiters bei Leiterquerschnitten über 50 mm². Die Erdungs- bzw. Schutzleiterklemme muss nach DIN EN 60445 gekennzeichnet werden.

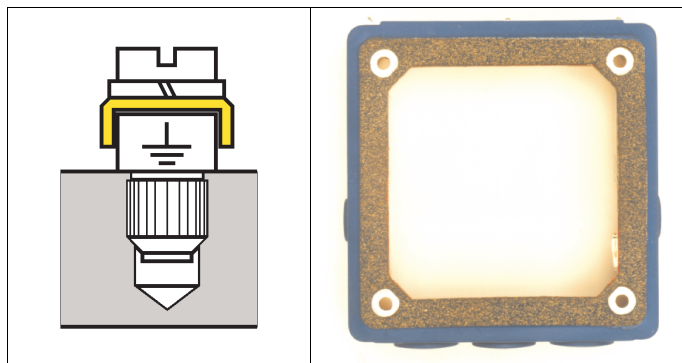


Bild 2.2.1.2
Beispiel einer Schutzleiterklemme
(links)
und für die leitwertgleiche
Verbindung zwischen
Klemmenkasten und Gehäuse
bzw. Deckel (blanke
Auflagenocken am Alu-
Druckgussteil)

2.2.2 Potentialausgleich

Ein zusätzlicher Potentialausgleich soll das Gehäuse der elektrischen Maschine und **fremde leitfähige Teile** auf gleiches oder annähernd gleiches Potential bringen. Für den Anschluss ist vom Hersteller in Nähe des Anschlusskastens eine äußere Schutzleiterklemme (z. B. nach Bild 2.2.1.2) anzubringen. Diese zusätzliche Schutzmaßnahme wird bei bestimmten Anwendungen in den zugehörigen Bestimmungen gefordert – z. B. bei Aufstellung in **landwirtschaftlichen Betriebsstätten**, in **feuergefährdeten** oder **explosionsgefährdeten Betriebsstätten** [1.16], [1.17].

Motoren, die für eine bestimmte Zündschutzart (z. B. »e«, »d« oder »p«) geprüft und zugelassen sind, haben diese zusätzliche äußere SL-Klemme werkseitig als Teil der Ex-Ausführung. Für andere Anwendungen muss sie von Fall zu Fall zwischen Besteller und Hersteller vereinbart werden, es sei denn, die Bemessungsleistung ist höher als 100 kW (s. Abschn. 2.2.1).

2.3 Umrichterspeisung

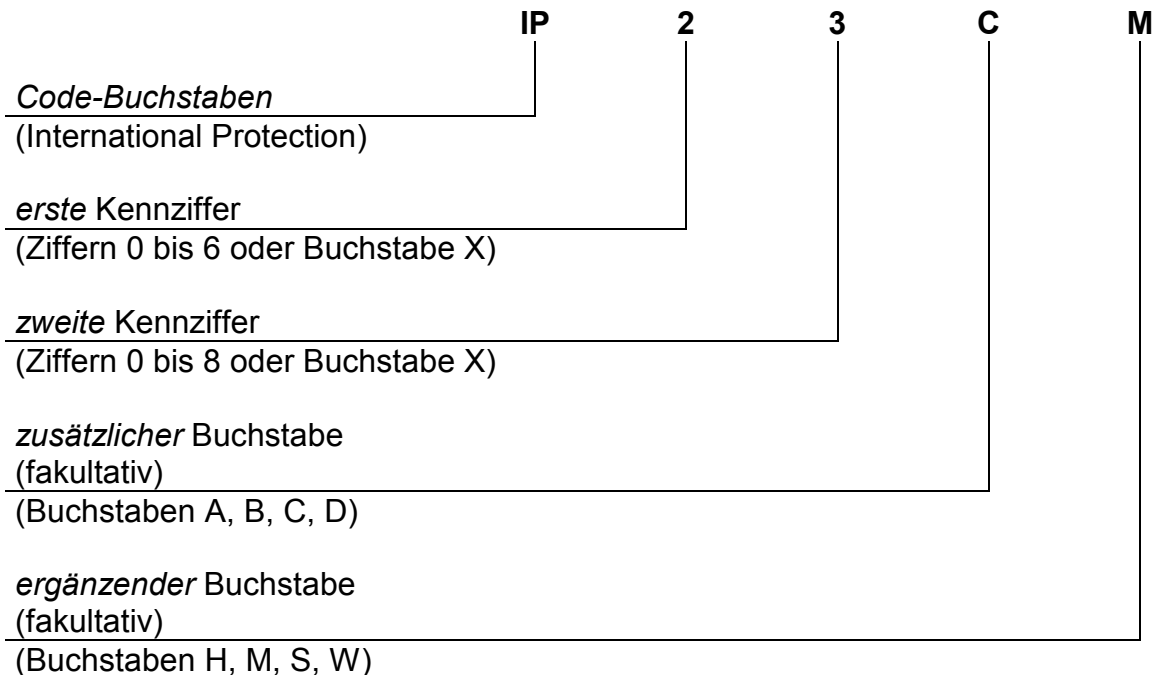
Bei Verwendung von bestimmten Stromrichtern (z. B. Frequenzumrichter mit Gleichstrom-Zwischenkreis in Drehstrom-Brückenschaltung) können bei Fehlern auf der Gleichspannungsseite **nichtpulsierende Gleichfehlerströme** auftreten, die eine ordnungsgemäße Funktion der **Fehlerstromschutzeinrichtung (RCD)** in Frage stellen. Die VDE-Bestimmungen werden entsprechend ergänzt, und es werden allstromsensitive Fehlerstromschutzschalter (Typ B) angeboten.

Ausführliche Hinweise zu diesem Thema in [3.4], [3.5], [3.12], [3.13].

3 IP-Schutzarten (IP-Code)

Bei der Auswahl einer elektrischen Maschine ist es wichtig, dass sie den Einsatz- und Umgebungsbedingungen entspricht. Die Wahl der richtigen **Schutzart** ist eine wichtige Voraussetzung, aber nicht die alleinige Gewähr für einen störungsfreien Betrieb [2.1], [2.19].

Die Schutzart durch ein Gehäuse wird mit einem alphanumerischen Code (**IP-Code**) angegeben. Die folgenden Erläuterungen gelten für den in EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1 [1.1] festgelegten Stand.



3.1 Berührungsschutz im IP-Code

Im Rahmen des Berührungsschutzes interessieren vor allem die erste Kennziffer und der neu eingeführte Zusatzbuchstabe.

Der **Schutz gegen Zugang zu gefährlichen Teilen** kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erreicht und beschrieben werden:

- kleine Öffnungsweiten** im Gehäuse, die das Eindringen von Fremdkörpern und Prüfsonden verhindern;
- große Öffnungsweiten, aber **innere Barrieren oder ausreichende Abstände**, die den Zugang der in ihrer Länge begrenzten Prüfsonden zu gefährlichen Teilen verhindern.

Bei elektrischen Maschinen wird der Berührungsschutz überwiegend durch eine **Begrenzung der Öffnungsweiten** erreicht und kann deshalb mit der ersten Kennziffer im Rahmen eines IP-Codes mit zwei Ziffern beschrieben werden.

Da jedoch andere Fachbereiche teilweise von der **Option Zusatzbuchstaben** Gebrauch machen und die Mindestanforderungen in VDE-Bestimmungen für den Schutz gegen direktes Berühren in Sicherheitsbestimmungen mit dem neuen IP-Code (z. B. IPXXB) ausgedrückt werden, werden hier beide Möglichkeiten beschrieben.

3.1.1 Fakultativer Zusatzbuchstabe

Zusätzliche Buchstaben werden nur verwendet,

- wenn der tatsächliche Schutz gegen das Berühren von gefährlichen Teilen höher ist als der durch die erste Kennziffer angegebene oder
- wenn nur der Schutz gegen das Berühren von gefährlichen Teilen angegeben wird und die erste Kennziffer durch ein X ersetzt ist.

Solch ein höherer Schutz kann z. B. durch Abdeckungen, geeignete Form von Öffnungen oder Abstände innerhalb des Gehäuses erreicht werden (Tabelle 3.1.1).

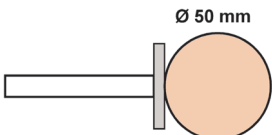
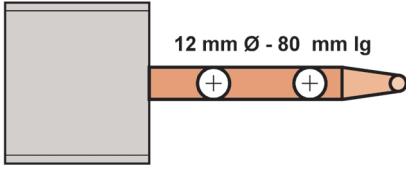
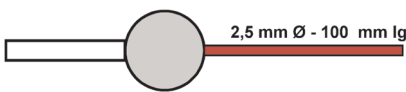

Tabelle 3.1.1 Zusatzbuchstaben für den Schutz gegen das Berühren von gefährlichen Teilen

Zusatzbuchstabe	Schutzgrad Kurzbeschreibung	Definition
A	geschützt gegen Berühren mit dem Handrücken	Die Berührungssonde (Kugel mit 50 mm Durchmesser) muss ausreichenden Abstand von gefährlichen Teilen haben.
B	geschützt gegen Berühren mit dem Finger	Der gegliederte Prüffinger (12 mm Durchmesser, 80 mm Länge) muss ausreichenden Abstand von gefährlichen Teilen haben.
C	geschützt gegen Berühren mit Werkzeug	Die Berührungssonde (2,5 mm Durchmesser, 100 mm Länge) muss ausreichenden Abstand von gefährlichen Teilen haben.
D	geschützt gegen Berühren mit Draht	Die Berührungssonde (1,0 mm Durchmesser, 100 mm Länge) muss ausreichenden Abstand von gefährlichen Teilen haben.

3.1.2 Prüfsonden

Die Zugangssonden wurden in EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1 [1.1] neu festgelegt. Sie gehören in ein System von Prüfsonden, das in DIN EN 61032 / VDE 0470 Teil 2 (Oktober 1998) ausführlich beschrieben ist und insgesamt 18 ausgewählte Varianten aus den IEC-Standards auflistet. Im Rahmen des IP-Codes werden die **Zugangssonden** nach Tabelle 3.1.2 benutzt.

Tabelle 3.1.2
Zugangssonden für die Prüfung des Berührungsschutzes im IP-System

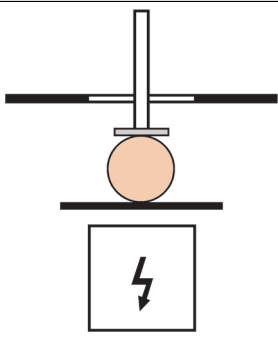
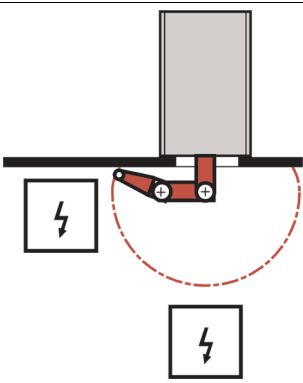
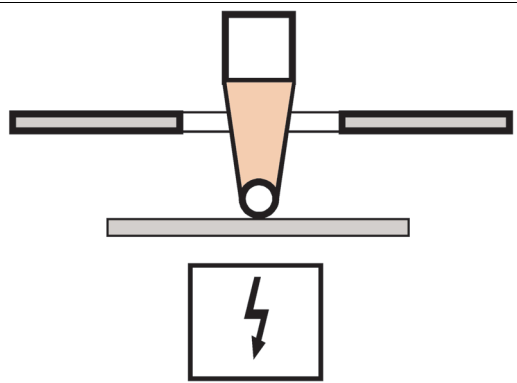
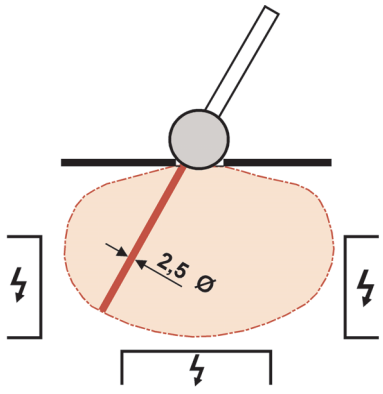
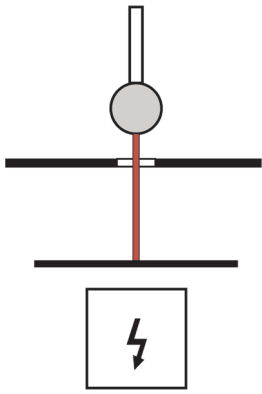
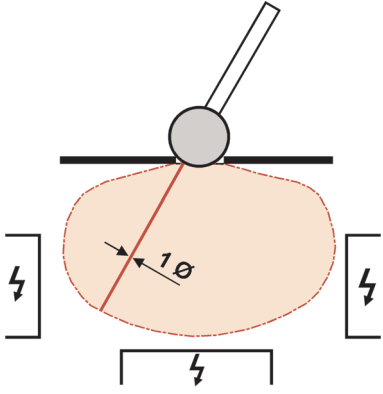
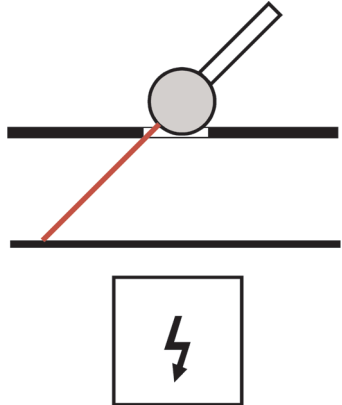
Schutz gegen Berühren mit	Zugangssonde	Erläuterung
Handrücken		Die Platte zwischen Kugel und Handgriff ist kein Anschlag, sondern ein Schutz für den Prüfer.
Finger		Der »gegliederte Prüffinger« hat zwei Gelenke; er ist im Rahmen der IP-Prüfung nur bis zu der im Bild dargestellten ersten Anschlagfläche 50 mm x 20 mm nach 80 mm Länge zu benutzen.
Werkzeug		Die »Anschlagfläche« ist als Kugel 35 mm Ø ausgebildet; sie soll die Knöchel simulieren, wenn das Werkzeug oder der Draht in der Hand gehalten wird.
Draht		

3.1.3 Prüfung auf Berührungsschutz nach Zusatzbuchstaben

Während bei der ersten Kennziffer vom Prinzip Schutz durch Begrenzung der Öffnungsweiten im Gehäuse Gebrauch gemacht wird, kommt bei den Zusatzbuchstaben der **Schutz durch Abstand oder Abdeckung** zur Anwendung. In Tabelle 3.1.3 wird die Prüfung mit den Zugangssonden erläutert:

3 IP-Schutzarten (IP-Code)


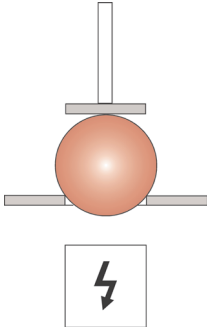

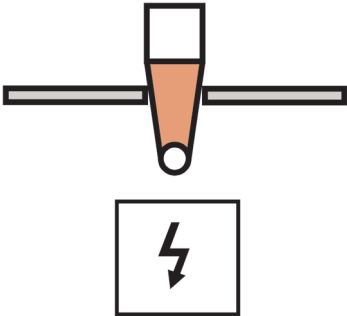

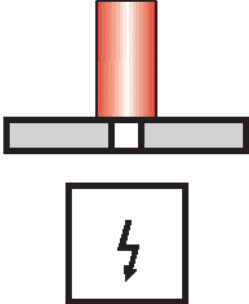

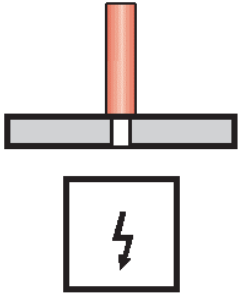
Tabelle 3.1.3 Anwendung der Zugangs sonden zur Prüfung des Berührungsschutzes nach den Zusatzbuchstaben im IP-Code

IP-Code	Berührungsschutz durch	
	Abstand	Abdeckung
IPXXA	-	
IPXXB		
IPXXC		
IPXXD		

3.1.4 Prüfung auf Berührungsschutz nach der ersten Kennziffer

Bei elektrischen Maschinen wird der Berührungsschutz durch das Prinzip **Begrenzung der Öffnungsweiten** erreicht. Die betriebsmittelspezifische Norm [1.18] macht deshalb **bewusst keinen Gebrauch** von dem fakultativen Zusatzbuchstaben (Tabelle 3.1.4).

Tabelle 3.1.4 Anforderungen an den Berührungsschutz bei den ersten Kennziffern IP1X ... IP6X

Schutzgrad	Schutz von Personen gegen Zugang zu gefährlichen Teilen	
<p>IP1X</p> <p>Handrücken</p> 		
<p>IP2X</p> <p>Finger</p> 		
<p>IP3X</p> <p>Werkzeug</p> 		
<p>IP4X IP5X IP6X</p> <p>Draht</p> 		

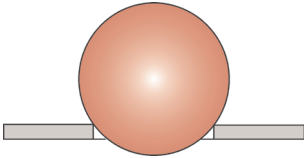
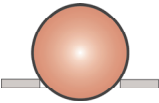
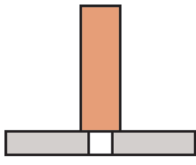
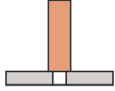
3.2 Fremdkörperschutz

Der Schutzgrad des Betriebsmittels innerhalb des Gehäuses gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern wird im IP-Code durch die erste Kennziffer beschrieben.

3.2.1 Grobe Fremdkörper

Den Schutz der Betriebsmittel gegen das Eindringen grober Fremdkörper beschreibt die Tabelle 3.2.1.

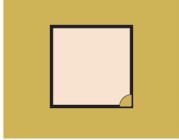

Tabelle 3.2.1 Anforderungen an den Fremdkörperschutz bei den ersten Kennziffern IP1X ... IP4X

Schutzgrad	Schutz des Betriebsmittels gegen Eindringen fester Fremdkörper	
IP1X	$\geq 50 \text{ mm } \varnothing$	
IP2X	$\geq 12,5 \text{ mm } \varnothing$	
IP3X	$\geq 2,5 \text{ mm } \varnothing$	
IP4X	$\geq 1,0 \text{ mm } \varnothing$	

3.2.2 Staub

Den Schutz der Betriebsmittel gegen das Eindringen von Staub beschreibt die Tabelle 3.2.2.

Tabelle 3.2.2 Anforderungen an den Staubschutz bei den ersten Kennziffern IP5X ... IP6X

Schutzgrad	Schutz des Betriebsmittels gegen Eindringen von Staub	
IP5X	staubgeschützt	
IP6X	staubdicht	

3.2.2.1 Prüfung auf Staubschutz

Der Staubschutz elektrischer Betriebsmittel wird nach [1.1] geprüft und beurteilt. Die übliche **geschlossene Ausführung** von elektrischen Maschinen entspricht der Schutzart IP 54. Der Unterschied zu der Sonderschutzart IP 65 wird aus der Gegenüberstellung der Abnahmebedingungen deutlich.

Bei der Prüfung in einer **Staubkammer** (Bilder 3.2.2.1.1 und 3.2.2.1.2) wird aus dem Innern des Prüflings mit einem Unterdruck von bis zu 20 mbar in 2 Stunden das 80- bis 120fache freie Luftvolumen abgesaugt. Lässt sich innerhalb 2 Stunden das 80fache Volumen des Prüflings nicht absaugen, so ist die Prüfung bis max. 8 Stunden fortzusetzen.

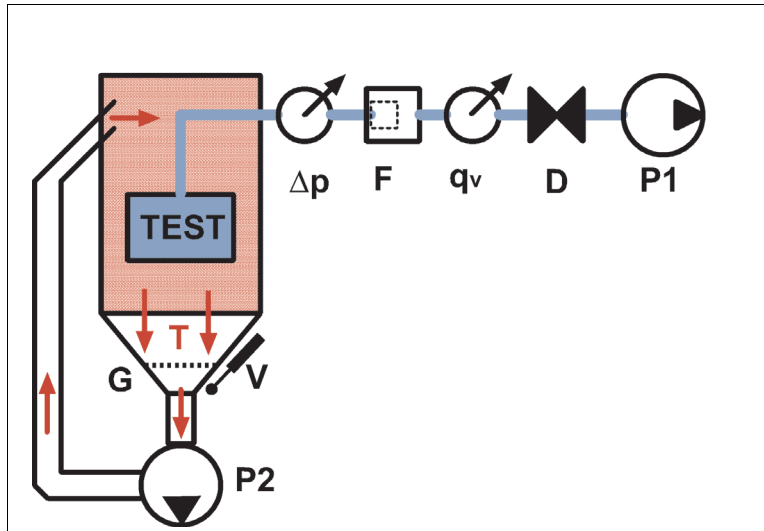


Bild 3.2.2.1.1
Schema der Staubprüfung
nach
EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1

T	Talkumpuder max. 75 μm (2 kg/m ³ Kammer)	TEST	Prüfling
V	Vibrator zum Lösen abgesetzten Staubes	G	Schutzgitter
Δp	Unterdruckmesser (max. - 20 mbar)	P1	Vakuumpumpe
q_v	Luft-Volumenstrom (max. 60 V _{Prüfling} /h)	F	Filter
P2	Staubumlaufpumpe	D	Drossel
		G	Schutzgitter

IP5X staubgeschützt

Das Eindringen von Staub ist nicht vollständig verhindert, aber Staub darf nicht in einer solchen Menge eindringen, dass das zufriedenstellende Arbeiten des Motors oder die Sicherheit beeinträchtigt wird.

Abnahmebedingungen:

Der Schutz ist zufriedenstellend, wenn ein Besichtigen zeigt, dass sich Talkumpuder nicht in einer Menge oder an Stellen derart angesammelt hat, dass **bei irgendeiner anderen Art von Staub** das ordnungsgemäße Arbeiten des Betriebsmittels oder die Sicherheit beeinträchtigt sein könnte.

Mit Ausnahme von besonderen Fällen, die in der betreffenden Produktnorm klar festgelegt werden müssen, darf sich kein Staub ablagern, wo dies zu Kriechströmen führen kann.

IP6X staubdicht

Es darf kein Staub eindringen.

Abnahmebedingungen:

Der Schutz ist zufriedenstellend, wenn nach Abschluss der Prüfung innerhalb des Gehäuses keine Staubablagerung sichtbar ist.

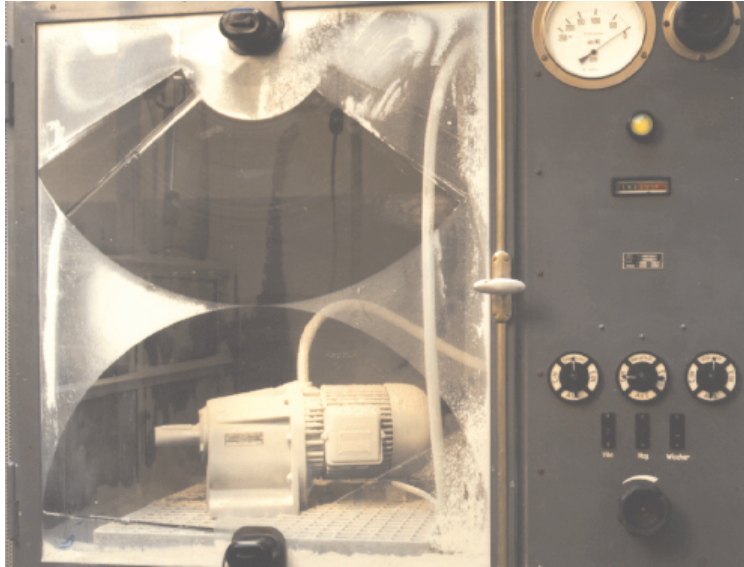


Bild 3.2.2.1.2
Staubkammer zur
Staubschutzprüfung nach
EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1

3.2.2.2 Abdichtung am Klemmenkasten

Beim Einsatz von Motoren in staubgefährdeten Bereichen ist zu prüfen:

- Bieten die werkseitig vorgesehenen Dichtungen (Bild 3.2.2.2.1) überhaupt Staubschutz?
- Sind die werkseitig vorgesehenen und unverlierbar angebrachten Dichtungen an den Passflächen zwischen Klemmenkasten und Ständergehäuse einerseits und Klemmenkastendeckel (3.2.2.2.2) andererseits unbeschädigt vorhanden?
- Sind die bauseitig anzubringenden Stopfbuchsverschraubungen für die Kabeleinführung beanspruchungsgerecht gewählt und richtig installiert?

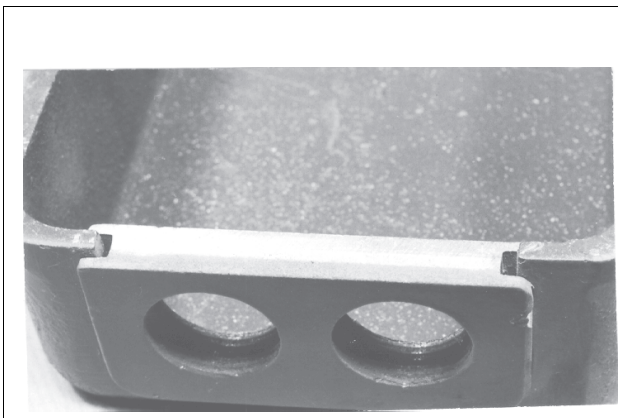


Bild 3.2.2.2.1
Ungeeignete Einföhrungsteile ohne
Staubschutz

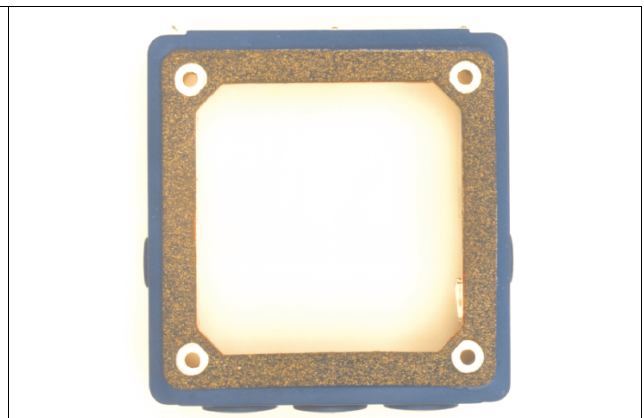


Bild 3.2.2.2.2
Selbstklebende Flächendichtung
aus Gummi-Kork-Mischung an den
Passflächen des Klemmenkastens
Schutzart IP6X

3.2.2.3 Abdichtung der Wälzlager

Die Ausfallursachen von elektrischen Maschinen und Wälzlagern mögen im Einzelfall je nach Industriezweig, Betriebsweise und Fabrikat von den in den Bildern 3.2.2.3.1 und 3.2.2.3.2 gezeigten statistischen Ermittlungen abweichen: Es bleibt die Tatsache, dass Wälzlager relativ häufig *wegen Verschmutzung* ausfallen.

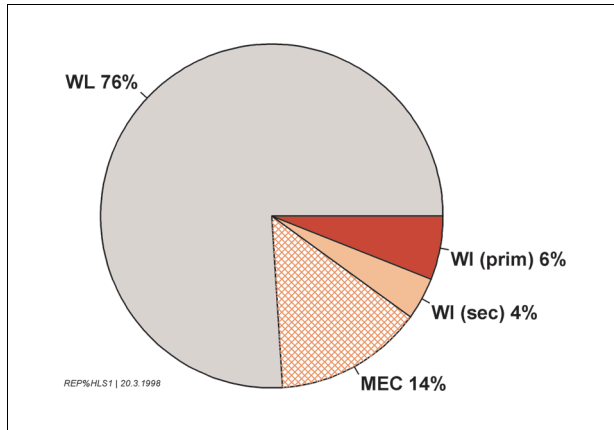


Bild 3.2.2.3.1
Anteil von Schadensursachen bei der Motoren-Instandsetzung der Fa. HÜLS AG

WL Wälzlager
MEC mechanische Teile
WI Wicklung

Quelle :
Vortrag *Wagner* beim ABB-Seminar der Ex-Sachverständigen 1990

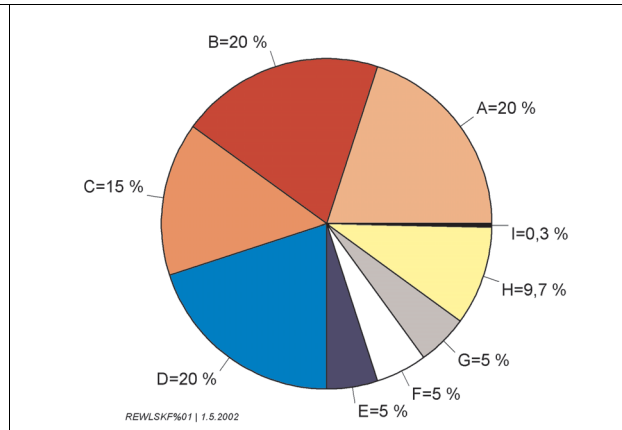


Bild 3.2.2.3.2
Ausfallursachen für Wälzlager (Quelle: SKF)

- A - Schmiermittel ungeeignet
- B - Schmiermittel gealtert
- C - Schmiermittel mangelt
- D - Feste Verunreinigungen
- E - Flüssige Verunreinigungen
- F - Montagefehler
- G - Folgeschäden
- H - Lager ungeeignet
- I - Material- oder Herstellungsfehler

Der Abdichtung der Wälzlager kommt also beim Einsatz in staubgefährdeten Bereichen eine ganz besondere Bedeutung zu (Bild 3.2.2.3.3).

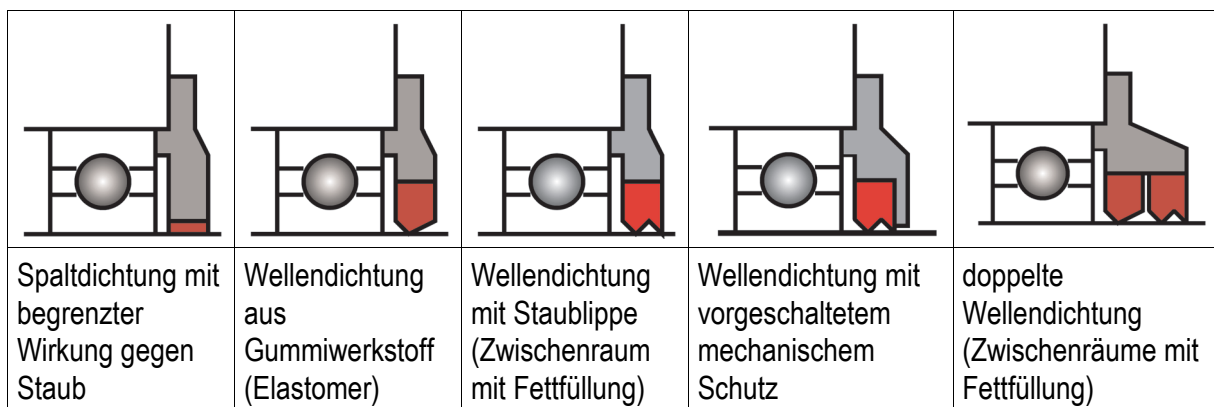


Bild 3.2.2.3.3 Verschiedene Stufen der Abdichtung von Wälzlagern gegen Staub

3.2.2.4 Verminderung der Kühlwirkung

Vor allem bei flusenförmigem Staub kann es zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Kühlwirkung kommen, wenn sich die Lufteintrittsöffnungen zusetzen, Kühlkanäle verstopfen (Bild 3.2.2.4) oder wenn vorgeschaltete Filter nicht rechtzeitig gereinigt werden.

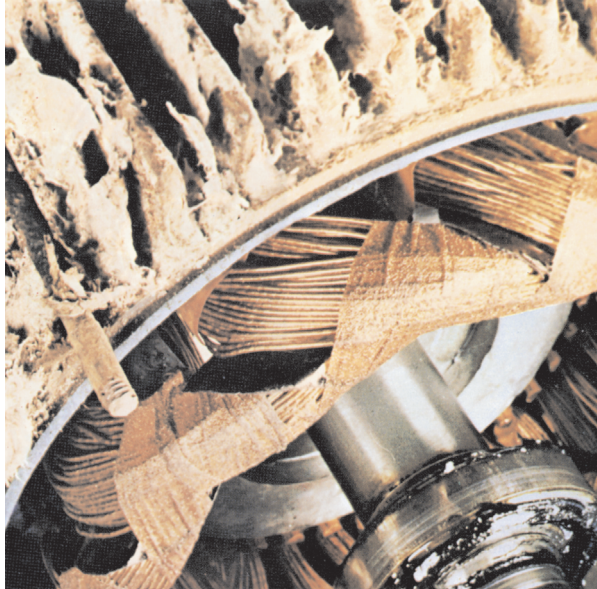


Bild 3.2.2.4
Starke Beeinträchtigung der Kühlwirkung bei einem oberflächenbelüfteten Motor wegen teilweiser Verstopfung der Kühlrippen

3.2.2.5 Staubexplosionsschutz

In staubexplosionsgefährdeten Bereichen der Zonen 10 und 11 bzw. 20, 21 und 22 erhält der Staubschutzgrad eine besondere, durch Bestimmungen [1.19] und Gesetze [1.20] geregelte Qualität. Ausführliche Angaben zu diesem Thema in [2.21]. Je nach Zone und Leitfähigkeit des Staubes sind die Mindestschutzarten nach Tabelle 3.2.2.5 vorgeschrieben.

Tabelle 3.2.2.5 Anforderungen an die Staubschtheit staubexplosionsschutzter elektrischer Betriebsmittel nach IEC 61241-14 und EN 50281-1-2

Nationale Normen	Zone 10		Zone 11	
DIN VDE 0170/0171 T.13	IP65		-	
DIN VDE 0165	-		Motor IP44 Klemmenkasten IP54	
Internationale Normen	Zone 20	Zone 21	Zone 22 Staub	
			leitend	nichtleitend
IEC 61241-14 Praxis A	IP6X	IP6X	IP6X	IP5X
EN 50281-1-2	IP6X	IP6X	IP6X	IP5X

3.3 Wasserschutz

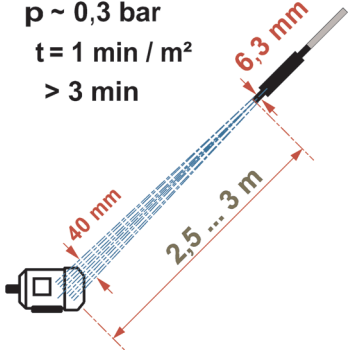
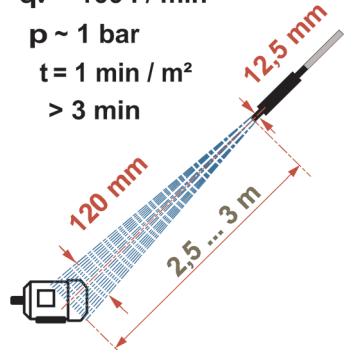
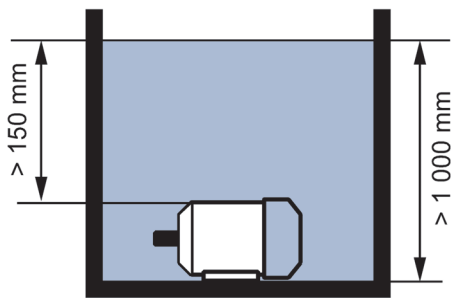
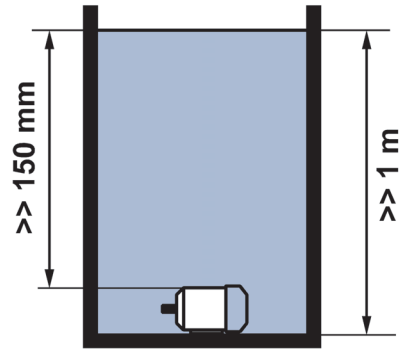
Der Schutzgrad des Betriebsmittels innerhalb des Gehäuses gegen schädliche Einwirkungen durch das Eindringen von Wasser wird im IP-Code durch die zweite Kennziffer beschrieben. Aus gutem Grund ist in der Norm ausdrücklich von **Wasser** und nicht von **Flüssigkeiten** die Rede; besondere Anforderungen wie der Schutz gegen ätzende Lösungen (z.B. Schneid- oder Kühlflüssigkeiten) bedürfen einer Festlegung in der betreffenden Produktnorm oder einer Vereinbarung zwischen Hersteller und Besteller (Anwender). Die Tabellen 3.3.1 und 3.3.2 veranschaulichen die Prüfungen auf Wasserschutz.

Tabelle 3.3.1 Anforderungen an den Wasserschutz bei den Kennziffern IPX1 ... IPX4

Schutzgrad	Schutz gegen	Schema der Prüfung
IPX1	Tropfwasser	
IPX2	Tropfwasser bei 15° Neigung	
IPX3	Sprühwasser	<p>0,07 l/min pro Düse</p>
IPX4	Spritzwasser	<p>0,07 l/min pro Düse</p>

3 IP-Schutzarten (IP-Code)

Tabelle 3.3.2 Anforderungen an den Wasserschutz bei den Kennziffern IPX5 ... IPX8

Schutzgrad	Schutz gegen	Schema der Prüfung
IPX5	Strahlwasser	<p> $qv = 12,5 \text{ l / min}$ $p \sim 0,3 \text{ bar}$ $t = 1 \text{ min / m}^2$ $> 3 \text{ min}$ </p> 
IPX6	starkes Strahlwasser	<p> $qv = 100 \text{ l / min}$ $p \sim 1 \text{ bar}$ $t = 1 \text{ min / m}^2$ $> 3 \text{ min}$ </p> 
IPX7	zeitweiliges Untertauchen	<p>$t = 30 \text{ min}$</p> 
IPX8	dauerndes Untertauchen	<p>$t = \infty \text{ IPX8} > \text{IPX7}$</p> 

3.4 Umstellung der Einführungsgewinde von Pg auf metrisch

Einführungsteile (**Verschraubungen**) für die Abdichtung der Kabel bei Eintritt in den Anschlussraum sind ein wichtiger Bestandteil der IP-Schutzart.

Ende 1999 lief die Übergangsfrist für die normengerechte Verwendung von **Panzerrohrgewinden (Pg)** in Europa ab. Das Sondergewinde wurde durch ein **metrisches ISO-Feingewinde** abgelöst. Von dieser Umstellung ist fast die gesamte Palette der elektrischen Betriebsmittel betroffen: Schaltschränke, Verteiler, Hausanschlusskästen, Abzweigdosen, Geräte, Elektromotoren uvam. Dieser Abschnitt befasst sich mit den Auswirkungen dieser Normenänderung und soll den Übergang auf die neuen Bezeichnungen erleichtern.

3.4.1 Abstufung der Nenngrößen und Dichtbereich

Die Pg-Verschraubungen decken mit **10 Größenstufen** etwa einen **Dichtbereich** (Kabel-Außendurchmesser) von 5 ... 46 mm ab; die metrische Variante benötigt für den fast gleichen Bereich 4 ... 42 mm nur **8 Nenngrößen**. Bild 3.4.1 zeigt den Dichtbereich der neuen, metrischen Verschraubungen.

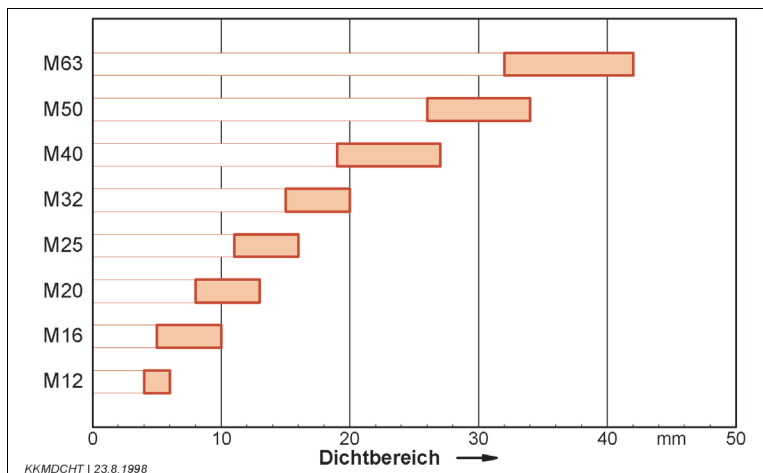


Bild 3.4.1
Dichtbereich der 8
Nenngrößen von metrischen
Verschraubungen

3.4.2 Austauschbarkeit bei maximalem Kabeldurchmesser

Wenn der größte einführbare Kabeldurchmesser für die Wahl des Einführungsteils maßgebend ist, gilt die Zuordnung nach Tabelle 3.4.2.1 und Bild 3.4.2.2.

Tabelle 3.4.2.1 Ersatz von Pg-Verschraubungen in Abhängigkeit vom Kabeldurchmesser

Pg	7	9	11	13,5	16	21	29	36	42	48
M	12	12(16)	16	20	25	32	40	50	63	63

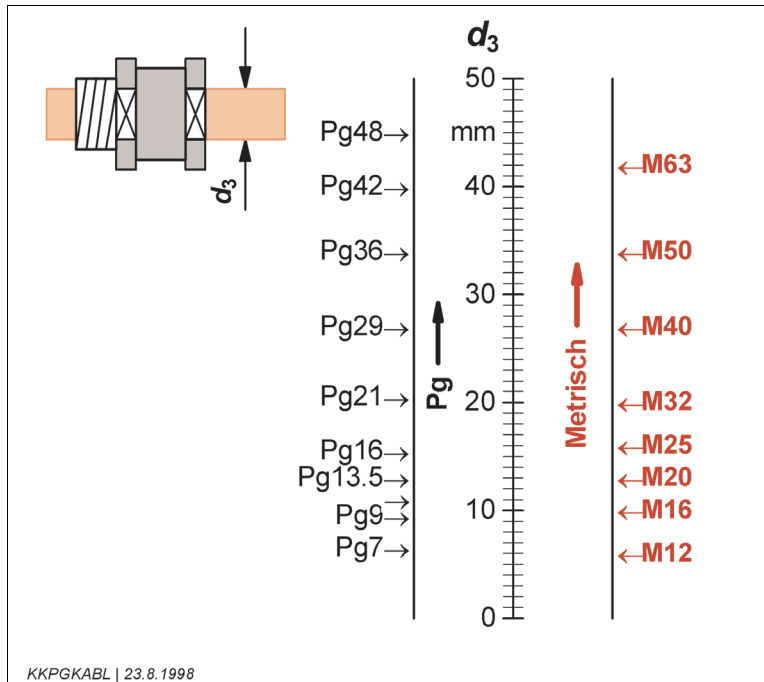


Bild 3.4.2.2
Vergleich der größten einführbaren Kabeldurchmesser d₃ nach Norm

3.4.3 Einführung in den Anschlusskasten von Normmotoren

Die Maßnormen für die Einführungsgewinde von Normmotoren (Tabelle 3.4.3) wurden mit DIN 42925 »Einführungen in den Anschlusskasten für Drehstrommotoren mit Käfigläufer bei Bemessungsspannungen 400 V bis 690 V« umgestellt:

Tabelle 3.4.3 Zuordnung der Einführungsgewinde am Anschlusskasten von oberflächengekühlten Normmotoren der Achshöhen 90 ... 315

Achshöhe mm	Verschraubung nach DIN 46319 (metrisch)	Verschraubung nach DIN 46320 (Pg)	Anzahl der Einführungslöcher
90	M25	Pg16	1
100	M32	Pg21	2
112	M32	Pg21	2
132	M32	Pg21	2
160	M40	Pg39	2
180	M40	Pg29	2
200	M50	Pg36	2
225	M50	Pg36	2
250	M63	Pg42	2
280	M63	Pg42	2
315	M63	Pg48	2

4 Umgebungsbedingungen

Auf elektrische Maschinen können am Aufstellungsort sehr unterschiedliche **Umgebungseinflüsse** einwirken, die durch entsprechende Planung, Auswahl und Aufstellung zu berücksichtigen sind. Die Wahl der IP-Schutzart (s. Abschnitt 3) spielt dabei eine wichtige, aber nicht die alleinige Rolle.

Da die Isolierung der Wicklung (Wärmeklasse) eine wichtige Voraussetzung für eine lange Gebrauchsdauer des Motors ist, wird dieser Begriff zunächst behandelt.

4.1 Wärmeklasse

Die verschiedenen zur Isolierung von Elektromotoren verwendeten Werkstoffe sind im Anhang A der überholten DIN VDE 0530 Teil 1 vom Juli 1991 sowie nach DIN IEC 60085 / VDE 0301 Teil 1 in **Wärmeklassen** (früher: **Isolierstoffklassen**) eingeteilt (Tabelle 4.1.1).

Die zugeordneten höchstzulässigen **Übertemperaturen** sind so gewählt, dass bei Dauerbelastung unter Einschluss ausreichender Sicherheiten eine hohe Lebensdauer gewährleistet ist. So lässt die für Motoren übliche Wärmeklasse B eine Dauertemperatur von 130 °C zu: Ausgehend von einer maximal zulässigen **Umgebungstemperatur** von 40 °C darf die Wicklung, gemessen nach dem Widerstandsverfahren, eine Grenz-Übertemperatur von 80 K erreichen; 10 K sind wegen einer möglichen örtlich ungleichen Temperaturverteilung (**hottest spot**) als Sicherheitsabstand vorgesehen (Bild 4.1.2).

Tabelle 4.1.1 Wärmeklassen von Isolierstoffen

Wärmeklasse (Isolierstoffklasse)	Grenztemperatur des Isolierstoffes °C	Grenz-Übertemperatur der Wicklung K
B	130	80
F	155	105
H	180	125

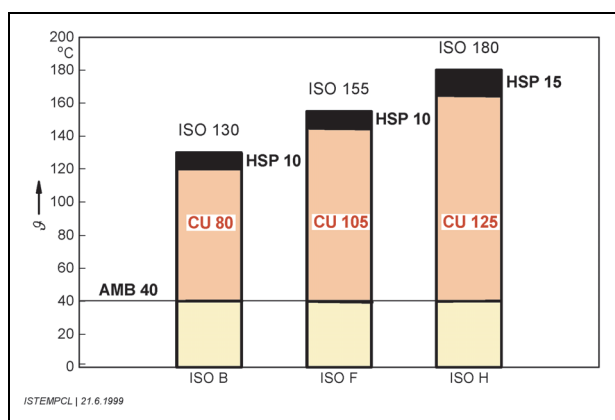


Bild 4.1.2

Grenztemperatur des Isolierstoffes (ISO) und Grenz-Übertemperatur (über 40 °C Umgebungstemperatur AMB) von Wechselstromwicklungen (CU) bei Motoren bis 200 kW, ermittelt nach dem Widerstandsverfahren DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1 und DIN IEC 60085 / VDE 301 Teil 1 mit Zuschlag für »hottest spot« (HSP)

Nach Bild 4.2.1 sinkt die theoretische **Lebensdauer eines Isolierstoffs** auf etwa 50 %, wenn die Temperatur um 10 K angehoben wird. Mit der Wahl einer höheren Wärmeklasse (z. B. F oder H) können wahlweise zwei Ziele erreicht werden:

- höhere Belastbarkeit bei gleicher theoretischer Lebensdauer
- höhere Lebensdauer und Sicherheit bei gleicher Belastung.

Meist wird die verbesserte Isolation zur Erzielung einer erhöhten Betriebssicherheit bei anormalen Betriebsbedingungen eingesetzt.

4.2 Umgebungstemperatur

4.2.1 Ausgangslage nach den Normen

Nach den Normen für elektrische Maschinen [1.6, Abschnitt 11] werden Umgebungstemperaturen zwischen -15 und $+40$ °C als »normal« angesehen.

Vor allem bei der Bewertung der oberen Grenze von 40 °C sollte man sich daran erinnern, dass die früheren nationalen »REM (Regeln für elektrische Maschinen)« eine Obergrenze von 35 °C für angemessen hielten und dass selbst dieser Wert mit der Einschränkung "an einzelnen heißen Sommertagen" versehen war.

Nun wurden in den letzten Jahrzehnten die Isolierstoffe zweifellos ganz erheblich verbessert – geblieben ist aber die nach **Montsinger** benannte Regel, wonach sich die Lebensdauer einer Isolierstoffkomponente halbiert, wenn die Temperatur um $8 \dots 10$ K ansteigt.

Die thermische Bewertung eines neuen Isolierstoffes basiert auf genormten Versuchsreihen, die in **Lebensdauer-Diagrammen** der in Bild 4.2.1 gezeigten Art resultieren. Bei der Einteilung in Wärmeklassen wird eine theoretische Lebensdauer von $20\,000$ h als Beurteilungsmaßstab verwendet. Diese Zahl ist eine reine **Vergleichsgröße**; die Erfahrung zeigt, dass die tatsächliche Lebensdauer des Isoliersystems einer elektrischen Maschine erheblich länger ist.

Vergleichbare Regeln gelten übrigens auch für die »Lebensdauer« von Schmierstoffen, wobei hier die Kriterien für den »Ausfall« nicht ganz leicht abzugrenzen sind.

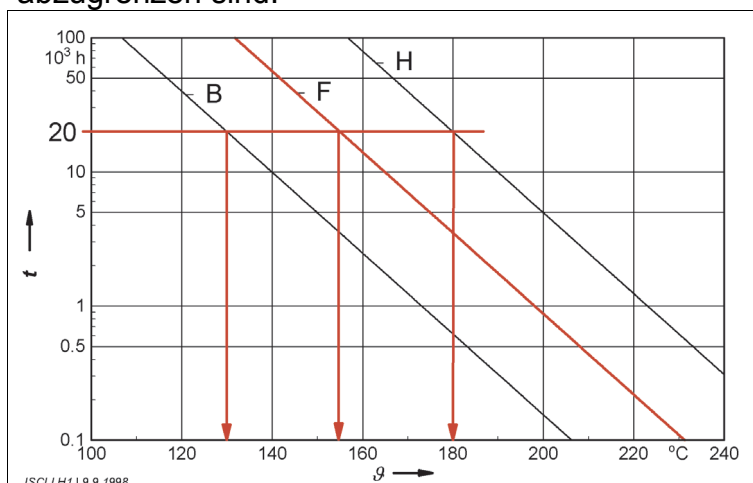


Bild 4.2.1

Theoretische Lebensdauer t von Isolierstoffkomponenten der Wärmeklassen B, F und H bei verschiedenen Temperaturen ϑ

4.2.2 Maßnahmen bei hohen Umgebungstemperaturen

Streng nach Norm erfordern nur die über 40 °C liegenden Umgebungstemperaturen eine besondere Berücksichtigung bei der Projektierung von elektrischen Antrieben. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit empfiehlt es sich jedoch, bei **Dauerbetrieb an der Grenze der Bemessungsleistung** an warmen Aufstellungsorten die folgenden Punkte zu beachten.

Wahl einer höheren Wärmeklasse für die Wicklung

Der Motor kann seine volle Übertemperatur annehmen, also mit voller Bemessungsleistung belastet werden. In den Empfehlungen nach Bild 4.2.2.1 ist die von der Norm gesetzte Spanne bewusst nicht voll ausgenützt (s. Abschn. 4.2.1).

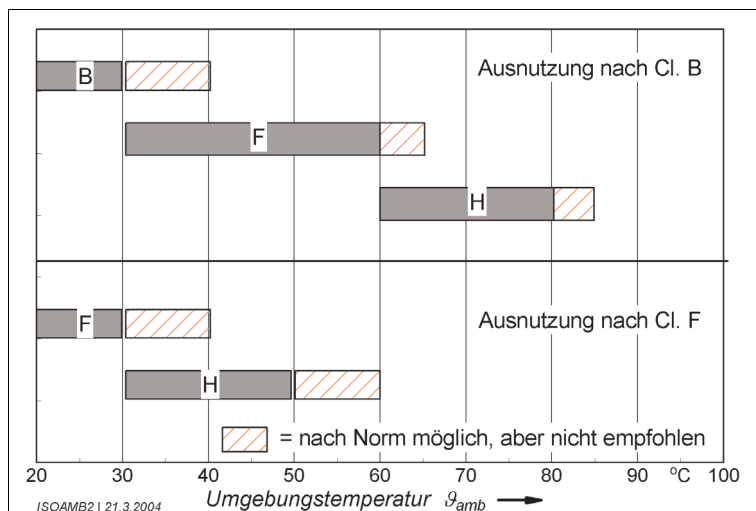


Bild 4.2.2.1

Empfehlung für die Wahl der Wärmeklasse bei erhöhter Umgebungstemperatur und Beibehaltung der Bemessungsleistung

Cl. B	Wärmeklasse B
Cl. F	Wärmeklasse F

Herabsetzung der Bemessungsleistung

Bei verminderter Nennleistung tritt eine geringere Wicklungsübertemperatur auf; die Grenztemperatur für die normale Wärmeklasse wird nicht überschritten (Bild 4.2.2.2).

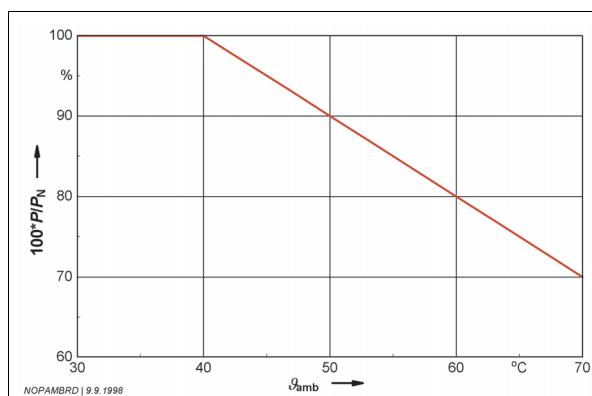


Bild 4.2.2.2

Herabsetzung der Bemessungsleistung P_N bei anomal hoher Umgebungstemperatur ϑ_{amb}

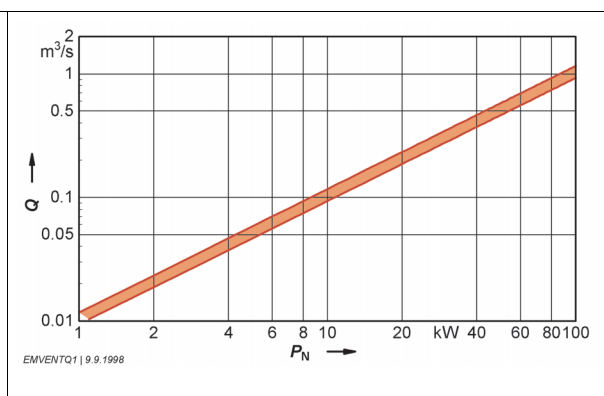


Bild 4.2.2.3

Richtwerte für den erforderlichen Kühlluftstrom Q zur Kühlung von 4poligen Normmotoren bei einer Temperaturzunahme der Kühlluft um etwa 20 K

Zufuhr von kühler Frischluft

Bei sehr hohen Raumtemperaturen kann je nach örtlichen Verhältnissen eine Zufuhr kalter Frischluft zweckmäßig sein. Für eine mittlere Temperaturerhöhung der Kühlluft um etwa 20 K wird in der Literatur übereinstimmend der folgende **Kühlluftbedarf** angegeben:

$Q_1 = 0,04 \dots 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Kilowatt Verlustleistung.

Für übliche Wirkungsgrade von 4poligen Normmotoren errechnet sich hieraus ein erforderlicher Kühlluftstrom Q gemäß Bild 4.2.2.3.

Wälzlagerschmierung

Mit Rücksicht auf die bei hohen Temperaturen früh einsetzende Alterung üblicher Schmierstoffe genügt es nicht, die Wärmeklasse der Isolierstoffe zu verbessern. Es sind zusätzlich die Nachschmierfrist herabzusetzen oder Sonder-Schmierstoffe zu verwenden.

4.2.3 Maßnahmen bei tiefen Umgebungstemperaturen

Bei tiefen Temperaturen (in der Regel unter -15 °C) neigen die zur Schmierung von Lagern und Getrieben verwendeten Schmierstoffe zum Verstocken, so dass beim Einschalten nach einer längeren Stillstandspause der Anlauf behindert wird.

Falls bei niedrigen Temperaturen ein erhöhter Leistungsbedarf zu erwarten ist, sollte dies schon bei der Bemessung des Antriebs berücksichtigt werden. Bei Antrieben, deren Losbrechmoment mit Rücksicht auf einen sanften Anlauf vermindert wurde, kann schon bei Temperaturen um den Gefrierpunkt eine zusätzliche **Beheizung des Getriebes** oder die Befüllung mit speziellem **Kälte-Schmierstoff** notwendig sein. Dies gilt ganz besonders für Getriebemotoren kleiner Leistung.

In diesem Zusammenhang sind folgende Punkte beachtenswert:

- Wenn die Tieftemperatur nur während des Transportes, der Lagerung oder beim Stillstand auftritt und vor Inbetriebnahme langsam wieder auf höhere Werte als -15 °C ansteigt, kann ein normaler Antrieb mit normalem Schmierstoff eingesetzt werden.
- Soll auch bei tiefen Temperaturen ein sicherer Anlauf aus kaltem Zustand heraus gewährleistet werden, so sind Sondermaßnahmen erforderlich:
 - Der Motor muss wesentlich überbemessen werden, damit er in der Lage ist, die meist auch eingefrorene Arbeitsmaschine oder zum Beispiel die Tragrollen eines Förderbandes und dieses selbst wieder von den Umlenkrollen loszureißen.
 - Falls praktisch durchführbar, könnte der Antrieb in den Betriebspausen leer durchlaufen, damit sich die Schmierstellen nicht zu tief abkühlen und bewegliche Teile nicht anfrieren.
 - Nach dem Abschalten vom Netz kann die Motorwicklung im Stillstand geheizt werden, so dass die Schmierstoffe nicht unter ihren Stockpunkt abkühlen. Zu diesem Zweck ist die Wicklung an eine stetig oder stufenweise verstellbare Wechselspannung in Höhe von etwa 20 % der Nennspannung anzuschließen (Bild 4.2.3.1).
 - Diese Heizspannung U_H ist so zu wählen, dass der Heizstrom I_H maximal 65 % des auf dem Leistungsschild angegebenen Nennstromes beträgt. Im Zweifelsfall empfiehlt sich eine Rückfrage beim Hersteller unter Angabe von Typ und Motornummer.
 - Die Erwärmung des Motors ist während der ersten 3 ... 5 Stunden zu beobachten, um eine Überhitzung durch zu hoch gewählte Heizspannung zu verhindern.

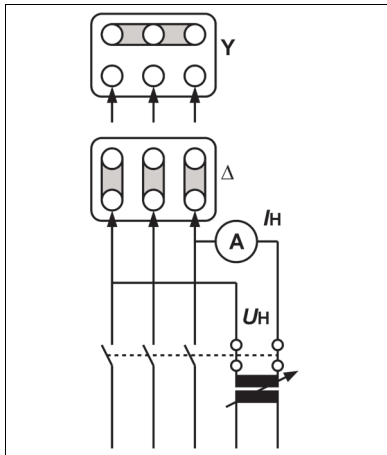


Bild 4.2.3.1
Schaltbild für Ständer-Stillstandsheizung
Richtwerte für
Heizspannung U_H (Richtwert 20 % von U_N)
Heizstrom I_H (Richtwert 65 % von I_N)

Im Elektromaschinenbau werden üblicherweise Wälzlagerfette auf der Basis von Lithiumseife mit einem weiten Temperatur-Einsatzbereich verwendet. In Sonderfällen kann der Einsatz von Sonderfetten für extrem tiefe oder hohe Temperaturen gemäß Bild 8.5 notwendig werden – die Beratung durch einen Schmierstoff-Fachmann ist einzuholen.

Zu beachten sind auch die Temperaturgrenzen für die **Kunststoffe**, die heute üblicherweise für die Ventilatoren von kleinen und mittleren Maschinen verwendet werden: Bei sehr niedrigen Temperaturen kann das Material spröde werden, bei sehr hohen Temperaturen kann es erweichen.

Bild 4.2.3.2 gibt Richtwerte für die Einsatzbereiche üblicher Werkstoffe für die Flügelräder elektrischer Maschinen.

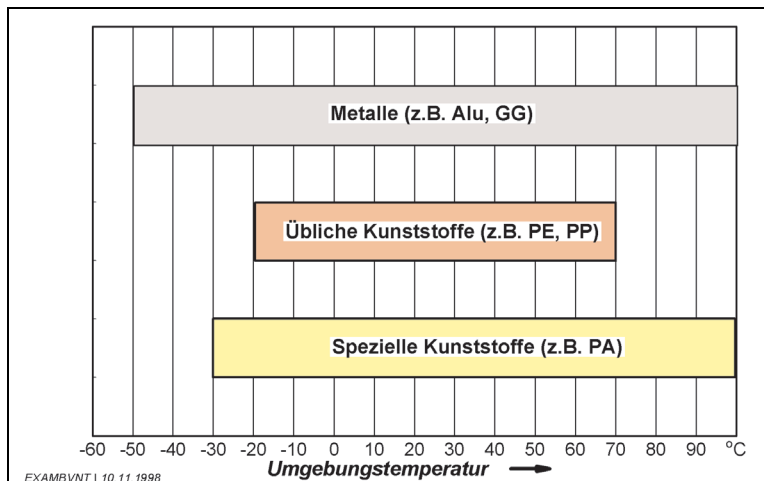


Bild 4.2.3.2
Richtwerte für den
Temperatur-Einsatzbereich
von Ventilatorwerkstoffen
ALU Aluminium
GG Grauguss
PE Polyethylen
(z.B. Hostalen)
PA Polyamid
(z.B. Ultramid)
PP Polypropylen
(z.B. Hostalen PP)

4.3 Aufstellungshöhe

Die Bemessungsdaten von Elektromotoren gelten für Aufstellungshöhen bis 1000 m über NN. Bei größerer Höhe ist die verminderte Wärmeabfuhr durch die Kühlluft zu berücksichtigen. Die folgenden Regeln sind daher auf unbelüftete Sonderauslegungen (Kühlart IC410) nicht anzuwenden.

Die Grenzüber Temperatur von Wicklungen muss nach Bild 4.3.1 bei Aufstellungshöhen über 1000 m vermindert werden.

4 Umgebungsbedingungen

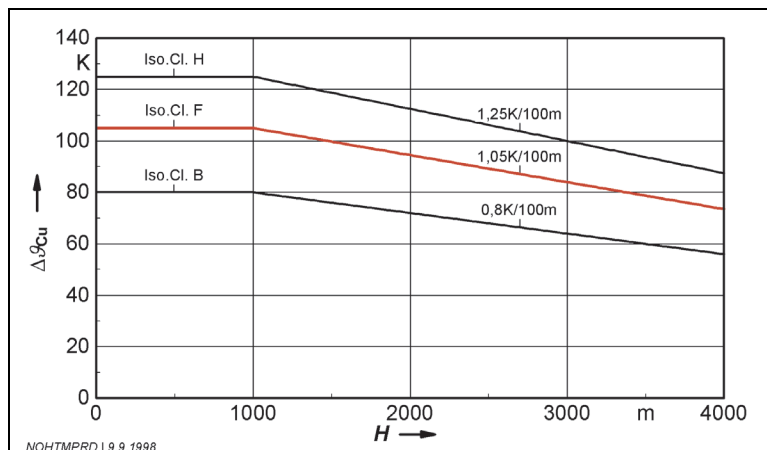


Bild 4.3.1
Grenz-Übertemperatur $\Delta\vartheta_{Cu}$
von Wicklungen
der Wärmeklassen B, F, H
bei Aufstellungshöhe H bis
4000 m und 40 °C
Umgebungstemperatur
nach DIN EN 60034-1 / VDE
0530 Teil 1, Abschnitt 16.4.1

Nimmt man als Erfahrungswert an, dass zur Herabsetzung der Übertemperatur um 1 K eine Leistungsverminderung um 1% erforderlich ist, so ergeben sich für Wärmeklassen (Isolierstoffklassen) B und F Leistungsrichtwerte nach Tabelle 4.3.2.

Tabelle 4.3.2 Richtwerte für die relative Ausnutzung P/P_N von belüfteten Elektromotoren der Wärmeklassen B und F bei Aufstellungshöhen H zwischen 1000 und 4000 m über NN und Umgebungstemperatur 40 °C

Aufstellungshöhe H m	Relative Ausnutzung P/P_N	
	B	F
1000	1	1
1500	0,96	0,95
2000	0,92	0,90
2500	0,88	0,85
3000	0,84	0,80
3500	0,80	0,75
4000	0,76	0,70

Meist kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in großer Höhe **nicht gleichzeitig dauernd** die maximal zulässige Umgebungstemperatur von 40 °C auftritt. Sind die Grenzwerte nach Bild 4.3.3 und Tabelle 4.3.4 eingehalten, so kann der Antrieb mit seiner vollen Bemessungsleistung P_N belastet werden. Damit ergibt sich für alle Beteiligten – Hersteller, Errichter und Anwender – eine vereinfachte Abwicklung.

In DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1, Abschnitt 16.3.5, ist hierzu unter anderem festgelegt: Soll die Maschine in einer Aufstellungshöhe zwischen 1000 m und 4000 m betrieben werden und ist die maximale Kühlmitteltemperatur nicht festgelegt, so soll folgendes angenommen werden: Die sich durch die Höhe ergebende verminderte Kühlung wird ausgeglichen durch eine Abnahme der maximalen Umgebungstemperatur unter 40 °C. Die festgelegte Aufstellungshöhe und die angenommene maximale Umgebungstemperatur müssen auf dem Leistungsschild vermerkt werden.

4 Umgebungsbedingungen

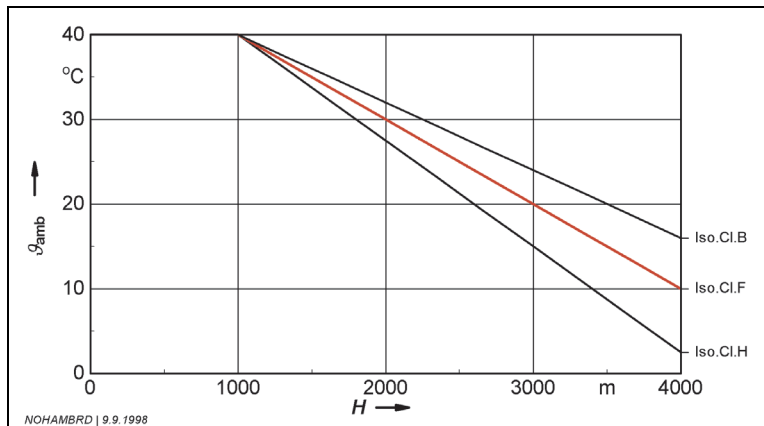


Bild 4.3.3
Maximal zulässige Kühlmittel- oder Umgebungstemperatur ϑ_{amb} bei voller Motorausnutzung $P = P_N$ in Aufstellungshöhen H von 1000 bis 4000 m über NN; nach DIN EN 60034-1, Abschnitt 16.3.5

Tabelle 4.3.4 Maximal zulässige Kühlmittel- oder Umgebungstemperatur ϑ_{amb} bei voller Motorausnutzung $P = P_N$ in Aufstellungshöhen H von 1000 bis 4000 m bei Wärmeklassen B, F und H

Aufstellungshöhe H m	Kühlmitteltemperatur ϑ_{amb} in °C		
	B	F	H
1000	40	40	40
1500	36	35	34
2000	32	30	28
2500	28	24	21
3000	24	19	15
3500	20	14	9
4000	16	9	3

4.4 Spritzwasser, Überflutung

In der praktischen Anwendung werden elektrische Maschinen recht häufig durch Wasser beansprucht, sei es durch Spritzwasser bei Verarbeitungs- und Reinigungsvorgängen, durch unabsichtliche gelegentliche Überflutung oder sogar bei dauerndem Betrieb unter Wasser.

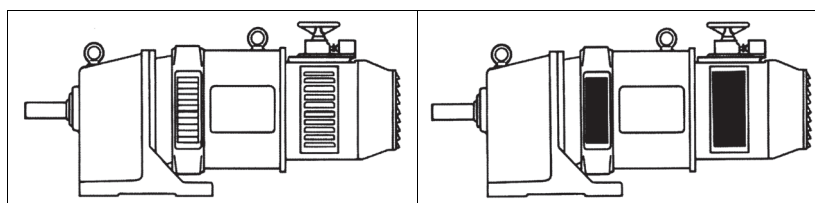
Welche Beanspruchungen sind durch den genormten IP-Schutzgrad abgedeckt – wann sind mit dem Hersteller Sondermaßnahmen zu vereinbaren? In diesem Abschnitt wird versucht, einige Antworten zu geben. Die Festlegungen für die IP-Schutzgrade gegen Wasser ergeben sich aus Abschnitt 3.3.

Darüber hinaus wird auf [2.1] verwiesen.

4.4.1 Aufstellung an Deck – Zusatzbuchstaben S und M

Die **ergänzenden Buchstaben** S und M wurden speziell für elektrische Maschinen in die Norm aufgenommen. Zu ihrer Erläuterung wird aus dem Entwurf DIN VDE 0530 Teil 5 A1 (Mai 1992) zitiert:

"Für besondere Anwendungen (wie z. B. offene, durchzugbelüftete Maschinen an Deck eines Schiffes, deren Öffnungen für den Lufteintritt und Luftaustritt während des Stillstandes geschlossen sind, darf den Kennziffern ein Buchstabe nachgestellt werden, der angibt, ob der Schutz gegen schädlichen Wassereintritt bei stillstehender Maschine (Buchstabe S) oder bei laufender Maschine (Buchstabe M) nachgewiesen oder geprüft wurde. In diesem Fall muss die Schutzart für beide Betriebszustände der Maschine angegeben werden, z. B. IP55S / IP20M. Fehlen die ergänzenden Buchstaben, so ist die Schutzart bei allen bestimmungsgemäßen Anwendungen eingehalten."



IP20M
beim Betrieb im Hafen

IP55S Stillstand während
der Fahrt auf hoher See

Bild 4.4.1
Anwendung der
ergänzenden Buchstaben
S und M:
durchzugbelüfteter
Wundenmotor für
Oberdeck-Aufstellung

4.4.2 Wettergeschützte Maschinen – Zusatzbuchstabe W

Für offene, durchzugbelüftete Maschinen zum Einsatz unter festgelegten Wetterbedingungen und mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen oder Einrichtungen wird der Buchstabe W verwendet.

Nähere Erläuterungen siehe [1.1], [2.1].

4.4.3 Vereisung

Bei Aufstellung im Freien kann eine Vereisung – z. B. nach dem Eindringen von Schnee oder Feuchtigkeit – zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Funktion eines elektrischen Betriebsmittels führen. Kritisch sind vor allem Bauteile, die zur äußeren Betätigung von innenliegenden Komponenten dienen (wie Stößel, Drücker, Wellen, Achsen), die durch eine dünne Eisschicht an der Bewegung gehindert werden können. Hier kann ein bewusst groß gehaltener Spalt oft weniger gefährdet sein als ein zur Abdichtung sehr eng gehaltener Spalt (Bild 4.4.3). Bei außenbelüfteten Motoren kann die Vereisung zu einer Blockierung führen. Gerade

dieses zweite Beispiel macht auch deutlich, dass allein mit einem hohen IP-Schutzgrad das Problem nicht zu lösen ist, so wie auch eine Stillstandsheizung nicht in allen Fällen zum Erfolg führt. Aus diesem Grund ist die Vereisung ausdrücklich aus dem Anwendungsbereich der Schutzart-Norm ausgenommen.

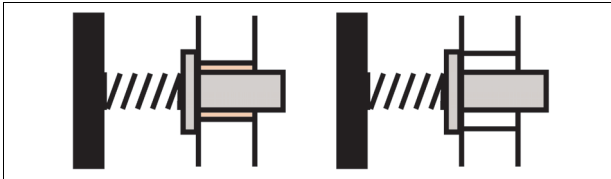


Bild 4.4.3
Drucktaste mit Vereisungsgefahr
links: kleiner Spalt = hoch
rechts: großer Spalt = gering

Hinweise für den Anwender:

Ein hoher Schutzgrad bietet allein keinen Schutz gegen Vereisung. Gefährdet sind vor allem enge Spalte an äußeren Betätigungselementen. Wasserdichte Geräte mit entsprechenden Abdichtungen (z. B. Membranen) sind zu bevorzugen. Vereinbarungen mit dem Hersteller sind dringend zu empfehlen.

4.4.4 Strahlwasser

Wird eine Anlage gelegentlich durch Strahlwasser aus dem normalen Leitungsnetz gereinigt, so genügt ein Motor in spritz- oder strahlwassergeschützter Ausführung IPX4 oder IPX5. Wird allerdings im Zuge des Herstellungsprozesses ein Produkt **ständig** abgestrahlt, so empfiehlt sich für die Antriebe im Wirkungsbereich des Strahlwassers die Sonderschutzart IPX6 (Bild 4.4.4).



Bild 4.4.4
Entzunderung von Großrohren durch Strahlwasser
mit hohem Druck
Rollgangmotoren und Hilfsantriebe
in Schutzart IP66

4.4.5 Hochdruckreinigung und Reinigungszusätze

Bei Anwendungen zur Herstellung und Verarbeitung von Lebensmitteln (z. B. auf Hochseefangschiffen für Fische) wird gelegentlich mit sehr hohem Druck (z. B. bis zu 10 bar) abgestrahlt. Werden übliche elektrische Maschinen direkt einem solchen Wasserstrahl ausgesetzt, so sind Wasserschäden zu erwarten.

Wenn dem Wasser besondere **chemische Reinigungsmittel** zugesetzt werden (z. B. in Autowaschanlagen, Bild 4.4.5), so erhält es einen besonders »dünnen Kopf« und kann Schmutz und Fett unterwandern – auch die üblichen Dichtungsmittel am Klemmenkasten oder am Lagerflansch!

Deshalb ist in EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1 im Abschnitt 6 festgelegt: "Die Prüfungen für die zweite Kennziffer werden mit frischem Wasser durchgeführt. Es kann sein, dass der tatsächliche Schutz nicht ausreichend ist, wenn Reinigungsvorgänge mit hohem Druck und/oder Lösemittel angewendet werden."

Diese Festlegung wurde leider in DIN EN 60034-5 nicht übernommen.



Bild 4.4.5
Für elektrische Betriebsmittel im direkten Wirkungsbereich des Wassers einer Autowaschanlage werden besondere Schutzmaßnahmen empfohlen.

Bildnachweis:
California Kleindienst Autowaschtechnik

4.4.6 Dauerberieselung

Kühltürme dienen zur Rückkühlung von Industrierwasser, das sich bei einem Produktionsprozess erwärmt hat und das aus ökonomischen und ökologischen Gründen in den Kreislauf zurückgebracht wird. Das Bild 4.4.6.1 zeigt die prinzipielle Wirkungsweise. Es lässt sich nicht vermeiden, dass ein geringer Prozentsatz des Wassers von der Kühlluft mitgerissen wird und nach oben entweicht – bei bestimmten Wetterlagen deutlich erkennbar an der »Wolke« über dem Kühlturm. Dieses Wasser benetzt den Antrieb des Ventilators und beansprucht die Dichtstellen ständig. Der **Dauerbetrieb** unter diesen Bedingungen macht Kühlturmantriebe zu einem der schwierigsten Antriebsfälle und zu einem klassischen Anwendungsbeispiel für die Schutzart IP66 (Bild 4.4.6.2).

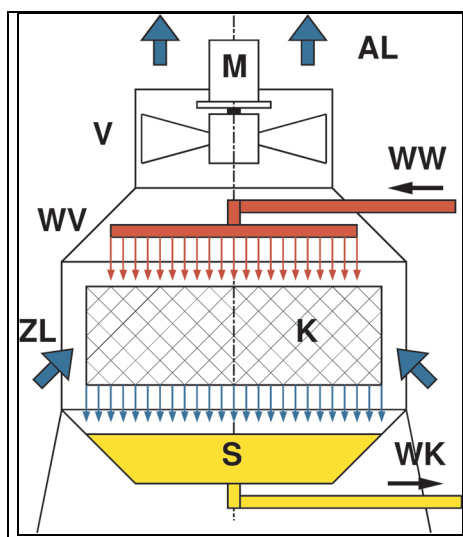


Bild 4.4.6.1
Schema der Wirkungsweise eines Kühlturms

M Motor
V Ventilator
K Kühleinbauten
ZL Zuluft
AL Abluft
WW Wasser (warm)
WK Wasser (kühl)
WV Wasserverteiler
S Sammelbecken

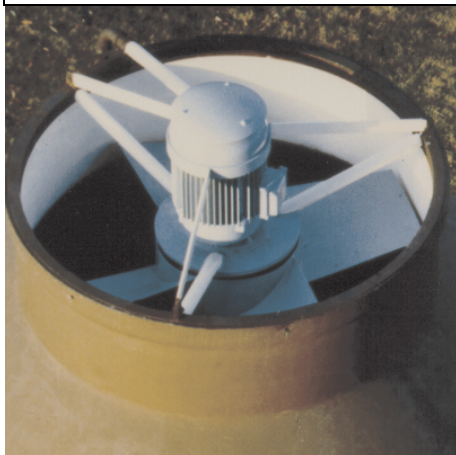


Bild 4.4.6.2
Blick auf einen Kühlturm mit einstufigem Getriebemotor als Ventilatorantrieb
Motor mit Schutzdach für Aufstellung V1

4.4.7 Vorübergehende Überflutung

Klärwerke werden häufig in Flussniederungen gebaut und sind deshalb durch Hochwasser gefährdet.

Motoren in der Sonderschutzart IP66 bieten zwar keine Garantie, aber erfahrungsgemäß eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, eine kurzzeitige Überflutung zu überstehen (Bild 4.4.7). Ausführliche Hinweise für Betriebsmittel aller Art in der »ep« - Sonderinformation "Wiederinbetriebnahme hochwassergeschädigter elektrischer Anlagen unter www.ep.de.



Bild 4.4.7
Hochwasser in einem Klärwerk mit kurzzeitiger Überflutung der Antriebsmotoren für Räumbrücken und Förderschnecken

4.4.8 Mindestschutzarten nach den Errichtungsbestimmungen

Der Wasserschutz eines elektrischen Betriebsmittels ist nicht nur für die Funktion wichtig, sondern auch sicherheitstechnisch relevant. Die Errichtungsbestimmungen (z.B. DIN VDE 0100, DIN VDE 0113) schreiben deshalb für bestimmte Anwendungen Mindestschutzarten vor, die nachfolgend auszugsweise genannt werden.

IPX5 Schutz gegen Strahlwasser

- Arbeitsgruben, die durch Strahlwasser gereinigt werden
- Duschräume (Bereiche 1, 2 und 3)
- Fahrzeugwaschanlagen
- Fleischereien (soweit Anlagenteile direkt abgestrahlt werden)
- Reiferäume in Käsereien
- Klärwerke

IPX6 Schutz gegen starkes Strahlwasser offene Decks von Seeschiffen

IPX7 Schutz beim zeitweiligen Untertauchen

- Molkereien
- Saunen (im Spritzbereich)
- Schlachthöfe
- Schwimmbäder (soweit abgestrahlt wird)
- Waschräume

Eine ausführliche Auflistung der Anforderungen je nach Betriebsstätten ist in dem Buch [2.19] zu finden, das ein wertvolles und umfassendes Nachschlagewerk für den Praktiker darstellt.

4.5 Kondenswasser

Bei Wicklungsschäden als Folge von Wasser oder Feuchtigkeit wird oft Kondenswasser als Ursache genannt. Für eine objektive Ursachenforschung lohnt es sich, die Vorgänge kritisch zu analysieren.

4.5.1 Physikalischer Vorgang

Die Vorgänge, die zur Bildung von Kondenswasser führen, lassen sich am besten anhand des vereinfachten **Zustandsschaubildes für feuchte Luft** in Anlehnung an DIN IEC 60721-2-1 erklären (Bild 4.5.1).

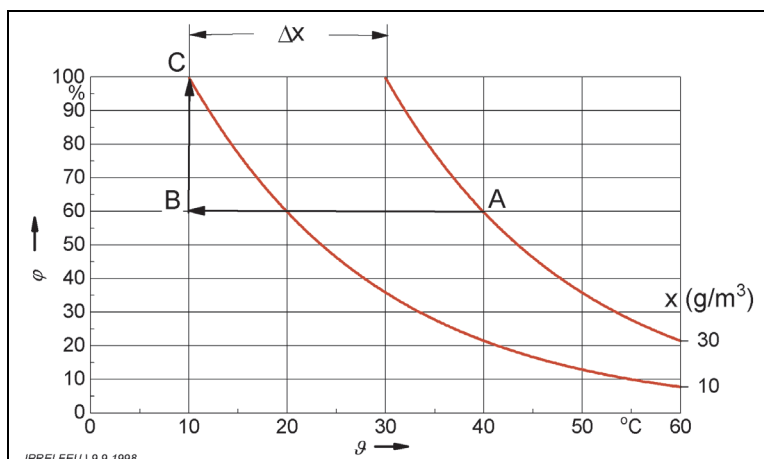


Bild 4.5.1
Vereinfachtes
Zustandsschaubild für
feuchte Luft in Anlehnung an
DIN IEC 60721-2-1
x absolute Luftfeuchte
(Wasserdampfgehalt)
 φ relative Luftfeuchte
 ϑ Temperatur

Die Kurven im Diagramm (zur Verbesserung der Übersicht auf zwei reduziert) zeigen den stabilen Zustand feuchter Luft. Eine **absolute Luftfeuchte** x von z. B. 30 g/m^3 kann bei 60 °C als Wasserdampf in Luft vorhanden sein. Die Luft ist dabei noch wenig mit Wasser gesättigt; die **relative Feuchte** φ (das Verhältnis zu maximalen Aufnahmefähigkeit) beträgt etwa 20 %.

Erst bei einer Temperatur von 30 °C wird die **Sättigungsgrenze** mit 100 % erreicht – bei tieferen Temperaturen kann die Wassermenge nicht mehr ganz in Luft aufgenommen werden: Ein Teil fällt als **Kondenswasser** (Tau) aus.

In einem geschlossenen, aber nicht luftdichten Gehäuse sei Luft mit einer absoluten Feuchte von $x = 30 \text{ g/m}^3$ und einer Temperatur von 40 °C eingeschlossen (Punkt A im Diagramm). Die relative Feuchte beträgt $\varphi = 60 \%$. Wird der Behälter und sein Inhalt rasch auf 10 °C (Punkt B) abgekühlt, so kann die Luft selbst bei vollständiger Sättigung am Punkt C ($\varphi = 100 \%$) nur eine Feuchte von 10 g/m^3 behalten. Das Sättigungsdefizit $\Delta x = 30 \text{ g/m}^3 - 10 \text{ g/m}^3 = 20 \text{ g/m}^3$ fällt in Form von Kondenswasser aus und schlägt sich vor allem an den kalten Stellen des Gehäuses (Innenwände) nieder.

4.5.2 Kondenswassermenge

In der Natur schwankt die absolute Feuchte – also die Wassermenge (g) pro Luftvolumen (m^3) – zwischen etwa 5 g/m^3 (in Nordeuropa) und 30 g/m^3 (in der Äquatorzone). Diese Zahlen signalisieren, dass die Kondensatmenge auch im Extremfall nicht hoch sein kann. Das Bild 4.5.2 gibt Richtwerte für das freie Luftvolumen V von Motoren im Bereich der Achshöhen 71 ... 200 mm und den maximalen dampfförmigen Wassergehalt in der Luft, nämlich 600 mg (0,6 g) bei Baugröße 200! Nur ein Bruchteil dieses Wassers kann als Kondenswasser ausfallen.

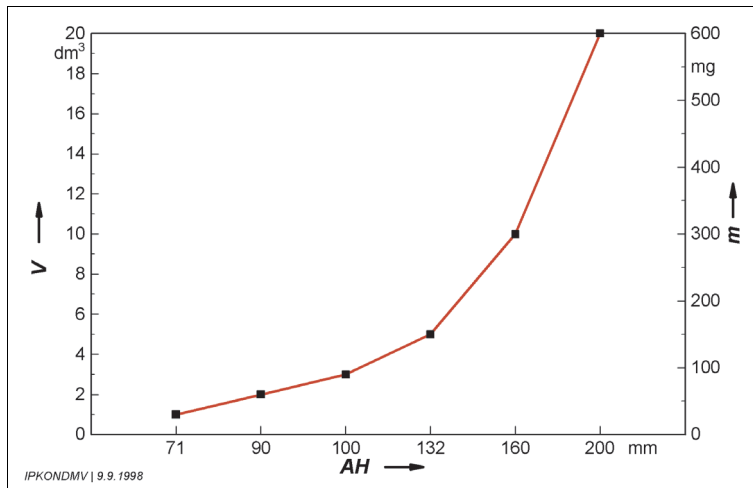


Bild 4.5.2
Richtwerte für das freie
Luftvolumen V und den
maximalen Wassergehalt m
bei Motoren mit Achshöhen
 $AH = 71 \dots 200 \text{ mm}$

Selbst bei wiederholter Erwärmung und Abkühlung ist physikalisch nicht zu begründen, dass sich Kondenswasser in solchen Mengen ansammelt, dass Wicklungsteile »unter Wasser stehen«.

Damit entfällt aber auch die Wirkung eines Kondenswasserablaufloches.

4.5.3 Größe und Lage von Kondenswasserlöchern

Die Motorenhersteller haben sich früher viele Gedanken zur richtigen Anbringung von Kondenswasserlöchern gemacht (Bild 4.5.3). Entsprechende Anweisungen in Betriebsanleitungen sprachen Bände:

- Das Kondenswasserloch sollte nicht zu groß sein, um das Eindringen von Staub und Fremdwasser zu reduzieren: nach der früher gültigen DIN 40050; Auswahlblatt 1 von 1963, maximal 8 mm.
- Es durfte nicht zu klein sein, um ein Verstopfen durch Rost und Schmutz zu verhindern: mindestens 4 ... 6 mm.
- Es sollte an der tiefsten Stelle liegen: bei verschiedenen Aufstellungen und vor allem bei senkrechter Anordnung keine einfache Forderung. Die Vorstellung, dass Wasser vom oberen Wickelraum durch die Nut und den Luftspalt zum unteren Wickelkopf sickert und dort schadlos abläuft, ist ebenso wenig nachvollziehbar wie die Wirkung eines Loches am oberen Ende des Blechpaketes.
- Da offene Kondenswasserlöcher offenbar mehr geschadet als genützt haben, wurden Verschlussstopfen erfunden: von der Wurmschraube (die festrostet) über Kunststoffstopfen (die so unzugänglich sind, dass sie nicht geöffnet werden) bis zum Ventil, das dann sogar noch eine elektrische Einschaltsperrung für den Motor betätigen sollte.
- Bei der Zündschutzart »druckfeste Kapselung« waren zünddurchschlagsichere Anordnungen erforderlich.

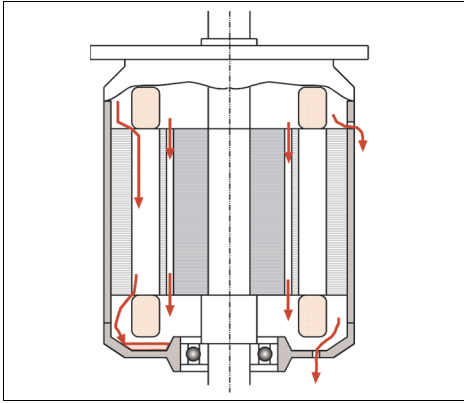


Bild 4.5.3

Prinzipbild einer Maschine in Anordnung V3 mit theoretischen (durch die vorgesehenen Abflusslöcher) und tatsächlichen Wegen (durch Nut und Luftspalt) des Kondenswassers

4.5.4 Schutz gegen Kondenswasser

Im vorigen Abschnitt wurde die früher lange diskutierte Problematik ausführlich dargestellt, um die heute übliche Betrachtungsweise besonders deutlich zu machen:

- Kondenswasser kann **nicht vollständig vermieden** werden.
- Es führt zunächst zu einem Feuchtigkeitsfilm auf allen Teilen – auch auf der Wicklung – und nur in Extremfällen zu einer solchen Ansammlung, dass es abgelassen werden kann.
- Feuchtigkeitsfeste, **unhygroskopische Isoliermaterialien** und Lacke sind wichtiger als eine Ablassöffnung.
- Reichliche Abstände** sind vor allem im Bereich der möglichen Wasseransammlung vorzusehen (Bild 4.5.4.1).
- In Extremfällen ist eine **Ständerstillstandsheizung sinnvoll**, um rasche und starke Temperaturunterschiede zu vermeiden. Bei mittleren und größeren Motoren werden hierzu spezielle Heizwicklungen eingebracht. Bei kleineren Maschinen wird meist die Ständerwicklung mit etwa 20 % der Bemessungsspannung einphasig gespeist (s. Bild 4.2.3.1).
- Für Sonderfälle ist ein **Klimastutzen** am Markt (Bild 4.5.4.2).
Als **Atmungshilfe** vermindert er Unterdruck, Saugwasser, Kondenswasseransammlung.
Als **Ablaufloch** für eingedrungenes Fremdwasser hat er einen hohen IP-Schutzgrad gegen Staub, Wasser und Berührung.



Bild 4.5.4.1

Gedrängte Raumverhältnisse zwischen Wickelkopf und Lagerschild führen bei Kondenswasser zu Überschlägen. Hier kann auch ein Ablassloch nicht helfen.

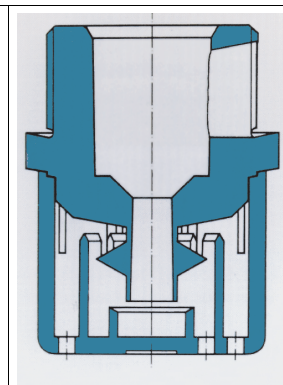


Bild 4.5.4.2

Klimastutzen mit Gewinden Pg 16 und Pg 21 sowie M 25 und M 32

Hersteller STAHL Schaltgeräte GmbH

Die jahrzehntelange Praxis zeigt, dass bei Einhaltung dieser Grundsätze gefahrlos auf ein Kondenswasserloch verzichtet werden kann. Während nach einer 1963 durchgeführten Umfrage noch mehr als 80 % aller in Deutschland produzierten geschlossenen Drehstrommotoren serienmäßig mit Kondenswasserabflusslöchern geliefert wurden, ist diese Ausführung heute die teilweise nur auf Wunsch gelieferte Ausnahme.

4.5.5 Abgrenzung Kondenswasser – Fremdwasser – Ausscheidung

Wicklungsschäden durch Wasser oder Feuchtigkeit sollten nicht vorschnell auf Kondenswasser zurückgeführt werden.

In der überwiegenden Zahl solcher Schadensfälle handelt es sich um Fremdwasser, dessen Spur sich oft zurückverfolgen lässt. Nehmen **Rostspuren** an Einpässen, Lagerflanschen, ins Innere führenden Gewinden oder an den Auflageflächen des Klemmenkastens ihren Anfang, so lassen sie eindeutige Rückschlüsse auf Fremdwasser zu – vor allem bei entsprechenden Einsatzbedingungen (z. B. Aufstellung im Freien).

Weniger bekannt ist, dass neue Wicklungen bei der **ersten Inbetriebnahme** Wasser abscheiden können, wenn hygroskopische Isolierstoffe (z. B. für die Blechisolierung) verwendet wurden. Nach den Untersuchungen von *Mecklinger* handelt es sich um erstaunliche Mengen, die allerdings bei jedem weiteren Erwärmungslauf deutlich abnehmen und die sich auch nach längerer Einwirkung von Luftfeuchte nicht reproduzieren (Bild 4.5.5).

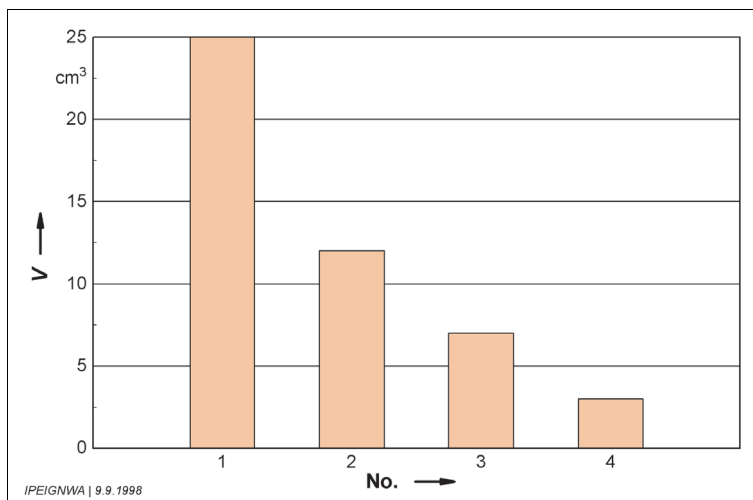


Bild 4.5.5
Abgeschiedene
Flüssigkeitsmenge V bei
einem Drehstrommotor der
Achshöhe 132 bei den
ersten vier
Erwärmungsläufen nach der
Fertigung

4.6 Feuchtigkeit, Tropen, Termiten

4.6.1 Feuchtigkeit

In der Umgebungsluft ist immer ein bestimmter Wasseranteil in dampfförmigem Zustand enthalten.

In der Natur schwankt die **absolute Feuchte** – also die Wassermenge (g) pro Luftvolumen (m³) – zwischen etwa 5 g/m³ (Nordeuropa) und 30 g/m³ (Äquatorzone). Je wärmer die Luft ist, um so mehr Feuchtigkeit kann sie aufnehmen – im »Waschküchenklima« ist die absolute Feuchte besonders hoch. (Relative Feuchte und Kondenswasser s. Abschnitt 4.5.). Die Feuchtigkeit wird an wasseraufnahmefähige (hygroskopische) Stoffe abgegeben. Selbst moderner, hochveredelter Pressspan nimmt bis zu 15 % seines Gewichtes Wasser auf (Bild 4.6.1.1).

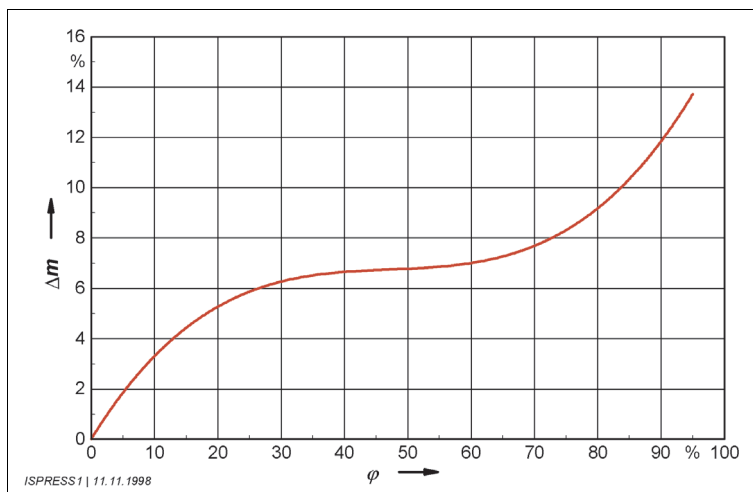


Bild 4.6.1.1
Wasseraufnahme Δm in % des Gewichtes von Pressspan bei Lagerung in Luft verschiedener relativer Feuchte φ

Bei Verwendung der Isolierstoffklassen A und E (Papier, Pressspan, Baumwolle, Seide, Asbest) kam es bei längerer Einwirkung hoher Luftfeuchtigkeit zu einer Abnahme der Isolationswerte und schließlich oft zum Ausfall der Wicklung. Bei der Gegenüberstellung der Durchschlagfestigkeit von heute üblichem Pressspan und modernen Folien wird der grundsätzliche Unterschied vor allem in der **absoluten Höhe** und weniger in der Abhängigkeit von der relativen Feuchte deutlich (Bild 4.6.1.2), logarithmischen Maßstab beachten!).

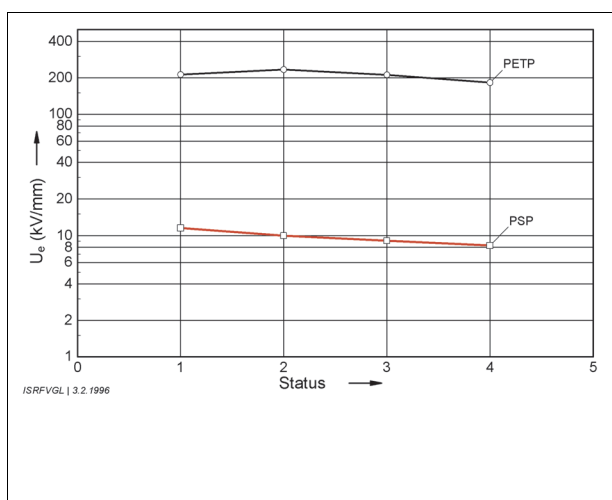


Bild 4.6.1.2
Durchlagfestigkeit U_e von Pressspan (PSP) und Polyethylteraphthalat-Folie (PETP) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte RF

Status :

- 1 Trocknung 2 h bei 105 °C
 - 2 Lagerung 4 Tage bei 50 % RF
 - 3 Lagerung 4 Tage bei 65 % RF
 - 4 Lagerung 4 Tage bei 85 % RF
- nach einer Versuchsreihe der Fa. A. KREMPEL Soehne GmbH

Die Einwirkung von Luftfeuchtigkeit ist auch durch eine hohe IP-Schutzart nicht zu verhindern, weil die Feuchtigkeit mit der Luft in das Gehäuse eindringt und weil auch der höchste IP-Code keinen luftdichten Abschluss gewährleistet. In der Norm für die »Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)« EN 60529 ist daher im Abschnitt 2 »Zweck« ausdrücklich festgelegt: "Maßnahmen zum Schutz ... des Betriebsmittels ... gegen äußere Einflüsse wie z.B. Feuchtigkeit ... sind Angelegenheiten der betreffenden Produktnorm."

Im Klartext: **Schutz gegen Feuchtigkeit kann nicht durch eine hohe IP-Schutzart erreicht werden.**

Die Entwicklung der Isolierstofftechnik hat das Problem auf einfache Weise entschärft oder gelöst:

Moderne **Flächenisolerstoffe** (z. B. Polyesterfolien, aromatische Polyamide, Polyimid) sind fast gänzlich **unhygroskopisch** und bieten in Kombination mit dem übrigen Isoliersystem einen sehr hohen **Schutz gegen hohe Luftfeuchtigkeit**.

4.6.2 Tropen

In den Normen gibt es weder eine einheitliche Gebietsbezeichnung »Tropen« noch eine Festlegung für die Anforderungen an »Tropensicherheit«, »Tropenschutz« oder »Tropenisolation«.

Die Begriffe werden von den verschiedenen Herstellern in ähnlichem Sinne benutzt, beinhalten aber teilweise unterschiedliche Sondermaßnahmen, je nach Stand der Grundausführung.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wird versucht, zur Klärung der Begriffe beizutragen.

Von den **Freiluftklimaten** nach DIN IEC 60721-2-1 [1.4] kann der in der Tabelle 4.6.2.1 markierte Bereich den Tropen zugerechnet werden. Die Norm enthält eine Weltkarte mit Farbmarkierung der Klimazonen.

Tabelle 4.6.2.1 Freiluftklimata DIN IEC 60721-2-1

Bezeichnung	Erläuterung	
EC	extrem kalt	extremely cold
C	kalt	cold
CT	gemäßigt kalt	cold temperate
WT	gemäßigt	warm temperate
WDr	mäßig trocken	warm dry
MWDr	warm-trocken	mild warm dry
EWDr	extrem warm-trocken	extremely warm dry
WDa	warm-feucht	warm damp
WDaE	ausgeglichen warm-feucht	warm damp equable

Zur weiteren Erläuterung wird aus der ausgezeichneten Darstellung [3.1] auszugsweise zitiert:

Die Tropen sind die Zonen der Erde, in denen tagsüber **ständig hohe Temperaturen** herrschen – häufig verbunden mit **hohen Niederschlägen**. In diesen Gebieten gibt es keine oder nur schwach ausgeprägte Jahreszeiten. Im allgemeinen Sprachgebrauch versteht man unter Tropen im wesentlichen die Zone mit tropischem Klima, über deren Abgrenzung jedoch sehr unterschiedliche Angaben zu finden sind:

- 20-°C-Isotherme des kältesten Monats,
- nördliche und südliche Grenze der Passatwinde oder der Palmen,
- südliche und nördliche Grenze des Schneefalls,
- die Linien, an denen die jährlichen Temperaturschwankungen größer werden als die täglichen.

Das Klima der Tropen reicht vom feuchtwarmen Klima im tropischen Regenwald am Äquator bis zum trockenwarmen Klima in den Wüsten in der Nähe der Wendekreise. Auch findet man Gebiete, deren Klima aufgrund der Höhenlage von den sonst üblichen Bedingungen dieser Breiten stark abweichen, z. B. die Sonneneinstrahlung und der Luftdruck oder Eis und Schnee auf den Gipfeln der Gebirge. Die Umgebungsbedingungen in den Tropen sind in manchen Gebieten durch sehr gleichmäßige Verhältnisse, in anderen Gebieten durch sehr extreme Einflussgrößen gekennzeichnet.

Ausgeglichene Bedingungen:

- Temperaturschwankungen:** täglich und jahreszeitlich minimal, z. T. Schwankungen von weniger als 1 °K oder von maximal 6 °K.
- Tageslängen:** ausgeglichen zwischen 10,5 und 13,5 h.
- Sonneneinstrahlung:** gleichmäßig.

Extreme Bedingungen:

- Niederschläge:** in der Nähe des Äquators Regenschauer während des gesamten Jahres, in der Nähe des Wendekreises Regenschauer während bestimmter Perioden des Jahres.
- Tropische Wirbelstürme in Meeresgebieten:** Windgeschwindigkeiten von 100 km/h mit Spitzenböen von mehr als 200 km/h, z. B. in den Taifunen im westlichen Pazifik und den Hurrikans in der karibischen See.

Die wichtigsten **Umwelteinflüsse** für elektrische Anlagen in den Tropen sind:

- Temperatur und Luftfeuchte,
- Sturm und Niederschlag,
- Betauung und Strahlung.

Daneben sind auch zusätzliche Klimakomponenten zu beachten:

- chemisch-aggressive Atmosphäre in Meeresnähe infolge Salzgehalt der Luft (Bild 4.6.2.2),
- atmosphärische Entladungen (Blitz) in Tropengewittern,
- Flugsand in der Wüste.



Bild 4.6.2.2

Förderlinie aus fahrbaren Gurtförderern mit Trommel-Motoren bei der Salzgewinnung in einem tropischen Gebiet

4.6.3 Schimmelpilze

Schimmelpilze entstehen in allen feuchten Klimaten bei ruhiger Luft, bei entsprechender Temperatur und bei passenden Nährböden. Der günstigste Temperaturbereich für die Schimmelbildung liegt um 25 ... 30 °C bei gleichzeitig auftretenden hohen Werten der relativen Luftfeuchte.

Störende Folgen der Schimmelbildung können sein: Feuchteansammlung, Verfärbung der Oberfläche, Korrosion, Zersetzung und Zerstörung von Kunststoffen, Verminderung der Isolationswiderstände und Kriechwege. Für Schimmel anfällige Werkstoffe (z. B. Leder, Pappe, tierische und pflanzliche Fette) sind in elektrischen Betriebsmitteln und Anlagen zu vermeiden. Besser ist es, Werkstoffe zu verwenden, die dem Schimmelpilz keine Nahrung geben (z. B. Silicone, Hart-PVC).

4.6.4 Termiten

Etwa 2000 Termitenarten sind bekannt, wovon etwa 500 Arten als schädlich anzusehen sind (Bild 4.6.4.1). Sie treten vorwiegend in den Tropen auf. Termiten nagen alles an, was ihnen den Weg zu ihrer Nahrung versperrt, sofern die Materialien weicher sind als ihre Fresswerkzeuge und außerdem so geformt sind, dass die Fresswerkzeuge sie umfassen können. Gefährdet sind Holz, Kunststoffe, auch solche Metalle und andere Werkstoffe, die man mit dem Fingernagel ritzen kann.

Technische Materialien, wie Kunststoffe oder trockenes Bauholz, werden von diesen Termitenarten meist nur dann angenagt, wenn die natürliche Nahrung fehlt. Die günstigsten Lebensbedingungen der tropischen Termitenarten liegen bei 26 ... 30 °C und bei einer relativen Luftfeuchte von 90 ... 97 %.

Der beste Schutz gegen Termiten besteht in einer **metallischen Umhüllung** mit einem hohen IP-Schutzgrad, z. B. mindestens IP5X, wie ihn Drehstrom-Normmotoren heute fast durchweg serienmäßig aufweisen. Der Abschluss muss metallisch sein oder – z. B. an Wellendichtungen – eine Spaltweite unter etwa 1 mm aufweisen (Bild 4.6.4.2). Kunststoff- oder Gummidichtungen sollten nicht zugänglich sein. Dies gilt natürlich auch für die Anschluss- und Hilfsleitungen, die entweder als metallisch bewehrtes Kabel oder als metallische Rohrleitung auszuführen sind.

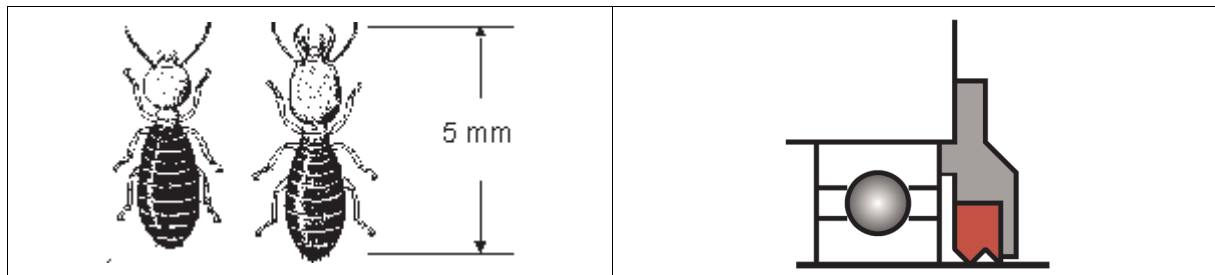


Bild 4.6.4.1
Eine der vielen Termitenarten
links Arbeiter, rechts Soldat

Bild 4.6.4.2
Wellendichtung mit metallischem Schurz
vor den Neopren-Teilen

4.6.5 Isolationswiderstand

Einen guten Anhaltspunkt für den Zustand einer Wicklung bietet der Isolationswiderstand, der auch am Einsatzort bei abgetrennten Anschlussleitungen – zum Beispiel mit einem Kurbelinduktor (Messspannung 500 V) – gemessen werden kann. Er beträgt bei neuwertigen Wicklungen mehr als 50 Megohm. In IEC 60079-19 (Abschnitt 6.2.6.3.1) ist für erneuerte Wicklungen ein Wert von mindestens 20 Megohm empfohlen. Der Isolationswiderstand kann unter dem Einfluss von Feuchtigkeit oder Verschmutzung auf etwa 5 Megohm absinken (Bild 4.6.5.1). Bei niedrigeren Werten empfiehlt es sich, die Wicklung mit einem neutralen Mittel (z. B. heißes Wasser oder »**Wicklungsreiniger**«) zu reinigen und anschließend bei etwa 80°C zu trocknen. Die untere zulässige Grenze beträgt etwa 0,5 bis 1 Megohm. Wenn der Motor nicht ausgebaut werden kann, lässt sich die Wicklung auch durch Anlegen einer **Einphasen-Heizspannung** nach Bild 4.6.5.2 am Einsatzort trocknen.

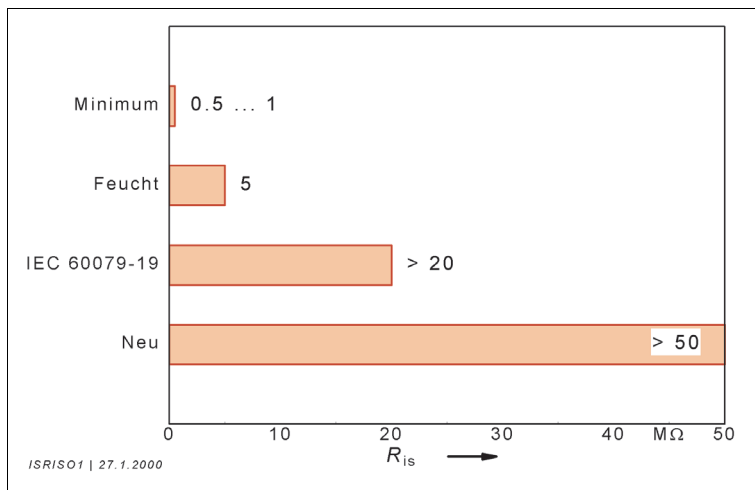


Bild 4.6.5.1
Richtwerte für den
Isolationswiderstand von
Drehstrom-
Ständerwicklungen

Neu –
Neuzustand
IEC 60079-19 – Empfehlung
der IEC
Feucht –
Trocknung ratsam
Minimum –

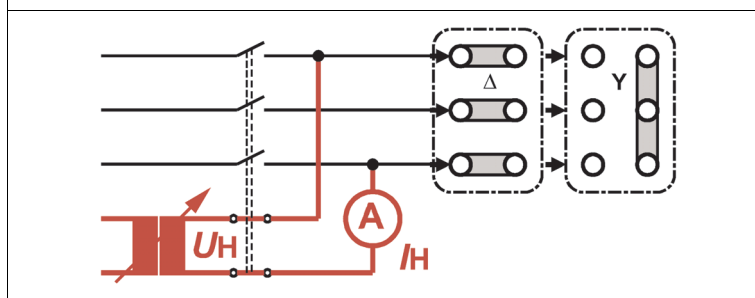


Bild 4.6.5.2
Schaltbild für die Trocknung
einer Drehstromwicklung am
Einsatzort

U_H - etwa 20 % von U_N
 I_H - etwa 65 % von I_N

4.7 Aufstellung im Freien

Der Begriff »Aufstellung im Freien« erscheint nicht in den Normen für den IP-Code, und es wird auch keine Zuordnung von IP-Schutzgraden und Umgebungsbedingungen getroffen.

Die in den Normungsgremien ausführlich diskutierten Gründe dafür werden nachstehend kurz erläutert.

4.7.1 Bezüge in den Schutzart-Normen

Beim Vergleich typischer **Regenmengen** mit den **Schärfegraden** bei den IP-Prüfungen scheinen zunächst die in unseren Breiten üblichen Beanspruchungen durch natürlichen Regen mit relativ niedrigen IP-Schutzgraden abdeckbar zu sein (Tabelle 4.7.1.1).

Tabelle 4.7.1.1 Typische Regenmengen nach DIN IEC 721-2-2 [1.5]

Bezeichnung	Niederschlagsmenge mm/h
Nieselregen	< 1
Leichter Regen	1
Mäßiger Regen	4
Intensiver Regen	15
Schwerer Regen	40
Wolkenbruch	> 100
IP-Schutzgrade	
Prüfung IPX1	60 (= 1 mm/min)
Prüfung IPX2	180 (= 3 mm/min)

Es ist jedoch zu bedenken, dass die genormte IP-Prüfung 10 min dauert, während ein Jahr 8760 h hat!

Die IP-Prüfung – auch mit erhöhten Wassermengen – kann die Beanspruchung einer Aufstellung im Freien nicht simulieren. Hier sind spezielle Langzeitprüfungen oder entsprechende Erfahrungen der Hersteller gefragt (Bild 4.7.1.2).



Bild 4.7.1.2
Langzeitberegnung von
Getriebemotoren zur Prüfung auf
Aufstellbarkeit im Freien

Der einzige Bezug zu einer Aufstellung im Freien könnte über den Begriff **wettergeschützte Maschinen** in DIN EN 60034-5 / VDE 0530 Teil 5 hergestellt werden. Dort heißt es im Abschnitt 10 "Anforderungen und Prüfungen für offene wettergeschützte Maschinen":

"Der Schutzgrad W ist für offene, durchzugsbelüftete Maschinen mit offener Kühlkreisordnung bestimmt, d. h. Maschinen mit Kühlsystem ICOX bis IC3X nach IEC 60034-6.

Wettergeschützte Maschinen sind so zu konstruieren, dass das Eindringen von Regen und Schnee und von der Luft mitgeführten kleinen Fremdkörpern in die elektrischen Bauteile vermindert ist.

Andere Maßnahmen zum Wetterschutz (wie vergossenen Wicklungen oder vollkommen geschlossenes Gehäuse) dürfen nicht mit W bezeichnet werden."

Es gibt aber noch andere, wichtige Gründe für die Zurückhaltung in der Schutzartnorm:

Global gesehen kann unter »Aufstellung im Freien« auch extreme Kälte, extreme Lufttemperatur, Erwärmung durch Sonneneinstrahlung, hohe Luftfeuchtigkeit, Schimmelbildung, Korrosion und vieles andere verstanden werden. Selbst bei Einsatz in unserem gemäßigten Klima stellt z.B. ein Betrieb in einem Klärwerk oder in der Freiluftanlage eines Chemiewerkes eine zusätzliche Beanspruchung dar, die mit dem pauschalen Begriff »Aufstellung im Freien« nicht erfasst ist.

Die gültigen Schutzartnormen klammern im Abschnitt »Zweck« aus gutem Grund folgende in diesem Zusammenhang relevanten Einflüsse ausdrücklich aus dem Geltungsbereich *aus*:

- Korrosion,
- Schimmel,
- schädliche Insekten,
- Sonneneinstrahlung,
- Vereisung,
- Feuchtigkeit (z. B. durch Kondensation gebildet).

Aus den Normen für die Schutzarten lässt sich also nicht ableiten, was getan werden muss, um eine elektrische Maschine zur Aufstellung im Freien tauglich zu machen. Es ist daher eine Rückfrage beim Hersteller notwendig, soweit nicht im Katalog oder in der Betriebsanleitung entsprechende Hinweise zu finden sind.

4.7.2 Hinweise in den Errichtungsbestimmungen

Etwas anders stellt sich die Sachlage in den Errichtungsbestimmungen DIN VDE 0100 dar. In Teil 737 »Feuchte und nasse Bereiche und Räume; Anlagen im Freien« hieß es unter 5.2: "In ungeschützten Anlagen im Freien müssen Betriebsmittel mindestens sprühwassergeschützt sein (IPX3 nach DIN 40050)."

Bei der Bewertung dieser Aussage sollte man beachten:

- Es handelt sich um eine **Mindestanforderung**.
- Die Errichtungsbestimmungen zielen primär auf den Aspekt der *Sicherheit* von Personen und Sachen. Die Aufrechterhaltung der *Funktion* eines Betriebsmittels bei **Verwendung unter besonderen Bedingungen** bleibt einer Vereinbarung zwischen Hersteller und Betreiber überlassen.

Die **neuere Norm DIN VDE 0100 - 510** hat folgenden Anwendungsbereich:

"510.1 Dieses Kapitel behandelt die Auswahl der Betriebsmittel und deren Errichtung. Es müssen die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen und die Einhaltung der Anforderungen hinsichtlich des zufriedenstellenden Betriebes der Anlage bei bestimmungsgemäßer Verwendung sowie hinsichtlich der jeweils zu erwartenden äußeren Einflüsse sichergestellt werden."

Die Norm listet in einem achtseitigen informativen Anhang die »Äußeren Einflüsse« auf, die bei der Auswahl von Betriebsmitteln beachtet werden sollen. Dort erscheint statt des pauschalen Begriffs »Aufstellung in Freien« eine Liste von Umgebungseinflüssen (Tabelle 4.7.2.1). Nur für das »Auftreten von Wasser« oder das »Auftreten von festen Fremdkörpern oder Staub in nennenswerter Menge« wird auf eine IP-Schutzart als »charakteristische Eigenschaft« für die Auswahl verwiesen (Tabelle 4.7.2.2). Alle anderen Einflüsse müssen durch »geeignete Anordnung oder Ausführung« berücksichtigt werden.

Tabelle 4.7.2.1 Zuordnung von klimatischen Umgebungsbedingungen und Auswahl der Betriebsmittel nach DIN VDE 0100-510 : 1997; Tabelle 51 A

Code	Lufttemperatur in °C		Relative Feuchte in %		Auswahl
	niedrig	hoch	niedrig	hoch	
AB1	-60	+5	3	100	speziell
AB2	-40	+5	10	100	speziell
AB3	-25	+5	10	100	speziell
AB4	-5	+40	5	95	normal
AB5	+5	+40	5	85	speziell
AB6	+5	+60	10	100	speziell
AB7	-25	+55	10	100	speziell
AB8	-50	+40	15	100	speziell

Tabelle 4.7.2.2 Zuordnung des Auftretens von Wasser und Fremdkörpern auf die Auswahl der Betriebsmittel nach DIN VDE 0100-510 : 1997; Tabelle 51 A

Code	Äußere Einflüsse	Auswahl der Betriebsmittel
	Wasser	
AD1	vernachlässigbar	IPX0
AD2	Tropfwasser	IPX1
AD3	Sprühwasser	IPX3
AD4	Spritzwasser	IPX4
AD5	Strahlwasser	IPX5
AD6	Schwallwasser	IPX6
AD7	Eintauchen	IPX7
AD8	Untertauchen	IPX8
	Feste Fremdkörper (Staub)	
AE1	vernachlässigbar	IP0X
AE2	klein (< 2,5 mm)	IP3X
AE3	sehr klein (< 1 mm)	IP4X
AE4	leichter Staub, geringe Menge	IP5X, wenn für die Funktion des Betriebsmittels nicht gefährlich
AE5	mittlere Staubmenge	IP6X, wenn kein Staub in das Betriebsmittel eindringen soll
AE6	bedeutende Staubmenge	IP6X

Ausgelöst durch die Arbeiten des TC 75 der IEC wird seit einigen Jahren an der umfassenden Normenreihe DIN IEC 721 »Klassifizierung von Umgebungsbedingungen« gearbeitet. Es ist das Ziel, sowohl die Anforderungen an Betriebsmittel wie auch die Eignung für alle Arten von Umweltbedingungen durch Kurzzeichen zu klassifizieren. Das System ist so komplex und kompliziert wie die zu normende Natur.

4.7.3 Unterschiede nach Art des Betriebsmittels

Die verschiedenen Arten von elektrischen Betriebsmitteln reagieren unterschiedlich auf die Beanspruchung bei einer Aufstellung im Freien. Dies soll am Beispiel eines Elektromotors veranschaulicht werden.

Bei **Käfigläufermotoren** führt Korrosion i. allg. zwar zu einer Beeinträchtigung des Aussehens, **nicht** jedoch zu einem **Ausfall der Funktion** (Bild 4.7.3). Die Wälzlager sind durch das Schmierfett ausreichend konserviert, der Luftpalt wird üblicherweise nicht »zuwachsen«, moderne Isolierstoffe sind nicht hygroskopisch und daher nicht anfällig.



Bild 4.7.3
Trommelmotor an einem
tragbaren Gurtförderer im
harten Baustelleneinsatz

Anders bei **mechanischen Bremsen**, die häufig an Elektromotoren angebaut werden. Vor allem im Stillstand können Reibmaterial und metallische Gegenfläche »verbacken«, zumal gewisse Komponenten des Reibmaterials die Korrosion verstärken können. Der Motor wird am Hochlauf gehindert, sollte aber von der ohnedies erforderlichen Schutzeinrichtung gegen einen Ausfall geschützt sein.

Die Korrosion zwischen Reibbelag und Gegenfläche kann durch einen hohen IP-Schutzgrad zwar verzögert und vermindert, aber wohl kaum ganz verhindert werden. Ein dichtes Gehäuse schützt gegen Wasser, nicht aber gegen Feuchtigkeit, die zur Auslösung von Korrosion ausreicht.

Offenbar nach entsprechenden Erfahrungen bieten einige Hersteller Bremsen in Sonderausführung mit **rostgeschützten Reibflächen** an.

4.8 Stoß, Schwingungen, Schock

Mechanische Beschädigungen durch äußere, nicht von der elektrischen Maschine selbst verursachte Einflüsse sind relativ häufig. Bestimmte Einsatzgebiete – Bergbau, Holzverarbeitung, Baustellen – signalisieren eine besonders hohe mechanische Beanspruchung. Häufig sind jedoch die Einsatzbedingungen »normal«, aber die Behandlung lässt das richtige Maß vermissen: Eine Werkzeugmaschine stellt an sich keine schwierige Anwendung dar, aber ein exponiert angebauter Motor kann vom Gabelstapler zu Schrott gefahren werden.

Dieser Abschnitt befasst sich mit einigen Arten von mechanischen Beanspruchungen und mit den in Normen oder Vereinbarungen festgelegten Grenzen.

4.8.1 Stoß

Für übliche industrielle Anwendungen sind in den Normen keine Grenzwerte für die Beanspruchung durch mechanische Stöße festgelegt. Gelegentlich wird ein sachlich nicht gerechtfertigter Zusammenhang mit den IP-Schutzarten hergestellt.

Im Abschnitt »Zweck« zu EN 60529 / DIN VDE 0470 Teil 1 heißt es: "Diese Norm befasst sich nur mit Gehäusen, die in jeder anderen Hinsicht für ihre beabsichtigte Verwendung, wie sie in der betreffenden Produktnorm festgelegt ist, geeignet sind und die hinsichtlich der Werkstoffe und Verarbeitung sicherstellen, dass die angegebenen Schutzarten bei bestimmungsgemäßer Verwendung erhalten bleiben." Mindestanforderungen und Prüfungen für die **Stoßfestigkeit** von Gehäusen sind nicht Gegenstand des IP-Codes. Wenn eine solche Festlegung zur Gewährleistung der Sicherheit notwendig ist, sind die produktspezifischen Normen zu ergänzen und zu beachten, wie sich dies z. B. in DIN EN 50014 / VDE 0170 / 0171 Teil 1 (Abschnitt 23.4.3.1) bewährt hat. Dort werden die Stoßfestigkeiten nach Tabelle 4.81.1 verlangt.

Tabelle 4.81.1 Stoßprüfung für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel nach DIN EN 50014

Gruppe	I		II	
Bereich	schlagwettergefährdet unter Tage		explosionsgefährdet über Tage	
Mechanische Gefahr	hoch	niedrig	hoch	niedrig
Schlagenergie (in J oder Ws)	20	7		4

Die teilweise aus der normalen Reihe abgeleiteten Betriebsmittel der Zündschutzart »e« (erhöhte Sicherheit) müssen demnach eine Stoßprüfung mit 7 J aushalten. Die Bilder 4.8.1.2 und 4.8.1.3 zeigen Muster von Lüfterhauben vor und nach einer bei Einführung dieser Norm (1978) notwendig gewordenen Verstärkung der Blechdicke von 1,0 auf 1,5 mm.

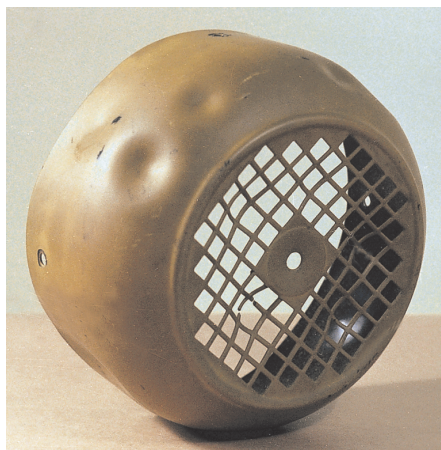


Bild 4.8.1.2
Unverstärkte Lüfterhaube nach der
Stoßprüfung

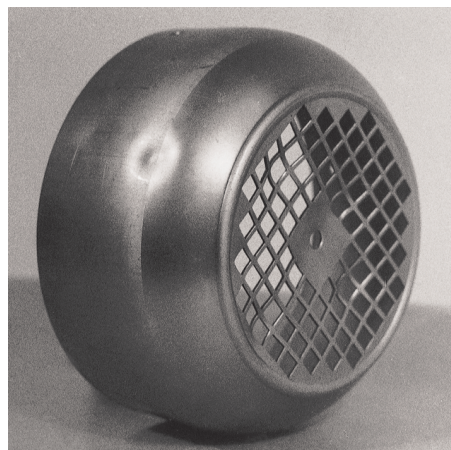


Bild 4.8.1.3
Verstärkte Lüfterhaube nach der
Stoßprüfung

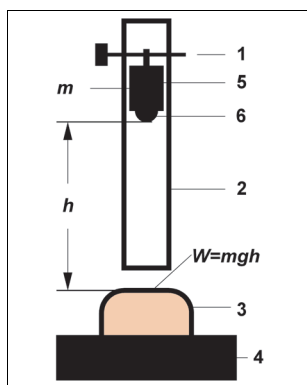


Bild 4.8.1.4
Schema einer Schlagprüfung der Lüfterhaube eines
Elektromotors mit einer Schlagenergie von z. B. 7 J,
Schlagstück 1 kg fällt zweimal aus 0,7 m Höhe

- 1 Höheneinstellung
- 2 Führungsrohr
- 3 Prüfmuster
- 4 Sockel aus Stahl ($m \geq 20$ kg)
- 5 Masse (z. B. $m = 1$ kg) aus Stahl
- 6 Schlagstück aus gehärtetem Stahl, Durchmesser z.B.

Neben der in DIN EN 50014 beschriebenen Stoßprüfung (Bild 4.8.1.4) sind noch zwei weitere Prüfgeräte genormt. Die Geräte sind im Herstellungsprogramm der Firma PTL 95346 Stadtsteinach.

In DIN EN 50102 / VDE 0470 Teil 100 [1.21] bzw. IEC 62262 wurde ein neues Bezeichnungssystem, der **IK-Code**, eingeführt, das im Bild 4.8.1.5 vorgestellt wird, um die Größenordnungen deutlich zu machen.

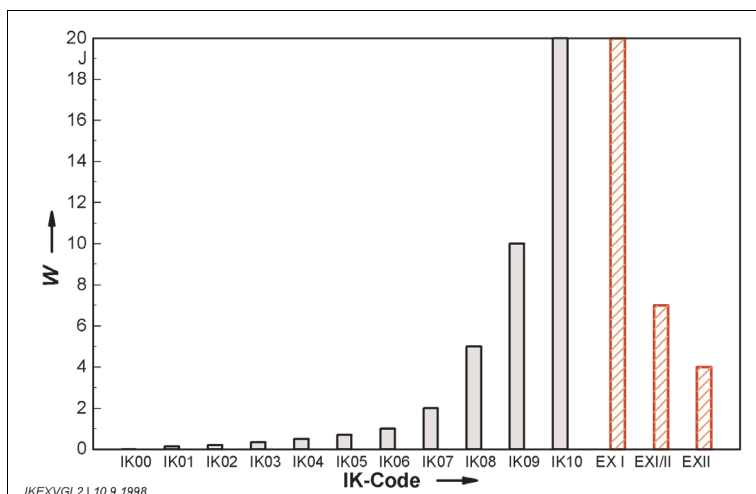


Bild 4.8.1.5
Abstufung der
mechanischen Stoßfestigkeit
elektrischer Betriebsmittel
nach dem IK-Code nach
DIN EN 50102 im Vergleich
zu den Festlegungen für
explosionsgeschützte
Betriebsmittel (EX)

Folgerungen für den Anwender:

Elektrische Betriebsmittel (Motoren, Schalt- und Steuergeräte) sind möglichst so anzuordnen, dass sie vor den bei bestimmungsgemäßer Verwendung zu erwartenden mechanischen Einwirkungen geschützt sind. In besonderen Fällen kann eine zusätzliche Abdeckung wirksamer und kostenkünstiger sein als eine Sonderausführung des Betriebsmittels (Bild 4.8.1.6).



Bild 4.8.1.6

Rollgangantriebe an einem Kühlbett mit Abdeckung gegen mechanische Beschädigung durch das glühende Transportgut

4.8.2 Schwingungen

Mechanische Schwingungen sind nicht vollständig vermeidbar. Sie können beim Übersteigen von zulässigen Grenzwerten zu Störungen mit erheblichen Folgeschäden führen:

- | | | |
|--|---|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Lockern von Befestigungen | ⇒ | Streifen rotierender Teile |
| <input type="checkbox"/> Wälzlagerschäden | ⇒ | Streifen des Läufers |
| <input type="checkbox"/> Isolationsschäden | ⇒ | Wicklungsausfall |
| <input type="checkbox"/> schlechter Kontakt | ⇒ | defekte Klemmen oder Wicklung. |

In der international anerkannten VDI-Richtlinie 2056 wird als Maß für das Schwingverhalten die **Schwingstärke** eingeführt, die dem Effektivwert der **Schwinggeschwindigkeit** entspricht. Die Richtlinie befasst sich primär mit der **Emission** (Abgabe) von Schwingungen. Da speziell für elektrische Maschinen keine allgemein bekannten Normen oder Richtlinien für die zulässige **Immission** (Einwirkung) vorhanden sind, kann die VDI-Richtlinie 2056 auch als Maßstab für die zulässige Schwingbeanspruchung verwendet werden.

Maschinen und Geräte werden in die Gruppen K, M, G, T, D, und S eingeteilt, von denen für elektrische Maschinen vor allem wichtig sind:

Gruppe K : ... insbesondere serienmäßige Elektromotoren bis etwa 15 kW,

Gruppe M : ... insbesondere Elektromotoren von 15 bis 75 kW Leistung.

Für diese Maschinengruppen sind im Bild 4.8.2.1 als Auszug in vereinfachter Form die Beurteilungsgrenzen in zwei Diagrammen dargestellt. Darin bedeuten:

- | | |
|------------------|---|
| s_{\max} | Wegamplitude (Spitzenwert der Halbwelle) |
| n | Drehzahl |
| v_{eff} | effektive Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) |
| 1 | Bereich unterhalb der mittleren Spürbarkeitsschwelle des Menschen |
| 2 | Bereich »gut« |
| 3 | Bereich »brauchbar« |
| 4 | Bereich »noch zulässig« |
| 5 | Bereich »unzulässig« |

4 Umgebungsbedingungen

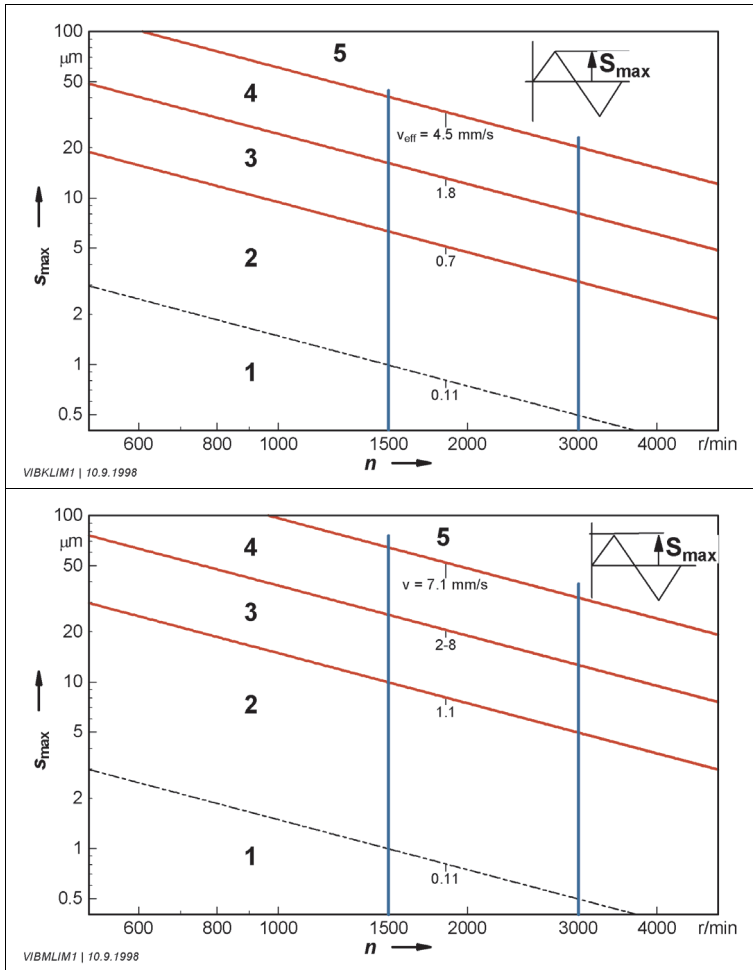


Bild 4.8.2.1
Beurteilungsgrenzen für das Schwingverhalten nach VDI 2056

a) Maschinengruppe K

b) Maschinengruppe M

Die Schwingstärke ist mit relativ einfachen Mitteln vor Ort messbar. Messbedingungen und Messpunkte sind in VDI 2056 und DIN ISO 2373 festgelegt. Eine Zuordnung der subjektiven Wahrnehmung zu den objektiven Messwerten und den Beurteilungsgrenzen ist in Bild 4.8.2.2 gegeben:

10 8 6 4 2 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0.1 0.08 0.06	mm/s	5	5	7.1	Wahrnehmung	
		4	4	2.8		sehr stark spürbar
		3	3	1.1		stark spürbar
		2	2			gut spürbar
		1	1			spürbar
		0.11			gerade spürbar	
		0.08			nicht spürbar	
		0.06				
			K	M		

VIBSTUF1 | 10.9.1998

Bild 4.8.2.2
Zuordnung der subjektiven Wahrnehmbarkeit zu den Beurteilungsgrenzen in Anlehnung an VDI 2057

Im Sicherheitsmerkblatt des FV1 im ZVEI werden folgende Grenzen für die Einwirkung äußerer Schwingungen im Bereich der Lagerstellen als **unbedenklich** bezeichnet:

- Maschinengruppe K: $v_{\text{eff}} \leq 3,5$ mm/s im Lauf,
- Maschinengruppe M: $v_{\text{eff}} \leq 4,5$ mm/s im Lauf,
- alle Maschinengruppen: $v_{\text{eff}} < 0,2$ mm/s im Stillstand (z. B. Einlagerung).

Im Zusammenhang mit dem übergeordneten Titel »Besondere Umgebungsbedingungen« ist die Norm DIN EN 60034-14 [1.14] nicht interessant, da sie normale und besondere Anforderungen an die **Schwinggüte** von elektrischen Maschinen festlegt. Sie wird der Vollständigkeit halber hier kurz erwähnt.

Die mechanischen Schwingungen von rotierenden elektrischen Maschinen werden nach dieser Norm gemessen und drei **Schwingstärkenstufen** zugeordnet. Grenzwerte für den Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit v_{eff} in Abhängigkeit von der Achshöhe H zeigt die Tabelle 4.8.2.3. Die Werte sind derzeit in Überarbeitung

Tabelle 4.8.2.3 Schwinggeschwindigkeit elektrischer Maschinen nach DIN EN 60034-14

Schwingstärke-Stufe	n_1 r/min	v_{eff} in mm/s für		
		$80 \leq H \leq 132$	$132 < H \leq 225$	$225 < H \leq 400$
N (normal)	600 bis 3600	1,8	2,8	4,5
R (reduziert)	600 bis 1800	0,71	1,12	1,8
	> 1800 bis 3600	1,12	1,8	2,8
S (spezial)	600 bis 1800	0,45	0,71	1,12
	> 1800 bis 3600	0,71	1,12	1,8

4.8.3 Schock

Unter einem mechanischen Schock versteht man die plötzliche, starke Bewegung einer Masse. Der Vorgang ist nicht periodisch und verursacht erhebliche Kräfte auf die Masse (Bild 4.8.3.1). Schockbelastungen können z. B. auftreten durch

- Erdbeben,
- Explosion,
- starker Wellengang (Brecher) auf Schiffen,
- Sturm.

Ein Schock ist gekennzeichnet durch die **maximale Beschleunigung**, ausgedrückt als Vielfaches der Erdbeschleunigung a_{max}/g .

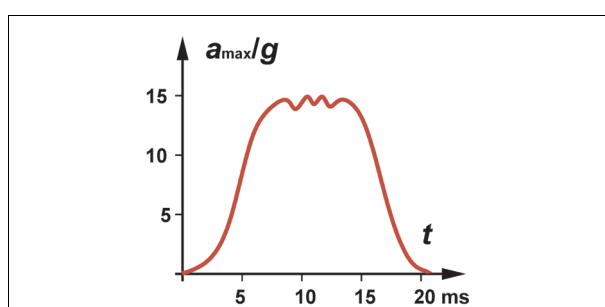


Bild 4.8.3.1

Typischer Verlauf eines Schocks
Beschleunigung als Vielfaches der
Erdbeschleunigung a_{max}/g über der Zeit t

Grenzwerte

Für die Verwendung von elektrischen Maschinen im militärischen Bereich bestehen umfangreiche Festlegungen für die **Schockfestigkeit** – bei industriellen Anwendungen sind solche Vorschriften nicht üblich. Das Bild 4.8.3.2 ist an Angaben der Fa. LOHER angelehnt; die Werte enthalten keine zusätzlichen Sicherheitsfaktoren. Vor einer Übernahme dieser Richtwerte sollte der jeweilige Hersteller konsultiert werden.

Der starke Abfall der zulässigen Beschleunigung mit zunehmender Baugröße erklärt sich aus der bekannten Beziehung

$$F = m \cdot a$$

Die Kräfte F wachsen also mit der zu beschleunigenden Masse m , die mit der Achshöhe (Baugröße) eines Motors überproportional zunimmt (Bild 4.8.3.3).

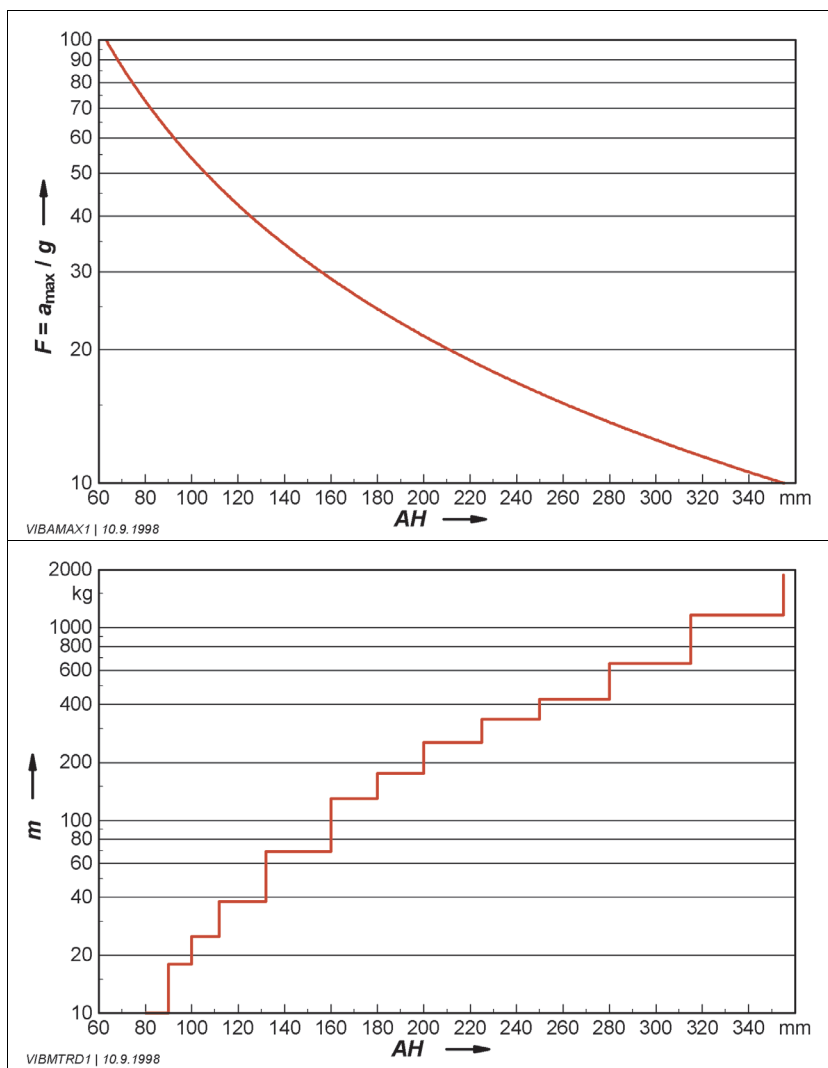


Bild 4.8.3.2
Zulässiger Schock als
Vielfaches der
Erdbeschleunigung
 a_{\max} / g bei elektrischen
Maschinen in
Abhängigkeit von der
Achshöhen AH

Katalogangaben der
Fa. LOHER

Bild 4.8.3.3
Überproportionale
Zunahme der Masse m
von Normmotoren mit
der Achshöhe AH

Regelklassen und Sicherheitsgrade für die Schockfestigkeit

Betriebsmittel zur Verwendung in Schutzräumen für den Zivilschutz müssen einer Schocksicherheitsprüfung unterzogen werden. Die Sicherheit wird in fünf **Regelklassen RK** und in drei **Sicherheitsgrade** eingeteilt. Die Werte in der Tabelle 4.8.3.4 sollen eine Vorstellung von den Größenordnungen eines Schocks vermitteln.

Tabelle 4.8.3.4 Regelklassen der Schocksicherheit

Klasse	Hauptkennwerte		Nebenkennwerte	
	Maximal- geschwindigkeit v_{\max} m/s	Maximal- beschleunigung a_{\max} m/s ²	Maximal- verschiebung s_{\max} cm	Beschleunigungs- anstieg (Ruck) r_{\max} g/ms
RK 0,63 / 6,3	0,63	6,3 g	10	1,6
RK 1,0 / 10	1,0	10 g	16	2,5
RK 1,6 / 16	1,6	16 g	25	4,0
RK 2,5 / 25	2,5	25 g	40	6,3
RK 4,0 / 40	4,0	40 g	63	10

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Erdbeschleunigung (Fallbeschleunigung)

Bei der Einteilung in **Sicherheitsgrade** spielt der Verwendungszweck des Betriebsmittels eine Rolle: Ein Lüfterantrieb zur Sauerstoffversorgung eines Schutzraumes wäre z. B. ausreichend, wenn er dem Sicherheitsgrad B entspricht, also nur für die Dauer des Schocks (z. B. durch Abheben der Bürsten bei einem batteriegespeisten Gleichstrommotor) ausfällt (Bild 4.8.3.5).

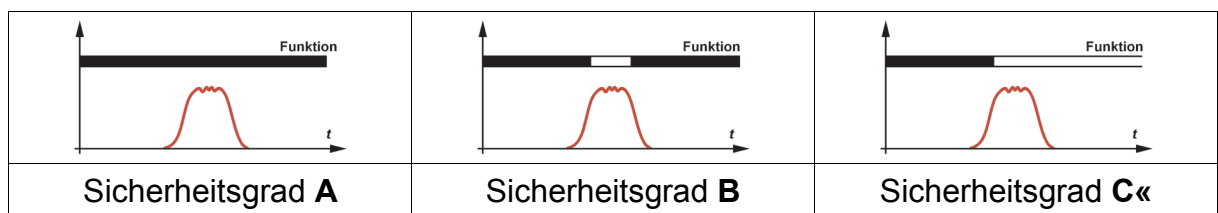


Bild 4.8.3.5 Sicherheitsgrade der Schocksicherheit

Sicherheitsgrad A Funktion während und nach der Schockeinwirkung gewährleistet

Sicherheitsgrad B Funktion während Schockeinwirkung gestört, danach wieder gewährleistet

Sicherheitsgrad C Funktionsausfall darf keine Folgeschäden verursachen.

4.9 Explosionsschutz

Viele der in diesem Buch angeschnittenen Schutzmaßnahmen sind Teil einer Zündschutzart, deren Einhaltung gesetzlich vorgeschrieben ist. Ausführliche Hinweise zum Explosionsschutz in [2.21].

5 Überlastungsarten für den Motor

Drehstrom-Käfigläufermotoren können kurzzeitig relativ hoch überlastet werden. Mindestwerte sind in der Norm [1.6] genannt:

Gelegentliche Stromüberlastung

Die Stromüberlastbarkeit bei drehenden Maschinen wird angegeben, um Steuer- und Schutzeinrichtungen auf die Maschinen abstimmen zu können. Prüfungen, mit denen die Überlastbarkeit nachgewiesen wird, werden in dieser Norm nicht gefordert. Die Erwärmung der Maschinenwicklungen ändert sich etwa mit dem Produkt aus der Zeit und dem Quadrat des Stromes. Ein Überstrom bewirkt steigende Temperaturen. Sofern nicht anders vereinbart, kann davon ausgegangen werden, dass die Maschine während ihrer Lebenszeit nur wenige kurze Zeitabschnitte mit den genannten Überströmen betrieben wird. Dreiphasenmotoren (ausgenommen Kommutatormotoren) mit Bemessungsleistungen bis 315 kW und Bemessungsspannungen bis 1 kV müssen einen Strom gleich dem 1,5fachen Bemessungsstrom mindestens 2 min lang aushalten können.

Kurzzeitige Drehmoment-Überlastbarkeit von Mehrphasen-Induktionsmotoren

Die Motoren müssen unabhängig von ihrem Betrieb und ihrer Konstruktion 15 s lang bei Bemessungsspannung, Induktionsmotoren auch bei Bemessungsfrequenz, bis zum 1,6fachen Bemessungsmoment überlastbar sein, ohne dass ein Stehenbleiben oder ein plötzlicher Drehzahlabfall (bei allmählichem Anstieg des Drehmoments) eintritt.

In den folgenden Abschnitten sind einige der Gründe für die Überlastung von Antrieben beschrieben.

5.1 Arbeitsmaschine

Vor allem bei manueller Bedienung können die meisten Arbeitsmaschinen überlastet werden und stellen dann auch erhöhte Anforderungen an den Antrieb.

5.1.1 Erhöhter Leistungsbedarf

Es darf angenommen werden, dass jeder Hersteller im Rahmen seiner Typprüfung eine **Belastungskennlinie** oder **Betriebskennlinie** ähnlich Bild 5.1.1 erstellt.

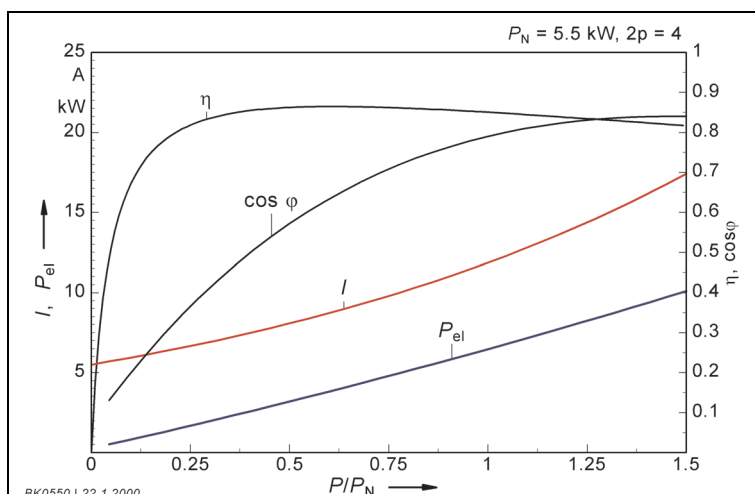


Bild 5.1.1
Typische
Belastungskennlinie eines
4poligen Drehstrom-
Asynchronmotors,
Bemessungsleistung 5,5 kW

5 Überlastungsarten für den Motor

Kennlinien dieser Art wurden vom Hersteller an einer genau ausgeregelten Bemessungsspannung aufgenommen. Sie sind für die Ermittlung der tatsächlichen Leistungsabgabe über die Messung der Stromaufnahme nur dann aussagekräftig, wenn auch bei der Messung am Einsatzort die Betriebsspannung (an den Motorklemmen!) nur wenig vom Sollwert abweicht. Toleranzen von etwa $\pm 3\%$ erscheinen in diesem Zusammenhang zulässig.

Die in DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1, Abschnitt 12.3, genannten zulässigen Spannungsschwankungen von $\pm 5\%$ im »Bereich A« bzw. $\pm 10\%$ im »Bereich B« haben lediglich mit der Funktion des Motors zu tun, nicht jedoch mit dem oft erheblichen Einfluss auf den Verlauf der Stromkennlinie, auf den es bei der Ermittlung der Leistungsabgabe entscheidend ankommt.

Belastungskennlinien der gezeigten Art sollten i. allg. für Serienmotoren (Normmotoren) beim Hersteller verfügbar sein. Bei ihrer Anforderung muss die **Fertigungsnummer** des betroffenen Motors angegeben werden, weil unter gleicher Typbezeichnung häufig geänderte Wicklungsauslegungen gefertigt werden, die sich auf diese Kennlinien auswirken.

Motoren mit Bemessungsleistungen unter etwa 1 kW benötigen eine relativ hohen Magnetisierungsstrom; die Stromkennlinie verläuft deshalb sehr flach (Bild 5.1.2). Infolge der hohen magnetischen Sättigung ergibt sich darüber hinaus eine große Streubreite in Abhängigkeit von der tatsächlich anliegenden Netzspannung, die nach den Normen für das Netz (DIN IEC 60038) um $\pm 10\%$ gegenüber dem Nennwert schwanken darf. Die Stromaufnahme ist repräsentativ für die **thermische Belastung** der Wicklung; stromabhängige Überlastungsschutzeinrichtungen (z. B. Bimetallrelais) können ihre Aufgabe erfüllen. Jedoch hat die Stromaufnahme bei solchen Motoren eine relativ geringe Aussagekraft bezüglich der **tatsächlichen Leistungsabgabe**. Hier bietet sich die elektrische **Leistungsaufnahme** als Messgröße an: Sie hat gemäß Bild 5.1.3 auch bei kleinen Motoren einen relativ steilen Verlauf und erlaubt eine gute Auswertung.

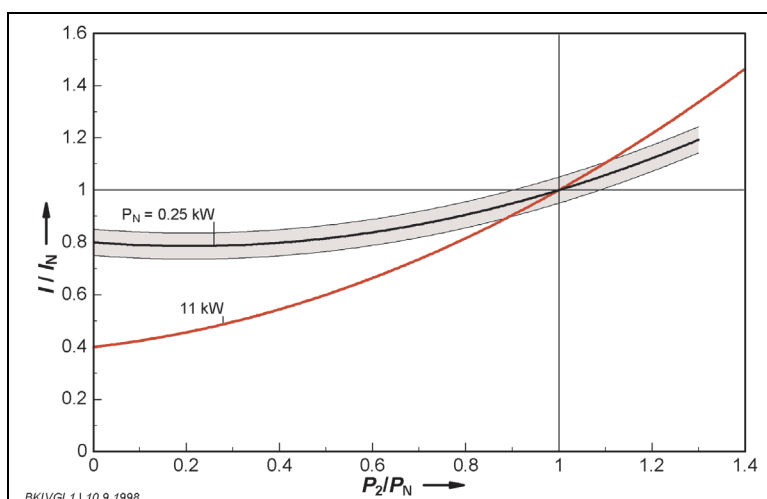


Bild 5.1.2
Relative Stromaufnahme I/I_N
in Abhängigkeit von der
relativen Belastung P_2/P_N
bei
Drehstrom-
Käfigläufermotoren mit
Bemessungsleistung $P_N =$
0,25 und 11 kW

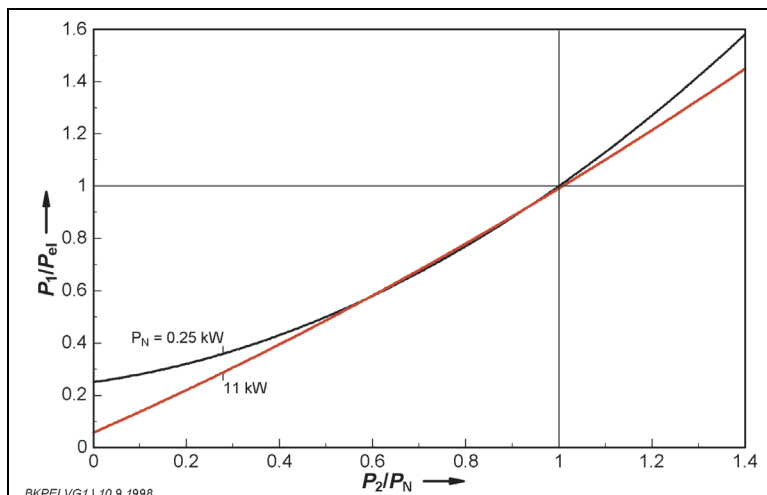


Bild 5.1.3
Relative Leistungsaufnahme P_1/P_{el} in Abhängigkeit von der relativen Belastung P_2/P_N bei Drehstrom-Käfigläufermotoren mit Bemessungsleistung $P_N = 0,25$ und 11 kW

5.1.2 Blockierung

Bei manchen Antriebsarten kann der Drehmomentbedarf über das vom Motor entwickelte Anzugs- oder Kippmoment ansteigen, der Motor wird blockiert. Der Elektromaschinenbauer bezeichnet diesen Betriebszustand mit festgebremstem Läufer als »**Kurzschlussfall des Motors**«.

Aus der Betriebsweise eines Motors ergeben sich besondere Anforderungen an den Überlastungsschutz, die am Beispiel eines Schrapfers (Bild 5.1.2.1) deutlich gemacht werden können:

Beim Einschalten im Vorfeld des Materials (Sand, Kiesel, Schotter) nimmt der Motor den Anzugsstrom I_A auf, bewegt dann die Schaufel fast im Leerlauf (I_0), bis sie zum Eingriff kommt. Der Laststrom I_L steigt mit der Schaufelfüllung bis auf den **Bemessungsstrom I_N** an. Gerät die Schaufel an einen unvorhergesehenen, extrem hohen Widerstand (z. B. an einen großen Steinbrocken), so kann der Motor abgewürgt werden und den **Anzugsstrom (Kurzschlussstrom) I_A** aufnehmen. Während eines typischen Spielverlaufs ändert sich der Strom im Verhältnis $I_0 : I_A$, d.h. etwa $1 : 12$.

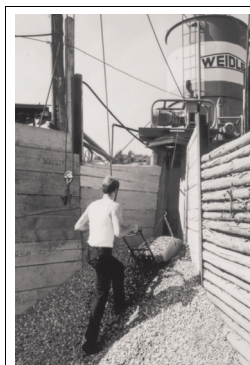


Bild 5.1.2.1
Schrapper als Anwendungsbeispiel für Elektromotoren mit wechselnder Belastung während eines Arbeitsspiels

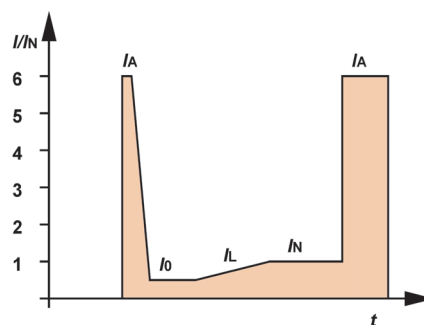


Bild 5.1.2.2
Stromaufnahme während des Arbeitsspiels eines Schrapfers
 I_A Anzugsstrom beim Einschalten oder Blockieren
 I_0 Leerlaufstrom
 I_L Laststrom
 I_N Bemessungsstrom

5 Überlastungsarten für den Motor

Die thermische Auswirkung unterschiedlicher Lastzustände wird aus Bild 5.1.2.3 deutlich; dabei ist vorausgesetzt, dass der jeweils angegebene Strom (I_A , I_0 , I_N) in gleichbleibender Höhe fließt. Die Ströme stehen bei dem für Bild 5.6 gewählten Beispiel etwa im Verhältnis $I_0 : I_N : I_A = 0,6 : 1 : 4$; die Erwärmungen etwa $0,35 : 1 : 15$. Bei dem Schrapper nach Bild 5.1.2.2 und 5.1.2.2 würde die Temperatur im Blockierungsfall mit I_A so rasch ansteigen, dass sie sich bei dem hier gewählten Zeichenmaßstab nicht mehr darstellen lässt.

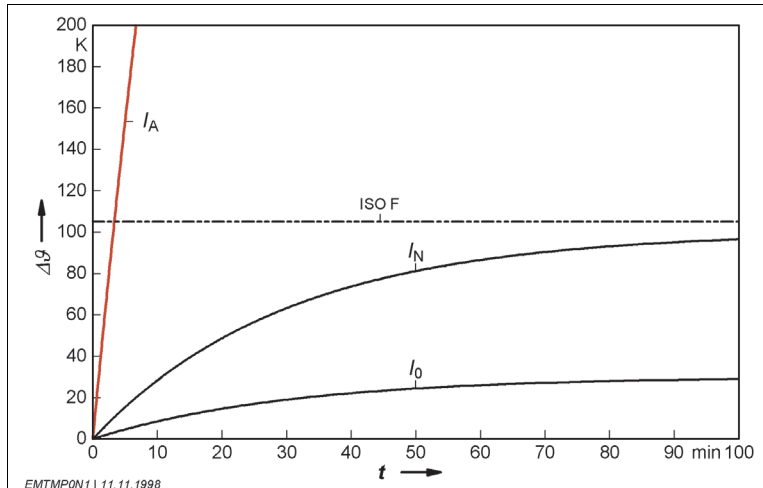


Bild 5.1.2.3
Temperaturanstieg $\Delta\theta$ bei
Leerlauf (I_0), Nennlast (I_N)
und im Kurzschluss (I_A)
im Vergleich zum Grenzwert
für Wärmeklasse F (ISO F)

Das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten eines Käfigläufermotors ist in Bild 5.1.2.4 gezeigt: Bei zunehmender relativer Belastung M/M_N nimmt die Drehzahl etwa linear um den Schlupf ab; bei Belastung mit dem Kippmoment M_K wird der Motor abgewürgt und steht mit festgebremstem Läufer, wobei das **Anzugsmoment** M_A entwickelt wird.

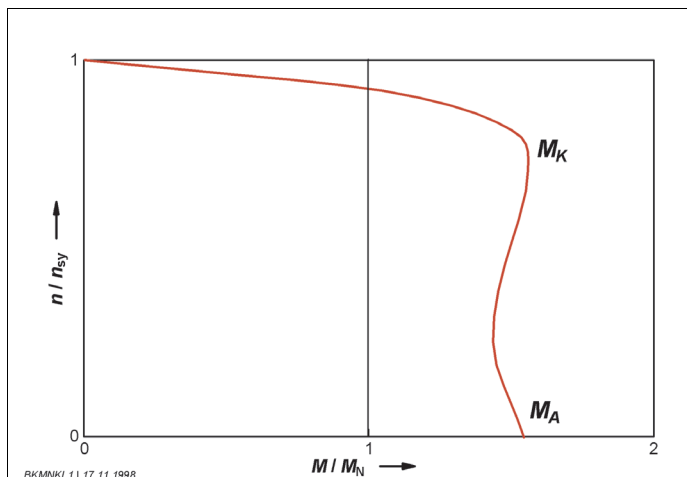


Bild 5.1.2.4
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie
eines Käfigläufermotors

M/M_N Drehmoment relativ zum
Bemessungsmoment
 n/n_{sy} Drehzahl relativ zur
Synchrondrehzahl
(z. B. 1500 r/min)
 M_K ...Kippmoment
 M_A ...Anzugsmoment

5.2 Netz

Bei einer Energieversorgung über moderne Industrienetze besteht i. allg. keine Gefahr für den Motor. Es sind jedoch Situationen denkbar, in denen die Wicklung thermisch (durch langanhaltende Spannungsabweichung) oder dielektrisch (durch Spannungsspitzen) gefährdet sein kann.

5.2.1 Toleranzen nach Norm

5.2.1.1 Netzspannung nach DIN IEC 60038

Die Bemühungen um eine weltweite Normspannungen haben im Jahr 1983 mit IEC 60038 einen vorläufigen Abschluss gefunden. Die identische nationale Norm DIN IEC 60038 ist 1987 erschienen. In einer auf 20 Jahre veranschlagten Übergangszeit sollen die in 50-Hz-Netzen üblichen Spannungen von 380, 415, 420 und 440 V durch die Normspannung 400 V abgelöst werden. Für Einphasennetze gilt dann sinngemäß 230 V.

Norm für die Netze

Die Bemühungen um weltweite Normspannungen haben im Jahr 1983 mit IEC 38 einen vorläufigen Abschluss gefunden. Die identische nationale Norm DIN IEC 38 ist 1987 erschienen. In einer auf 20 Jahre veranschlagten Übergangszeit sollen die in 50-Hz-Netzen üblichen Spannungen von 380, 415, 420 und 440 V durch die Normspannung 400 V abgelöst werden. Für Einphasennetze gilt dann sinngemäß 230 V.

Die neuen Nennwerte und ihre Toleranzen sollten bis zum Jahr 2003 übernommen werden. Im CENELEC-Memorandum No.14 war sogar empfohlen, die neuen Werte bis 1993 einzuführen. Da aber Großbritannien (Spannungen 415, 420 und 440 V) erst 1993 formal zugestimmt hat und dort die Umstellung mit den Ende 1994 eingeführten Ergänzungen zu den "Wire regulations" BS 7671 verzögert umgesetzt wird, konnte das eigentliche Ziel einer Welt-Normspannung bei 50 Hz noch nicht erreicht werden.

Bedeutung der Spannungsangabe 230 V

Nach Auskunft der VDEW kommen Drehstromnetze 3 x 220 V in den alten Bundesländern nicht mehr vor. In den neuen Bundesländern gibt es noch einige wenige Drehstromnetze 3 x 220 V, die so bald wie möglich auf 3 x 400 V umgestellt werden sollen.

Die Spannung 230 V ist fast immer eine **Einphasenspannung** für Licht- und Stauernetze. Eine Spannungsangabe 230/400 V kann daher nur als Netzbezeichnung 1~ 230 V / 3~ 400 V verstanden werden. Für die Bestellung und Beschilderung von Motoren für Netzbetrieb macht die Bezeichnung 230/400 V Δ/Y (also 3~ 230 / 3~ 400 V Δ/Y) keinen Sinn und sollte daher vermieden werden. Lediglich bei Umrichterbetrieb kann eine Auslegung für 3 x 230 V vorkommen.

Akzeptanz der »Eurospannung« in europäischen Ländern

Trotz CENELEC-Memorandums ist wenige Jahre vor Ablauf der 20jährigen Übergangsfrist eine insgesamt unbefriedigende praktische Akzeptanz der **Eurospannung** festzustellen: Dies gilt vor allem für den Handelspartner

Großbritannien, dessen Sondernetz 415 bzw. 420 V ein wichtiger Grund für die Einführung der neuen Spannung 400 V war (Bild 5.2.1.1).

Aus der Erhebung ist nicht erkenntlich, welcher Anteil der Motoren im jeweiligen Land (also an »genormten« 400 V) verwendet werden soll und welcher Anteil zum Export in Länder mit weiterhin genormten 380 V bestimmt ist.

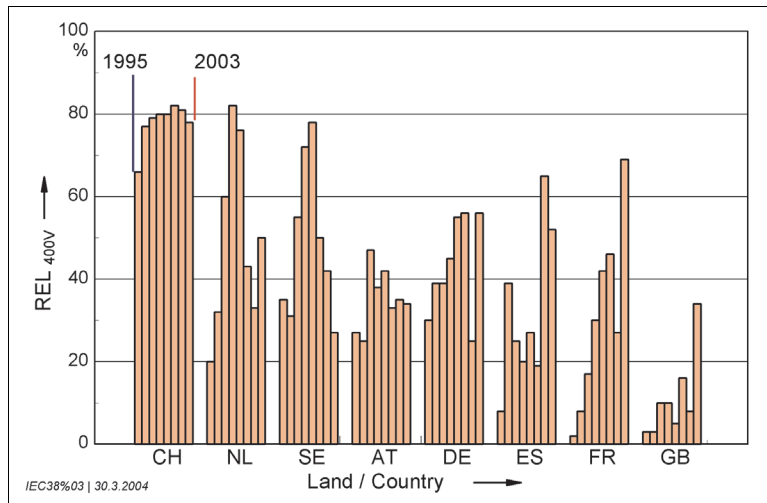


Bild 5.2.1.1
Akzeptanz
der »Eurospannung 400 V«
in acht europäischen
Ländern
in den Jahren 1995 ... 2003
(ohne 2002)

Quelle :
Danfoss Bauer GmbH

5.2.1.2 Zulässige Spannungsschwankung für elektrische Maschinen

Für elektrische Maschinen gilt nach wie vor DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1, die mit IEC 60034-1 harmonisiert und in deren Abschnitt 12.3 eine zulässige Spannungsschwankung von $\pm 5\%$ genormt ist.

Diese Toleranz bezieht sich auf die jeweils auf dem Leistungsschild genannte Spannung, d. h. ein Motor, benannt für

380 V	kann verwendet werden für	361 bis 399 V
400 V		380 bis 420 V.

Die genormte Toleranz $\pm 5\%$ wird auf dem Leistungsschild nicht angegeben (vgl. Abschnitt 12.3 in [1.6]).

Für elektrische Maschinen ist also – im Gegensatz zu den Festlegungen für die Netzspannung und Toleranzen vieler anderer Betriebsmittel – eine relativ enge Schwankung der Anschlussspannung zulässig. Dies hat technische Gründe: Kleine Motoren (z. B. unter etwa 1,1 kW) und hochpolige Motoren arbeiten häufig nahe der magnetischen Sättigung und reagieren daher auf Überspannung relativ empfindlich.

Für Betrieb mit Spannungsschwankungen, die über die derzeit genormten $\pm 5\%$ hinausgehen, ist in [1.6] vorgesehen, dass die Motoren **funktionsstüchtig** sein sollen: Sie können ihr Bemessungsdrehmoment abgeben, wobei die übrigen Kenndaten (z. B. auch die Erwärmung) größere Abweichungen von den für die Bemessungsspannung festgelegten Daten haben dürfen:

5 Überlastungsarten für den Motor

Tabelle 5.2.1.2 Zulässige Spannungsschwankungen für Motoren nach DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1 sowie IEC 60034-1, Bild 14

Nenn- oder Bemessungspunkt	ΔU (%)	
	10	Bereich B Motor muss funktionstüchtig sein, darf aber größere Abweichungen der Kenndaten haben; Betrieb über längere Zeit an den Grenzen von B wird nicht empfohlen; für EEx e nicht zulässig
	5	
	0	Bereich A Motor muss im Dauerbetrieb funktionstüchtig sein Erwärmung darf um 10 K höher sein als Grenzwert; auch zulässig bei EEx e
	- 5	
	- 10	Bereich B Motor muss funktionstüchtig sein, darf aber größere Abweichungen der Kenndaten haben; Betrieb über längere Zeit an den Grenzen von B wird nicht empfohlen; für EEx e nicht zulässig

Der Toleranzbereich B stellt für **normale, nicht explosionsgeschützte** Maschinen eine Konzession dar, von der Hersteller und Betreiber nach Abwägung der Auswirkung auf die Betriebsdaten und die Lebensdauer der Wicklungsisolierung eigenverantwortlich Gebrauch machen können. Da bei **explosionsgeschützten** Motoren die Sicherheit tangiert ist, muss hier die Umstellung auf die Spannung 400 V unter Beachtung der einschlägigen Normen (z. B. DIN EN 50018 und DIN EN 50019) und der speziellen Motorauslegung vorgenommen und dokumentiert werden.

5.2.2 Betriebsverhalten bei Spannungsänderung

Zur Beurteilung des Betriebsverhaltens von Drehstrom-Asynchronmotoren bei Änderung der Anschlussspannung kann eine Versuchsreihe herangezogen werden, die häufig im Rahmen der Typprüfung zur Feinabstimmung der Wicklungsauslegung durchgeführt wird: konstante Leistungsabgabe bei verschiedenen Spannungen. Im Grunde ermittelt man hier bei der Typprüfung die **magnetische Flussdichte (Induktion)**, bei der sich die günstigsten Betriebseigenschaften ergeben. Die Wicklung wird für die Serie dann so ausgelegt, dass sich bei Betrieb mit Bemessungsspannung eben diese günstigste Flussdichte einstellt. Wenn irgend möglich, wählt man die Flussdichte so, dass bei Bemessungsspannung die niedrigsten Verluste auftreten. Bei dieser Auslegung hat der Motor bei Abgabe der Bemessungsleistung die geringste Erwärmung – nachfolgend als **Optimum** bezeichnet. Es gibt jedoch zwingende Gründe, die Flussdichte niedriger oder höher als das Optimum zu wählen.

Die Bilder 5.2.2.1 bis 5.2.2.3 sind rein qualitativ zu betrachten. Durch eine vereinfachte und überzeichnete Darstellung soll die Tendenz besonders deutlich werden. Sie eignen sich nicht für eine quantitative Auswertung.

- Der **Wirkstrom I_w** – der zur mechanischen Leistungsabgabe beiträgt – hat bei steigender Spannung (Flussdichte) eine fallende Tendenz (u.a. weil der Schlupf kleiner wird).
- Der **Magnetisierungsstrom I_μ** – der den magnetischen Fluss bildet – hat bei steigender Spannung (Flussdichte) eine steigende Tendenz, die vor allem bei Erreichen der Sättigungsgrenze überproportional steil ist.
- Der **Gesamtstrom I** – der in der Zuleitung zu messen ist – setzt sich geometrisch aus den Komponenten I_w und I_μ zusammen.
- Das **Minimum des Gesamtstromes I** – der auch die Verluste repräsentiert – charakterisiert das Optimum der Flussdichte.

Bemessungsspannung (Flussdichte) im Optimum (Bild 5.2.2.1)

Diese Auslegung ist nach Möglichkeit anzustreben und ist typisch für Motoren mit Bemessungsleistungen von etwa 1,1 ... 11 kW.

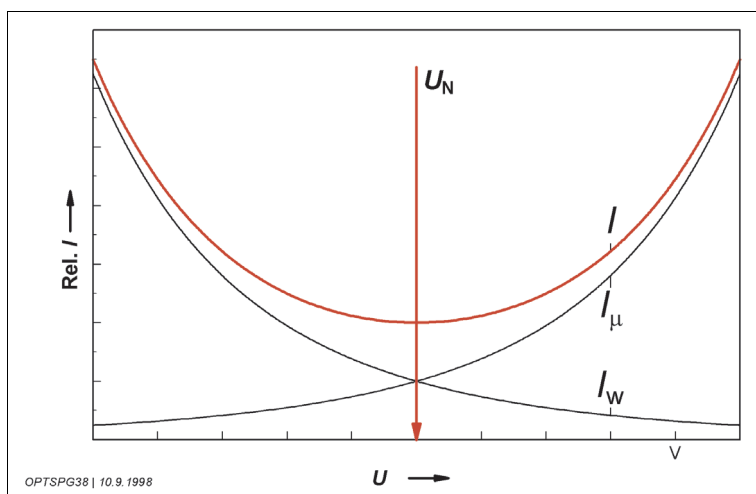


Bild 5.2.2.1
Tendenz der
Stromaufnahme I mittlerer
Motoren
(ca. 1,1 ... 11 kW)
bei Änderung der
Anschlussspannung U

Zuordnung der
Bemessungsspannung U_N
im Optimum (qualitative
Darstellung)

Beurteilung des Betriebsverhaltens:

- Spannungsänderungen im Rahmen üblicher Toleranzen wirken sich relativ wenig auf die Stromaufnahme (Erwärmung) aus.
- Der Weiterbetrieb eines für 380 V gewickelten Motors an der neuen Bemessungsspannung 400 V i. allg. zulässig.

Bemessungsspannung (Flussdichte) unterhalb des Optimums (Bild 5.2.2.2)

Diese Auslegung ist typisch für Motoren mit Bemessungsleistungen über etwa 11 kW, weil sich bei optimaler Flussdichte zu hohe Anzugsmomente und Anzugsströme ergeben würden. Während die Anzugsmomente nur für nachgeschaltete Übertragungselemente (Getriebemotoren) und Arbeitsmaschinen eine Gefahr darstellen, führen hohe Kurzschlussstromdichten im Blockierungsfall zu einem gefährlich raschen und starken Temperaturanstieg, der z. B. durch Thermistoren nicht mehr erfasst werden kann.

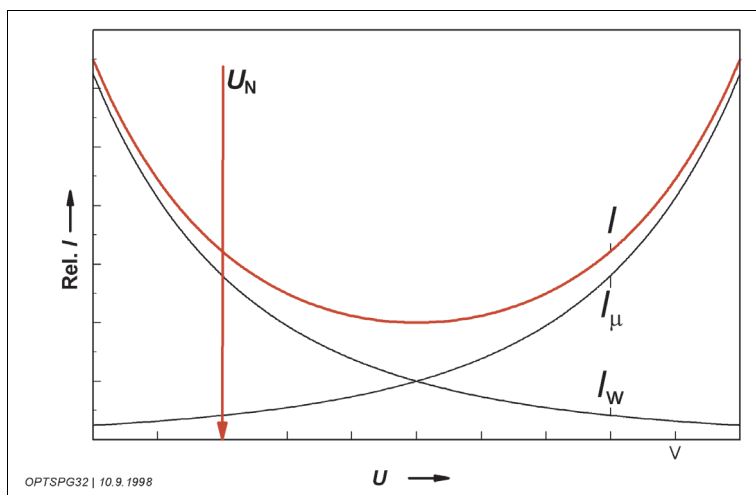


Bild 5.2.2.2
Tendenz der Stromaufnahme I großer Motoren (ca. > 11 kW) bei Änderung der Anschlussspannung U

Zuordnung der Bemessungsspannung U_N unterhalb des Optimums (qualitative Darstellung)

Beurteilung des Betriebsverhaltens:

- Spannungsverminderung führt zu höherer Stromaufnahme (Erwärmung),
- Spannungsanhebung führt zu niedrigerer Stromaufnahme (Erwärmung),
- Der Weiterbetrieb eines für 380 V gewickelten Motors an der neuen Bemessungsspannung 400 V ist zulässig, falls Werte für erhöhtes M_A und M_K für die Arbeitsmaschine unbedenklich sind.

Bemessungsspannung (Flussdichte) oberhalb des Optimums (Bild 5.2.2.3)

Diese kritische Auslegung kann für Motoren mit Bemessungsleistungen unter etwa 1,1 kW erforderlich sein, weil mit der optimalen Flussdichte die genormte Überlastbarkeit $M_K/M_N \geq 1,6$ nicht erreicht würde. Für den Weiterbetrieb von 380-V-Motoren am neuen Netz 400 V ist dies die kritische Gruppe!

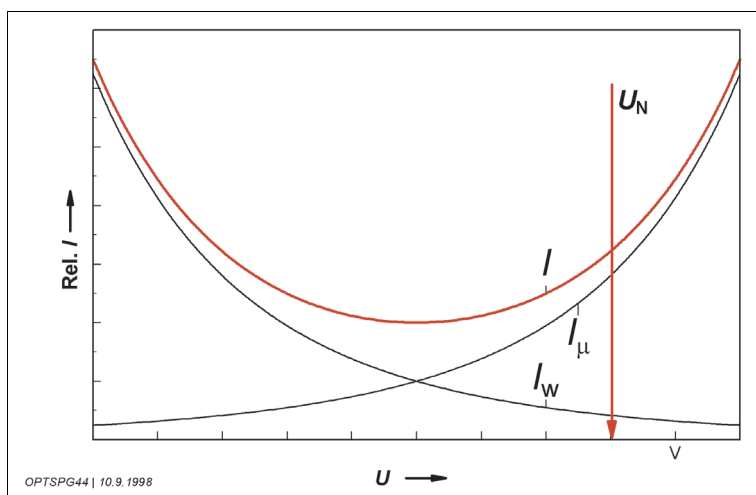


Bild 5.2.2.3
Tendenz der Stromaufnahme I kleiner Motoren (ca. < 1,1 kW) bei Änderung der Anschlussspannung U

Zuordnung der Bemessungsspannung U_N oberhalb des Optimums (qualitative Darstellung)

Beurteilung des Betriebsverhaltens:

- Spannungsverminderung führt zu geringerer Stromaufnahme (Erwärmung), jedoch ist die nach Norm verlangte Überlastbarkeit $M_K/M_N \geq 1,6$ in Frage gestellt.
- Spannungsanhebung führt wegen der Sättigung zu erheblich höherer Stromaufnahme (Erwärmung). Der Leerlaufstrom kann größer werden als der Bemessungsstrom!
- Der Weiterbetrieb eines für 380 V gewickelten Motors an der neuen Bemessungsspannung 400 V i. allg. in Frage gestellt. Stromaufnahme und Erwärmung im tatsächlichen Betrieb prüfen, Hersteller konsultieren!

5.2.3 Spannungsspitzen

Öffentliche Versorgungsnetze sind mit Rücksicht auf empfindliche Verbraucher (Industrie-Elektronik, Computer) i. allg. frei von Spannungsspitzen, die für die Isolierung einer Wicklung gefährlich werden könnten. In der industriellen Anwendung können jedoch lokal durch bestimmte Verbraucher Spannungsspitzen in kritischer Höhe oder Frequenz erzeugt werden; die beiden nachstehenden Beispiele stehen stellvertretend für die vielen möglichen Ursachen.

5.2.3.1 Selbstinduktion einer Magnetspule

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 im Bild 5.2.3.1.1 zeigt einen solchen Abschaltvorgang.

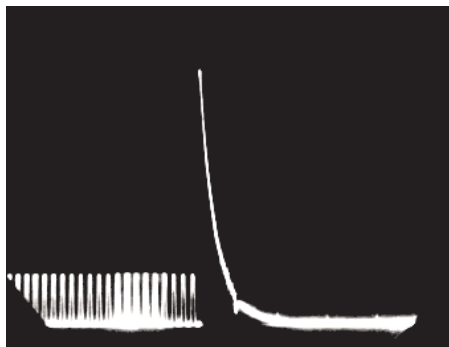


Bild 5.2.3.1.1

Oszillogramm der Abschaltspannungsspitze eines Gleichstrom-Lüftmagneten

In ungünstigen Fällen können beim Abschalten **Induktionsspitzen** bis zur 20fachen Nennspannung auftreten. Es empfiehlt sich daher, die Nennspannung des Magneten möglichst niedrig (z. B. 24 V) zu wählen, so dass 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, Selendioden, Z-Dioden oder Varistoren abgebaut werden (Bild 5.2.3.1.2).

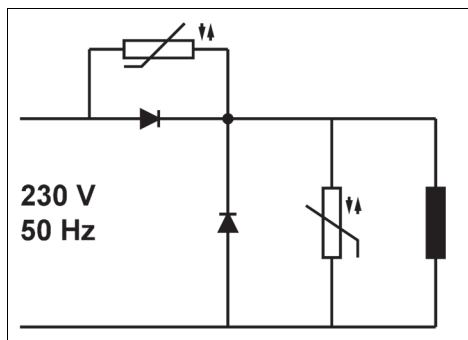


Bild 5.2.3.1.2
Einweg-Gleichrichtung mit
Stromrückführungdiode und Beschaltung durch
spannungsabhängige Widerstände (Varistoren)

5.2.3.2 Schaltspannung bei Pulsumrichtern

Die Annäherung des Motorstromes an die ideale Sinusform (Bild 5.2.3.2.1) und die dadurch erzielte Minimierung von Oberschwingungsverlusten und Geräusch haben ihren technischen Preis:

Pulsfrequenzen im Ultraschallbereich (≥ 16 kHz) bedingen extrem schnelle Halbleiterschalter (z. B. IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor oder MOS-Feldeffekttransistoren) mit Schaltzeiten unter 200 ns (1 Nanosekunde = 10^{-9} Sekunden).

Die Tabelle 5.2.3.2.2 soll die Größenordnungen im Vergleich zu üblichen Netzvorgängen deutlich machen.

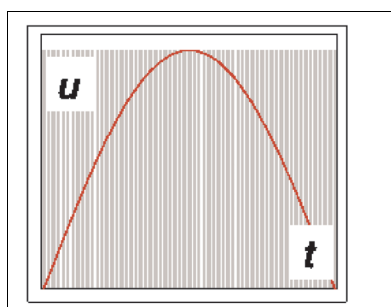


Bild 5.2.3.2.1
Prinzipdarstellung der Pulsbreitenmodulation zur
Erzeugung einer sinusförmigen Ausgangsspannung am
PWM-Umrichter (Pulsfrequenz: bis 20 kHz)

Tabelle 5.2.3.2.2 Typische Kenngrößen beim Umrichter

	Taktfrequenz Hz	Schaltzeit s	Spannungsanstiegs- geschwindigkeit V/ μ s
Umrichter	20000	$100 \cdot 10^{-9}$	50000
Netz	50	$5 \cdot 10^{-3}$	0,2
Relation	400	50000	250000

Es entstehen hohe **Spannungsänderungsgeschwindigkeiten** du/dt und Spannungsspitzen, die bei langen Leitungen (z. B. > 25 m) und anderen ungünstigen Parametern durch Reflexionen und Einschwingvorgänge auf bis zu 10 ... 50 kV/ μ s und auf die doppelte **Zwischenkreisspannung** (also z. B. $2 \cdot \sqrt{2} \cdot 400$ V = 1100 V) (Bild 5.2.3.2.3) ansteigen können [3.7].

Bei einer Simulation der Spannungsüberhöhung mit einem unsymmetrischen Rechtecksignal am Anfang und Ende einer 50 m langen Leitung bei einer Grundfrequenz von 38,6 kHz wurden Werte von 2,5facher Überhöhung gemessen (Bild 5.2.3.2.4).

5 Überlastungsarten für den Motor

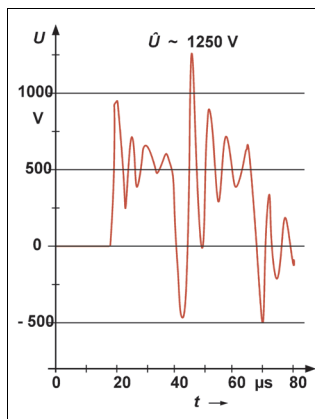


Bild 5.2.3.2.3
Gemessene Schaltspannungen an den Motorklemmen im transienten Anfangszustand eines Einschaltvorganges [3.6]
Scheitelwert der Spannung: ca. 1250 V

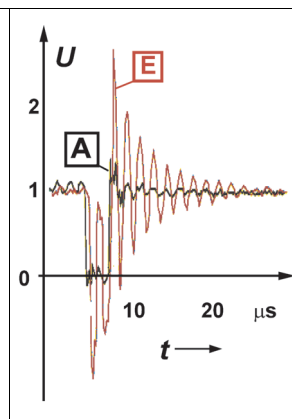


Bild 5.2.3.2.4
Simulation der Spannungsüberhöhung am Ende (E) einer 50 m langen Leitung gegenüber dem Anfang (A);
Grundfrequenz: 38,6 kHz
Quelle: Jahresbericht der PTB 1994

Für die Wicklungsisolierung entstehen Beanspruchungen, die mit den durch Blitzentladung verursachten **Wanderwellen** vergleichbar sind – mit dem wichtigen Unterschied, dass es sich nicht um gelegentliche, einmalig auftretende Vorgänge handelt, sondern um eine Dauerbeanspruchung mit der hohen Pulsfrequenz!

Die Spannung an der Wicklung ändert sich so schnell, dass am Anfang und Ende eines Stranges unterschiedliches Potential herrscht – im ungünstigsten Fall bei parallelen Spulengruppen und »wilder« Wicklung ist also der Lackfilm zwischen zwei sich berührenden Drähten mit der vollen Spitzenspannung beansprucht.

Erschwerend kommt der **Einfluss der Leitungslänge** hinzu, wie aus Bild 5.2.3.2.5 ersichtlich ist.

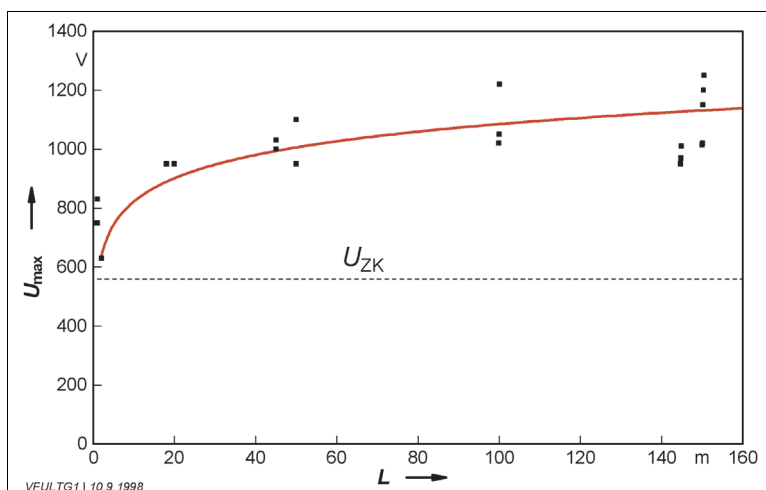


Bild 5.2.3.2.5
Einfluss der Leitungslänge L auf die Spannungsspitze U_{max} im Vergleich zur Zwischenkreisspannung U_{ZK} (nach [3.6])

Es wäre dem Prinzip der Umrichterspeisung abträglich, wenn die Spannungsspitzen nur durch eine Begrenzung der Leitungslänge bekämpft würden (Bild 5.2.3.2.6). Die technisch richtige Lösung besteht in **Ausgangsfiltern** am Umrichter.

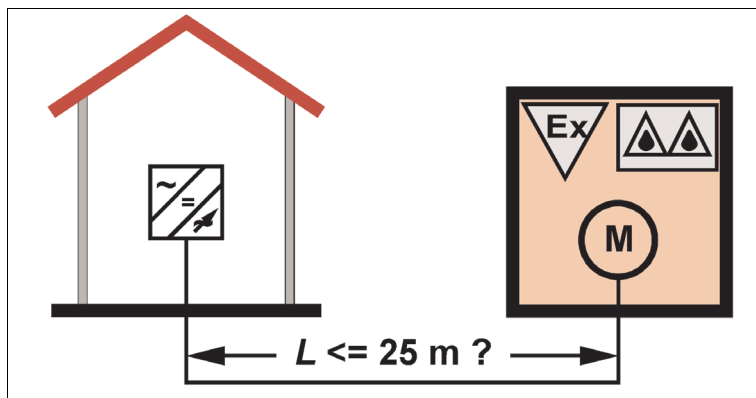


Bild 5.2.3.2.6
Mit einer Begrenzung der Leitungslänge geht ein entscheidender Vorteil des Prinzips der Umrichterantriebe verloren.

Der Anwender ist gut beraten, wenn er einen Umrichter mit einem **Ausgangsfilter** auswählt, bei dem die kritischen Werte so gedämpft sind, dass sie keine Gefährdung für die Wicklungsisolierung darstellen. So wurden z. B. am Ausgang eines PWM-Umrichters gemessen:

- ohne Ausgangsfilter $\hat{U} \approx 800 \text{ V}$,
- mit Ausgangsfilter $\hat{U} \approx 265 \text{ V}$.

Der Aufwand für das Ausgangsfilter bietet einen hohen Gegenwert:

- erhöhte Sicherheit gegen vorzeitige Wicklungsschäden,
- verminderte Geräuschemission,
- günstigere Voraussetzungen für die Einhaltung der EMV-Richtlinien, auch ohne geschirmte Motorzuleitungen.

5.2.3.3 Maßnahmen beim Isoliersystem

Mit der Wahl des Begriffs "**Isoliersystem**" soll deutlich werden, dass es allein mit der Verwendung einer dickeren oder **TE-resistenten Lackschicht** auf den Wickeldrähten nicht getan ist. In einer US-amerikanischen Studie kommt dies offenbar nach einschlägigen Erfahrungen klar zum Ausdruck: "Neuartige Lackdrähte können die vom Umrichtersystem erzeugten Spannungsspitzen nicht verhindern und die leitungsbedingten Reflexionen nicht unterdrücken. Sie können den Ausfall hinausschieben, aber nicht ganz verhindern."

Wenn die erhöhte Spannungsbeanspruchung im Umrichterbetrieb zu einem Wicklungsschaden führt, dann kann dieser überwiegend als Windungsschluss mit sehr enger, lokaler Begrenzung erkannt werden. Das Bild 5.2.3.3.1 zeigt einen solchen Schaden, wie er an einem Twist im Versuch erzeugt wurde.



Bild 5.2.3.3.1
Lokaler Spannungsdurchschlag an einem Twist
Quelle: Drahthersteller ESSEX

- Bei umrichter gespeisten Antrieben darf auf **Phasentrennungen** nicht verzichtet werden. Bei Motoren im "low-cost"-Bereich kam es mit den ersten Umrichteranwendungen zu unerwarteten Erfahrungen.
- **Schaltverbindungen**, die über die Spulenköpfe geführt werden, müssen mit einem zusätzlichen Isolierschlauch geschützt werden.
- **Löt- und Schweißstellen** dürfen keine Spitzen aufweisen und müssen gut isoliert sein.
- Lackierte Drähte sollten besonders **schonend verarbeitet** werden; auch Sonderlackdrähte können schon durch Druckstellen oder leichte Kratzer geschädigt werden.
- Die Luftwickel zwischen den Runddrähten sollten möglichst gut mit Tränklack gefüllt sein, weil TE in Luft leichter auftreten als in Isolierlack (Bild 5.2.3.3.2). Zweimalige Tränkung, gute Vorwärmung und neue Methoden der Erwärmung mit verbessertem Eindringen des Lacks (z. B. **Strom-UV-Tauch-Imprägnierung**) sind daher wichtige Komponenten eines umrichtertauglichen Isoliersystems.

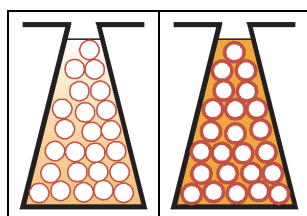


Bild 5.2.3.2
Unterschiedliche Lackfüllung in den Zwickeln
einer Träufel- oder Einziehwicklung

Bei der Strom-UV-Imprägnierung wird das Eindringen des Tränkmittels in die Hohlräume zwischen den Drähten durch die Stromwärme unterstützt. Der chemische Vorgang des Aushärtens findet unter Zufuhr elektrischer Energie und UV-Strahlung statt. Für den Umrichterbetrieb ist die deutliche Erhöhung der TE-Einsatzspannung wichtig; daneben werden Abtropfverluste, Heizkosten und Schadstoffemissionen reduziert.

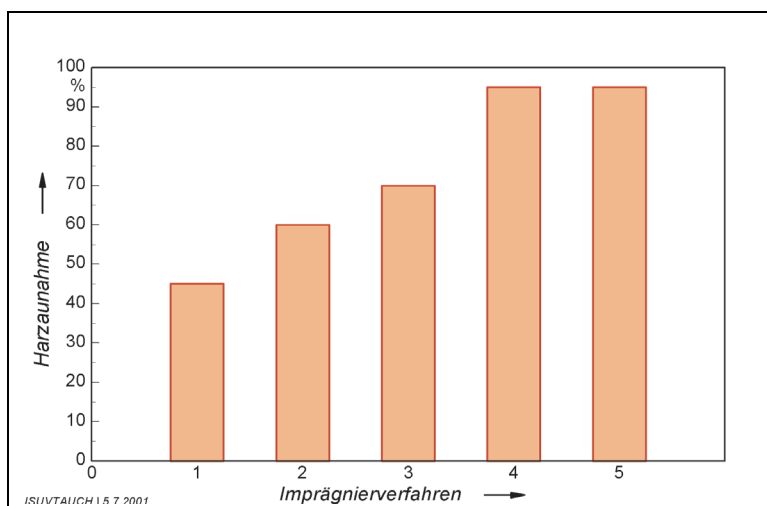


Bild 5.2.3.3
Relative Harzaufnahme bei
verschiedenen Imprägnier-
und Heizverfahren

- 1 Tauchen, Ofen
- 2 Vakuum, Ofen
- 3 Träufeln, Ofen
- 4 Träufeln, Vakuum,
Stromheizung
- 5 Tauchen, Strom, UV

Quelle: G.Thumm GmbH

Durch gute Tränkung kann die TE-Einsatzspannung um 50 % gesteigert werden. Bei speziellen TE-beständigen Drahtlacke besteht fast keine Abhängigkeit von der **Harzaufnahme**, doch liegt deren Vergleichswert auch ohne Tränkung wesentlich höher.

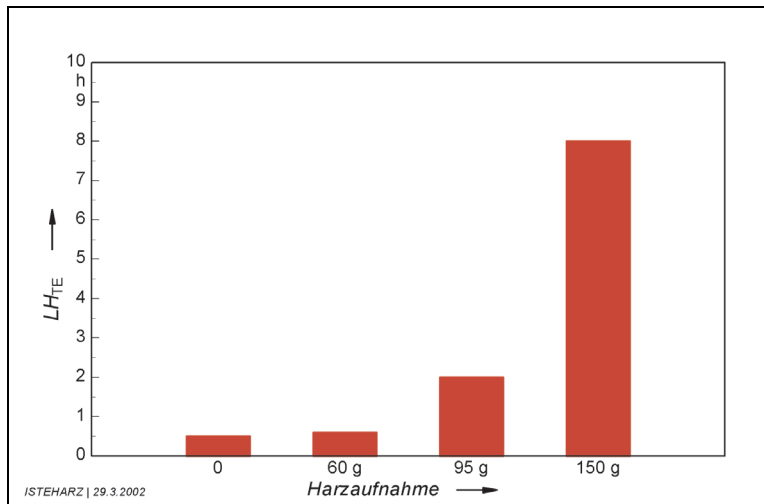


Bild 5.2.3.3.4
Lebensdauer LH_{TE} von
Versuchswicklungen unter
forcierter TE-Einwirkung in
Abhängigkeit von der
Harzaufnahme bei Overcoat-
Lackdrähten der Sorte
THEIC-PEI

Quelle: DuPont

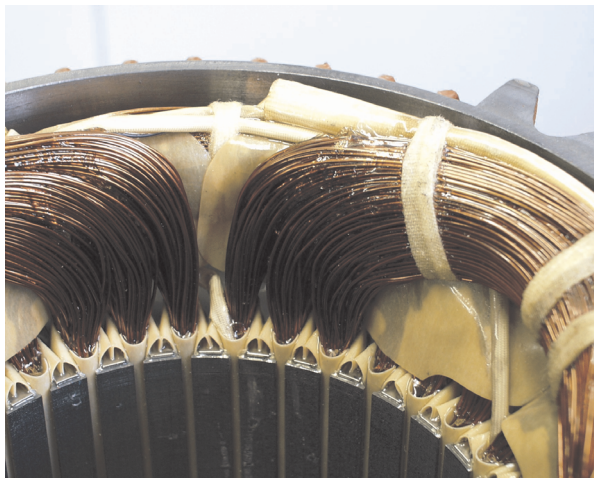


Bild 5.2.3.3.5
Wicklung mit guter Anreicherung von
Tränkharz in Kopf und Nut nach einer
Strom-UV-Tauch-Imprägnierung

Werksbild: Danfoss Bauer GmbH

5.2.4 Zweileiterbetrieb

Wenn – nach allgemeinem Sprachgebrauch – eine »Phase« (ein Außenleiter) ausfällt, so läuft ein »Dreiphasenmotor« (der zur Bildung eines Drehfeldes drei zeitlich verschobene Spannungen oder »Phasen« benötigt) an zwei »Phasen« weiter. Er arbeitet in diesem Störfall im »Zweiphasenlauf« – physikalisch gesehen hat er die Wirkungsweise eines »Einphasenmotors«.

Ist seine Wicklung in Dreieck geschaltet, so wird »eine Phase« (Wicklungsstrang) überhitzt, bei Sternschaltung sind »zwei Phasen« gefährdet.

Diese Schilderung zeigt, wie sehr die Begriffe im allgemeinen Sprachgebrauch durcheinandergelassen werden.

Der Grund: Das Wort »Phase« sollte **nur für einen zeitlichen Zustand und nicht für die Netzleiter** und für die Wicklungsstränge benutzt werden.

In diesem Abschnitt werden folgende Begriffe verwendet :

Phase ist der augenblickliche Schwingungszustand eines periodischen Schwingungsvorganges.

Anmerkung: In der Ausgabe 1966 von DIN 40108 wurden die den einzelnen Strombahnen eines Mehrphasensystems zugeordneten Leiter oder Anordnungen im übertragenen Sinne auch als Phase bezeichnet. Diese im technischen Sprachgebrauch noch übliche Verwendung des Wortes »Phase« zur Bezeichnung von Gegenständen wird nicht mehr empfohlen.

(Vgl. DIN 40108, Abschn. 2.1 sowie DIN 1311 Teil 1, Abschn. 3.4).

Außenleiter sind Leiter, die Stromquellen und Verbrauchsmittel verbinden, aber nicht vom Mittel- oder Sternpunkt ausgehen.

(Vgl. DIN VDE 0100, Teil 200, Abschn. 3.1 und DIN 40108, Abschn. 4.1.1)

(Wicklungs-)Strang ist die Strombahn in Mehrphasensystemen, in der Strom einer Phase (in der Bedeutung »Schwingungszustand«) fließt.

(Vgl. DIN 40108, Abschn. 4.2)

Zweileiterbetrieb oder **Einphasenlauf** ist der gestörte Betrieb einer Drehstrommaschine nach Ausfall eines Außenleiters.

Im englischen Sprachgebrauch wird dieser Störfall zutreffend als **single-phasing** bezeichnet.

5.2.4.1 Ursachen für den Zweileiterbetrieb

Beim Betrieb von Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren kommt es immer wieder vor, dass einer der drei Außenleiter ausfällt. Die Ursache hierfür ist meist das Ansprechen **einer** Schmelzsicherung beim Einschaltstromstoß, gelegentlich auch schlechter Kontakt in der Leitungsführung oder eine Leitungsunterbrechung.

Bekanntlich bleibt ein Drehstrom-Asynchronmotor auch bei Zweileiteranschluss mit nahezu voller Drehzahl – wenn auch bei verminderter Kippleistung – mit derjenigen Drehrichtung in Betrieb, in der ihm ein Bewegungsimpuls erteilt wurde oder in der er sich vor der Störung befand.

5.2.4.2 Auswirkung auf Stromaufnahme und Wicklungserwärmung

Der Strom in den beiden aktiven Netzleitern steigt gegenüber dem ungestörten Betrieb etwa um den Faktor 1,2 ... 2 an (Bild 5.2.4.2). Die Stärke des Anstieges ist u. a. abhängig von

- Größe und Auslegung des Motors,
- Auslastung (in der Regel niedriger als Nennmoment, da bei Zweileiterbetrieb das Kippmoment erheblich reduziert ist).

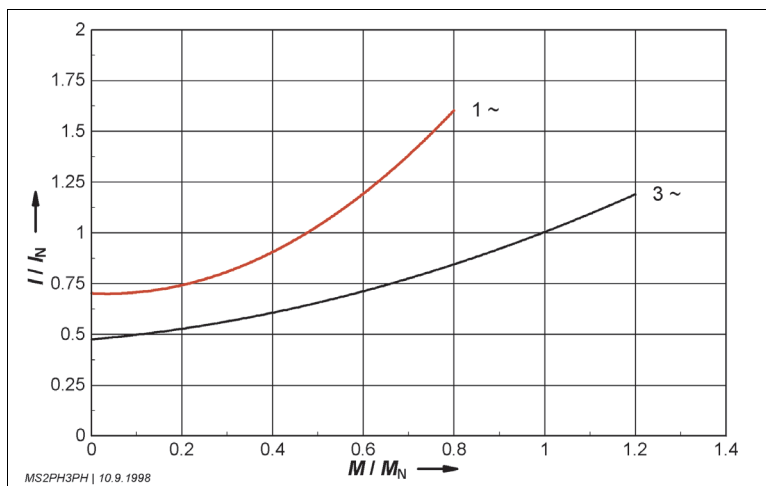


Bild 5.2.4.2
Relativer Strom in der Zuleitung I/I_N bei verschiedener Belastung M/M_N , jeweils bezogen auf den Bemessungswert im ungestörten Betrieb
3 ~ bei Dreiphasenbetrieb (3 Leiter)
1 ~ bei Einphasenbetrieb (2 Leiter)

Im Gegensatz zum ungestörten Betrieb ist der Strom in den beiden verbliebenen Außenleitern kein Maßstab für die Erwärmung des Motors:

- Bei Dreieckschaltung findet eine vom normalen Verhältnis abweichende Stromaufteilung statt:
ungestörter Betrieb: $1 : 1/\sqrt{3} = 1 : 0,58$,
gestörter Betrieb: $1 : 2/3 = 1 : 0,67$.
- Das gegenläufige (inverse) Drehfeld verursacht zusätzliche Verluste im Rotor, so dass vor allem bei größeren Motoren mit ausgeprägter Stromverdrängung Läufertemperaturen auftreten können, die bis zum doppelten Nennwert und höher ansteigen können. Die Rotortemperaturen heizen vor allem bei geschlossenen, oberflächengekühlten Maschinen (z. B. Kühlart IC 411) die Ständerwicklung entsprechend auf.
- Entlastend wirkt, dass Teile der Ständerwicklung entweder gar nicht direkt erwärmt werden (bei Sternschaltung ist ein Strang ohne Strom) oder nur mit reduziertem Strom beschickt werden (bei Dreieckschaltung liegen zwei Stränge in Reihenschaltung).

Eine allgemein gültige Aussage über die Wicklungstemperaturen im Zweileiterbetrieb ist daher nicht möglich. Wicklungen in Sternschaltung wären nicht gefährdet, wenn das Überstromrelais einen Stromanstieg über den Einstellwert verhindern könnte.

5.2.4.3 Auswirkungen auf die Ströme in den Wicklungssträngen

Für die Stromverteilung in den drei Wicklungssträngen des Motors und für die Wirksamkeit des normalen Motorschutzrelais ergeben sich bei den beiden üblichen Schaltungen der Drehstrom-Ständerwicklung unterschiedliche Gesichtspunkte.

Sternschaltung

Bei Sternschaltung der Wicklung liegen die in der Netzleitung angeordneten Relais in Reihe mit den zugehörigen Wicklungssträngen, überwachen also direkt den für die Ständererwärmung maßgebenden Strom (Bild 5.2.4.3.1). Obwohl dieser Strom im ungünstigsten Fall um bis zu 32 % höher sein kann als der Nennstrom, besteht i. allg. keine besonders hohe Gefahr für die Wicklung, da ja ein Wicklungsstrang (also ein Drittel des bewickelten Raumes) ohne Strom ist und einen erheblichen Wärmeausgleich übernehmen kann.

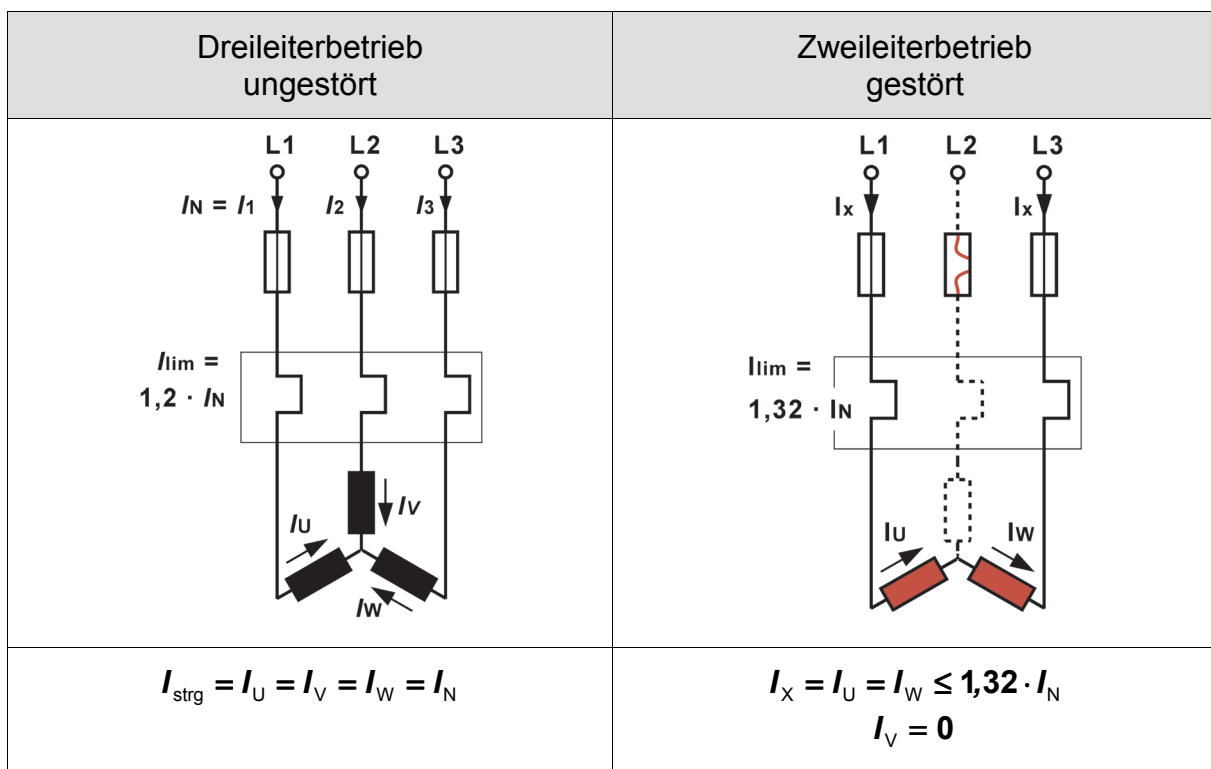


Bild 5.2.4.3.1 Stromaufnahme bei Dreiphasen- und Einphasenbetrieb in Sternschaltung

Dreieckschaltung

Fällt bei der Dreieckschaltung eine Netzleitung aus, so verbleibt ein Wicklungsstrang an voller Spannung, während die beiden anderen Stränge jeweils nur die halbe Nennspannung erhalten. Entsprechend ist auch die Stromaufteilung auf die beiden Zweige wie 2 : 1 bzw. $2/3 I_N : 1/3 I_N$.

Selbst wenn das auf I_N eingestellte Motorschutzrelais nicht mehr als diesen Sollwert dauernd zulassen würde, wäre im gefährdeten Wicklungsstrang mit einem Dauerstrom von $2/3 I_N = 0,67 I_N$ zu rechnen, während dieser Strang nur für $1/\sqrt{3} I_N = 0,58 I_N$ dauernd bemessen ist.

Tatsächlich darf im gestörten Betrieb ein Ansprechstrom bis zu $1,32 I_N$ fließen, d. h. im gefährdeten Wicklungsstrang können dauernd bis zu $1,32 \cdot 0,67 I_N = 0,88 I_N$ auftreten, ohne dass das Relais anspricht.

Der Wicklungsstrang wird also mit dem $0,88/0,58 = 1,5$ fachen zulässigen Strangstrom belastet, was selbst bei einem guten Wärmeausgleich mit den nur zu etwa 75% ihres Nennwertes belasteten beiden anderen Strängen eine beachtliche Gefährdung darstellt (Bild 5.2.4.3.2).

Es wurden Wicklungstemperaturen bis zu 140 % der Nennwerte gemessen, wenn der Außenleiterstrom dem Nennstrom entspricht.

Es können jedoch im Rahmen der zulässigen, genormten Ansprechtoleranzen der Relais weit höhere Ströme auftreten, sofern auf spezielle Phasenausfallempfindlichkeit verzichtet wird.

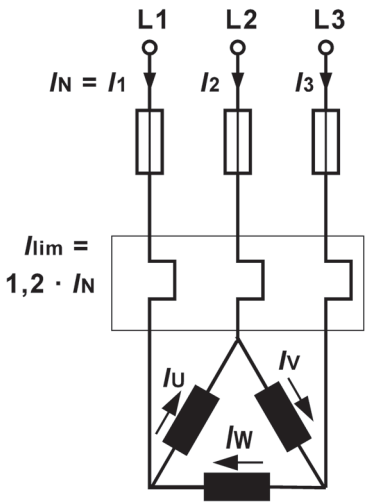
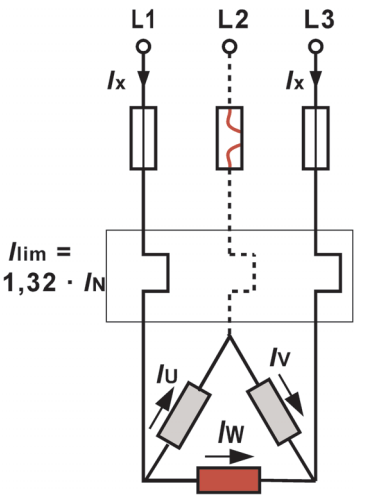
Dreileiterbetrieb ungestört	Zweileiterbetrieb gestört
	
$I_{\text{strg}} = I_U = I_V = I_W = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_N = 0,58 \cdot I_N$	$I_U = I_V = \frac{1}{3} \cdot I_X$ $I_W = \frac{2}{3} \cdot I_X \leq 0,88 \cdot I_N \approx 1,5 \cdot I_{\text{strg}}$

Bild 5.2.4.3.2

Stromaufnahme bei Dreiphasen- und Einphasenbetrieb in Dreieckschaltung

5.2.4.4 Typische Schadensbilder von Drehstrom-Ständerwicklungen

Die im vorigen Abschnitt dargestellten Stromverhältnisse führen zu typischen Schadensbildern, die einen eindeutigen Rückschluss auf die Schadensursache erlauben (Bilder 5.2.4.4.1 und 5.2.4.4.2).

Bei entsprechenden Hinweisen an den Betreiber können die Schwachstellen im Netz beseitigt und eine Wiederholung von Wicklungsschäden vermieden werden.

Sternschaltung

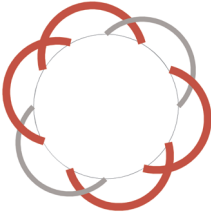
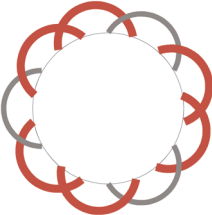
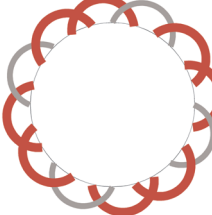
Polzahl	4	6	8
Schadensbild			

Bild 5.2.4.4.1 Gefährdete Spulen (rot) am Wickelkopf von 4-, 6-, 8poligen Drehstrom-Ständerwicklungen bei Zweileiterbetrieb in Sternschaltung

Dreieckschaltung

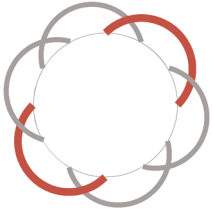
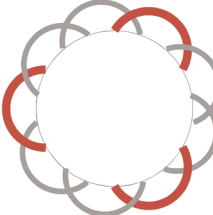
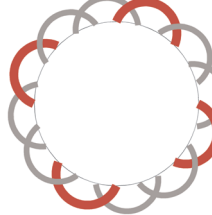
Polzahl	4	6	8
Schadensbild			

Bild 5.2.4.4.1 Gefährdete Spulen (rot) am Wickelkopf von 4-, 6-, 8poligen Drehstrom-Ständerwicklungen bei Zweileiterbetrieb in Dreieckschaltung

Sonderschaltungen

Die obigen Schadensbilder gelten für übliche Schaltung und Anordnung der Teilspulen eines Wicklungsstranges.

Sonderschaltungen (z. B. Polumschaltung nach Dahlander) und Sonderwicklungen (z. B. Zweischichtwicklungen) ergeben andere Schadensbilder, die sich aber für den Fachmann leicht auf die gezeigte Systematik zurückführen lassen.

5.2.4.5 Ansprechwerte von Bimetallauslösern

Für Überlastrelais sind Prüfströme und ihre Toleranzen in DIN EN 60947-4-1 / VDE 0660 Teil 102 festgelegt:

Tabelle 5.2.4.5 Prüfströme für Überlastrelais

Überlastrelais	Faktor A	Faktor B
3polig belastet	1,05	1,2
2polig belastet, nicht phasenausfallempfindlich	1,05	1,32
2polig belastet, phasenausfallempfindlich	1,0	1,15

Kenndaten für das Auslösen von 3poligen Überlastrelais, temperaturkompensiert, bei 20 °C (Auszug aus DIN EN 60947-1-1 / VDE 0660 Teil 102, Tabellen 3 und 4):

A : Prüfstrom als Vielfaches des Einstellstromes, bei dem das Relais, ausgehend vom kalten Zustand, innerhalb von 2 Stunden nicht auslösen darf,

B : Prüfstrom als Vielfaches des Einstellstromes, bei dem das Relais anschließend an Test A innerhalb von 2 Stunden auslösen muss.

5.2.4.6 Phasenausfallempfindlichkeit von Motorschutzrelais

Die geschilderte Gefährdung von Drehstrom-Ständerwicklungen (vor allem in Dreieckschaltung) und die relativ hohe Ausfallquote haben schon in den 20er und 30er Jahren zur Entwicklung von »Phasenwächtern« oder »Asymmetrie-Relais« geführt, die meist zusätzlich zum Überstromrelais installiert werden mussten. Erst seit Einführung der »Phasenausfallempfindlichkeit« in Form einer relativ einfachen und preisgünstigen Zusatzeinrichtung am Bimetallauslöser in den 60er Jahren wurde der **Phasenausfallschutz** etwas häufiger verwendet. Die ausführliche Diskussion bei der Einführung von erweiterten Bestimmungen für den Schutz von explosionsgeschützten Motoren der Zündschutzart »e« hat zu einer breiteren Anwendung dieser Schutzmöglichkeit beigetragen.

Stellvertretend für die verschiedenen am Markt angebotenen Lösungen wird nachstehend das Motorschutzrelais Z der Fa. MOELLER (Bild 5.2.4.6) beschrieben. Wenn sich die Bimetalle im Hauptstromteil des Relais infolge dreiphasiger Motorbelastung ausbiegen, wirken sie alle drei auf eine Auslöse- und eine Differentialbrücke. Ein gemeinsamer Auslösehebel schaltet bei Erreichen der Grenzwerte den Hilfsschalter um. Auslöse- und Differentialbrücke liegen eng und gleichmäßig an den Bimetallen an. Wenn nun z. B. bei Ausfall eines Leiters ein Bimetall nicht so stark ausbiegt wie die beiden anderen oder zurückläuft, dann legen Auslöse- und Differentialbrücke unterschiedliche Wege zurück. Dieser Differenzweg wird im Gerät durch eine Übersetzung in zusätzlichen Auslöseweg umgewandelt, und die Auslösung erfolgt schneller.

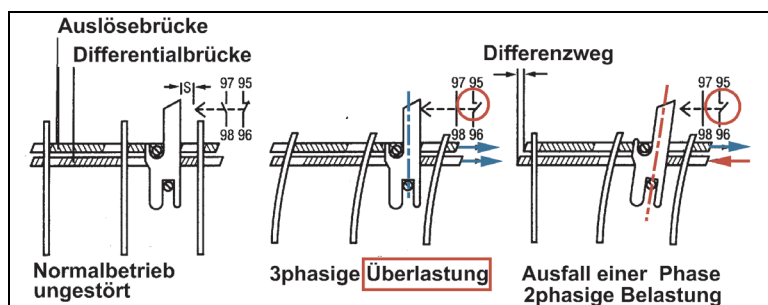


Bild 5.2.4.6
Prinzip der
Phasenausfallempfindlichkeit
eines Bimetallrelais

(Motorschutzrelais Z der Fa.
MOELLER)

5.2.4.7 Phasenausfallschutz bei explosionsgeschützten Motoren der Zündschutzart »e«

Bei der Neufassung der Errichtungsbestimmungen DIN VDE 0165 im Jahr 1976 gab es zu diesem Thema langwierige und teilweise sehr theoretische Diskussionen. Die jetzt gültige Norm legt fest:

"Bei Motoren sind Schutzeinrichtungen vorzusehen, die einen Motorschutz auch bei Ausfall eines Außenleiters sicherstellen. Stromabhängig verzögerte thermische Überstromrelais oder -auslöser sind z. B. geeignet, wenn sie mit Phasenausfallschutz nach DIN VDE 0660 Teil 104/09.82 versehen sind.

Schutzeinrichtungen für Motoren in Δ -Schaltung müssen bei zweipoliger Belastung ausgehend vom kalten Zustand bei Auslöseströmen $> 3 \times$ Einstellstrom bei dem 0,87fachen Anzugsstrom des Motors innerhalb der Erwärmungszeit t_E auslösen. Hierzu sind Kennlinien für die Schutzeinrichtungen für zweipolige Belastung analog Abschnitt 6.1.4.3.2 zu beachten".

(Die Abschnitts-Nummer 6.1.4.3.2 bezieht sich auf DIN VDE 0165/02.91).

Diese Formulierung lässt verschiedene Lösungsmöglichkeiten offen, soweit sie von einer anerkannten Prüfstelle als ausreichend angesehen werden. Beispielhaft wurde nur eine – relativ einfache und daher wahrscheinlich die gebräuchlichste – Lösungsmöglichkeit genannt.

Bezüglich der **Phasenausfallempfindlichkeit** besteht zwischen der "alten" und der "neuen" Vorschrift bei streng wörtlicher Auslegung eine Diskrepanz:

Die alte Vorschrift verlangt nur, dass der Schutz des Motors sichergestellt ist. Die neue Vorschrift könnte so interpretiert werden, dass der Betrieb unterbunden werden muss – z.B. durch Überwachung der **Phasensymmetrie**.

Nach Auffassung der PTB genügt tatsächlich ein Bimetallrelais mit Phasenausfallempfindlichkeit. Einzelheiten in der Danfoss-Publikation EP 304.

5.2.4.8 Zusammenfassung zur Phasenausfallempfindlichkeit

Die Gefahr eines Wicklungsschadens als Folge eines Zweileiterbetriebes nach einer Netzstörung kann durch die Verwendung von Bimetallrelais mit Phasenausfallempfindlichkeit wesentlich vermindert werden. Vor allem für **mittlere und größere Motoren in Dreieckschaltung** empfiehlt sich diese zusätzliche Schutzeinrichtung, mit der die ohnedies schon geringe Quote von Wicklungsschäden bei Drehstrom-Normmotoren weiter reduziert werden kann.

Bei Motoren der Zündschutzart »e« ist eine solche Einrichtung vorgeschrieben.

5.3 Betriebsarten

Abgesehen von speziellen Antrieben (z. B. Hebezeuge) sind listenmäßige Motoren stets für Dauerbetrieb bemessen. Wird der Antrieb mit hoher Schalthäufigkeit betrieben, so kann dies die Wahl eines vergrößerten Motormodells in Sonderauslegung erforderlich machen, während umgekehrt bei ausgesprochenem Kurzzeitbetrieb oft ein wesentlich kleineres Modell gewählt werden kann. **Es ist deshalb technisch erforderlich oder wirtschaftlich vorteilhaft, jede vom Dauerbetrieb abweichende Betriebsart dem Motorhersteller anzugeben.**

Die zunehmende Automatisierung von Fertigungsabläufen brachte mit sich, dass elektrische Antriebe immer häufiger im Taktbetrieb oder zur Positionierung, also im Schalt- und Bremsbetrieb, eingesetzt werden. Für eine klare Beschreibung der thermischen Belastung des Antriebs mussten daher die bewährten Begriffe wie

»Dauerbetrieb«, »Aussetzbetrieb« oder »Kurzzeitbetrieb« durch zusätzliche Definitionen ergänzt werden. Für die Beschreibung der Betriebsarten in der international harmonisierten Fassung von DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1 werden 13 A4-Seiten benötigt. Leider dient der umfangreiche Text nicht immer der Klarheit. Er wird nachstehend auszugsweise wiedergegeben, soweit dies für einen raschen Überblick notwendig erscheint. Die schematischen Diagramme und die Kurzzeichen für die Größen wurden gegenüber der Norm abgeändert, um die Darstellung besser lesbar zu machen [2.4].

Für den Überlastungsschutz ergeben sich je nach Betriebsart unterschiedliche Gesichtspunkte und Empfehlungen.

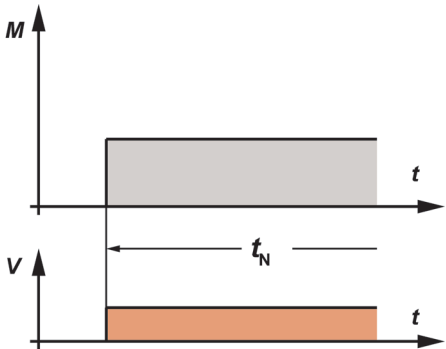
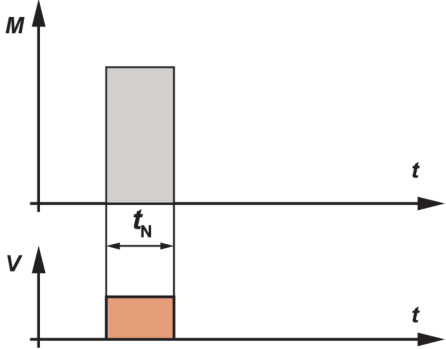
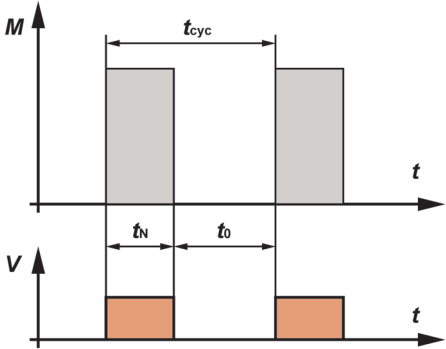
5.3.1 Einteilung

Tabelle 5.3.1 enthält die Einteilung der Betriebsarten von elektrischen Maschinen nach [1.6]. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

M	Belastung	t_N	Betriebszeit mit konstanter Belastung
V	elektrische Verluste (P_V)	t_{Br}	Zeit mit elektrischer Bremsung
t	Zeit	t_0	Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen
t_{cyc}	Spieldauer		
t_a	Anlaufzeit		

Relative Einschaltdauer = $(t_a + t_N + t_{Br}) / t_{cyc}$

Tabelle 5.3.1 Betriebsarten elektrischer Maschinen

Früher übliche Bezeichnung Vereinfachtes Schema	Kurzzeichen und Definition nach Norm
<p>DB — Dauerbetrieb</p> 	<p>S1</p> <p>Dauerbetrieb</p> <p>Betrieb mit einer konstanten Belastung, die so lange ansteht, dass die Maschine den thermischen Beharrungszustand erreichen kann.</p> <p>Die entsprechende Kennzeichnung ist S1 oder DB.</p>
<p>KB — Kurzzeitbetrieb</p> 	<p>S2</p> <p>Kurzzeitbetrieb</p> <p>Betrieb mit konstanter Belastung, dessen Dauer nicht ausreicht, den thermischen Beharrungszustand zu erreichen, und einer nachfolgenden Zeit im Stillstand mit stromlosen Wicklungen von solcher Dauer, daß die wieder abgesunkenen Maschinentemperaturen nur noch weniger als 2 K von der Temperatur des Kühlmittels abweichen.</p> <p>Die entsprechende Kennzeichnung ist S2, ergänzt durch eine Angabe der Betriebsdauer.</p> <p>Beispiel: S2 — 10 min</p>
<p>AB — Aussetzbetrieb</p> 	<p>S3</p> <p>Periodischer Aussetzbetrieb</p> <p>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.</p> <p>Die Kennzeichnung ist S3, ergänzt durch die relative Einschaltdauer.</p> <p>Beispiel: S3 — 25%</p>

<p>ASB — Aussetzschaltbetrieb</p>	<p>S4</p>
	<p>Periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs</p> <p>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.</p> <p>Die entsprechende 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.</p> <p>Beispiel: S4 — 25% $J_M = 0,15 \text{ kgm}^2$</p>
	<p>S5</p>
	<p>Periodischer Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung</p> <p>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.</p> <p>die entsprechende 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.</p> <p>Beispiel: S5 — 25% $J_M = 0,15 \text{ kgm}^2$ $J_{ext} = 0,7 \text{ kgm}^2$</p>
	<p>S6</p>
	<p>Ununterbrochener periodischer Betrieb</p> <p>Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Betriebszeit mit konstanter Belastung und eine Leerlaufzeit umfasst. Es tritt keine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen auf.</p> <p>Die entsprechende Kennzeichnung ist S6, ergänzt durch die relative Einschaltdauer.</p> <p>Beispiel: S6 — 40%</p>

<p>DSB — Durchlauf-Schaltbetrieb</p>	<p>S7</p>
	<p>Ununterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung</p> <p>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.</p> <p>Beispiel: S7 — $J_M = 0,4 \text{ kgm}^2$ $J_{ext} = 7,5 \text{ kgm}^2$</p> <p>Relative Einschaltdauer = 1</p>
	<p>S8</p>
	<p>Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahländerungen</p> <p>Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Spiele zusammensetzt; jedes dieser Spiele umfasst eine Betriebszeit mit konstanter Belastung und bestimmter Drehzahl und anschließend eine oder mehrere Betriebszeiten mit anderen konstanten Belastungen entsprechend den unterschiedlichen Drehzahlen. (Dies wird beispielsweise durch Polumschaltung von Induktionsmotoren erreicht). Es tritt keine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen auf. Die entsprechende Kennzeichnung ist S8, ergänzt durch das Massenträgheitsmoment des Motors (J_M) und das Massenträgheitsmoment der Belastungsmaschine (J_{ext}), beide auf die Motorwelle bezogen, sowie die Belastung, die Drehzahl und die relative Einschaltdauer für jede in Frage kommende Drehzahl.</p> <p>Beispiel: S8 — $J_M = 0,5 \text{ kgm}^2$ $J_{ext} = 6 \text{ kgm}^2$ 16 kW 740 r/min 30 % / 40 kW 1460 r/min 30 %</p>

	<p>S9</p> <p>Betrieb mit nichtperiodischen Last- und Drehzahländerungen</p> <p>Betrieb, bei dem sich i. allg. Belastung und Drehzahl innerhalb des zulässigen Betriebsbereiches nichtperiodisch ändern. Bei diesem Betrieb treten häufig Überlastungen auf, die weit über der Vollast liegen dürfen.</p> <p>Die entsprechende Kennzeichnung ist S9.</p> <p>Für diese Betriebsart wird eine konstante Belastung entsprechend Betriebsart S1 als Referenzwert (M_{ref}) für die Überlastung passend ausgewählt.</p>
	<p>S10</p> <p>Betrieb mit einzelnen konstanten Belastungen</p> <p>Betrieb, der nicht mehr als vier einzelne Belastungswerte (oder gleichwertige Belastungen) enthält, von denen jeder einzelne über eine ausreichende Zeit aufrechterhalten bleibt, die der Maschine erlaubt, den thermischen Beharrungszustand zu erreichen. Die kleinste Belastung innerhalb eines Betriebsspiels darf den Wert null besitzen (Leerlauf oder Stillstand mit stromlosen Wicklungen).</p>

Die entsprechende Kennzeichnung ist S10, ergänzt durch die bezogene Größe $p/\Delta t$ für die jeweilige Belastung und ihre Einwirkdauer, sowie die bezogene Größe TL für die relative thermische Lebenserwartung des Isoliersystems. Der Bezugswert für die thermische Lebenserwartung ist die thermische Lebenserwartung bei Bemessung für Dauerbetrieb und mit den zulässigen Grenzwerten der Übertemperatur entsprechend Betriebsart S1. Für eine Zeit im Stillstand mit stromlosen Wicklungen muss die Belastung durch den Buchstaben r gekennzeichnet sein.

Beispiel:

S10 $p/\Delta t = 1,1/0,4, 1/0,3, 0,9/0,2, r/0,1, TL = 0,6$

Der Zahlenwert von TL sollte auf 0,05 gerundet werden.

Für diese Betriebsart muss eine konstante Belastung entsprechend Betriebsart S1 als Referenzwert für die einzelnen Belastungen passend ausgewählt werden.

ANMERKUNG:

Die einzelnen Lastwerte stellen üblicherweise einen gleichwertigen Dauerbetrieb dar, welcher auf der Integration über eine bestimmte Zeitspanne basiert. Es ist nicht erforderlich, dass alle Lastspiele exakt gleich sind; allerdings muss jede Belastung innerhalb eines Spiels so lange aufrechterhalten werden, dass thermische Beharrung erreicht wird, und jedes Lastspiel muss integral auf die gleiche relative thermische Lebenserwartung führen.

5.3.2 Dauerbetrieb S1

Unter vereinfachten Annahmen und konstanten Bedingungen (Belastung, Belüftung, Umgebungstemperatur) gilt für die Übertemperatur einer elektrischen Maschine folgende Funktion:

$$\vartheta = \Theta_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Bei Auslegung für Dauerbetrieb S1 gilt $\Theta_{max} \leq \Theta_{lim}$.

- ϑ Übertemperatur in K
- Θ_{max} höchste Übertemperatur bei Ausgleich zwischen Wärmezufuhr und Kühlung
- Θ_{lim} Grenztemperatur für die Wärmeklasse
- t Belastungszeit
- τ Zeitkonstante (Kennwert für Größe und Kühlung einer Maschine)
- e Eulersche Zahl (etwa 2,72)

Die **Beharrungstemperatur** Θ_{max} der Maschine darf die für ihre Wärmeklasse in [1.6] festgelegte Grenz-Übertemperatur Θ_{lim} nicht übersteigen. Die **Zeitkonstante** τ ist lang, wenn eine Maschine groß und/oder relativ schlecht belüftet ist. Sie ist bei kleinen und/oder gut belüfteten Maschinen relativ kurz. Bild 5.3.2.1 zeigt schematisch den Einfluss der Zeitkonstante auf den Erwärmungsverlauf.

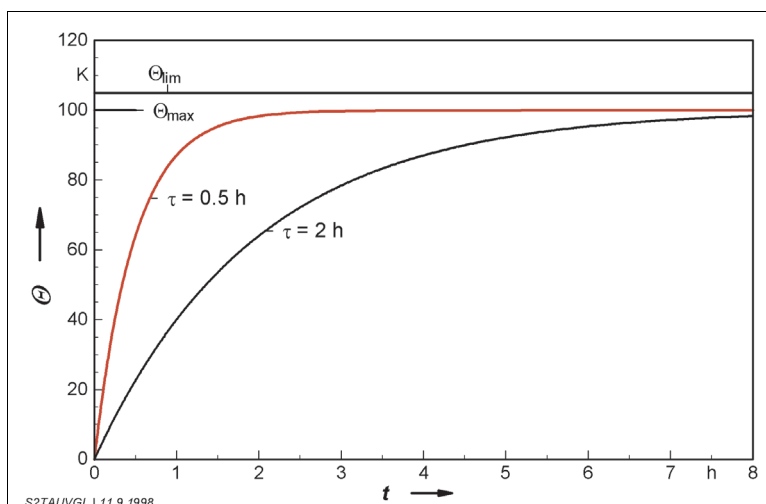


Bild 5.3.2.1
Schematischer Verlauf der Übertemperatur

$\tau = 0,5$ relativ kleine und/oder gut belüftete Maschinen

$\tau = 2$ relativ große und/oder schlecht belüftete Maschinen

Bei höherer Belastung (Verlustwärme) würde sich im Dauerbetrieb S1 eine höhere End-Übertemperatur Θ_{max} einstellen; der Erwärmungsanstieg muss daher durch eine Begrenzung der Zeit in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Bild 5.3.2.2 zeigt schematisch, dass die zulässige Betriebszeit um so kürzer ist, je mehr die Maschine überlastet wird: Diese stromabhängige Zeitfunktion übernimmt das Bimetallrelais, wobei es i. allg. infolge seiner im Vergleich zum Motor geringen Masse früher auslöst, als der Motor zulassen würde. Nimmt man im Beispiel Bild 5.27 vereinfachend an, dass bei 1,5facher Leistung etwa 1,5facher Strom fließt, so würde ein Motorschutzrelais aus kaltem Zustand heraus nach etwa 2 min auslösen, während der Motor unter gleichen Bedingungen erst nach mehr als einer Stunde gefährdet ist.

5 Überlastungsarten für den Motor

Für die Übertemperatur der Wicklung kann im Bereich von etwa $(0,75 \dots 1,25)P_N$ mit folgender praxisbewährten Formel (sog. linear-quadratische Umrechnung) gerechnet werden:

$$\vartheta_x = \frac{\frac{P_x}{P_N} \cdot \vartheta_N + \left(\frac{I_x}{I_N}\right)^2 \cdot \vartheta_N}{2}$$

ϑ Übertemperatur
 P Leistungsabgabe
 I Stromaufnahme
Index N im Bemessungspunkt
Index x im beliebigen Lastpunkt $(0,75 \dots 1,25)P_N$

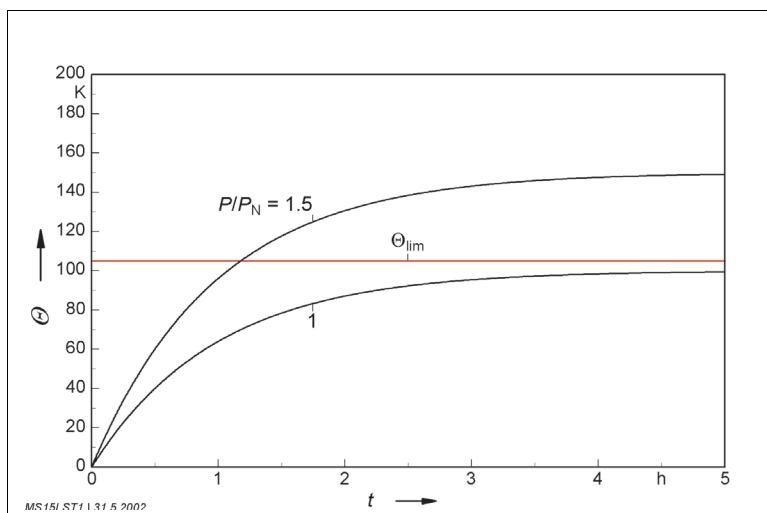


Bild 5.3.2.2
Änderung des
Temperaturanstiegs bei
Überlastung $P/P_N = 1,5$
im Vergleich zur
Bemessungsleistung $P/P_N = 1$
 θ_{lim} Grenz-Übertemperatur
für Wärmeklasse F

5.3.3 Kurzzeitbetrieb S2

Die im vorigen Abschnitt geschilderte – allerdings typabhängige – hohe Überlastungskapazität von Drehstrom-Käfigläufermotoren wird bei bestimmten Anwendungen gefahrlos und kostensparend ausgenutzt, indem der Motor auf dem Leistungsschild mit » $1,5P_N - 1h$ « deklariert wird. Das Motorschutzrelais wird auf den erhöhten Strom eingestellt – wird also nach einer Stunde *nicht auslösen!* Bei den Betriebsarten S2 und S3 stellt der Strom allein kein Maß für die Erwärmung dar; stromabhängig thermisch verzögerte Bimetallrelais sind daher lediglich als Schutz bei Blockierung mit festgebremstem Läufer geeignet. Es muss die **Betriebszeit** oder die **Wicklungstemperatur** überwacht werden. Bei S2 ist häufig die Laufzeit auf natürliche Weise begrenzt: Fabriktoie, Rolläden, Hebezeuge sind Beispiele für solche Anwendungen. In anderen Fällen muss die Laufzeit und die Dauer der anschließenden Pause überwacht werden. Der thermische Motorschutz (TMS) mit Thermistoren ist eine andere, sichere Methode.

Bei der Betriebsart S2 muss definitionsgemäß auf die Belastungszeit eine stromlose Pause im Stillstand folgen, in der sich die Maschine so weit abkühlen kann, dass ihre Temperatur weniger als 2 K von der Temperatur des Kühlmittels abweicht. Wegen der fehlenden Belüftung ist die **Abkühl-Zeitkonstante** wesentlich länger als im Betrieb (z. B. um den Faktor 4). Es entsteht daher eine relativ lange Abkühlzeit (Bild 5.3.3.1 und Tabelle 5.3.3.2).

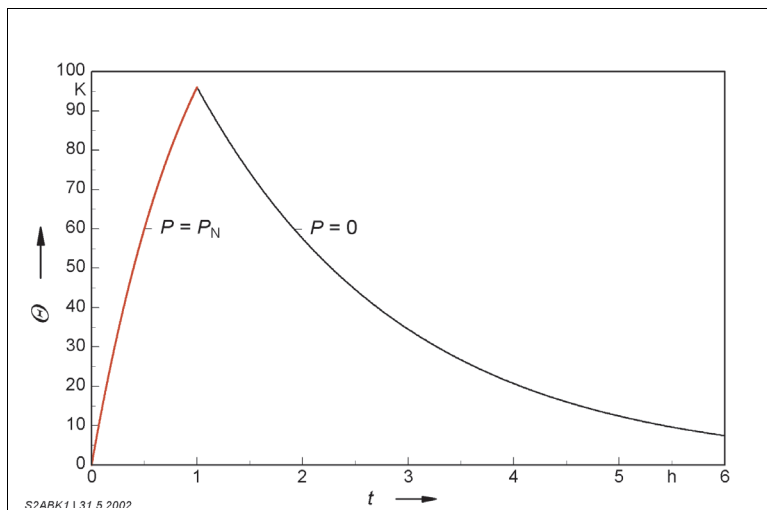


Bild 5.3.3.1
Schematischer Verlauf von Erwärmung ($P=P_N$) und Abkühlung ($P=0$) eines S2-Motors

Tabelle 5.3.3.2 Typische Abkühlzeiten nach Kurzzeitbetrieb S2

Motor-Achshöhe (mm)	56 ... 80	90 ... 112	132 ... 180	200 ... 280
Abkühlzeit (min)	80	160	240	360

5.3.4 Temperaturverlauf bei S3

In der Betriebsart S3 wird bei einem einzelnen Spiel weder die Endtemperatur bei Belastung noch die Umgebungstemperatur in der Abkühlpause erreicht. Der Temperaturverlauf nähert sich sägezahnartig einem eingeschwungenen Zustand, bei dem die Temperatur zwischen einem Maximalwert ϑ_{S3max} und einem Minimalwert ϑ_{S3min} pendelt. Nach [1.6], Abschnitt 15.5.3.7.2, gilt das Temperaturspiel als gleichwertig (eingeschwungen), wenn eine gedachte Verbindungslinie zwischen den entsprechenden Eckwerten eine Neigung von weniger als 2 K/h aufweist (Bild 5.3.4.1).

Die Temperatur in der Mitte des Zeitabschnitts darf die Grenztemperatur der jeweiligen Wärmeklasse nicht überschreiten (Bild 5.3.4.2).

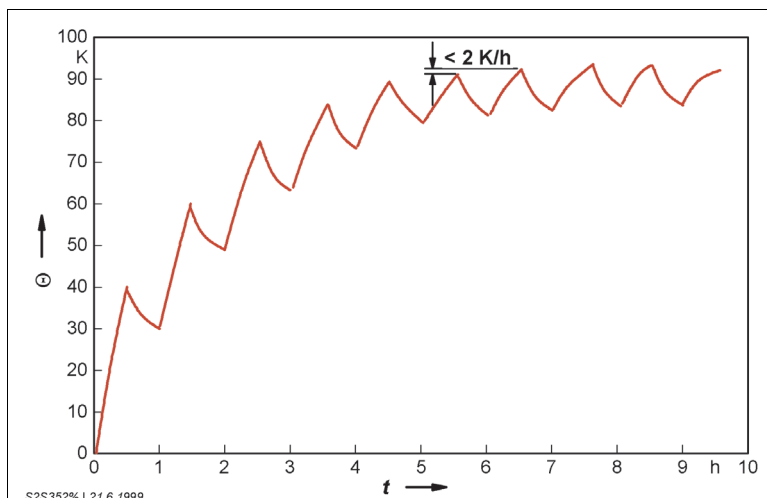


Bild 5.3.4.1
Schematischer Verlauf der Temperatur ϑ bei der Betriebsart S3 - 50 %

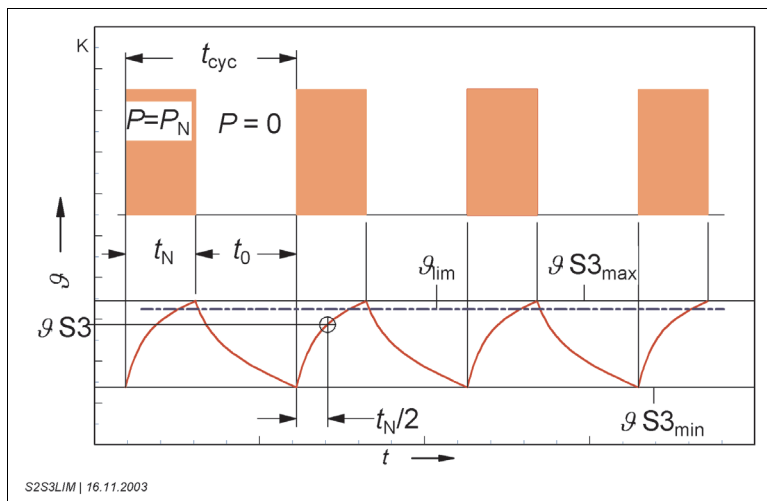


Bild 5.3.4.2
Bemessungs-
Übertemperatur ϑ_{S3} bei der
Betriebsart S3 - 40 %

Bestimmung nach der halben Zeit
eines Belastungsintervalls t_N
bei eingeschwungenem
Temperaturverlauf zwischen den
Grenzen ϑ_{S3min} und ϑ_{S3max}
Die Bemessungs-Übertemperatur
muss unterhalb der Grenz-
Übertemperatur ϑ_{lim} liegen.

Für den Überlastungsschutz gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei der Betriebsart S2. Allerdings wird bei S3 die Zeitüberwachung zu kompliziert; hier bietet sich der Schutz durch TMS an.

5.3.5 Aussetz-Schaltbetrieb S4

Bei dieser Betriebsart ist die Gesamterwärmung von Wicklung und Käfigläufer entscheidend durch Schwere und Anzahl der Anläufe bestimmt. Für die Vorausberechnung der zulässigen Schalthäufigkeit sind firmenspezifische, grundsätzlich ähnliche Verfahren unter Benutzung der experimentell ermittelten Kennzahl Z_0 für die **zulässige Leerschalthäufigkeit** üblich [2.4], [2.8].

Stromabhängig verzögerte thermische Überstromauslöser eignen sich nicht als Überlastungsschutz, da sie kein thermisches Abbild der Wicklung darstellen. Sie würden unter dem Einfluss hoher Schalthäufigkeit viel zu früh auslösen. Die Relaishersteller nennen in Katalogen 25 ... 60 c/h als maximal zulässige Schalthäufigkeit. Dieser Richtwert kann im Einzelfall deutlich überschritten werden, wie die nachfolgende, an [2.10] angelehnte Betrachtung in den Bildern 5.3.5.1 und 5.3.5.2 zeigt.

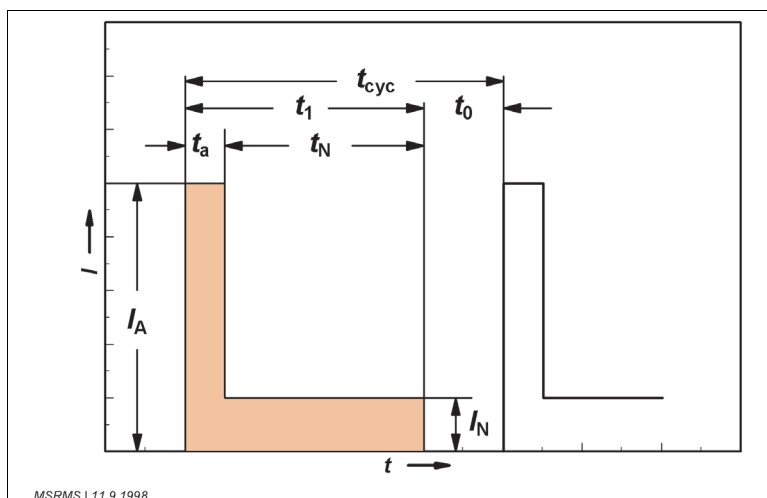


Bild 5.3.5.1
Kenngrößen beim Aussetz-
Schaltbetrieb

t_{cyc} - Spielzeit
 t_1 - gesamte Laufzeit
 t_N - Laufzeit mit
Bemessungsstrom I_N
 t_a - Anlaufzeit mit
Anzugsstrom I_A
 t_0 - Pause ohne Strom

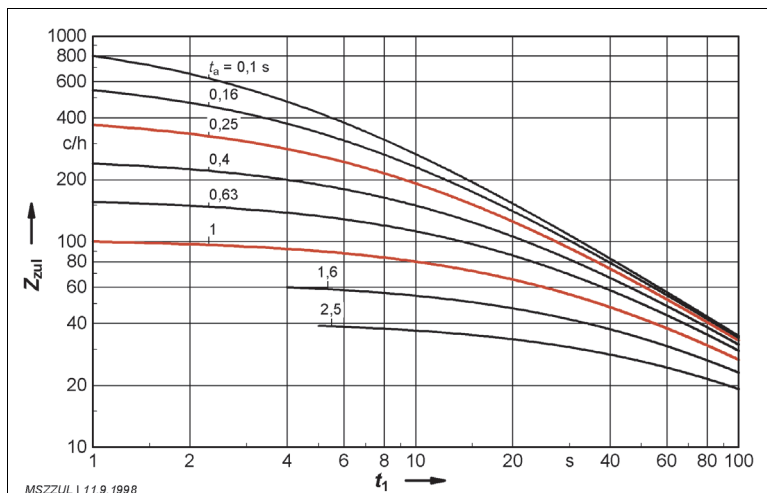


Bild 5.3.5.2
Thermisch zulässige
Schalthäufigkeit Z_{zul} von
Bimetallrelais
Erläuterungen siehe Bild
5.3.5.1

Mit diesen Richtwerten soll lediglich eine Abschätzung der zulässigen Schalthäufigkeit des Relais ermöglicht werden. Empfohlen wird bei der Betriebsart S4 die Verwendung des thermischen Maschinenschutzes (TMS) nach Abschnitt 6.2 in **Kombination mit einem Bimetallrelais**, das so hoch eingestellt ist, dass es beim maximalen Schaltbetrieb noch nicht auslöst.

5.3.6 Drehrichtungs-Umschaltung

Beim **Reversieren** eines Motors werden die für Rechtslauf geschalteten Netzleiter ohne Schaltpause auf Linkslauf umgeschaltet. Das nun linkslaufende Drehfeld bremst zunächst die noch rechtslaufenden Massenträgheitsmomente bis zum Stillstand ab und beschleunigt sie dann im Linkslauf (Bild 5.3.6.1).

Bei diesem stoßartig verlaufenden Vorgang entsteht im Motor etwa die 4fache Verlustarbeit gegenüber einer Abschaltung aus Rechtslauf mit anschließendem freien Auslauf bis zum Stillstand und Einschalten in Linkslauf.

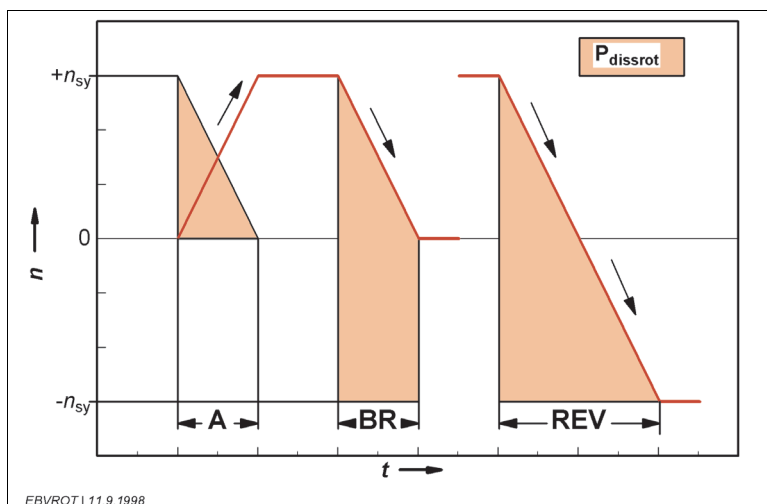


Bild 5.3.6.1
Schematische Darstellung
der Begriffe Anlauf (A),
Gegendrehfeldbremsung
(BR) und Reversierung
(REV) und der
Rotor-Verlustleistung $P_{dissrot}$

Um den Einfluss der Stromverdrängung zu berücksichtigen, sind die in Tabelle 5.3.6.2 angegebenen tatsächlichen Faktoren für die thermische Bewertung einer Reversierung üblich.

Tabelle 5.3.6.2 Faktor für die thermische Bewertung von Reversierungen

Motor-Bemessungsleistung	P_N (kW)	$\leq 1,5$	$\leq 7,5$	≤ 22	≤ 50
Thermische Bewertung Reversierung : Anlauf	K_R	3	2,8	2,6	2,4

5.3.7 Drehzahl-Umschaltung

Bei **polumschaltbaren Motoren** mit zwei oder mehr Drehzahlen sollte möglichst 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

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

Die Verluste lassen sich nach Bild 5.3.7.1 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.

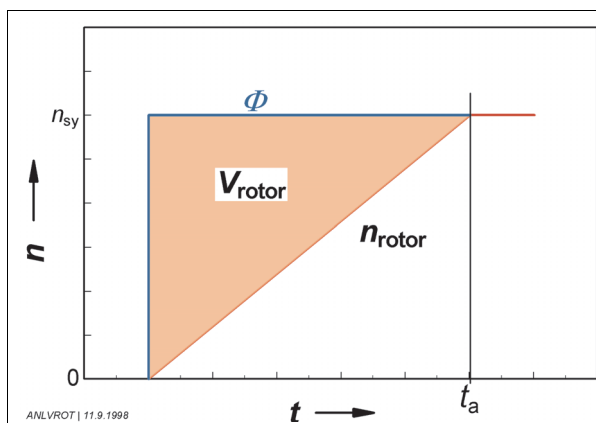


Bild 5.3.7.1 Verlustarbeit im Rotor V_{rotor} bei Direktanlauf mit voller Drehfelddrehzahl n_{sy}

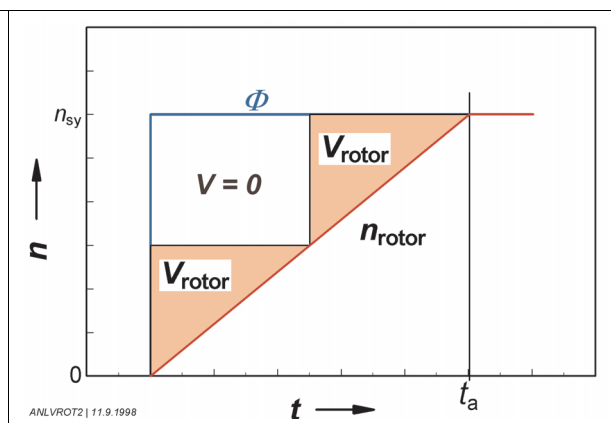


Bild 5.3.7.2 Verlustarbeit im Rotor V_{rotor} bei unterteiltem Hochlauf durch Polumschaltung 1:2 (z. B. 4/2-polig) mit verlustfreier Fläche $V=0$

Bei unterteiltem Hochlauf (z. B. durch Polumschaltung im Drehzahlverhältnis 1 : 2 nach Bild 5.3.7.2) kann die Verlustarbeit im Vergleich zur Direkteinschaltung auf die Hälfte vermindert werden ($V_{rotor} = 0,5$). Bei anderen Polzahlverhältnissen ist die Einsparung teilweise erheblich niedriger:

5 Überlastungsarten für den Motor

Tabelle 5.3.7.3

Verlustrarbeit (rote Flächen) und Verlusteinsparung (helle Rechtecke) bei stufenweiser Einschaltung durch Polumschaltung im Drehzahlverhältnis K

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

5.3.8 Elektrodynamische Auslaufbremsung

Der Begriff signalisiert drei wichtige Eigenschaften dieser Bremsverfahren:

- 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.

5.3.8.1 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 (Bild 5.3.8.1). Was beim Rückschalten von einer hohen auf eine niedrige Drehzahl wegen des Umschaltstoßes störend sein kann (vgl. Abschnitt 5.3.8.4), 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.

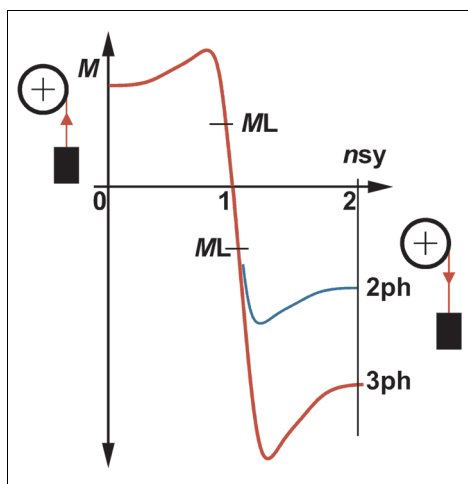


Bild 5.3.8.1

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

5.3.8.2 Gegendrehfeldbremsung

Bei der **Gegendrehfeldbremsung (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 Gegendrehrichtung vermieden (Bild 5.3.8.2.1).

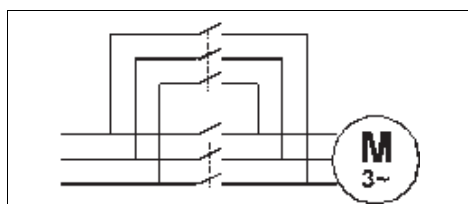


Bild 5.3.8.2.1

Grundsätzliches Schaltbild einer Gegendrehfeldbremsung

5 Überlastungsarten für den Motor

So einfach sich die Gegendrehfeldbremsung in der Wirkung und in der Schaltung auch darstellt – in der Praxis gibt es zwei schwerwiegende Einschränkungen:

- 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 Drehzahlulldurchgang ist um so schwieriger, je kürzer der Bremsvorgang ist (Bild 5.3.8.2.2). Zeitglieder können den Einfluss unterschiedlicher Last und Massenträgheitsmomente nicht erfassen. Drehzahlwächter stellen einen erhöhten Aufwand dar.

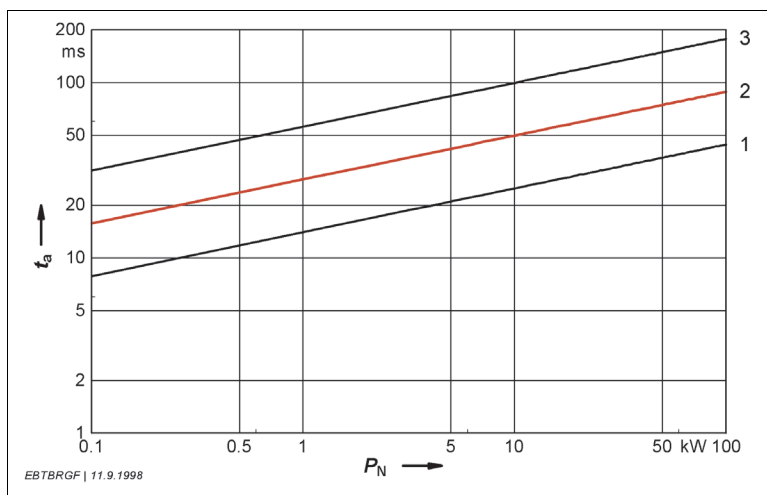


Bild 5.3.8.2.2
Richtwerte für die Gegendrehfeld-
Bremszeiten bei 4poligen
Drehstrom-Käfigläufermotoren mit
Einfluss des Trägheitsfaktors F_I
(relative Fremdmassen) und M_L
(Lastmoment)

- 1 $F_I=1$, $M_L=1$ (Lastmoment =
Reibung unterstützt die Bremsung)
- 2 $F_I=1$, $M_L=0$
- 3 $F_I=2$, $M_L=0$

Es gibt jedoch auch Anwendungsgebiete, wo das Prinzip der Gegendrehfeldbremsung sehr beliebt ist. Es wird z. B. im Rollgangsbetrieb häufig angewandt, da es **keinen zusätzlichen Geräteaufwand** erfordert. Da der Reibungsschluss zwischen Rolle und Transportgut die maximale 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 Ulldurchgang 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.

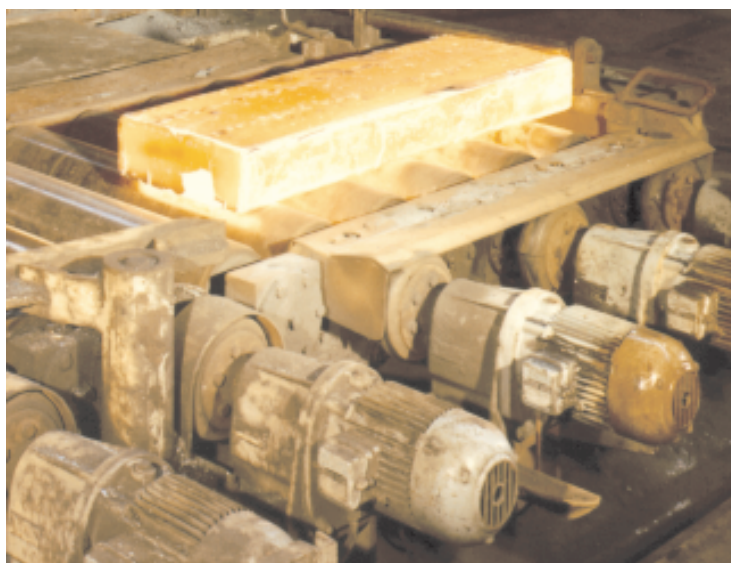


Bild 5.3.8.2.3
Anwendungsbeispiel für die
Gegendrehfeldbremsung im
Rollgangsbetrieb

Um den Einfluss der Stromverdrängung zu berücksichtigen, sind die in Tabelle 5.3.8.2.4 angegebenen tatsächlichen Faktoren für die thermische Bewertung einer Gegendrehfeldbremung üblich.

Tabelle 5.3.8.2.4 Faktor für die thermische Bewertung von Gegenfeldbremungen

Motor-Bemessungsleistung	P_N (kW)	$\leq 1,5$	$\leq 7,5$	≤ 22	≤ 50
Thermische Bewertung Gegendrehfeldbremung : Anlauf	K_G	2	1,8	1,6	1,4

5.3.8.3 Gleichstrom-Auslaufbremung

Bei Speisung einer Drehstrom-Wicklung 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 5.3.8.3.1).

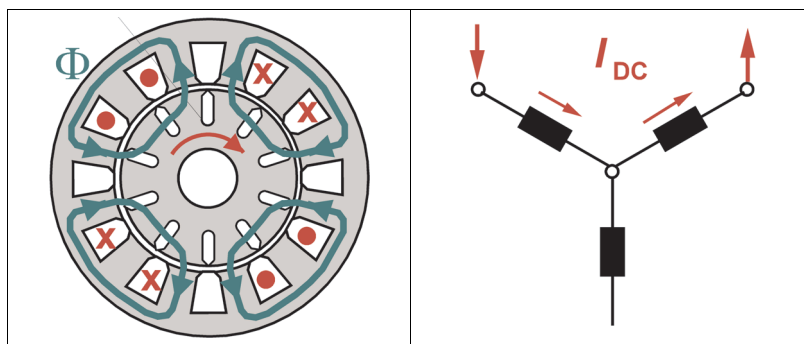


Bild 5.3.8.3.1
Feldausbildung bei
Speisung einer 4poligen
Drehstrom-
Ständerwicklung in
Sternschaltung

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. 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 null (Bild 5.3.8.3.2).

Die Gleichstrom-Auslaufbremung **eignet sich nicht zum Festhalten einer Last**. Andererseits ist jedoch die **sanft einsetzende und immer kräftiger zupackende** Charakteristik der Bremsung für fast alle Verzögerungsvorgänge geradezu ideal. Eine ausführliche Darstellung dieser Bremsmethode findet sich in [2.8].

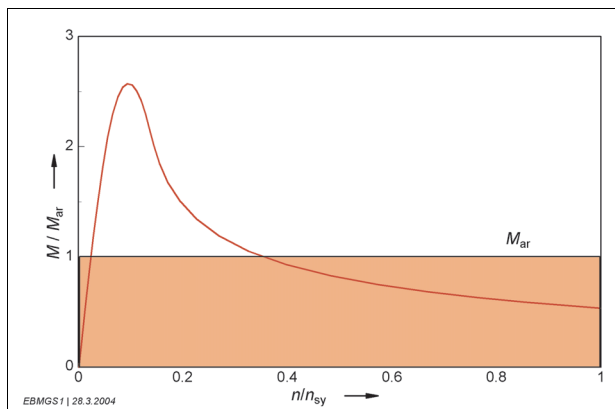


Bild 5.3.8.3.2
Wirksamkeit der Gleichstrom-
Auslaufbremung während des
Drehzahlabfalls $n \rightarrow 0$
 M Augenblickswert
 M_{ar} Mittelwert
des Bremsmoments

5.3.8.4 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 **Dahlanderschaltung** verwendet, bei allen übrigen Drehzahlverhältnissen handelt es sich meist um Motoren mit **zwei getrennten Ständerwicklungen**, die zwar eine aufwendige Fertigung und entsprechende Kosten bedingen, die aber gegenüber Lösungen mit stetig verstellbarer Drehzahl (z. B. GS-Motoren oder umrichter-gepeiste Motoren) immer noch deutliche Preisvorteile bieten.

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 von dem Polzahl- bzw. Drehzahlverhältnis und von dem Motortyp abhängig ist.

Bild 5.3.8.4 zeigt den Verlauf der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie 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 üblichen Betriebsgeräuschen liegen.

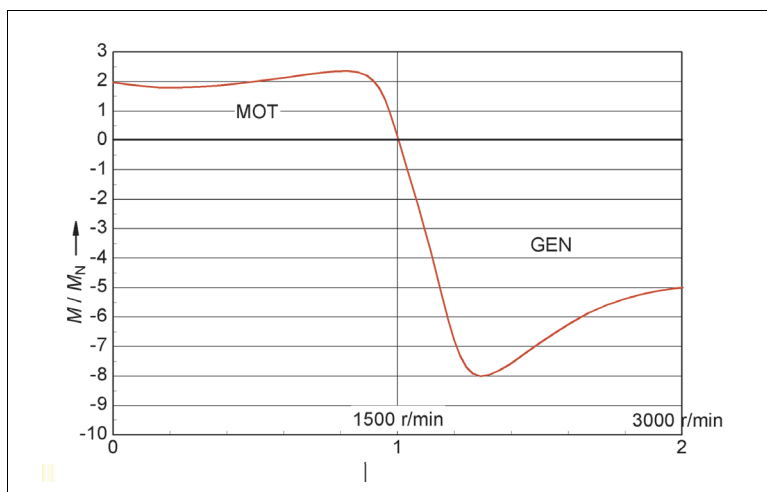


Bild 5.3.8.4
Verlauf des Drehmoments beim Rückschalten von der niedrigen in die höhere Polzahl bei Drehzahlverhältnis 2 : 1.

Das Verhältnis motorisches Kippmoment zu generatorischem Kippmoment entspricht hier etwa 1 : 4.

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

Bei der Schaltung für die 2strängige Rückbremsung, mit oder ohne Vorwiderstand, muss steuerungstechnisch sichergestellt sein, dass der Zweileiterbetrieb nur für den Zeitraum der generatorischen Bremsung wirksam ist. Nach Ablauf der generatorischen Bremsung muss der Motorbetrieb an den drei Leitern L1, L2 und L3 fortgeführt werden, weil sonst ein Teil der Wicklung thermisch überlastet ist (s. Abschnitt 5.2.4).

Durch die Reduzierung der Bremsmomente wird die mechanische Beanspruchung des Getriebes und der nachgeschalteten Übertragungselemente verringert. Einzelheiten zu Schaltung und Drehmomentverlauf in [2.8].

Weitere Möglichkeiten für eine Reduzierung der Bremswirkung:

- Bei Drehstrommotoren mit getrennter Wicklung kann die Wicklung, die nur zum generatorischen Bremsen benutzt 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 steuerungsseitige 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 Schützensteuerung wird durch einen **elektronischen Sanftumschalter** ersetzt.

5.3.9 Mechanische Bremsung

Die **Bremsarbeit** fällt an den Reibflächen der Bremse an; sie muss durch die Wahl einer nach Größe und Bauart entsprechenden Bremse mit ausreichender thermischer Kapazität und Abriebreserve berücksichtigt werden [2.22].

Die Bremse kann aber durch **verzögerte Lüftung** auch den Motor und sich selbst zusätzlich belasten:

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 bekanntlich nach einer Exponentialfunktion auf- und abgebaut wird und die deshalb im Vergleich zu Bremsen mit Wechselstrom-Magneten besonders lange Ansprechzeiten haben.

Bild 5.3.9.1 zeigt den theoretischen und Bild 5.3.9.2 den tatsächlichen Verlauf des Stromes beim Einschalten der Magnetspule.

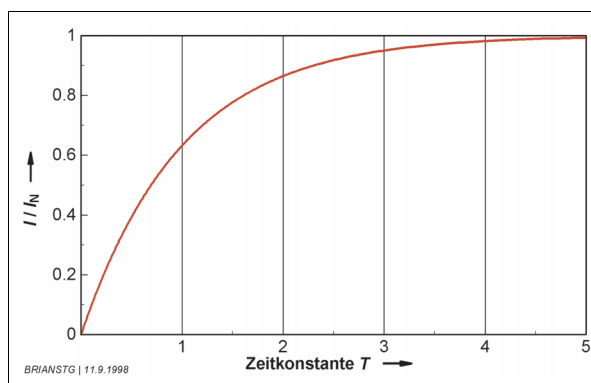


Bild 5.3.9.1
Theoretischer Stromverlauf beim Einschalten eines GS-Magneten

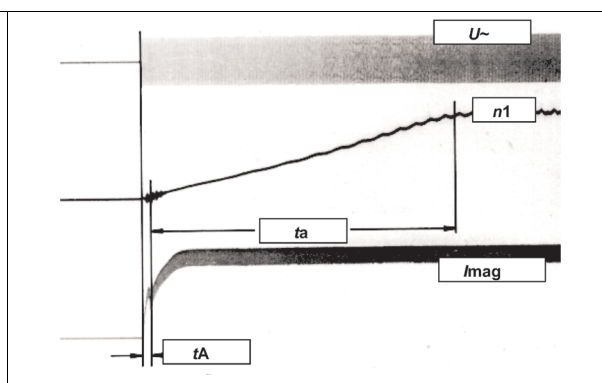


Bild 5.3.9.2
Tatsächlicher Stromverlauf beim Einschalten eines GS-Magneten
 U Spannung n_1 Drehzahl
 I_{mag} Magnetstrom t_a Hochlaufzeit
 t_A Ansprechzeit der Bremse

Die **Zeitkonstante** $T = L / R$ tritt mit zunehmender Bremsengröße immer stärker in Erscheinung.

Bei der **Schnellerregung** wird die Zeitkonstante T vermindert, indem der ohmsche Widerstand R durch einen Vorwiderstand erhöht wird.

Diese Methode ist weitgehend abgelöst durch die **Übererregung**: 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.

Moderne Übererregungs-Gleichrichter enthalten die Spannungserhöhung und ein elektronisches Zeitglied. 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. Ist das Anzugsmoment des Motors höher als das Bremsmoment der Bremse, so wird die Bremse während der Ansprechzeit durchgedreht und hat zusätzlichen Verschleiß. Ist das Bremsmoment höher, so bleibt der Motor blockiert und erwärmt sich zusätzlich.

Bild 5.3.9.3 zeigt, dass die Zeiten im Vergleich zur normalen Anlaufzeit t_a relativ hoch liegen und daher in die Verlustbilanz entscheidend eingehen können.

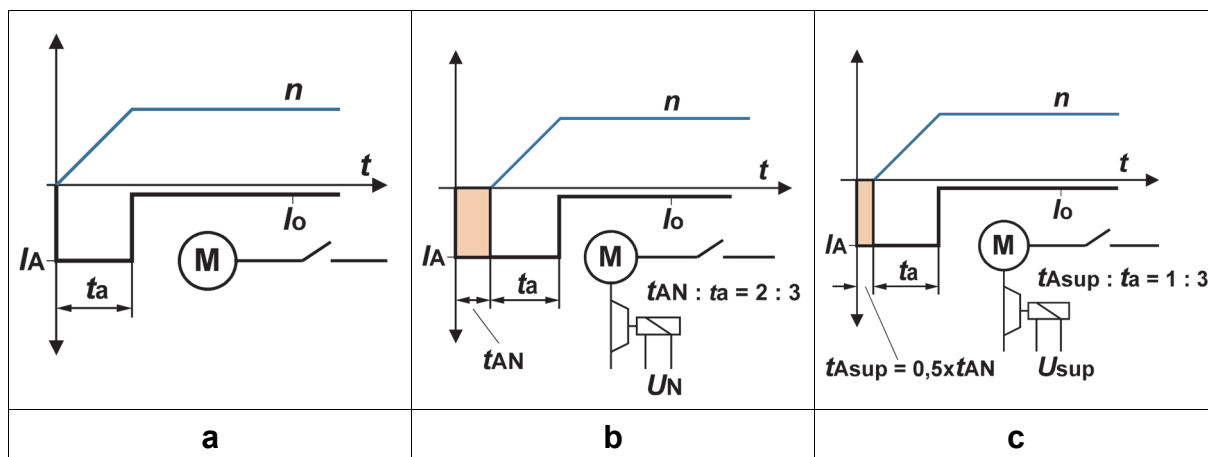


Bild 5.3.9.3 Vergleich der Blockierzeiten

- ohne Bremse, Hochlaufzeit t_a
 - Bremse mit Übererregung U_{sup} ; Blockierzeit t_{Asup}
 - Bremse mit Normalerregung U_N ; Blockierzeit t_{AN}
- Blockierzeit und Verluste bei Übererregung nur ca. 50% gegenüber Normalerregung

5.3.10 Frequenzgeführte Drehzahländerungen

Bei einer geführten Frequenzänderung (»Rampe«) kann nicht nur die Anlauf- oder Bremszeit fast beliebig lang oder weich gesteuert werden – es lassen sich auch die Verluste und damit die thermische Belastung der Motorwicklung drastisch vermindern.

5.3.10.1 Anlauf

Bei einem Anlauf am Netz springt die Drehfeldfrequenz n_{fld} praktisch unverzögert auf die Synchronfrequenz n_{sy} , während der Rotor erst nach einer von Last und Massenträgheitsmomenten abhängigen Anlaufzeit seine Asynchronfrequenz erreicht.

Die anfänglich hohe Schlupfdrehzahl Δn zwischen n_{fld} und n_{rot} verursacht die relativ hohe Rotor-Verlustrarbeit W_{rot} (Bild 5.3.10.1.1).

Bei einem frequenzgeführten Anlauf eilt die Drehfeldfrequenz der Rotordrehzahl nur um die Schlupfdrehzahl vor, mit der ein ausreichendes Beschleunigungsmoment erzeugt werden kann.

Die schattiert dargestellte Fläche entspricht der Verlustrarbeit im Rotor – sie ist beim Frequenzanlauf wesentlich geringer als bei der Direkteinschaltung am Netz (Bild 5.3.10.1.2).

Diese Überlegungen gelten sinngemäß auch für die generatorische Bremsung.

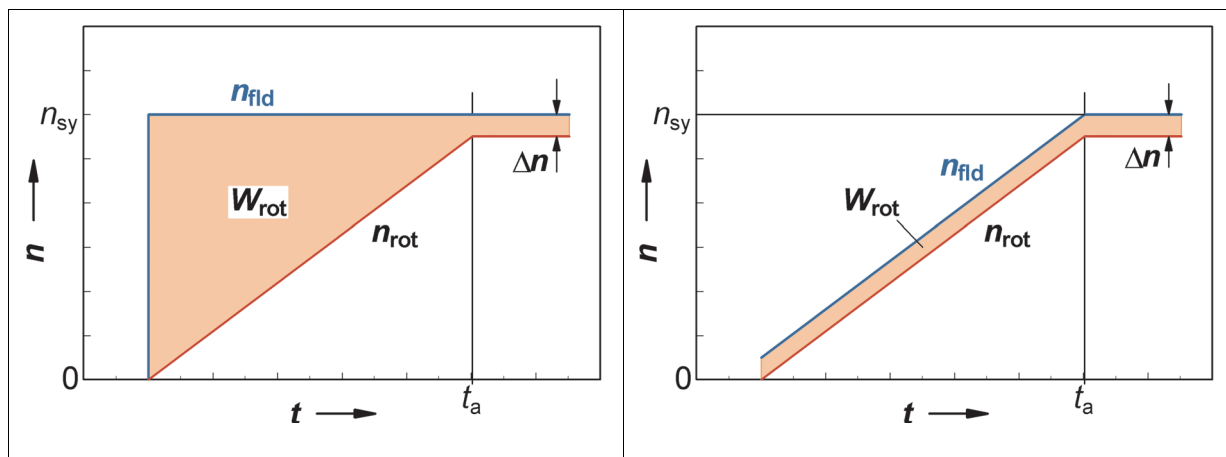


Bild 5.3.10.1.1
Schematische Darstellung der Verlustrarbeit im Rotor W_{rot} bei Direktanlauf am Netz

Bild 5.3.10.1.2
Schematische Darstellung der Verlustrarbeit im Rotor W_{rot} bei frequenzgeführtem Anlauf

5.3.10.2 Bremsung

Die im Abschnitt 5.3.8.1 beschriebene **übersynchrone generatorische Bremsung** kann auch zur Verzögerung auf Drehzahlen $n \Rightarrow 0$ benutzt werden, wenn die Frequenz $f \Rightarrow 0$ geführt wird. Frequenzumrichter machen dies möglich.

Die generatorisch erzeugte Wirkleistung fließt in den Umrichter. Wegen der Sperrichtung der Ventile im Eingangsgleichrichter des Frequenzumrichters ist eine Weiterleitung ins Versorgungsnetz nicht möglich. Um eine unzulässige Aufladung des Zwischenkreiskondensators auf gefährlich hohe Spannung zu verhindern, muss diese Energie durch den **Brems-Chopper** abgeleitet und im zugehörigen Widerstand in Wärme umgesetzt werden.

Bei der Auswahl des Brems-Choppers ist zu beachten:

- maximale Bremsleistung,
- mittlere Bremsleistung,
- äquivalente Dauerleistung unter Berücksichtigung des Betriebsspiels.

Es empfiehlt sich Rückfrage bei den Lieferanten von Motor und Umrichter.

In Bild 5.3.10.2 ist der Bremsvorgang qualitativ dargestellt: In der Zeit t_L vom Zeitpunkt 0 bis 1 läuft der Motor mit der asynchronen Rotordrehzahl n_{rot} die um die Schlupfdrehzahl Δn kleiner ist als die Drehfeldfrequenz n_{fld} . Beim Zeitpunkt 1 beginnt die Verzögerung, indem die Frequenz und damit die Drehfeldfrequenz durch die Steuereinheit des Umrichters an einer voreingestellten Rampe gegen 0 geführt wird. Die Drehzahl von Rotor und angetriebenen Massen bleibt zunächst – je nach

5 Überlastungsarten für den Motor

Bremswirkung des Lastmomentes – fast auf voller Höhe, wird also höher als die Drehfeldfrequenz. Abhängig von der übersynchronen Drehzahl Δn entwickelt der Motor ein generatorisches Bremsmoment, das die Rotordrehzahl innerhalb der Bremszeit t_a verzögert.

Beim Zeitpunkt 2 erreichen Frequenz und Drehfeldfrequenz den Wert 0 – die Bremswirkung entspricht einer GS-Bremsung. Der Rotor läuft bis zum Zeitpunkt 4 ungeführt, wenn er nicht durch eine mechanische Bremse (Haltebremse) schon zum Zeitpunkt 3 stillgesetzt wird.

Bei dieser Darstellung wurde davon ausgegangen, dass die Rampe nach der vorausgerechneten Verzögerungszeit t_a eingestellt wurde und dass die Rechenwerte mit den tatsächlichen Werten übereinstimmen.

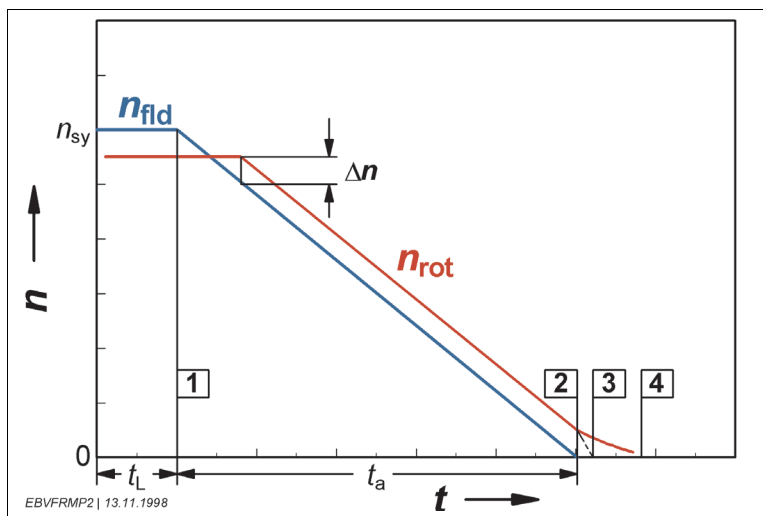


Bild 5.3.10.2
Schematische Darstellung
einer frequenzgeführten
generatorischen Bremsung
Drehzahl n über der Zeit t

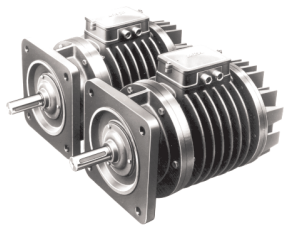
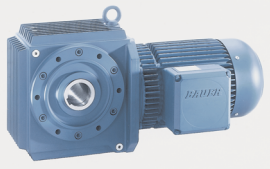
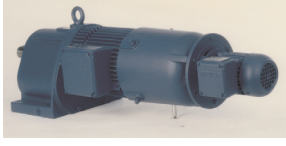
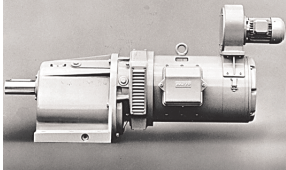
n_{fld}	Drehfeldfrequenz	1	Beginn der Rampe
n_{rot}	Rotordrehzahl	2	Ende der Rampe
Δn	Schlupfdrehzahl	3	mechanische Haltebremse
t_L	Laufzeit	4	freier Auslauf
t_a	Bremszeit		

5.4 Kühlung

Drehstrom-Käfigläufermotoren im genormten Leistungsbereich werden mit Luft gekühlt. Die Kurzzeichen für die Kühlarten (*IC-Code*) sind in DIN EN 60034-6 / VDE 0530 Teil 6 [1.22] festgelegt.

Beispiele für übliche Kühlarten zeigt Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4 Kühlarten (Bilder: Danfoss Bauer GmbH)

IC-Code	Ausführung	Charakteristik	Bauart
IC410		unbelüftet vollkommen geschlossen	Drehstrom- Rollgangsmotor
IC411		eigenbelüftet vollkommen geschlossen	Drehstrom- Käfigläufermotor mit angebautem Kegelradgetriebe
IC416		fremdbelüftet vollkommen geschlossen	Drehstrom- Käfigläufermotor mit angebautem Stirradgetriebe
IC06		fremdbelüftet offen, durchzugbelüftet	Gleichstrom- Nebenschlussmoto r mit angebautem Stirradgetriebe

5.4.1 Kühlmitteltemperatur

Im Bereich der Normmotoren ist die Kühlmittel-Temperatur mit der **Umgebungstemperatur** gleichzusetzen. Die genormten Grenzen und die Auswirkungen einer erhöhten Umgebungstemperatur sind in Abschnitt 4.2 abgehandelt.

Ein stromabhängiger Überlastungsschutz ist für diese Überlastungsart nicht geeignet – es muss die Wicklungstemperatur direkt erfasst werden (s. Abschn. 6.2).

5.4.2 Behinderung der Kühlluftzufuhr

Die meisten elektrischen Maschinen werden mit Luft gekühlt, die von einem Außenlüfter (Oberflächenlüftung, Bild 5.4.2.1) oder Innenlüfter (Durchzugbelüftung, Bild 5.4.2.2) aus der Umgebung angesaugt wird. Ist die Luft sehr staubhaltig, so können die Belüftungswege verschmutzen (Bild 5.4.2.3). Dies führt einerseits zu einer Verminderung der Kühlwirkung (also erhöhter Wicklungstemperatur mit den entsprechenden Folgen), andererseits zu einer Verschlechterung des Isolationszustandes. Je nach Staubanfall sollten daher die Belüftungswege und eventuell vorgeschaltete Staubfilter in regelmäßigen Abständen gereinigt werden.

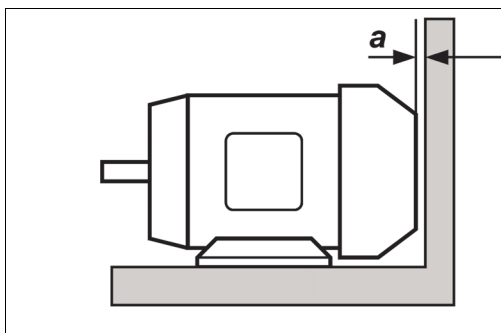


Bild 5.4.2.1
Auf Abstand a am Lufteintritt achten!
Im Normbereich: $a > (2 \dots 10)$ cm

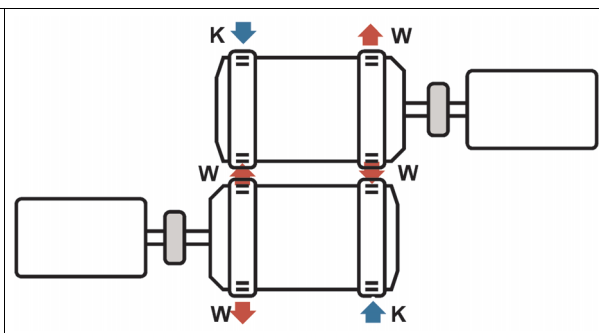


Bild 5.4.2.2
Auf Zufuhr kühler Luft (K) achten!



Bild 5.4.2.3
Verschmutzte Kühlrippen erhöhen die Erwärmung

5.4.3 Niedrige Drehzahl

Durch die Vorschaltung eines statischen Frequenzumrichters wird der normale Drehstrom-Käfigläufermotor zum drehzahlverstellbaren Antrieb. Diese einfache und weit verbreitete Technik birgt die Gefahr, dass das vom Motor zur Verfügung gestellte Drehmoment auch im Bereich niedriger Frequenzen (Drehzahlen) – also bei verminderter Kühlung – dauernd oder langfristig abverlangt wird. Ein auf Bemessungsstrom eingestelltes Bimetallrelais kann keine Gefahr melden, da der vom Drehmoment abhängige Strom fast unverändert fließt. Der kritische Bereich liegt etwa unterhalb 30 Hz (Bild 5.4.3.1).

Die aus den zusätzlichen Verlusten wegen **Oberschwingungen** und aus der drehzahlabhängigen Kühlung resultierende Reduzierung des thermisch zulässigen Dauer-Drehmoments wird bei den meisten Herstellern in praxisgerechten, vereinfachten Kennlinien dargestellt. Ein Vergleich (Bild 5.4.3.1) zeigt einen relativ breiten Streubereich, der sich aus den verschiedenen technischen Voraussetzungen und unterschiedlichen Sicherheitszuschlägen erklären lässt.

Diese Zusammenfassung kann und soll die Einzelauswertung der Hersteller-Kennlinien nicht ersetzen.

5 Überlastungsarten für den Motor

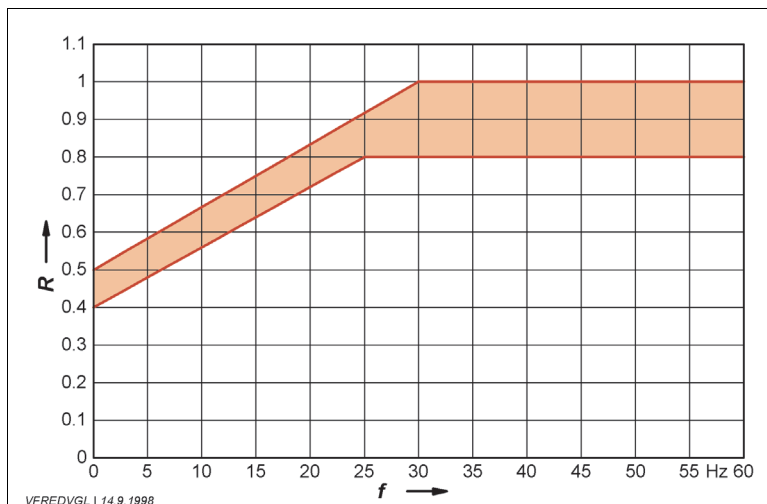


Bild 5.4.3.1
Reduktionsfaktor R für das thermisch zulässige Bemessungsdrehmoment bei eigenbelüfteten Käfigläufermotoren (Kühlart IC411) bei Dauerbetrieb S1 Umrichterspeisung $f = 5 \dots 50$ Hz
Streuband von zehn verschiedenen Herstellerangaben und Normen

Bei Verwendung eines am Netz betriebenen **Fremdlüfters**, der unabhängig vom Umrichter mit gleichbleibender Drehzahl und Kühlwirkung arbeitet, ist das thermisch zulässige Bemessungsdrehmoment im unteren Frequenzbereich nicht zu reduzieren. Bei der Planung ist also zu entscheiden zwischen

- einem eigenbelüfteten Motor, dessen Typeleistung zum Ausgleich der kühlungsbedingten Drehmomentreduzierung vergrößert ist, und
- einem fremdgekühlten Motor mit günstiger Baugröße, aber zusätzlichem Aufwand für den getrennten Lüfter und dessen Netzanschluss.

Sind Haupt- und Lüftermotor 4polig, so ergeben sich bei Frequenzen über 50 Hz Geräuschvorteile gegenüber einem eigenbelüfteten Motor.

Für eine Entscheidung rein unter Kostengesichtspunkten muss der Einzelfall geprüft werden.

Das breite Streuband in Bild 5.4.3.2 schließt verschiedene Herstellerangaben und Auslegungen ein. Es zeigt, dass i. allg. im Leistungsbereich bis etwa 7,5 kW eine klare Entscheidung für die Eigenbelüftung (Kühlart IC411) und über etwa 15 kW für die Fremdbelüftung (Kühlart IC416) gefällt werden kann. Im Leistungsbereich zwischen diesen Eckwerten ist der Einzelfall zu überprüfen.

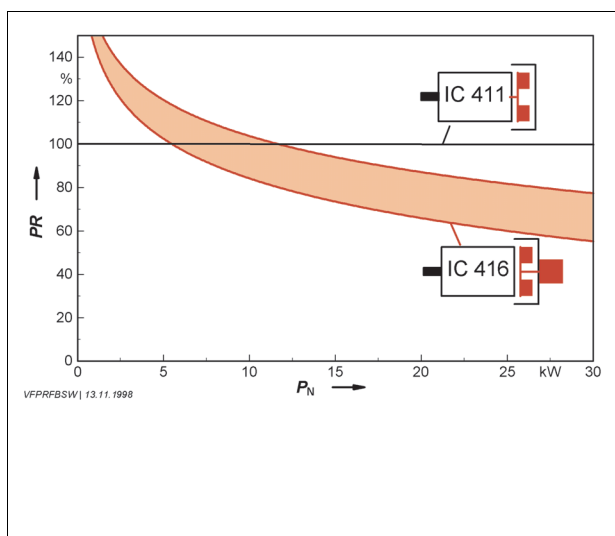


Bild 5.4.3.2
Streuband für den relativen Preis PR eines fremdbelüfteten, umrichtergespeisten Motors (IC416) im Vergleich zum vergrößerten eigenbelüfteten Modell (IC411) bei verschiedenen Auslegungen und Herstellerangaben.

Im Übergangsbereich (ca. 7,5 ... 15 kW 50-Hz-Typeleistung, 4polig) empfiehlt sich Einzelprüfung der Preisrelation.

5.5 Antriebe für Hebezeuge

Elektrische Antriebe für Hebezeuge benötigen besondere Schutzeinrichtungen, die nicht nur gegen eine thermische Überlastung der Motorwicklung, sondern auch gegen eine Gefährdung von Personen oder Sachen als Folge von Zweileiterbetrieb oder bei Überdrehzahl schützen. DIN EN 60204-32/VDE 0113 Teil 32 befasst sich ausführlich mit diesen besonderen Schutzmaßnahmen [1.23],[2.25]

5.5.1 Wicklungsschutz

Hebezeuge können wegen der begrenzten Hubhöhe nicht im Dauerbetrieb S1 betrieben werden. Je nach der Häufigkeit der aufeinander folgenden Betriebsspiele sind sie deshalb für die in Abschnitt 5.3 ausführlich erläuterten Betriebsarten S2, S3 oder S4 zu bemessen und zu schützen.

Im Abschnitt 7.3 von [1.23] heißt es diesem Thema u.a.:

"Für Motoren mit speziellen Betriebsbedingungen, die häufig anlaufen oder bremsen müssen, kann es schwierig sein, einen Überlastschutz vorzusehen, der eine vergleichbare Zeitkonstante wie die zu schützende Wicklung hat. Es wird empfohlen, geeignete Schutzeinrichtungen zu verwenden, die für Motoren besonderer Betriebsart ausgelegt sind.

Die Verwendung von Motoren mit eingebautem thermischem Schutz (siehe IEC 60034-11) wird für solche Fälle empfohlen, bei denen die Kühlung beeinträchtigt sein kann (z. B. staubige Umgebungen). In Abhängigkeit vom Motortyp ist ein Schutz bei blockiertem Läufer oder Phasenausfall durch einen eingebauten thermischen Schutz nicht immer sichergestellt, und ein zusätzlicher Schutz sollte dann vorgesehen werden."

5.5.2 Drehfeldüberwachung

Im Abschnitt 7.8 von [1.23] heißt es zu diesem Thema:

"Wo ein falsches Drehfeld der Versorgungsspannung einen gefahrbringenden Zustand oder eine Beschädigung des Hebezeuges verursachen kann, muss ein Schutz vorgesehen werden.

Betriebsbedingungen, welche zu einem falschen Drehfeld führen können ein:

- ein Hebezeug wird von einer Versorgung auf eine andere umgestellt;
- einen Mobilkran mit Anschlussmöglichkeiten für eine externe Energieversorgung.

Ein Hebezeug mit Einrichtungen für den Anschluss einer Hilfsstromversorgung (z. B. für Reparaturen) oder einer alternativen Stromversorgung (z. B. für Notfälle) muss eine Drehfeldüberwachung haben, um die richtige Drehrichtung sicherzustellen."

In der empfehlenswerten VDE-Schriftenreihe [2.25] ist zu diesem Thema ausgeführt:

"Eine falsche Drehrichtung der Bewegungsantriebe auf einem Hebezeug kann katastrophale Folgen haben. Einerseits ist sicher ein Kranführer beim Auftreten einer solchen Störung völlig verwirrt und wird zu spät und möglicherweise auch falsch darauf reagieren. Andererseits kommt hinzu, dass unter Umständen wichtige Schutzeinrichtungen wie Endschalter oder Überlastüberwachungen und Lastmomentüberwachungen nicht mehr wirksam sind, weil diese üblicherweise mit den Fahrtrichtungskommandos logisch verknüpft sind. Im Allgemeinen wird diesem Sachverhalt bei der Inbetriebnahme eines Hebezeuges besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Man kann davon ausgehen, dass bei fest installierten Hebezeugen, aber auch Mobilkränen mit eigener Energieversorgung, beim späteren Betrieb ein solcher Fehler nicht auftreten kann. Dies ist jedoch nicht der Fall bei Hebezeugen, die bestimmungsgemäß an verschiedene Versorgungsanschlüssen angeschlossen werden können.

Die Anmerkung nennt Beispiele für solche Einsatzfälle. Exemplarisch sei hierfür ein Baustellen-Turmdrehkran genannt. Der zweite Absatz weist auf weitere Beispiele hin, die speziell bei großen Hebezeugen vorkommen können, z. B. alternative Stromversorgung für Notfälle usw. Bei solchen Hebezeugen muss eine Drehfeldüberwachung vorgesehen werden."

Die Norm und ihre Erläuterungen [1.23 und 2.25] befassen sich vor allem mit den Maßnahmen zur **Vermeidung einer falschen Drehrichtung**.

In den folgenden Abschnitten wird erläutert, wie sich der **"Ausfall einer Phase"** bei einem Hubantrieb auswirken kann.

5.5.3 Senkbremsung

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, 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.

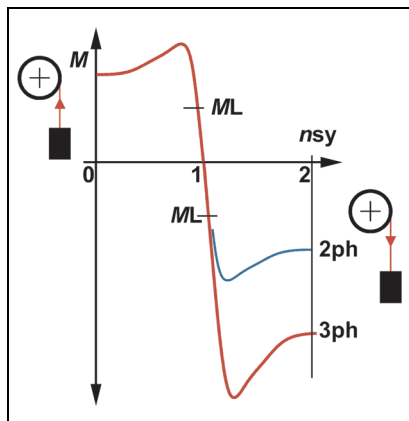


Bild 5.5.3.1

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



Bild 5.5.3.2

Heberantrieb in einer Automobilfabrik, angetrieben durch Getriebemotor.

Kegelrad-Getriebe in Aufsteckform

Abwärtsbetrieb als übersynchroner Generator am Netz

Bild: Danfoss Bauer GmbH

5.5.4 Anlaufverhalten bei Zweileiteranschluss

Wenn ein Drehstrommotor beim Einschalten nur mit zwei Außenleitern ("Phasen") gespeist wird, so entwickelt er kein Anzugsmoment und läuft nicht an. Wenn er allerdings einen mechanischen Impuls erhält, so läuft er in der angestoßenen Richtung hoch.

Es sind vier Positionen mit unterschiedlichen Auswirkungen denkbar, wobei eine mechanische Bremse beim Einschalten lüftet und beim Ausschalten bremst:

Schema				
Situation	1 Last am Boden Befehl "Heben"	2 Last an Decke Befehl "Senken"	3 Zwischenhalt Befehl "Heben"	4 Zwischenhalt Befehl "Senken"
Auswirkung	keine Bewegung	kontrollierte Bewegung nach unten	unerwünschte Bewegung nach unten	kontrollierte Bewegung nach unten

Bild 5.5.4 Anlaufverhalten bei Zweileiteranschluss eines Hubmotors

M gewünschte Bewegungsrichtung des Motors
L tatsächliche Bewegungsrichtung der Last

Eine gefährliche Auswirkung könnte sich bei der Situation 3 ergeben, weil die Bedienungsleute eine Bewegung nach oben erwarten, während sich die Last mit begrenzter Geschwindigkeit nach unten bewegt. Beim Zusammentreffen von ungünstigen Umständen (Überlastung, Unterspannung und ungeeigneter Motorauslegung) könnte die Bewegung allerdings auch unkontrolliert werden (vgl. Abschnitt 5.5.2).

5.5.5 Phasenausfallempfindlichkeit

Neben der Drehfeldrichtung muss gemäß Abschnitt 5.5.2 auch die Anwesenheit von allen drei Außenleiterspannungen ("Phasen") überwacht werden. Thermisch verzögerte Überstromschutzeinrichtungen ("Bimetallrelais") sind mit einer einfachen und kostengünstigen "Phasenausfallempfindlichkeit" ausgerüstet, die jedoch wegen der thermisch bedingten Verzögerung von einigen Sekunden die kritische Situation 3 nach Bild 5.5.4 nicht verhindern würde.

Die Überwachungseinrichtung muss beim Ausfall eines Außenleiters **sofort** wirksam werden. Sie kann in die Drehfeldüberwachung integriert sein oder mit einem getrennten Phasensymmetriewächter realisiert werden.

5.5.6 Überdrehzahlschutz

In 9.5 der Norm [1.23] ist u.a. festgelegt:

"Sicherheitsstromkreise, welche unzulässige Überschreitungen von Wegen, Geschwindigkeiten und/oder Lasten erfassen, die einen gefahrbringenden Zustand oder einen Schaden am Hebezeug oder der Last verursachen können, müssen bei ihrem Ansprechen eine Stop-Funktion auslösen."

Hierauf bezieht sich die Anforderung in 7.6 der Norm:

"Überdrehzahlschutz muss ... vorgesehen werden, wo Überdrehzahlen auftreten können und diese möglicherweise einen gefahrbringenden Zustand verursachen könnten. Der Überdrehzahlschutz muss entsprechende Steuerbefehle einleiten.

Diese Überwachung kann z. B. aus einem Fliehkraftschalter oder aus einem Geschwindigkeits-Grenzwertmelder bestehen. Der Überdrehzahlschutz sollte so arbeiten, dass die mechanisch zulässige Geschwindigkeit des Motors oder seiner Last nicht überschritten wird.

Unzulässig hohe Geschwindigkeiten könnten z. B. bei Hebezeugantrieben entstehen, die mit Gleichstrommotoren ausgerüstet sind."

Die Gefahr einer Überdrehzahl war besonders bei den früher überwiegend eingesetzten Gleichstrommotoren gegeben, die im Feldschwäcbereich arbeiten. Sie ist nicht mehr vorhanden bei umrichter gespeisten Drehstrommotoren, selbst wenn diese im "Feldschwäcbereich" arbeiten würden. Dieser Begriff hat bei Umrichterbetrieb eine völlig andere Bedeutung; hier bestimmt die Frequenz die Drehzahl und die Geschwindigkeit und verhindert ein "Durchgehen".

6 Schutz der Motorwicklung

Bei vielen Überlastungsursachen, z. B. mechanischer Überlast, Überspannung, Unterspannung, Schalthäufigkeit, Blockierung, Zweileiter-Netzanschluss, führt eine **erhöhte Stromaufnahme** zu anormaler Wicklungserwärmung. In anderen Fällen jedoch kann die Wicklung auch bei normaler Stromaufnahme gefährdet werden: überhöhte Raumtemperatur, verminderte Kühlluftzufuhr oder Umrichterbetrieb bei niedriger Frequenz. Von den verschiedenen, nachstehend beschriebenen Verfahren zum Schutz der Motorwicklung ist daher je nach Gefahr und gefordertem Schutzbereich das geeignete auszusuchen; gewisse Betriebsbedingungen können sogar eine Kombination von zwei verschiedenen Schutzeinrichtungen notwendig machen.

6.1 Stromabhängige Überstromauslöser

6.1.1 Schmelzsicherungen

Schmelzsicherungen sind in elektrischen Anlagen nach DIN VDE 0100 Teil 523 vorgeschrieben. Bei Belastung mit 1,2fachem Nennstrom – für einen Elektromotor bereits eine gefährliche Überlastung – spricht eine Schmelzsicherung von der Stärke des Motor-Bemessungsstromes (Nennstromes) überhaupt nicht an. Bei 6fachem Nennstrom, der beim Anlauf eines Elektromotors auftreten kann, spricht eine solche Schmelzsicherung in flinker Ausführung bereits nach 0,04 s, in träger Ausführung nach 0,5 s, in beiden Fällen also vor einem sicheren Hochlauf des Motors, an (Bild 6.1.1). Da in der Regel nur eine der drei Sicherungen durchschmilzt, kann der Motor an zwei Hauptleitern weiterlaufen und ist bei Belastung auf das äußerste gefährdet (Zweileiter-Netzbetrieb oder Zweiphasenlauf, s. Abschn. 5.2.4). Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Schmelzsicherungen können nur den Schutz von Leitungen und Anlageteilen, jedoch keinen Motorschutz übernehmen.
- Mit Rücksicht auf den Anzugsstrom bei Direkteinschaltung sind Schmelzsicherungen in träger Ausführung für etwa 2 ... 3fache Bemessungsstromstärke des Motors zu wählen. Die Schmelzsicherung wirkt als Kurzschlusschutz für die Leitung; den thermischen Überlastungsschutz der Leitung kann das Motorschutzrelais übernehmen (hervorgehobener Linienzug 3+4 in Bild 6.1). Bei der Auswahl dieser getrennten Schutzorgane ist DIN VDE 0100 Teil 430, Abschnitt 7.2, zu beachten.

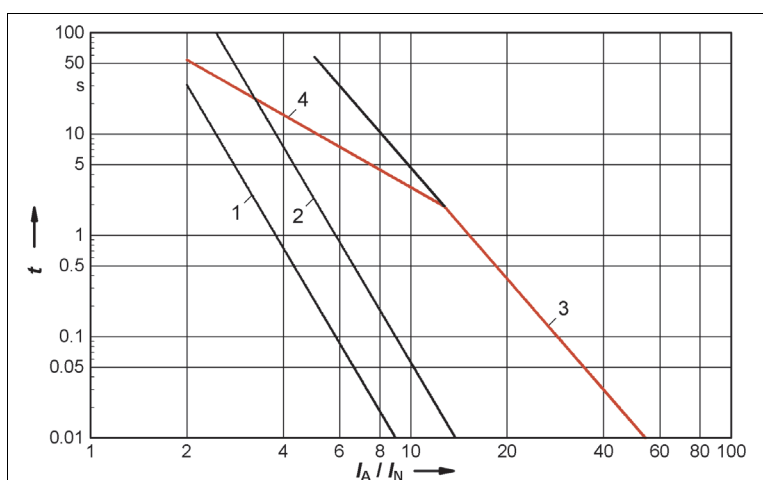


Bild 6.1.1
Vereinfachte
Auslösekennlinien von
Schmelzsicherungen und
Bimetallrelais

Linie	Überlastorgan	Einstellwert	Auslösezeit ca. s
1	flinke Sicherung	I_N	0,1
2	träge Sicherung	I_N	1
3	träge Sicherung	$3 I_N$	50
4	Bimetallschalter	I_N	6
3	träge Sicherung bei Klemmenkurzschluss	$3 I_N$ $I_A/I_N > 10$	< 2

6.1.2 Stromabhängig verzögerte thermische Überstromauslöser

In jedem Leitungszug wird ein Bimetallstreifen durch den Strom des zu schützenden Motors direkt oder indirekt beheizt. Bei erhöhter Stromaufnahme, also verstärkter Wärmeentwicklung, trennt der **Bimetallschalter** den gefährdeten Motor vom Netz, und zwar

- als **Bimetallauslöser** direkt mechanisch durch Betätigung der Auslösung eines Leistungsschalters (Motorschutzschalter);
- als **Bimetallrelais** über einen Hilfsschalter durch Betätigung des zugehörigen Motorschützes.

Die Verzögerung gemäß der Bimetall-Kennlinie (Bild 6.1.1) entspricht der Überlastungsfähigkeit eines Elektromotors: Beispielsweise spricht ein Relais bei 1,2fachem Nennstrom nach etwa 2 h und bei 6fachem Nennstrom (Anzugsstrom) nach etwa 6 s an. Bei einem normalen Anlaufvorgang von weniger als etwa 5 Sekunden Dauer kommt der Motorschutz also nicht zum Ansprechen. Im Blockierungsfall (also bei festgebremstem Läufer und Anschluss an volle Netzspannung) ist die Ansprechzeit des Relais genügend kurz, um eine Beschädigung der Motorwicklung zu verhindern.

Bei Motoren für Stern-Dreieck-Anlauf ist das Relais in Reihe mit den Wicklungssträngen zu schalten und auf den **Strangstrom** einzustellen (Bild 6.1.2).

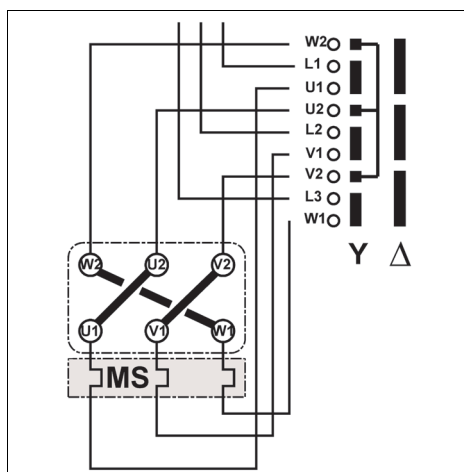


Bild 6.1.2

Schaltbild für Y-Δ-Einschaltung mit Anordnung und Bemessung der Bimetallschalter MS für den Strangstrom $I_{strg} = I_N / 1,73 = 0,58 I_N$

6.2 Thermischer Motorschutz durch Thermistoren (TMS)

Stromabhängig thermisch verzögerte Motorstarter (Motorschutzschalter mit Bimetallrelais) sind bewährte und preisgünstige Organe für den Überlastungsschutz elektrischer Maschinen. Mit der zunehmenden Verwendung elektrischer Antriebe im Schaltbetrieb (z. B. Betriebsart S4) wurde deutlich, dass ein so relativ kleines Gerät **kein thermisches Abbild** des Motors (mit seiner viel größeren Masse) darstellen kann und dass es zwangsläufig zu Frühauslösungen kommen muss.

Die Einführung des thermischen Maschinenschutzes TMS mit Thermistoren etwa Mitte der 60er Jahre wurde daher von Herstellern und Anwendern sehr begrüßt – die anfängliche Bezeichnung **Motorvollschutz** signalisiert die hohen Erwartungen an dieses neue System.

Ausfälle, die ein Vollschutz eigentlich hätte vermeiden müssen, zeigten dann die Grenzen des neuen Überlastungsschutzes.

Dieser Abschnitt soll beschreiben, wo die Möglichkeiten und Grenzen des TMS liegen und wie in Kombination mit dem altbewährten Motorschutzschalter doch ein Vollschutz erreichbar ist.

6.2.1 Wirkungsweise des Thermistor-Motorschutzes

Kaltleitertemperaturfühler oder **Thermistoren** sind temperaturabhängige Widerstände mit positivem Temperaturkoeffizienten (PTC), d. h., sie vergrößern nach Bild 6.2.1.1 bei einer bestimmten **Nennansprechtemperatur NAT** (z. B. 130 °C bei Motoren mit Wärmeklasse B) plötzlich sehr stark ihren Widerstand.

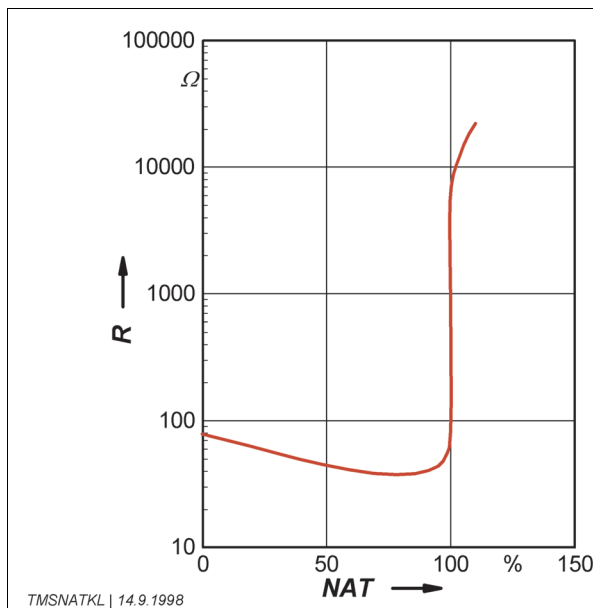


Bild 6.2.1.1
Temperatur-Widerstands-Kennlinie eines Kaltleiter-Temperaturfühlers mit PTC nach DIN VDE 0660 Teil 302 und IEC 60034-11-2 »Mark A«
NAT Nennansprechtemperatur
PTC Positive Temperature Coefficient

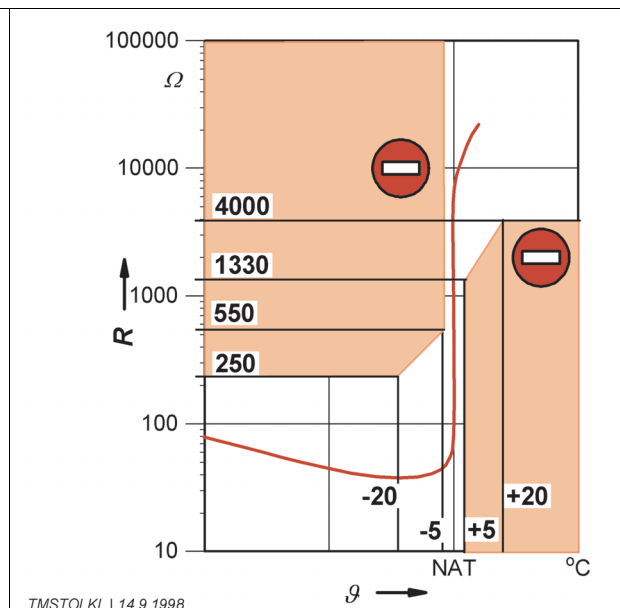


Bild 6.2.1.2
Zulässiger Toleranzbereich für die Kennlinie eines Thermistors nach DIN 44081, Tabelle 1
NAT Nennansprechtemperatur

Gemäß Bild 6.2.1.3 liegen die Temperaturfühler in Reihe mit der Relaispule eines Auslösegerätes. Beim Erreichen der Ansprechtemperatur oder bei einer ungewollten Leitungsunterbrechung schaltet das Relais um und trennt den gefährdeten Motor vom Netz.

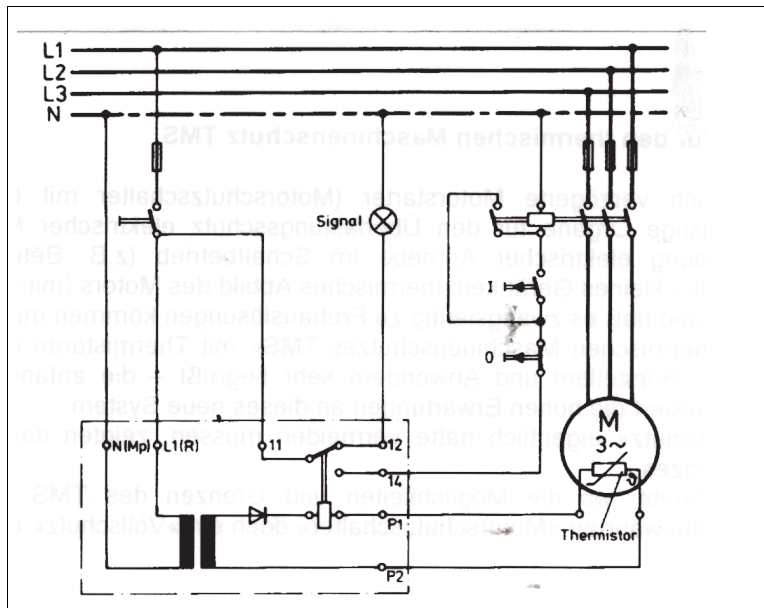


Bild 6.2.1.3
Schaltbild für thermischen
Motorschutz (TMS) mit
Kaltleiter-Temperaturfühlern
(Thermistoren)

Bei der Überprüfung der Wirkungsweise von Thermistoren sind einige Regeln zu beachten:

Durchgang

Maximal DC 2,5 V pro Fühler.

Höhere Spannungen (z. B. Summer, Prüflampe) führen zur Zerstörung.

Maximale Bemessungsspannung je nach Hersteller 25 ... 30 V.

Isolation

Prüfwechselspannung nach DIN EN 60034-1 / VDE 0530-1 zwischen Fühlerkreis und der mit Masse verbundenen und an Erde gelegten Motorwicklung.

Bei der Isolationsprüfung der Motorwicklung muss der Fühlerkreis geerdet sein, um Schäden durch kapazitive Aufladung zu vermeiden.

Widerstand bei Raumtemperatur

Nach Norm sind Werte $R \leq 250 \Omega$ pro Fühler zulässig; erfahrungsgemäß liegt der Messwert für die Reihenschaltung von drei Fühlern bei 100 ... 600 Ω .

Maximale Messspannung DC 2,5 V pro Fühler.

Nennansprechtemperatur NAT (Tabelle 6.2.1.3)

Tabelle 6.2.1.3 Abstufung und Farbkennzeichnung der Nennansprechtemperatur nach DIN 44081

NAT (°C)	Farbcode	NAT (°C)	Farbcode	NAT (°C)	Farbcode
60	weiß/grau	110	braun/braun	150	schwarz/schwarz
70	weiß/braun	120	grau/grau	155	blau/schwarz
80	weiß/weiß	130	blau/blau	160	blau/rot
90	grün/grün	140	weiß/blau	170	weiß/grün
100	rot/rot	145	weiß/schwarz	180	weiß/rot

Tatsächliche Ansprechtemperatur

Wenn die Widerstandsgrenzen nach Bild 6.2.1.2 eingehalten werden und trotzdem Zweifel an der tatsächlichen Ansprechtemperatur bestehen, so empfiehlt sich eine Überprüfung nach folgendem Verfahren:

Der Stator mit Wicklung wird im Trockenofen oder durch Anschluss an eine geeignete Heizspannung langsam aufgeheizt. In der Nähe der NAT sollte der Temperaturanstieg nicht mehr als etwa 2 K/min betragen. Die tatsächliche Ansprechtemperatur sollte von der NAT nicht wesentlich mehr als ± 5 K abweichen.

6.2.2 Einbau der Temperaturfühler

Die Funktion des TMS hängt entscheidend vom richtigen Einbau der Fühler ab. Sie sollten möglichst im Wicklungsabschnitt mit der höchsten Temperatur (**hottest spot**) und mit gutem Wärmekontakt zur Wicklung angebracht werden.

6.2.2.1 Oberflächenbelüftete Maschinen (z. B. IC411, IC416)

Der von den Rührflügeln am Rotor erzeugte primäre Kühlkreislauf (innere Luftbewegung um die Wickelköpfe) ist i. allg. nicht sehr effektiv. Die Wärme fließt hauptsächlich über die Nuten zum Blechpaket und wird von dort zur meist verrippten Gehäuseoberfläche geleitet. Der hottest spot ist bei dieser Maschinenart im Wickelkopf auf der dem Außenlüfter abgewandten Seite – in der Regel also auf der A-Seite (Bild 6.2.2.1).

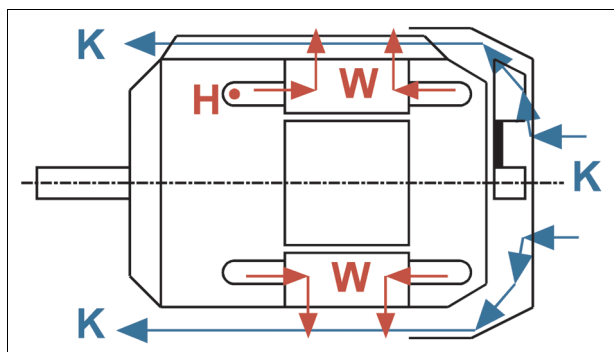


Bild 6.2.2.1
Wärmefluss (W), Kühlluftstrom (K) und hottest spot (H) bei oberflächenbelüfteten Maschinen (z. B. IC411, IC416)

6.2.2.2 Durchzugbelüftete Maschinen (z.B. IC 01, IC 06)

Die Wickelköpfe werden intensiv vom Kühlluftstrom umspült. Die Wärme fließt hauptsächlich aus der Nut zum Wickelkopf. Der hottest spot ist bei dieser Maschinenart etwa in Nutmitte (Bild 6.2.2.2).

Wenn die Nutfüllung eine Anordnung der Fühler in der Nut nicht erlaubt, ist der Wickelkopf auf der Luftaustrittseite zu wählen und der Fühler so anzubringen, dass er nicht direkt vom Luftstrom getroffen wird.

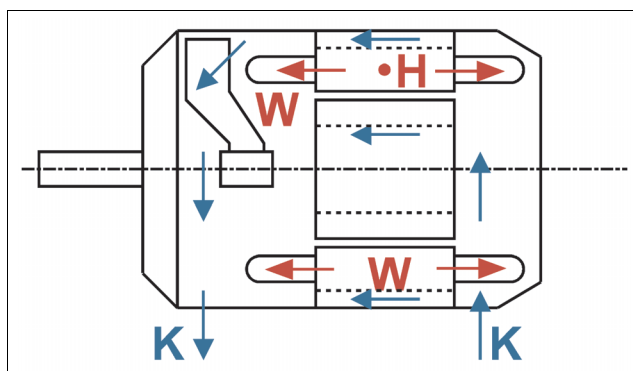


Bild 6.2.2.2
Wärmefluss (W), Kühlluftstrom (K) und hottest spot (H) bei durchzugbelüfteten Maschinen (z.B. IC01, IC06)

6.2.2.3 Einbettung in den Wickelkopf

Die Temperaturfühler sind bei der Herstellung der Wicklung im Wickelkopf parallel zu den Wickeldrähten einzubetten. Nach den Angaben eines Fühler-Herstellers [2.20] sollten die Anschlusslitzen auf einer Länge von 30 ... 40 mm mit eingebettet werden (Bild 6.2.2.3.1). Übermäßige mechanische Beanspruchung der Fühler beim Formen des Wickelkopfes ist zu vermeiden.

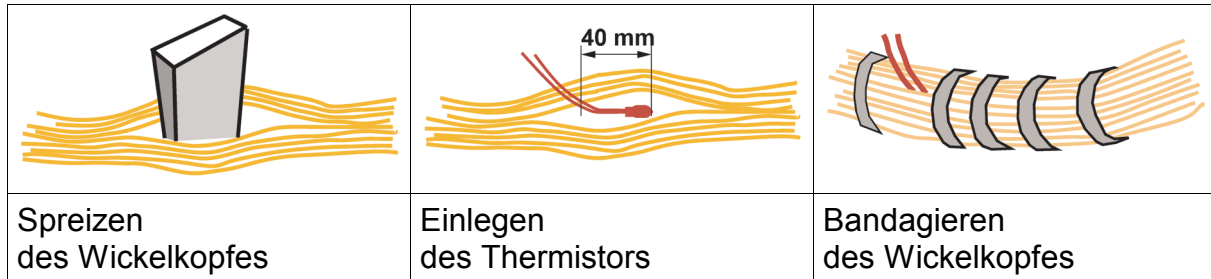


Bild 6.2.2.3.1 Arbeitsschritte beim Einbau der Thermistoren in den Wickelkopf nach Herstellerangaben [2.20]



Bild 6.2.2.3.2 Optimale Einbettung eines Thermistors nach Herstellerangaben (THERMIK)

6.2.2.4 Nachträgliche Anbringung am Wickelkopf

Wegen der unzureichenden Wärmeübertragung sollte diese Anbauart möglichst auf Sonderfälle beschränkt werden. In einem grundsätzlichen Versuch wurden die Übertemperaturen bei verschiedenen Anbauarten im Vergleich zur üblichen Einbettung der Thermistoren ermittelt (Tabelle 6.2.2.4).

Tabelle 6.2.2.4 Einfluss der Anbauart auf die Übertemperatur

Anbauart	Erhöhung der Ansprechtemperatur
mit Wärmeleitpaste	30 K
ohne wärmeleitende Hilfsmittel direkt anbandagiert	50 K
mit ungeeigneter, plastischer Masse anbandagiert	80 K

Wenn es in **Sonderfällen** unumgänglich ist, die Thermistoren nachträglich am Wickelkopf anzubandagieren, so wird empfohlen:

- Verwendung von Wärmeleitpaste zur Verbesserung der Wärmeübertragung,
- Herabsetzung der NAT um 10 ... 20 K gegenüber den bei Einbettung üblichen Werten (vgl. Abschn. 6.2.6).

6.2.3 Temperaturverlauf in Wicklung und Fühler

Die elektrische Isolierung zwischen Fühler und Wicklung verzögert den Wärmeübergang vom Kupferdraht zum Thermistor. Je nach Betriebs- und Überlastungsart ergibt sich eine mehr oder weniger große Temperaturdifferenz.

6.2.3.1 Langsamer Temperaturanstieg (z. B. Betriebsart S1)

Bei Dauerbetrieb S1 wird die Beharrungstemperatur je nach Größe und Belüftung des Motors erst nach 2 ... 8 h erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen Wicklung und Thermistor (Temperaturüberlauf) ist vernachlässigbar gering (Bild 6.2.3.1).

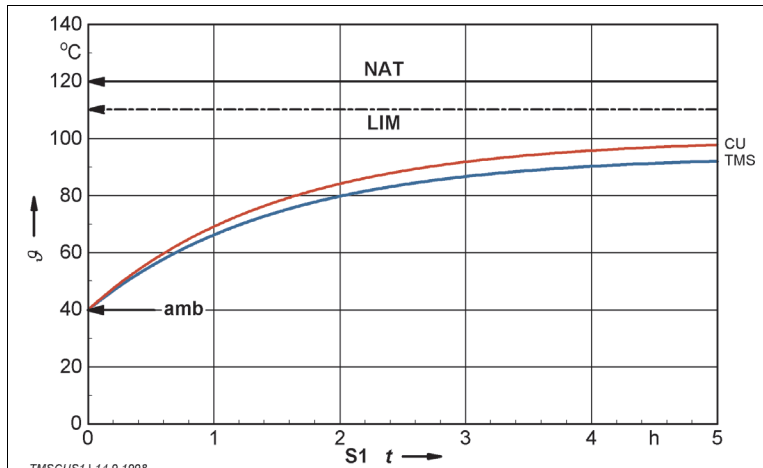


Bild 6.2.3.1

Temperaturverlauf ϑ in Kupfer (CU) und Thermistor (TMS) im Vergleich zur Grenztemperatur (LIM) und Nennansprechtemperatur (NAT)
 Dauerbetrieb S1 –
 Zündschutzart EEx e II T3 –
 Wärmeklasse B –
 Umgebungstemperatur (amb) 40 °C

Bei starker Überlastung (z. B. mit 1,5 ... 2fachem Bemessungsstrom) wird der **Temperaturüberlauf** der Wicklung zwar etwas höher, bleibt aber im Rahmen der thermischen Überlastbarkeit einer guten Isolierung, sofern die Überlastung nicht zu häufig auftritt.

Überlast bei laufendem Motor wird vom TMS erfasst.

6.2.3.2 Rascher Temperaturanstieg

Drehstrom-Asynchronmotoren nehmen bei festgebremstem Läufer (also im »Kurzschluss«) den Anzugsstrom auf, der je nach Größe, Polzahl und Auslegung des Motors etwa 400 ... 800 % des Bemessungsstromes beträgt. Die Erwärmung im Kupfer – quadratisch abhängig vom Strom – steigt sehr rasch an; ihr Verlauf kann während der ersten Sekunden gemäß Bild 6.2.3.2 linear angenommen werden. Die Temperatur am Thermistor folgt nach einer Ankoppelungszeit T_K , die vom Wärmeübergangswiderstand – also z. B. von der Dicke der Isolierung – abhängig ist. Es sind Werte von 3 ... 6 (8) s üblich.

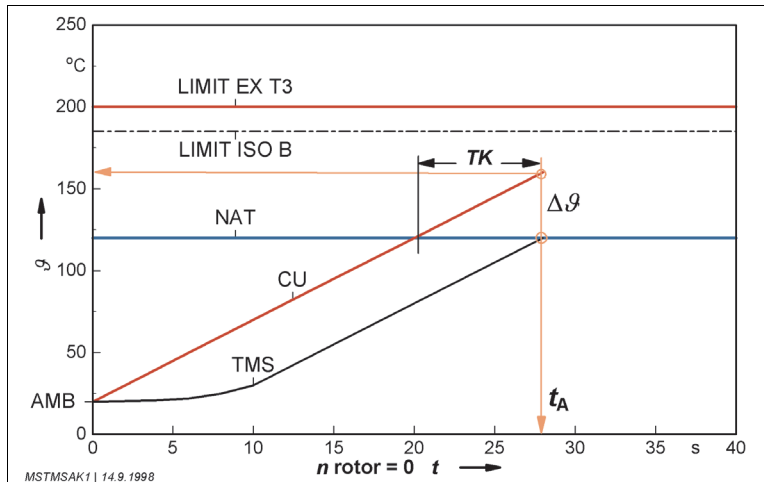


Bild 6.2.3.2
Temperaturverlauf im Wickeldraht (CU) und im Thermistor (TMS) bei hoher Überlastung – z.B. bei festgebremstem Läufer ($n_{\text{rotor}} = 0$)

AMB	Umgebungstemperatur	$\Delta\vartheta$	Temperaturüberlauf
ϑ	Temperatur	LIMIT ISO B	Grenze bei Wärmeklasse B
NAT	Nennansprechtemperatur	LIMIT EX T3	Grenze bei Temperaturklasse T3
TK	Ankoppelungszeit		

Die Wicklungstemperatur beim Ansprechen des TMS wird also immer höher sein als die NAT. Dieser Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta$ ist abhängig von der Ankoppelungszeit T_K und der Anstiegsgeschwindigkeit $v = \Delta\vartheta / T_K$.

6.2.4 Einfluss der Ankoppelungszeit T_K

Bei einer Kurzschluss-Stromdichte $i_A = 30 \text{ A/mm}^2$ ist eine Temperaturanstiegsgeschwindigkeit $v = 5 \text{ K/s}$ zu erwarten. Beträgt bei ungünstiger Annahme die Ankoppelungszeit $T_K = 8 \text{ s}$, so ist der Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta = T_K \cdot v = 8 \text{ s} \cdot 5 \text{ K/s} = 40 \text{ K}$. Wird die Isolierung des Fühlers so »verbessert«, dass die Ankoppelungszeit auf den doppelten Wert ansteigt, also $T_K = 16 \text{ s}$, so wird der Temperaturüberlauf 80 K. Die Abschaltung erfolgt also erst bei einer Temperatur, die um 80 K über der Nennansprechtemperatur (NAT) des Fühlers liegt (Bild 6.2.4).

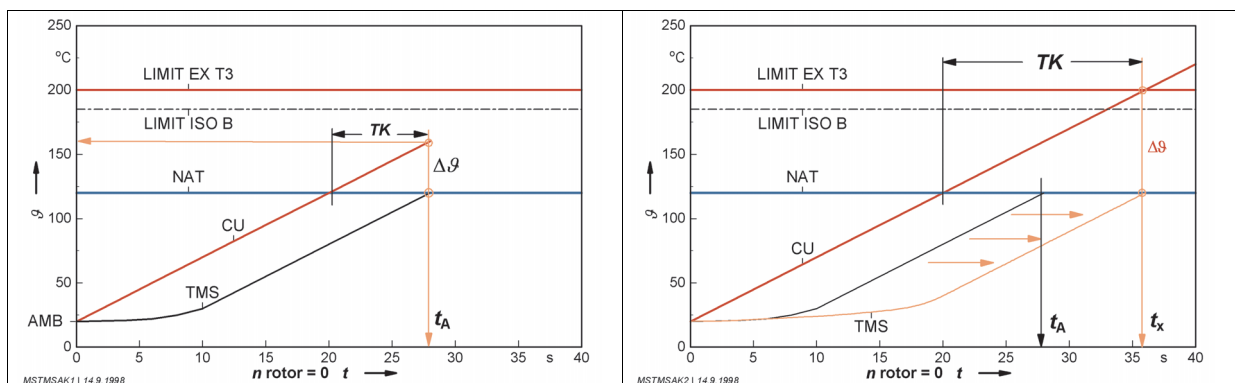


Bild 6.2.4 Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta$ in der Wicklung (CU) eines hoch ausgenutzten Drehstrommotors bei üblicher ($T_K = 8 \text{ s}$) und verschlechterter Ankoppelungszeit ($T_K = 16 \text{ s}$) gegenüber der Nennansprechtemperatur (NAT) des Thermistors (TMS) Temperaturanstiegsgeschwindigkeit v in beiden Fällen etwa 5 K/s.

Hieraus ergibt sich: Die Ankoppelungszeit sollte möglichst niedrig gehalten werden, indem für die Isolierung des Fühlers möglichst dünne Folien oder Schrumpfschläuche verwendet werden.

6.2.5 Einfluss der Stromdichte

Die **Anstiegsgeschwindigkeit** der Temperatur hängt direkt von der **Kurzschlussstromdichte** i_A ab (Bild 6.2.5.1).

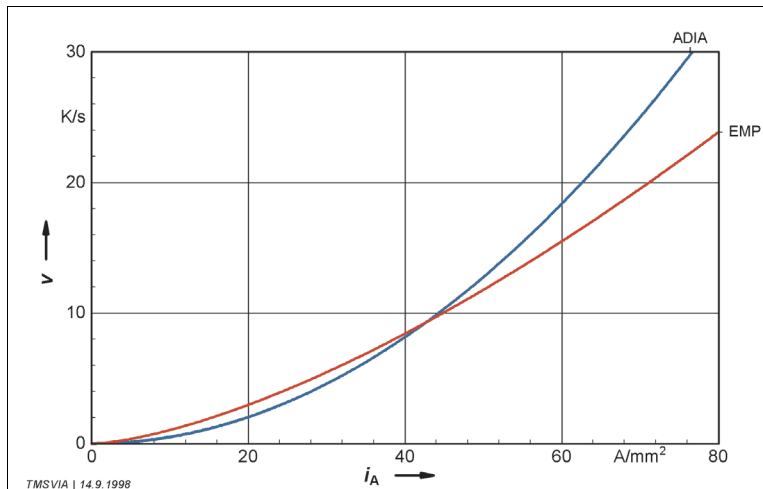


Bild 6.2.5.1

Richtwerte für die Anstiegsgeschwindigkeit v der Wicklungstemperatur in Abhängigkeit von der Kurzschlussstromdichte i_A

ADIA : theoretisch aus adiabatischer Erwärmung [8]

EMP : empirisch als Mittelwert aus Messungen (Danfoss Bauer GmbH)

Bei einer üblichen Ankoppelungszeit $T_K = 8$ s ergibt sich

- bei Stromdichten von etwa 30 A/mm^2 ein Temperaturüberlauf von etwa 40 K ,
- bei extremer Stromdichte von z. B. etwa 60 A/mm^2 ein Temperaturüberlauf von etwa 120 K (Bild 6.2.5.2).

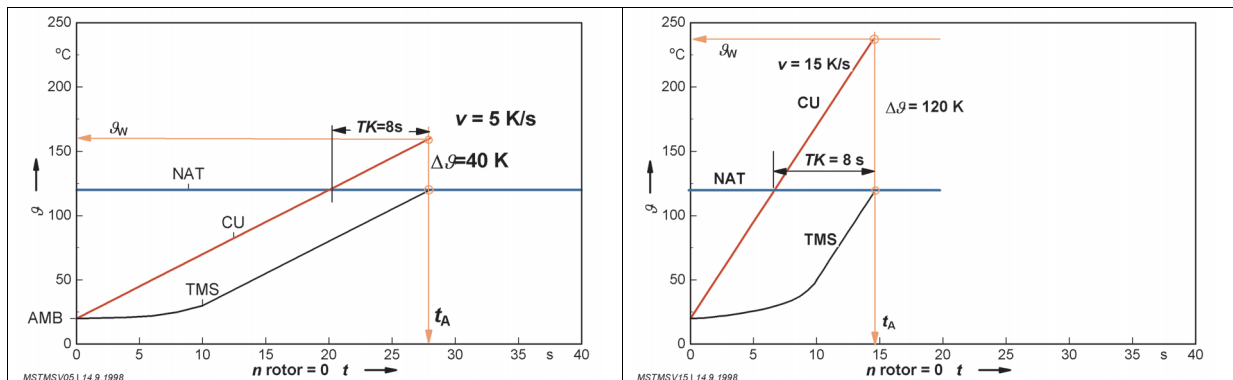


Bild 6.2.5.2 Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta$ in der Wicklung (CU) eines Drehstrommotors bei üblicher ($v = 5 \text{ K/s}$) und extremer Temperaturanstiegsgeschwindigkeit ($v = 15 \text{ K/s}$) gegenüber der Nennansprechtemperatur (NAT) des Thermistors (TMS) Ankoppelungszeit (T_K) in beiden Fällen etwa 8 s

Hieraus ergibt sich:

Stromdichten von mehr als etwa 40 A/mm^2 ergeben einen Temperaturüberlauf $\Delta\vartheta > 50 \text{ K}$.

Höhere Werte stellen eine Gefährdung für die Wicklungsisolierung dar.

Thermistoren können in diesen Fällen keinen »Alleinschutz« oder »Vollschutz« übernehmen.

Es empfiehlt sich die Kombination mit einem stromabhängigen

Bimetallauslöser (Motorschutzschalter). Dieser ist so einzustellen, dass er bei festgebremstem Läufer (also beim Strom I_A) spätestens nach etwa 15 s auslöst.

6.2.6 Wahl der Nennansprechtemperatur NAT

Für die Zuordnung der Nennansprechtemperatur NAT zu einer Wärmeklasse lässt sich keine allgemein gültige Regel angeben, da Temperaturbild, Wärmeübergang und Einbauort bei den verschiedenen Maschinenarten zu unterschiedlich sind.

In DIN VDE 0660 Teil 302 und IEC 60034-11 wurde deshalb lediglich festgelegt, welche Grenztemperatur die Wicklung nach dem Ansprechen des TMS erreichen darf. Die Werte der Kategorie 1 schließen eine höhere Sicherheit ein als bei Kategorie 2, die deshalb nur mit Vorsicht und bei Kenntnis aller Betriebsbedingungen anzuwenden sind (Tabelle 6.2.6.1).

Tabelle 6.2.6.1 Richtwerte für die Zuordnung der NAT zur Wärmeklasse und Grenztemperatur nach dem Ansprechen gemäß DIN VDE 0660 Teil 302 und IEC 60034-11

Kategorie	Grenztemperatur in °C nach dem Ansprechen bei Wärmeklasse		
	B	F	H
1	145	170	195
2	165	190	215

Die Richtwerte für NAT in der Tabelle 6.2.6.2 entsprechen einem Mittelwert aus verschiedenen Herstellerangaben und haben sich in der Praxis für oberflächengekühlte Motoren bewährt.

Tabelle 6.2.6.2 Richtwerte für die Wahl der NAT (Nennansprechtemperatur) für oberflächenbelüftete (IC4X) und durchzugbelüftete (IC0X) Maschinen der Wärmeklassen B, F und H

Kühlart	Funktion	NAT in °C bei Wärmeklasse		
		B	F	H
IC 4X (oberflächenbelüftet)	Warnen	120	140	160
	Abschalten	140	160	180
IC 0X (durchzugbelüftet)	Warnen	110	130	150
	Abschalten	130	150	170

6.3 Thermoschutzschalter

Bimetallgesteuerte Kleinschalter betätigen beim Erreichen der Ansprechtemperatur sprunghaft einen Steuerkontakt. Sie können bei Kleinmotoren (Bemessungswerte z. B. 1 A, 250 V) den Hauptstromkreis direkt unterbrechen oder bei größeren Motoren auf den Steuerstromkreis wirken. Obwohl die Baugröße im Laufe der Entwicklungsjahre von der ursprünglichen Knopfgröße («Knopfthermostat») deutlich verringert werden konnte (Bild 6.3.1), haben sie gegenüber Thermistoren einige Nachteile:

- größere Masse, daher verzögerte »thermische Ankoppelung« und Gefahr für die Wicklung bei raschem Temperaturanstieg, z. B. Blockierung (s. Abschn. 6.2.4).
 - lange Abkühlzeit bis zur Wiedereinschaltbereitschaft,
 - große Abmessungen, daher Einbauschwierigkeiten bei kleineren Motoren.
- Im Vergleich zu Thermistoren haben Thermostaten deshalb nur noch ein begrenztes Anwendungsgebiet.

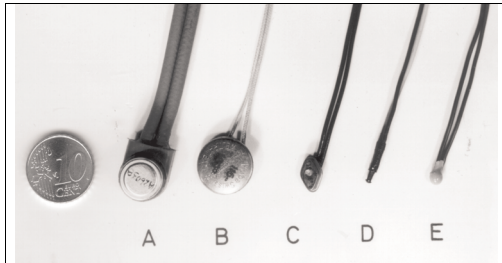


Bild 6.3.1
Größenvergleich von Thermostaten
verschiedener Bauart (A, B, C)
mit Thermistoren (D, E)

Beim nachträglichen Anbau ohne Einbettung in den Wickelkopf ist eine sichere Funktion – vor allem bei raschem Temperaturanstieg – sehr in Frage gestellt.

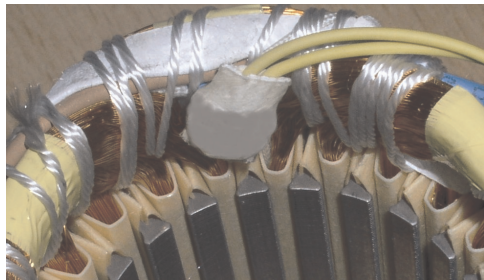


Bild 6.3.2
Unzureichende thermische Ankoppelung eines
Thermo-Schutzschalters auf Bimetall-Basis
durch falsche Anbringung außen an die
Wicklung (statt Einbettung)

6.4 Widerstandsthermometer

Bei manchen Anwendungen – vor allem mit größeren Maschinen – ist es erforderlich, die Temperatur der Wicklung oder eines Lagers nicht nur zu begrenzen, sondern zu **messen** und visuell oder automatisch mit einem Sollwert zu vergleichen. Die fast lineare Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Metallen eignet sich gut für dieses Verfahren. Wegen der hohen chemischen Beständigkeit und der guten Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften werden Sensoren aus Platin bevorzugt, wie sie in DIN EN 60751 genormt und in [3.8] ausführlich beschrieben sind. Die Kennlinie eines PT 100-Temperaturfühlers ist in Bild 6.4 gezeigt.

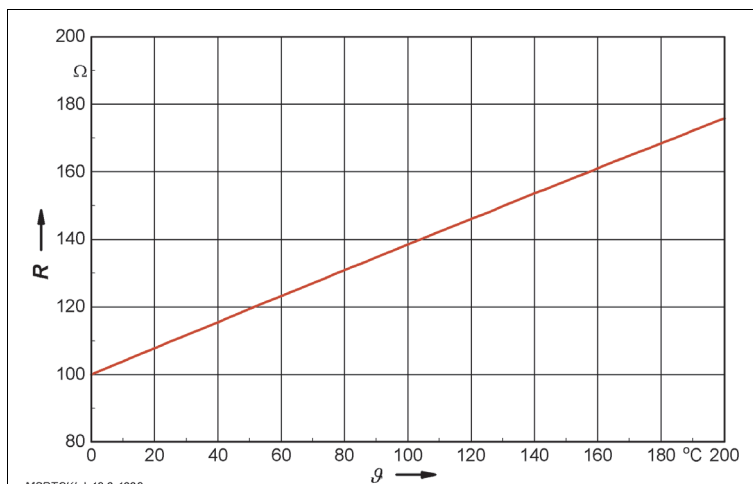


Bild 6.4
Widerstand R in
Abhängigkeit von der
Temperatur ϑ bei einem
Platin-
Widerstandsthermometer
PT 100

6.5 Elektronische Motorschutzrelais

Bei diesen Relais kann die thermische Charakteristik eines Motors simuliert werden; die Auslösecharakteristik entspricht also weitgehend der thermischen Belastbarkeit des Motors. Zusätzlich können überwacht werden: Phasenausfall, Netzsymmetrie, Erdschluss, Überlast, Wiedereinschaltbereitschaft [2.10]. Diese Relais erfordern eine sorgfältige Einstellung bei Inbetriebnahme nach Parametern, die der Motorhersteller liefern kann. Ihr Preis beschränkt derzeit die Verwendung auf größere Maschinen, Hochspannungsmotoren oder Einsatzfälle, bei denen eine hohe Verfügbarkeit verlangt wird [2.2].

6.6 Überlastungsarten und ihre Schutzmöglichkeiten

In der Tabelle 6.6.1 sind häufig vorkommende Überlastungsarten und die Schutzmöglichkeiten verschiedener Einrichtungen zusammengestellt. In den Vergleich wurden Schmelzsicherungen einbezogen, um deutlich zu machen, dass sie lediglich eine Schutzfunktion für die Leitung, nicht jedoch für den Motor haben.

Tabelle 6.6.1 Schutzwirkung üblicher Motorschutzeinrichtungen

Überlastungsart	Schutzelement				
Überstrom $I \leq 2 \cdot I_N$	0	■	■	■	■
Schaltbetrieb $Z \leq 30$ c/h	0	▼	▼	■	■
Schaltbetrieb $Z > 30$ c/h	0	0	0	■	■
Schwerstanlauf $t_a > 6$ s	0	■	■	▼	■
Blockierung bei $i_A \leq 40$ A/mm ²	▼	■	■	■	■
Blockierung bei $i_A > 40$ A/mm ²	▼	■	■	▼	■
Zweileiterbetrieb *)	0	▼	■	■	■
Spannungsabweichung $\Delta U > \pm 10$ %	0	■	■	■	■
Frequenzabweichung $\Delta f > \pm 5$ %	0	■	■	■	■
Umgebungstemperatur $\vartheta_{amb} > 50$ °C	0	0	0	■	■
Behinderung der Kühlung, z. B. durch Verschmutzung	0	0	0	■	■
Umrichterbetrieb in unzulässig niedrigen Frequenzbereichen	0	0	0	■	■

Erläuterung der Schutzmöglichkeit: 0 kein Schutz
 ▼ bedingter Schutz
 ■ voller Schutz

I Tatsächlicher Strom bei Überlastung

I_N Bemessungsstrom des Motors

Z Zahl der Einschaltungen pro h; bis zu 30 c/h ist i. allg. keine Frühauslösung zu erwarten; bei mehr als 30 c/h ist eine Frühauslösung des Bimetallrelais nicht auszuschließen

t_a Hochlaufzeit; falls länger als 6 s ist Frühauslösung des Bimetallrelais zu erwarten, - evtl. Sättigungswandler verwenden

i_A Stromdichte bei Anzugsstrom I_A







*) Wicklungen in Δ -Schaltung sind besonders gefährdet, falls keine Relais mit Phasenausfallempfindlichkeit eingesetzt werden

ΔU Spannungsabweichung als Netzschwankung; s. DIN VDE 0530-1, Abschn.12.3

Δf Frequenzabweichung als Netzschwankung; s. DIN VDE 0530-1, Abschn. 12.3

ϑ_{amb} Umgebungstemperatur

Tabelle 6.6.2 Erläuterungen zu den Schutzelementen in Tabelle 6.6.1

Symbol	Erklärung
	träge Schmelzsicherung Nennwert $(1,6 \dots 2,5) \cdot I_N$
	stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) Einstellwert $I_E = I_N$
	stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) mit Phasenausfallempfindlichkeit Einstellwert $I_E = I_N$
	thermischer Motorschutz TMS (Thermistor-Auslösegerät) Ankoppelungszeit $T_K < 6$ s
	stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) mit Phasenausfallempfindlichkeit Trägheitsgrad TI Einstellwert $I_E: 1,5 I_N < I_E < 0,3 I_A$ möglichst niedrig, jedoch max. $0,3 I_A$
+	kombiniert mit
	thermischem Motorschutz TMS (Thermistor-Auslösegerät) Ankoppelungszeit $T_K < 6$ s

7 Aufstellung

Die richtige Wahl von Aufstellungsort, Aufstellungsart und Übertragungsmittel kann sich entscheidend auf die Lebensdauer eines Antriebs auswirken.

7.1 Aufstellungsort

Der Antrieb sollte möglichst erschütterungsfrei aufgestellt werden. In der Schutzart IP54 nach [1.1] ist er staubgeschützt und spritzwassersicher, in IP65 staubdicht und strahlwassersicher (s. Abschnitt 3). Bei Aufstellung im Freien ist er zum Schutz gegen Korrosion mit einem dauerhaften, mehrfachen Anstrich zu versehen.

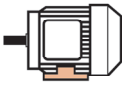
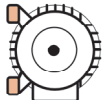
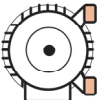
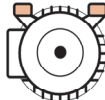


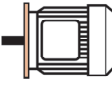

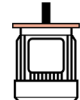
An Aufstellungsorten mit anormalen Betriebsbedingungen (z. B. langanhaltende Wasserberieselung, hohe Umgebungstemperatur über 30 ... 40 °C, Explosionsgefahr) sind Sondervorschriften zu beachten.

Die Ansaugung von Frischluft darf nicht durch ungünstigen Einbau oder durch Verschmutzung behindert werden (s. Abschn. 5.4.2). Intensive und langanhaltende Sonneneinstrahlung ist durch ein Schutzdach zu vermeiden.

7.2 Bauform und Aufstellung

Die Norm unterscheidet zwischen **Bauform** (z. B. Befestigung mit Fuß oder Flansch) und **Aufstellung** (z. B. waagrecht, senkrecht oder Montage an der Wand; Konstruktion und Fertigung der Normmotoren sind meist für alle Aufstellungsarten gleich (Tab. 7.2.1).

Tabelle 7.2.1 Beispiele für übliche Aufstellungen bei Fuß- oder Flanschbauform

Fußbauform						Flanschbauform		
IM B3	IM B6	IM B7	IM B8	IM V5	IM V6	IM B5	IM V1	IM V3
IM 1001	IM 1051	IM 1061	IM 1071	IM 1011	IM 1031	IM 3001	IM 3011	IM 3031
								

Lediglich bei Getriebemotoren bildet die **Schmierstoff-Füllmenge** die einzige, aber wichtige Ausnahme: Sie ist werkseitig für die bestellte und auf dem Leistungsschild als **IM-Code** markierte Aufstellung optimiert und muss bei nachträglicher Änderung der tatsächlichen Anordnung durch Nachfüllen oder Ablassen der entsprechenden Menge angepaßt werden (Bilder 7.2.2 und 7.2.3). Die im Werk eingefüllte Menge ist dem Schmierschild auf dem Getriebe zu entnehmen; die Sollmenge ergibt sich aus der zugehörigen Dokumentation.

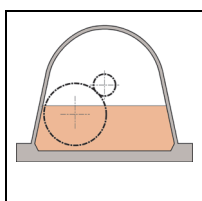


Bild 7.2.2
Optimaler
Schmierstoffpegel für die
Aufstellung B3

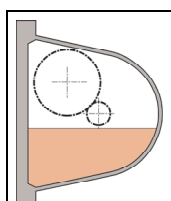


Bild 7.2.3
Gefahr von Trockenlauf bei nachträglicher
Änderung der Aufstellung von B3 in B6
ohne Anpassung der Schmierstoffmenge

7.3 Ausrichtung

Maschinen mit Kupplungen müssen ausgerichtet werden, damit die Mittellinien der Wellen parallel und ohne **Versatz** verlaufen (Bilder 7.3.1 und 7.3.2). Fehler können sich um so schwerwiegender auf die Lebensdauer der Lager auswirken, je schneller die Wellen drehen und je starrer die Kupplung ist.

Nach dieser Regel erfordern Getriebemotoren i. allg. einen geringeren Aufwand als Normmotoren – vor allem, wenn Kupplungen gewählt werden, die einen relativ großen Versatz zulassen (s. Abschn. 7.6). Mit Rücksicht auf die Lagerbelastung sollten jedoch die von den Kupplungen zugelassenen Grenzwerte für den Versatz nicht ausgenutzt werden. Die heute verfügbaren optischen Hilfsmittel unter Verwendung von Laserstrahlen und Computern zur präzisen, einfachen Ausrichtung von Wellen sind daher nur in besonderen Einsatzfälle erforderlich, erleichtern aber die Arbeiten erheblich (Bild 7.3.3).

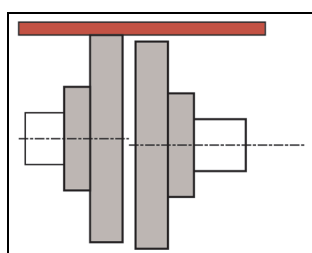


Bild 7.3.1
Überprüfung der
Wellenfluchtung
mit dem
Haarlineal

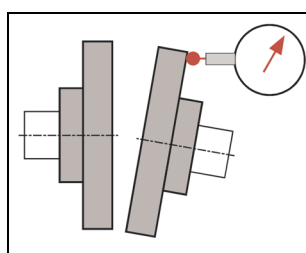


Bild 7.3.2
Überprüfung des
Winkelversatzes
mit der Messuhr

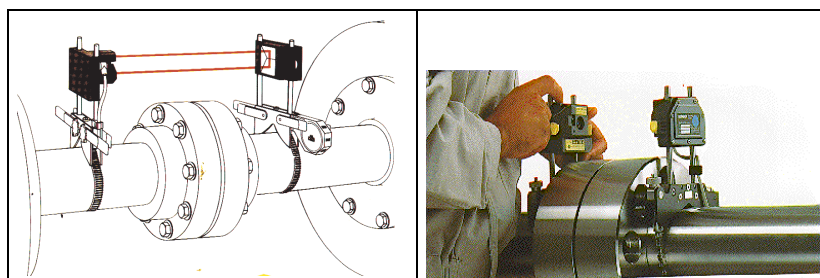


Bild 7.3.3
Wellenausrichtung mit
Laser und Computer
(Quelle: ROTALIGN
Prüftechnik AG
Ismaning)

7.4 Befestigung

Getriebemotoren entwickeln je nach Untersetzung erheblich höhere Drehmomente und Kräfte als schnellaufende Motoren entsprechender Leistung. Befestigungsmittel, Unterbau und Drehmomentabstützung sind für die im Betrieb und beim Anlauf zu erwartenden, hohen Kräfte zu bemessen und hinreichend gegen Lockerung zu schützen.

Bild 7.4.1 gibt Richtwerte für die beim Anlauf zu erwartenden Kräfte auf die Befestigung unter folgenden Voraussetzungen:

- Einhaltung der Mindest-Teilkreisdurchmesser nach Abschnitt 7.7,
- volles Anzugsmoment fließt über das Getriebe zur Last (z. B. bei hohem Trägheitsfaktor FI oder bei Blockierung),
- keine Zusatzkräfte aus Massenwirkung, z. B. infolge Spiels in den Übertragungsmitteln.

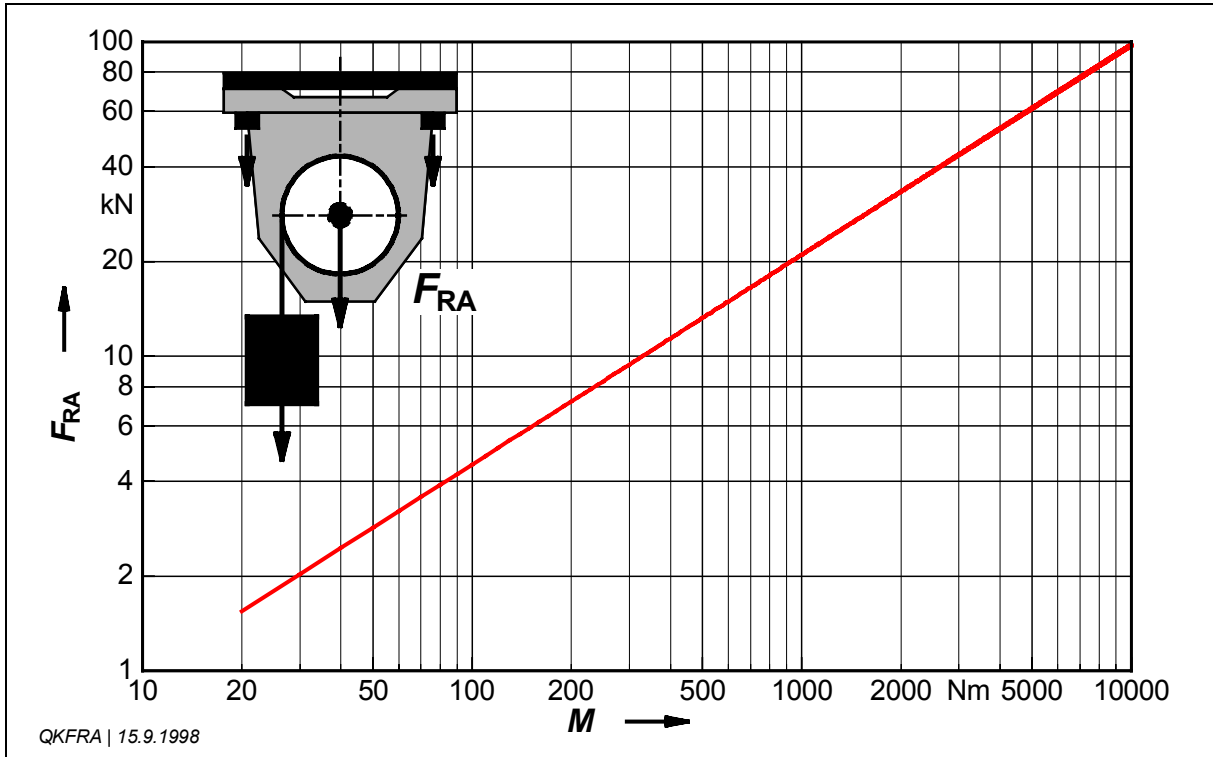


Bild 7.4.1 Richtwerte für die beim Anlauf gegen große externe Massen zu erwartenden Kräfte F_{RA} auf die Befestigung von Getriebemotoren, aufgetragen über dem Bemessungsmoment M

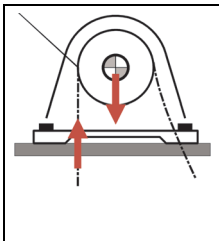


Bild 7.4.2 Günstige Beanspruchung von Graugussgehäuse und Befestigungsschrauben

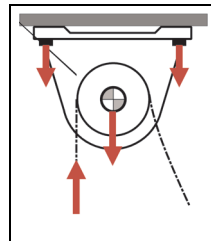


Bild 7.4.3 Ungünstige Beanspruchung von Graugussgehäuse und Befestigungsschrauben

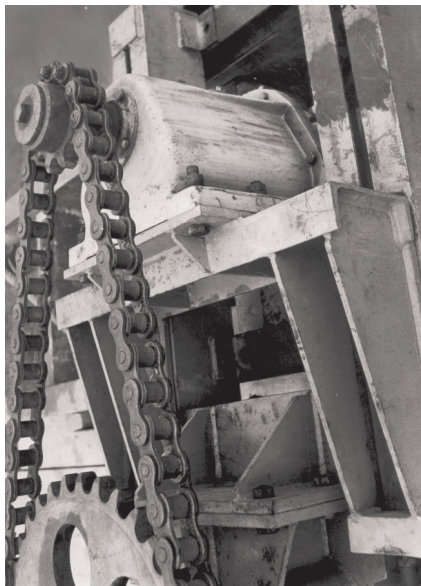
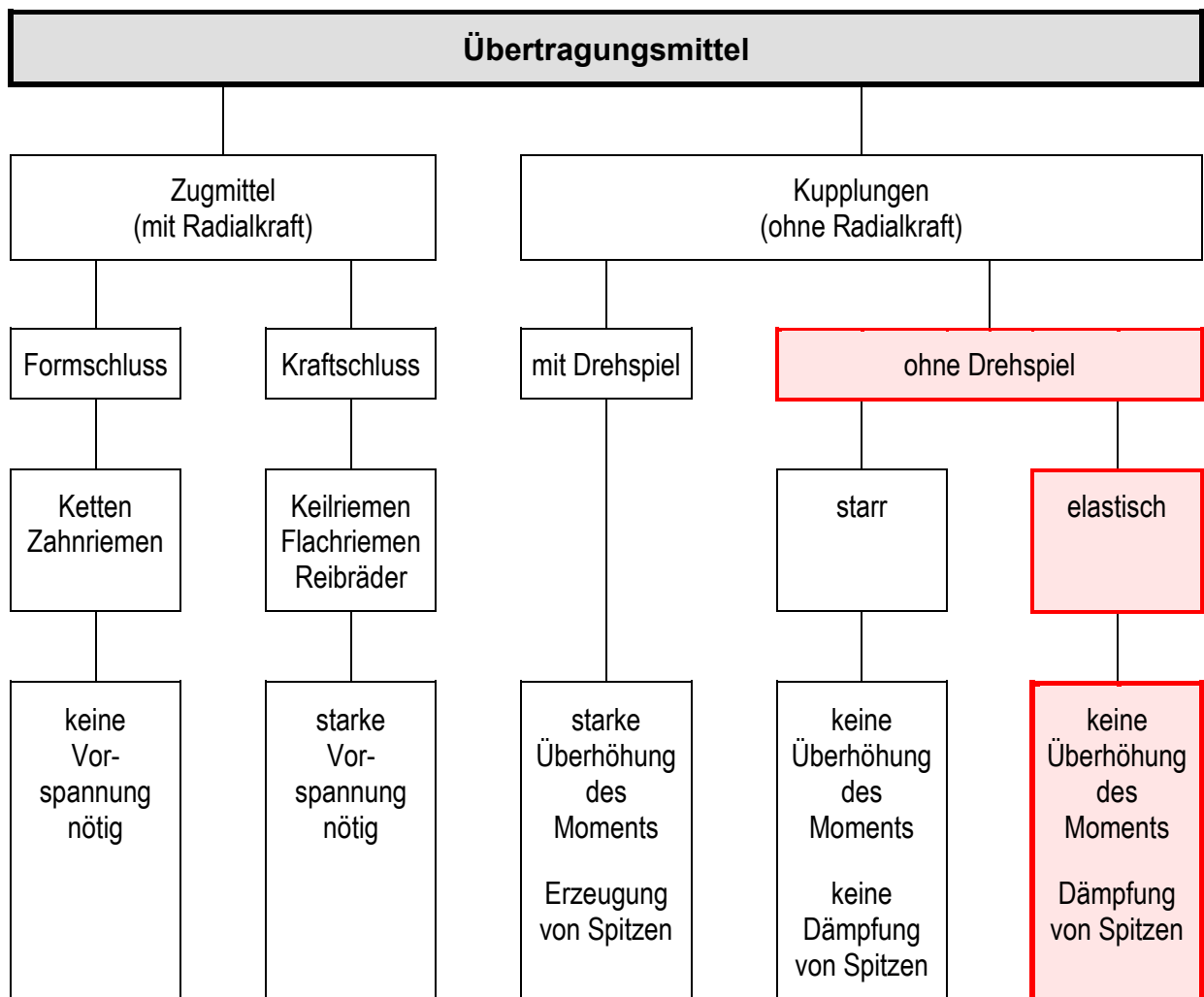


Bild 7.4.4 Anwendungsbeispiel eines Getriebemotors an einer Baumaschine in günstiger Anordnung zur Aufnahme der hohen Radialkräfte aus dem Kettenzug

8 Wahl der Übertragungsmittel

Die von einem Antrieb entwickelten Drehmomente können in verschiedener Weise auf die Arbeitsmaschine übertragen werden (Bild 8.5). Häufig führen die Einbausituation oder die Notwendigkeit einer Nachuntersetzung zwangsläufig zu bestimmten Übertragungsmitteln.

Vor allem im Schaltbetrieb können spielbehaftete Übertragungsmittel (Ketten, Klauenkupplungen) zu gefährlichen, dynamisch erzeugten Drehmomentspitzen führen. Bei solchen Antrieben ist die Verwendung einer spielfreien, hochelastischen Kupplung dringend zu empfehlen.



8.1 Kupplungen

Dieses Übertragungsmittel ist in zahlreichen Ausführungsarten und Fabrikaten am Markt. Der »Kupplungs-Atlas« von A. Schalitz (leider vergriffen) bietet einen umfassenden Überblick und eine gute Systematik zu diesem Thema.

In der Tabelle 8.1.3 sind stellvertretend zehn Systeme aufgelistet und nach langjährigen Praxiserfahrungen bewertet. Da jeder Antriebsfall andere Bedingungen stellt, können die Bewertungen nur eine **unverbindliche Empfehlung** darstellen. Die **Standzeit** (z. B. die Lebensdauer bei Schaltbetrieb) ist nicht bewertet.

Bei der Bewertung des **Spiels** eines Kupplungssystems (z. B. einer Klauenkupplung nach Ref. H) sollte nicht nur der Neuzustand, sondern auch die Veränderung nach längerer Beanspruchung beachtet werden (Bild 8.1.1).

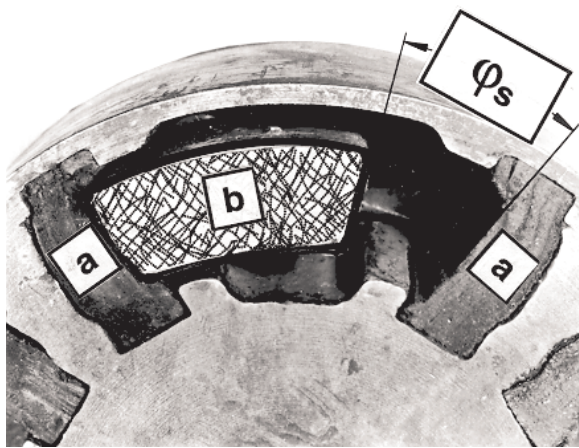


Bild 8.1.1

Klauenkupplung nach längerem Reversierbetrieb

- φ_s stark erhöhtes Drehspiel
- a komprimierte Lederpakete
- b abgesägte Klaue

Wichtig ist auch die Austauschbarkeit von Verschleißelementen in Kupplungen: Bild 8.1.2 zeigt ein Beispiel für eine besonders wartungsfreundliche Bauart.

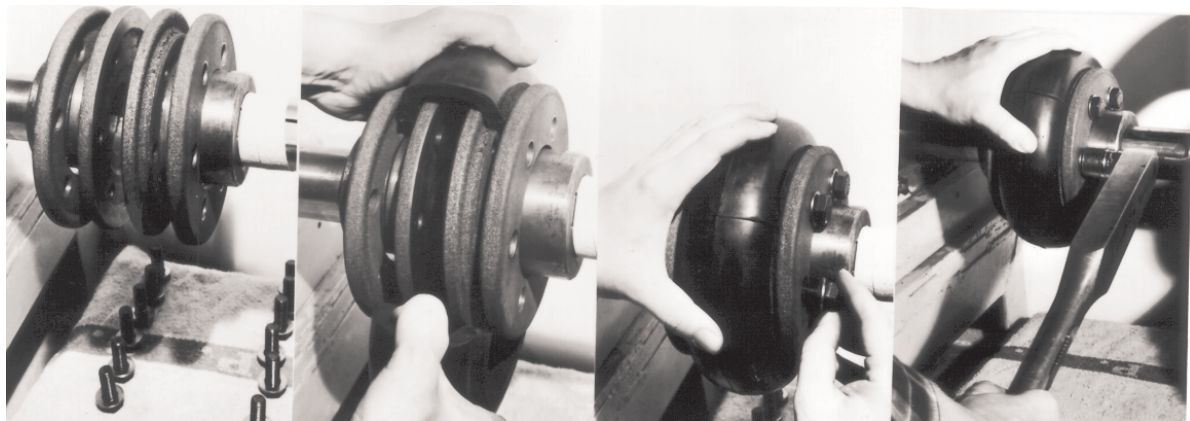
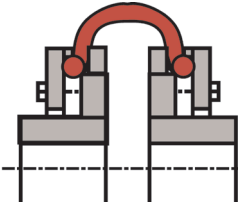
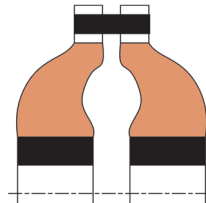
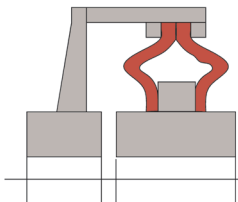
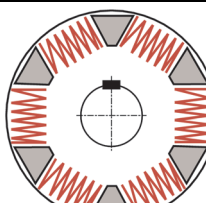
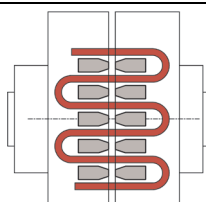


Bild 8.1.2 Tausch des elastischen Wellenreifens bei einer PERIFLEX-Kupplung (Fa. Stromag)

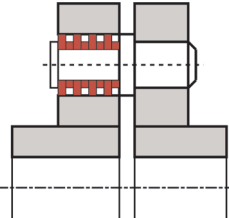
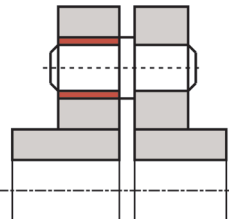
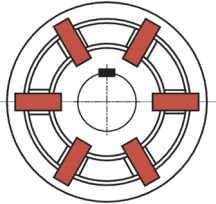
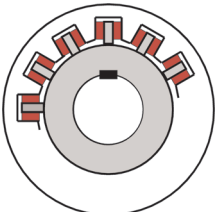
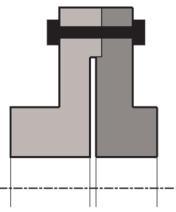
8 Wahl der Übertragungsmittel

Tabelle 8.1.3 Bewertung verschiedener Kupplungsbauarten

- gut geeignet
- bedingt geeignet
- ↓ nicht geeignet

Ref.	System	Bewertung bezüglich				Eignung bei Schaltbetrieb
		Spiel-freiheit	Elastizität	Zul. Verlagerung parallel	winklig	
A		■	■	■	■	■
B		■	■	■	■	-
C		■	■	■	■	■
D		■	■	■	■	■
E		■	■	■	■	■

8 Wahl der Übertragungsmittel

Ref.	System	Bewertung bezüglich				
		Spiel- freiheit	Elastizität	Zul. Verlagerung		Eignung bei Schaltbetrieb
				parallel	winklig	
F		-	-	-	-	-
G		-	↓	-	-	↓
H		↓	↓	-	-	↓
I		↓	↓	-	-	↓
J		↓	↓	↓	↓	↓

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.2 Rechenbeispiel für überhöhte Radialbelastung

Ein praktisches Beispiel soll deutlich machen, weshalb sekundäre stromabhängige Schutzmaßnahmen nicht wirksam sind:

Eine einfache Hubeinrichtung soll üblicherweise unter den Bedingungen der linken Spalte in Bild 8.2 eingesetzt sein. Für einen Sonderfall soll sie die doppelte Last heben. Der Planer hat eine an sich gute Idee: Er halbiert den Außendurchmesser der Seilrolle bei sonst gleichen Bedingungen. Da er den gleichen Strom (also gleiche Leistungsabgabe) misst, scheint alles in Ordnung zu sein.

Tatsächlich sind gemäß der rechten Spalte die Lager der Arbeitswelle des Getriebemotors überlastet.

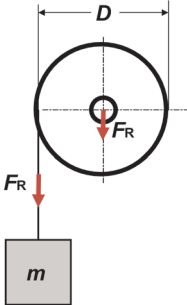
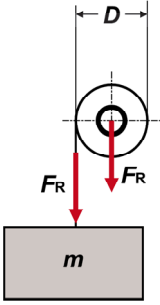
	
$D = 100 \text{ mm}$ $m = 200 \text{ kg}$ $F = m \cdot g = 200 \cdot 9,81 \approx 2000 \text{ N}$ $M = F \cdot D/2 = 2000 \cdot 0,05 = 100 \text{ Nm}$ $n_2 = 105 \text{ r/min}$ $v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,1 \cdot 105}{60} = 0,55 \text{ m/s}$ $P = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{100 \cdot 105}{9550} = 1,1 \text{ kW}$ $I_N = 2,7 \text{ A}$ <p>F_{RN} lt. Katalogangabe für das Getriebe: 3150 N</p> <p>Rel. Last : $2000 / 3150 = 63 \%$</p>	$D = 50 \text{ mm}$ $m = 400 \text{ kg}$ $F = m \cdot g = 400 \cdot 9,81 \approx 4000 \text{ N}$ $M = F \cdot D/2 = 4000 \cdot 0,025 = 100 \text{ Nm}$ $n_2 = 105 \text{ r/min}$ $v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,05 \cdot 105}{60} = 0,275 \text{ m/s}$ $P = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{100 \cdot 105}{9550} = 1,1 \text{ kW}$ $I_N = 2,7 \text{ A}$ <p>F_{RN} lt. Katalogangabe für das Getriebe: 3150 N</p> <p>Rel. Last : $4000 / 3150 = 126 \%$</p>

Bild 8.2 Rechenbeispiel für eine Überlastung durch Querkraft auf die Arbeitswelle ohne Rückwirkung auf die Stromaufnahme

8.3 Zugmittel mit Radialkraft (Querkraft)

Fast alle Motorschutzeinrichtungen (stromabhängig thermisch verzögerte Überlastschalter oder -relais, Thermistoren) basieren auf der direkten oder indirekten Wärmewirkung des Stromes. Sie können daher eine oft planungsbedingte mechanische Überlastung der Welle und ihrer Lager nicht erfassen. Dieser Abschnitt gibt Hinweise zur Vermeidung oder Beseitigung von antriebstechnischen Planungsfehlern.

8.3.1 Querkraftbelastung der Arbeitswelle

Wo langsam laufende Antriebe – also Getriebemotoren – eingesetzt sind, werden meist auch **hohe Antriebskräfte** verlangt. Bei Verwendung einer direkten Kupplung treten diese äußeren Kräfte als Paar auf und stellen daher keine zusätzliche Belastung für den Wellenstumpf und die Lager der Arbeitswelle dar (Bild 8.3.1.1). Meist werden die Antriebskräfte jedoch über form- oder kraftschlüssige Zugmittel – z. B. Ketten oder Riemen – übertragen und wirken dabei in ihrer Reaktion als Querkräfte auf die Arbeitswelle (Bild 8.3.1.2).

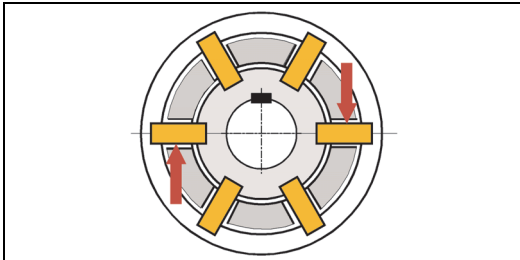


Bild 8.3.1.1
Das Kräftepaar in einer Kupplung hebt sich in seiner Wirkung auf die Welle auf

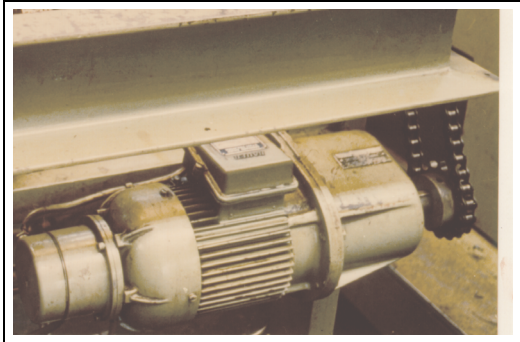
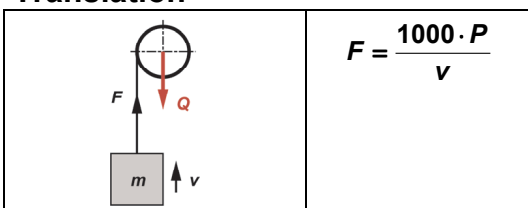


Bild 8.3.1.2
Typische Anwendung eines Getriebemotors mit Nachuntersetzung durch Kettentrieb

8.3.2 Höhe und Richtung der Querkraft

Die Antriebseinheit Getriebemotor ist thermisch und mechanisch für die Übertragung eines bestimmten Nenn Drehmoments M_N im Dauerbetrieb bemessen. Am äußeren Übertragungsmittel – z. B. Kettenrad, Zahnrad, Keilriemenscheibe, Kurbel – wird dieses Nenn Drehmoment in eine nutzbare Antriebskraft F umgesetzt, die nach folgenden Beziehungen berechnet werden kann:

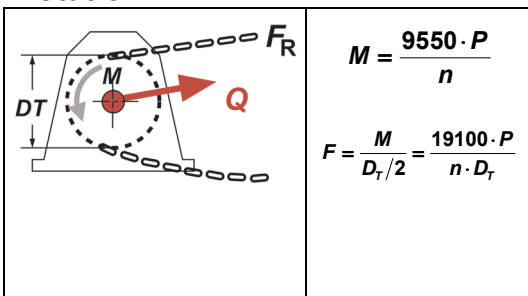
Translation



$$F = \frac{1000 \cdot P}{v}$$

Bild 8.3.2.1
 F - Antriebskraft in N
 P - Antriebsleistung in kW
 v - Geschwindigkeit in m/s
 Q - Querkraft auf die Arbeitswelle

Rotation



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

$$F = \frac{M}{D_r/2} = \frac{19100 \cdot P}{n \cdot D_r}$$

Bild 8.3.2.2
 M - Antriebsmoment in Nm
 P - Antriebsleistung in kW
 n - Antriebsdrehzahl in r/min
 F - Antriebskraft in N
 D_T - Teilkreis-Durchmesser des Antriebs-
 elements (z. B. Zahnrad, Kettenritzel) in m

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.4 Antriebselemente mit formschlüssiger Kraftübertragung

Bei Verwendung **formschlüssiger** Übertragungselemente, wie Ketten, Zahnräder, Zahnriemen, Schubstangen, Exzenter, Kurvenscheiben, wirkt der Widerstand gegen die nutzbare Antriebskraft F als Querbelastung Q auf die Arbeitswelle des Getriebemotors ein (Bild 2.3).

8.4.1 Kettenantrieb

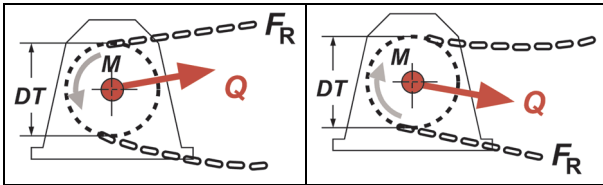


Bild 8.4.1
Belastung der Arbeitswelle bei einem Kettenantrieb

Der Kettenzug F wirkt als Querkraft Q auf die Arbeitswelle in Richtung des ziehenden Kettentrums.

8.4.2 Antrieb über Stirn-Zahnräder

Die bei Stirn-Zahnrädern auftretende Zahnkraft F wirkt unter dem **Zahneingriffswinkel** von 20° zur gemeinsamen Tangente der Teilkreise von treibendem und getriebenem Rad (Bild 8.4.2). Auf das getriebene Rad wirkt die treibende Zahnkraft F (graue Pfeile). Auf das treibende Rad wirkt sie als Reaktionskraft zurück (schwarze Pfeile). In der Wirkung auf die Arbeitswelle kann diese Reaktionskraft als Querkraft Q an der Welle angreifend gedacht werden (rote Pfeile).

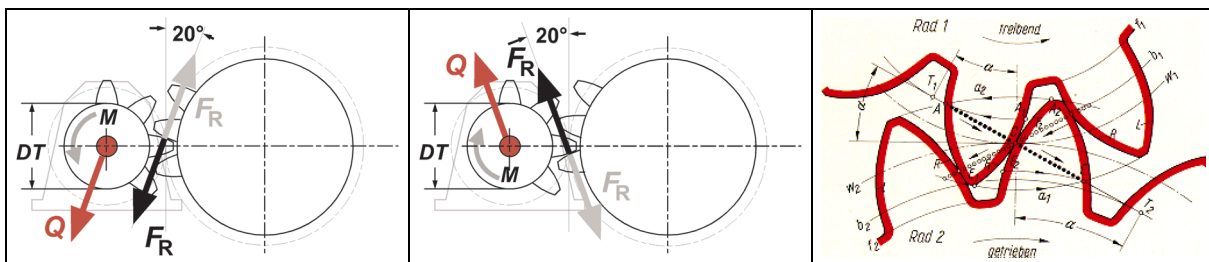


Bild 8.4.2 Belastung der Arbeitswelle bei einem Antrieb über Stirn-Zahnräder (Eingriffswinkel 20°)

8.5 Antriebselemente mit reibschlüssiger Kraftübertragung

Bei Verwendung **reibschlüssiger** Übertragungselemente, wie Flachriemen oder Keilriemen, ist zur Erreichung eines Kraftschlusses eine **Vorspannung** notwendig. Als Querbelastung auf die Arbeitswelle wirkt daher nicht nur der nutzbare Riemenzug, sondern zusätzlich noch die Vorspannkraft.

Die Vorspannkraft sollte mit Rücksicht auf Riemen und Lager möglichst nur so hoch gewählt werden, wie es zu einer sicheren schlupffreien Kraftübertragung notwendig ist. Da jedoch die Riemen-Spanneinrichtungen oftmals ein müheloses und unkontrollierbares Anspannen gestatten, findet man in der Praxis häufig unnötig stark vorgespannte Riementriebe. Es empfiehlt sich daher, bei der Berechnung der resultierenden Querkräfte entsprechend hohe Sicherheitsfaktoren einzusetzen und die Arbeitswellen-Lager reichlich zu bemessen.

8.5.1 Riemenantrieb

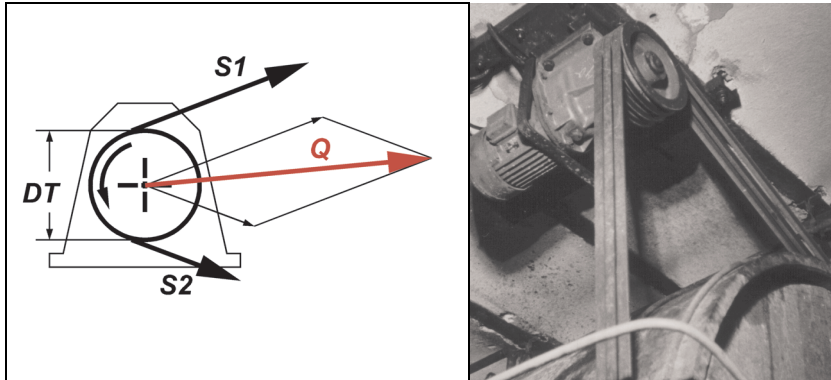


Bild 8.5.1
Querkraft Q auf die
Arbeitswelle
als Wirkung der
Riemenkräfte
 S_1 und S_2 bei
einem Riementrieb

S_1 und S_2 sind Riemenkräfte im Betrieb, hervorgerufen durch Vorspannung und Riemenzug F .

Q ist die auf die Arbeitswelle einwirkende Querkraft. Sie liegt zwischen ziehendem Trum und Lostrum, etwas zum ersteren hingeneigt. Je nach der Vorspannung ist

- o bei Keilriemen: $Q = (2 \dots 2,5) \cdot F$
- o bei Flachriemen: $Q = (2 \dots 3) \cdot F$.

Die Lager der Arbeitswelle sind für die Gesamtkraft Q zu bemessen.

8.5.2 Antrieb über Reibrad

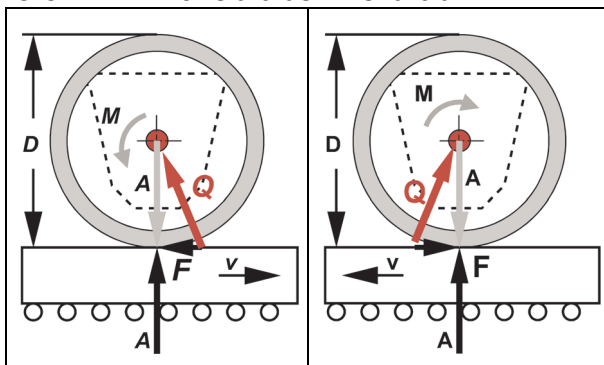


Bild 8.5.2
Belastung der Arbeitswelle bei einem
Antrieb über Reibrad

Zur Übertragung der nutzbaren Umfangskraft F auf das Transportgut ist es erforderlich, das Reibrad mit der **Anpresskraft A** gegen das Transportgut zu drücken (Bild 8.5.2). Die erforderliche Anpresskraft ist mindestens

$$A = \frac{F}{\mu} \text{ wobei } \mu \text{ die Reibungszahl zwischen Reibrad und Transportgut ist.}$$

Als Querbelastung auf die Arbeitswelle wirkt die resultierende Kraft

$$Q = \sqrt{A^2 + F^2}$$

Unter üblichen praktischen Verhältnissen wird $Q = (3 \dots 4) \cdot F$.

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.6 Belastbarkeit der Arbeitswellenlager

Die Gesamtbelastung der Arbeitswellenlager eines Getriebemotors setzt sich aus der im Getriebe selbst auftretenden Zahnkraft und der äußeren Querkraft zusammen. Die zulässige Radialbelastung ist den Katalogangaben zu entnehmen. Die Querkraft kann durch ungünstige Wahl von Durchmesser und Anordnung eines Übertragungsmittels unzulässig hohe Werte annehmen, ohne dass die Bemessungsleistung überschritten wird.

8.6.1 Richtwerte für zulässige Bemessungs-Radialkraft

Falls Herstellerangaben nicht zur Verfügung stehen, können Richtwerte nach Bild 8.6.1 verwendet werden. Sie beziehen sich auf einen Kraftangriffspunkt in halber Wellenstumpflänge und auf Drehzahlen bis etwa 20 r/min.

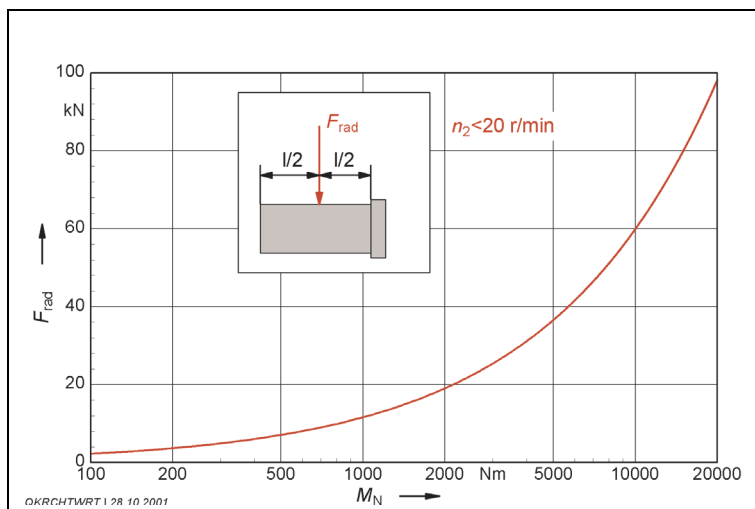


Bild 8.6.1
Richtwerte der zulässigen Radialkraft auf die Arbeitswelle von Getriebemotoren hoher Qualität

Einfluss der Drehzahl und des tatsächlichen Abstands vom Wellenbund zusätzlich beachten

8.6.2 Einfluss der Drehzahl

Die Richtwerte nach Bild 3.1 ergeben sich aus der Festigkeit von Welle und Gehäuse; sie gelten auch bei niedrigen Drehzahlen. Bei höheren Drehzahlen z. B. $n_2 > 20$ r/min ist wegen der Lagerlebensdauer ein Reduktionsfaktor nach Bild 8.6.2 zu beachten.

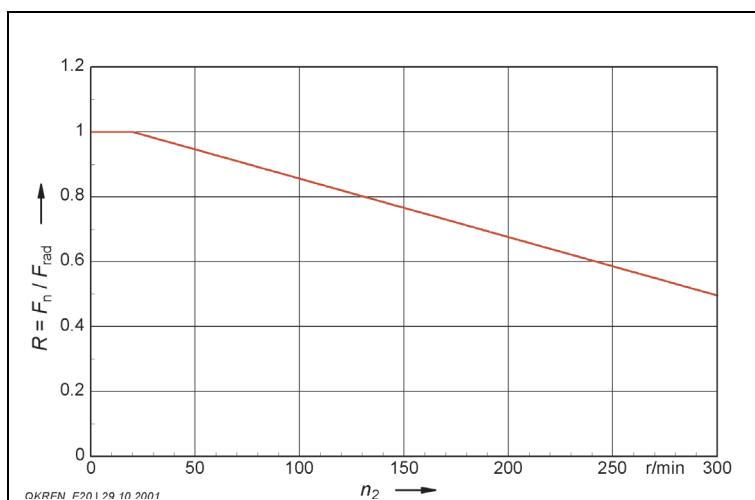


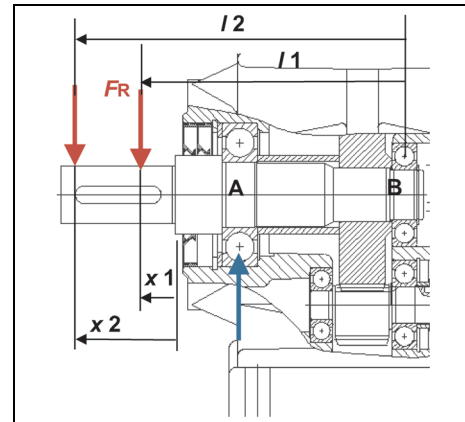
Bild 8.6.2
Reduktionsfaktor für die zulässige Bemessungs-Radialkraft in Abhängigkeit von der Drehzahl n_2

F_n - Radialkraft bei Drehzahl n_2
 F_{rad} - Radialkraft bezogen auf Drehzahl 20 r/min (Maximalwert für Festigkeit von Welle und Gehäuse)

8.6.3 Kraftangriff auf der Wellenstumpflänge

Das Biegemoment an der Arbeitswelle und damit die Beanspruchung von Welle und Lager ist neben der Höhe der Querkraft auch von deren Angriffspunkt in axialer Länge abhängig. Bild 8.6.3.1 zeigt ein Beispiel für die konstruktive Situation.

Bild 8.6.3.1
Beispiel für die Anordnung der Arbeitswellenlager eines Getriebemotors und für den Einfluss des Abstandes x_1 oder x_2 auf die Belastung des vorderen Lagers »A«



Quelle: Danfoss Bauer GmbH

Die »lange Reihe« der genormten Wellenstumpflängen nach DIN 748 Teil 1 erlaubt die Übertragung der zugeordneten Nenndrehmomente auch mit Riementrieben, die relativ breite Scheiben (= lange Wellenenden) erfordern. Für formschlüssige Übertragungselemente (wie Ketten- oder Zahnräder) jedoch ist diese »lange Welle« unnötig lang und verleitet daher zu einer ungünstigen Anordnung des Kraftangriffspunkts mit großem Hebelarm zum ersten Lager.

Für gleiche rechnerische Lebensdauer der Wälzlager und unter Einhaltung der zulässigen Biegebeanspruchung der Arbeitswelle darf die nominelle Querkraft F_x um so höher sein, je kleiner der Abstand x vom Wellenbund gewählt wird (Bild 8.6.3.2). Größe und Anordnung des Übertragungsmittels (z. B. eines Kettenrades) können die Lebensdauer entscheidend beeinflussen (Bild 8.6.3.3).

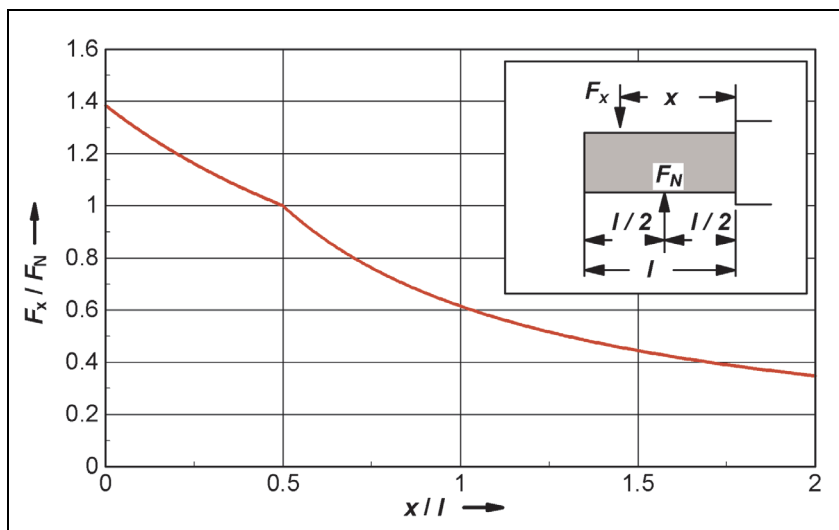


Bild 8.6.3.2
Änderung der zulässigen Querkraft F_x im Vergleich zum Normalwert F_N bei Änderung des Abstandes vom Wellenbund x gegenüber dem Normalwert $l/2$



Bild 8.6.3.3
Häufig anzutreffende, ungünstige Anordnung eines Kettenritzens am Ende der Arbeitswelle

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.7 Polygoneffekt bei Kettenrädern

Die Kette liegt in Form eines Vielecks auf dem Kettenrad; daher schwanken wirksamer Teilkreisdurchmesser und Kettengeschwindigkeit im Verhältnis $1 : \cos \alpha$, wobei α der halbe Winkel zwischen zwei Zähnen des Kettenrades ist ($\alpha = 180/Z$); Bild 8.7.1.

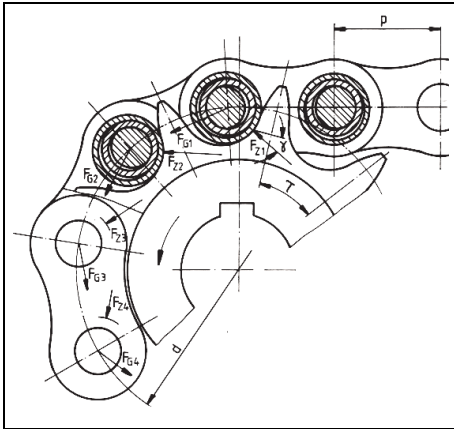


Bild 8.7.1
Geometrie eines Kettenritzels zur Erläuterung des Polygoneffekts
Quelle: Arnold und Stolzenberg

Dieser **Polygoneffekt** ist um so ausgeprägter, je niedriger die Zähnezahl Z des Kettenrades ist. Neben anderen Gründen ist dies der Anlaß, dass in DIN 8195 »Auswahl von Kettentrieben« empfohlen wird, Kettenräder mit mindestens 17 Zähnen zu wählen. Die Kettenrad-Hersteller schließen sich zwar meist dieser Empfehlung an, bieten aber teilweise listenmäßig noch 10 oder 11 Zähne als untere Grenze an. In den Bildern 8.7.2 und 8.7.3 ist der Polygoneffekt, also die **Ungleichförmigkeit** der Kettengeschwindigkeit, in Abhängigkeit von der Zähnezahl des Kettenritzels gezeigt.

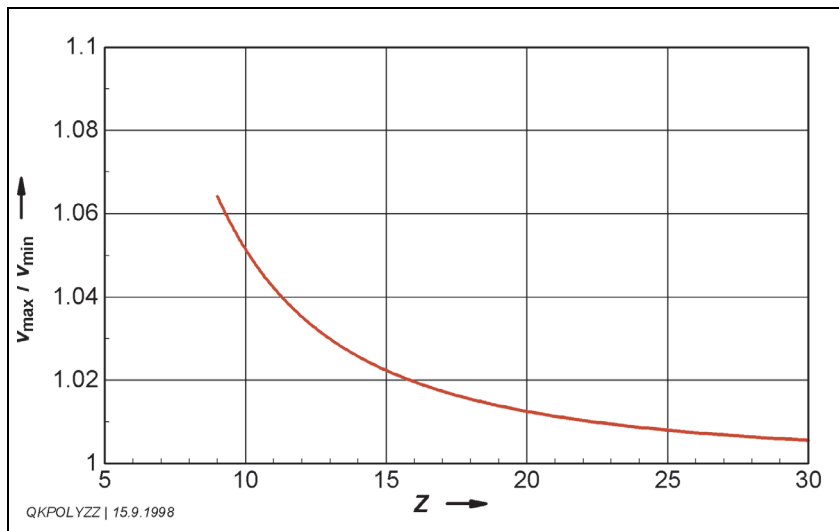


Bild 8.7.2
Polygoneffekt als Ungleichförmigkeit der Kettengeschwindigkeit v_{max} / v_{min} in Abhängigkeit von der Zähnezahl Z des Kettenritzels

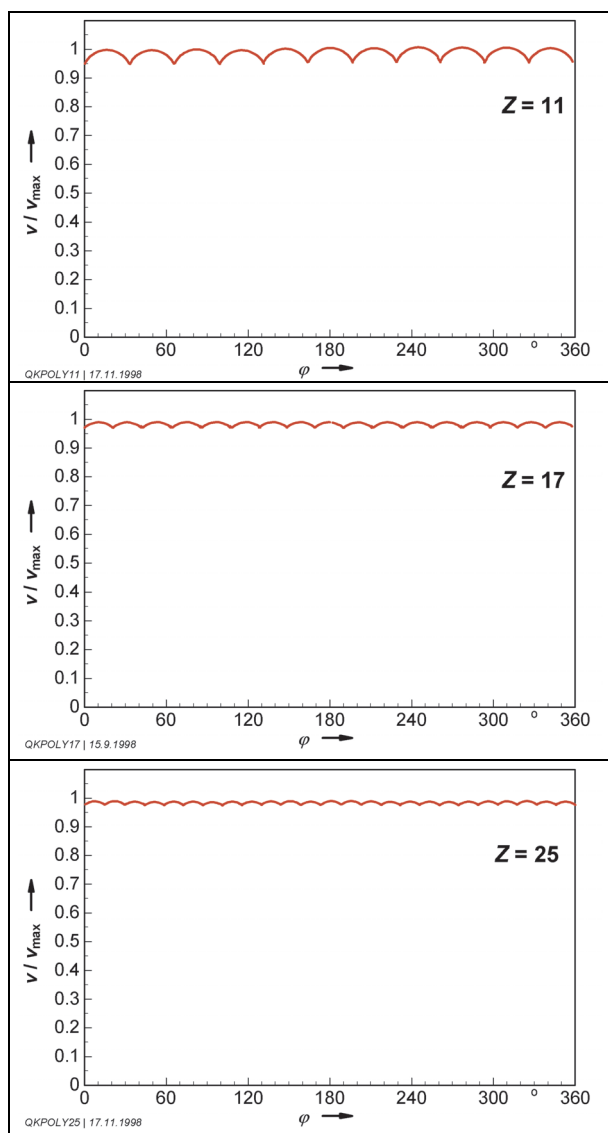


Bild 8.7.3
 Polygoneffekt als Ungleichförmigkeit
 der Kettengeschwindigkeit
 v / v_{\max} in Abhängigkeit vom
 Drehwinkel φ der Arbeitswelle bei
 Kettenrad-Zähnezahlen
 $Z = 11 / 17 / 25$

Die Ungleichförmigkeit der Geschwindigkeit kann also im Extremfall bis zu etwa 5% betragen. Dies ist für manche Antriebsaufgaben störend, meist jedoch belanglos.

Je nach dem Absolutwert der Kettengeschwindigkeit und den beteiligten Massen hat der Polygoneffekt jedoch auch eine dynamische Wirkung; es treten zusätzliche Beschleunigungskräfte auf, die zu einer Überhöhung der Radialbelastung für die Arbeitswelle führen. Dieser Polygoneffekt ist zahlenmäßig schwer zu erfassen, da die theoretisch sehr hohen Spitzenwerte durch die Elastizität der Kette mehr oder weniger stark gedämpft werden.

Die Angaben für die Mindest-Teilkreisdurchmesser von Kettenrädern und die Katalogangaben für die zulässigen Radialkräfte der einzelnen Getriebe gelten daher für übliche Bedingungen; d. h. :

- für die in DIN 8195 empfohlenen Ritzel-Zähnezahlen (mindestens $Z = 17$),
- für niedrige Kettengeschwindigkeit (bis zu etwa 0,5 m/s),
- für übliche Trägheitsfaktoren (F_I bis zu etwa 1,5).

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.8 Drehrichtung und Krafrichtung

Im Zahneingriff der Endstufe wirkt die Kraft F_{RE} (Bild 8.8.1); ihre Richtung ist durch die Anordnung von Ritzel und Rad und durch die Drehrichtung festgelegt, die Höhe hängt vom Drehmoment ab.

Die äußere, auf die Arbeitswelle wirkende Kraft F_{RA} hängt von der Anwendung ab; sie kann jede Richtung am Umfang der Welle annehmen.

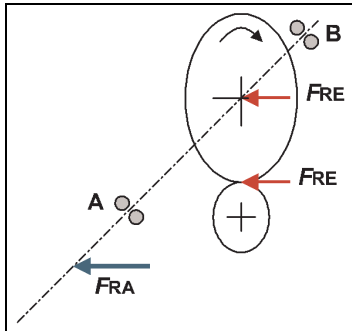


Bild 8.8.1
Richtung der inneren Zahnkraft F_{RE} abhängig von der Drehrichtung;
Richtung der äußeren, nutzbaren Kraft beliebig

Die Wirkung dieser beiden Kräfte kann sich auf das vorwiegend beanspruchte A-seitige Lager ungünstig addieren oder teilweise aufheben. Setzt man eine bestimmte Lagerlebensdauer voraus, dann ergeben sich die in Bild 8.8.2 schematisch gezeigten zulässigen Kräfte in Abhängigkeit von Drehrichtung und äußerer Krafrichtung.

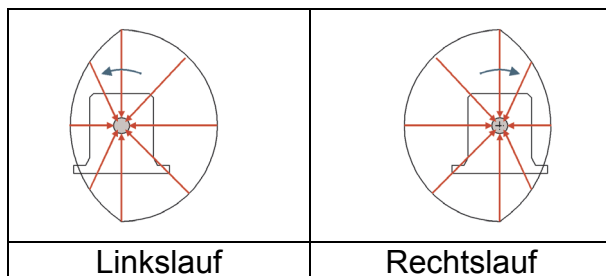


Bild 8.8.2
Prinzipdarstellung der bei gleicher Lagerlebensdauer zulässigen äußeren Radialkräfte in Abhängigkeit von Drehrichtung und Krafrichtung

Fasst man die beiden Darstellungen zusammen, so zeigt sich in Bild 8.8.3, dass für eine einfache Aussage im Katalog oder in anderen Bemessungsgrundlagen nur die Möglichkeit besteht, den kleinsten Grenzwert F_{RN} (Cat) für die ungünstigste Richtung als generellen Grenzwert anzugeben und von den zulässigen Reserven keinen Gebrauch zu machen. Für den Anwender ergibt sich jedoch aus Bild 8.8.3, dass Krafrichtungen etwa quer zur Fußfläche bei üblicher innerer Radanordnungen höhere Kräfte zulassen würden oder zu einer längeren nominellen Lagerlebensdauer führen als Krafrichtungen etwa parallel zur Fußauflage. Einzelne Hersteller geben in einer Darstellung ähnlich Bild 8.8.4 einen Faktor f_{α} an, um den die nominelle Radialkraft in Abhängigkeit von ihrer Wirkrichtung am Umfang der Arbeitswelle erhöht werden darf.

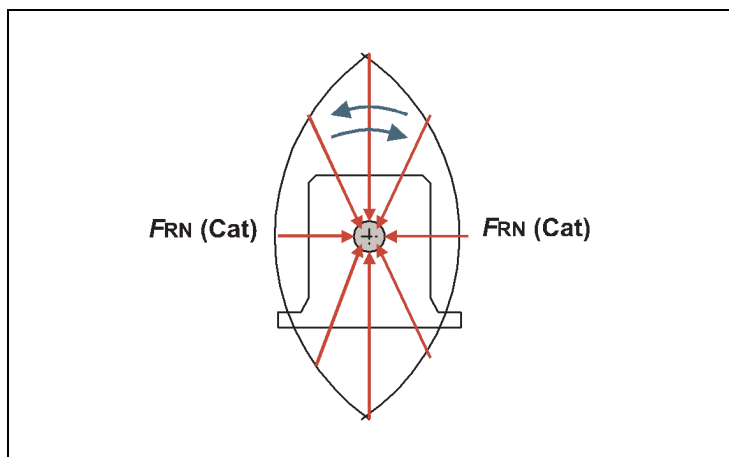


Bild 8.8.3
Klare Katalogangabe F_{RN} meist kleinste zulässige Radialkraft – dadurch Reserven quer zur Fußauflage

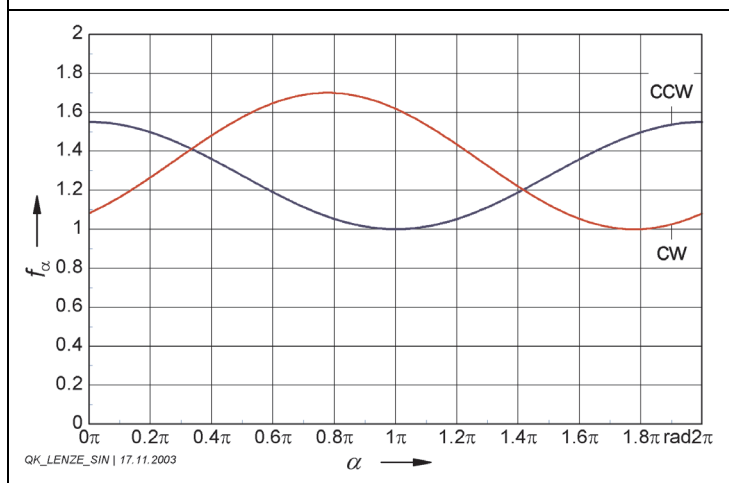


Bild 8.8.4
Wirkrichtungsfaktor f_α für die Erhöhung der zulässigen Kraft auf die Abtriebswelle
cw = Rechtslauf
ccw = Linkslauf

Quelle:
LENZE Drive Systems GmbH

8.9 Optimale Gestaltung des Getriebegehäuses

Bei der Berechnung der zulässigen Radialkraft auf die Arbeitswelle eines Getriebemotors sind u. a. zu beachten:

- Höhe der Radialkraft
- Abstand des Angriffspunkts vom Lager und vom Wellenbund
- Krafrichtung
- Drehrichtung
- innere Radialkraft und Axialkraft (aus Zahnschrägung) am Endrad
- Abstand der Arbeitswellenlager
- Tragzahl der Wälzlager
- Drehzahl der Arbeitswelle.

Trotz dieser vielen Parameter ist die Belastung von Welle und Lager mit konventionellen Rechenmethoden vergleichsweise einfach zu ermitteln.

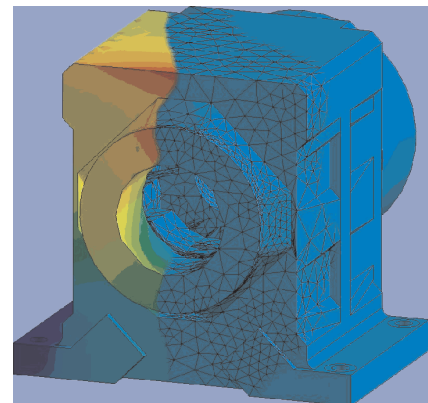
Raumbedarf und Gewicht des Getriebes sind weitgehend vom Gehäuse bestimmt. Zur Optimierung der komplizierten geometrischen Form des Getriebegehäuses kann in komplexen Rechenprogrammen die **Finite-Elemente-Methode (FEM)** verwendet werden. Im Bild 8.9.1 sind drei verschiedene Einzelbilder vereinigt: Rechts das Gehäuse in der normalen Ansicht, in der Mitte die Vernetzung des Modells mit manueller Anpassung in den für die Festigkeitsbetrachtung wichtigen Bereichen; links die durch Farbabstufung dargestellte Beanspruchung des Gehäuses. Die rechnerische Beanspruchung des Gehäuses durch die maximal zulässige Radialkraft von 20 000 N liegt im zulässigen Bereich. Auch unter Worst-case-Annahmen hat das Gehäuse eine ausreichende Sicherheit gegen Bruch.

Bild 8.9.1

Simulation einer von unten auf die Arbeitswelle wirkenden Radialkraft von 20 000 N auf das Getriebegehäuse BG70 der Danfoss-Bauer-Reihe.

Bewertung der Farbskala für die Beanspruchung:

dunkelblau	keine
hellblau	gering
grün	mittel
gelb	hoch
rot	maximal



Der Anwender eines Getriebemotors kann voraussetzen, dass sein Lieferant diese Kriterien bei der **Konstruktion** angewandt hat.

Bei der **Anordnung** des Getriebegehäuses ist zu beachten, dass Grauguss vorzugsweise auf Druck beansprucht werden sollte (Bild 8.3.1.2).

8.10 Computerunterstützung bei der Auswahl

In der konventionellen Version der Auswahlkataloge vieler Hersteller von Getriebemotoren werden die maximal zulässigen, auf Mitte der Wellenlänge bezogenen Radialkräfte zusammen mit den anderen Kenndaten (Drehmoment, Drehzahl) genannt. Mit dem neuen Medium »**elektronischer Katalog**« kann die Auswahl erleichtert werden, indem die tatsächlich auftretende Kraft beim geplanten Übertragungselement (Kette, Zahnrad) ermittelt und mit dem zulässigen Grenzwert – auch unter Berücksichtigung des Kraftangriffspunktes auf der Wellenlänge – verglichen wird (Bilder 8.10.1 und 8.10.2).

Die Arbeit des Planers wird auf diese Weise erleichtert und abgekürzt.

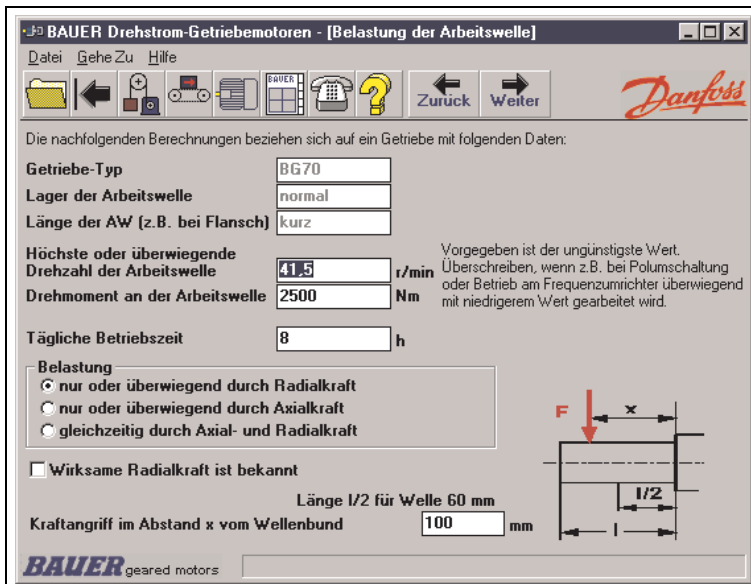


Bild 8.10.1
Eingabe der Randbedingungen zur Ermittlung der Arbeitswellenbelastung aus Radial- und Axialkräften. Auf Wunsch wird die tatsächliche Radialkraft nach den Formeln in Abschnitt 8.3 ermittelt und mit dem zulässigen Wert verglichen

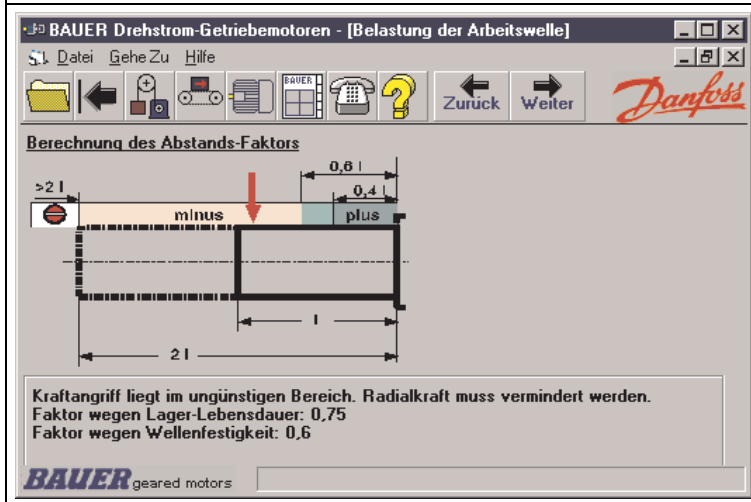


Bild 8.10.2
Ermittlung und Bewertung des Kraftangriffspunktes auf der Wellenlänge. "plus" = günstiger Bereich "minus" = ungünstiger Bereich. Liegt der Angriffspunkt außerhalb der 2fachen Wellenlänge ($>2l$), wird ein Außenlager oder getrennte Lagerung empfohlen

8.11 Zusammenfassung zur Radialbelastung

Für die Bewertung der Belastung der Arbeitswelle eines Getriebemotors sind viele Faktoren zu beachten. **Sekundäre Schutzmaßnahmen gegen Überlastung auf der Basis einer elektrischen oder elektronischen Messung sind wirkungslos.** Entscheidend ist die **richtige Planung**, Bemessung und Anordnung der Übertragungsmittel. Es ist daher wichtig, dass der Hersteller klare und **aussagekräftige Unterlagen** zur Verfügung stellt – möglichst zur Verwendung in einem PC.

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.12 Aufziehen der Übertragungsmittel

Die Arbeitswelle der Antriebe ist meist nach ISO k6 oder m6 geschliffen. Im Zweifelsfall ist die Katalogangabe oder das zugeordnete Maßbild entscheidend. Für einen guten Sitz muß die Bohrung des Übertragungsmittels nach ISO H7 bemessen sein; die Toleranzen sind der Betriebsanleitung zu entnehmen.

Übertragungsmittel müssen sorgfältig und schonend auf die Welle aufgezogen werden – am besten unter Verwendung des hierfür nach DIN 332 in der Wellenstirn vorgesehenen Stirngewindeloches (Bilder 8.12.1 und 8.12.2). Es erleichtert den Arbeitsgang und schont die Bauteile, wenn das aufzuziehende Übertragungsmittel auf etwa 100 °C angewärmt wird.

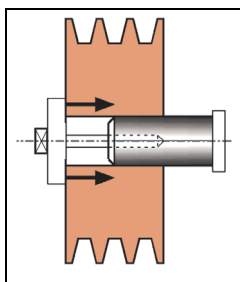


Bild 8.12.1
Aufziehen eines
Übertragungsmittels
auf die Arbeitswelle
mit Hilfe des
Stirngewindelochs

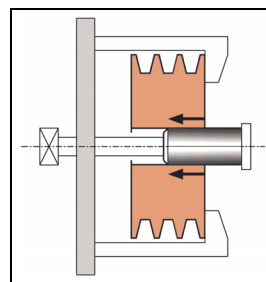


Bild 8.12.2
Abziehen eines
Übertragungsmittels
mit Hilfe einer
handelsüblichen
Abziehvorrichtung

Wenn die anzutreibende Welle nach den Hersteller-Vorschlägen in den entsprechenden Katalogen vorbereitet ist, gestaltet sich auch das Aufziehen und das Abziehen eines Getriebes mit Hohlwelle problemlos (Bild 8.12.3).

<p>Aufdrücken</p>	<p>Axial festlegen</p>	<p>Abdrücken</p>
<p>Ein Gewindebolzen (d) wird in das Stirngewinde der anzutreibenden Welle (AW) eingeschraubt. Über Druckstück (b) und Sicherungsring (c) wird die Hohlwelle (HW) des Aufsteckgetriebes mit Hilfe der Mutter auf die Welle gedrückt.</p>	<p>Das Druckstück (b) wird umgedreht und mit der Innensechskantschraube (a) gegen den Sicherungsring (c) gedrückt. Hohlwelle und anzutreibende Welle sind gegenseitig festgelegt.</p>	<p>Ein Abdrückstück (f) wird zwischen Wellenstirn und Sicherungsring (c) angebracht. Die Abdrückschraube (e) drückt gegen die Wellenstirn der anzutreibenden Welle (AW) und zieht die Hohlwelle (HW) des Aufsteckgetriebes ab.</p>

Bild 8.12.3 Montagehilfen für Aufsteckgetriebe

8.13 Wuchtung von Motoren und Verbundteilen

Dieser Abschnitt erläutert die Hintergründe der neuen Norm, vergleicht die bisher übliche und jetzt für alle Hersteller verbindliche neue Festlegung und gibt Hinweise für die fachgerechte Montage von »Verbundteilen« (Kupplungen, Riemenscheiben, Schwunräder) auf der Welle von Normmotoren.

Das Thema »Halbkeilwuchtung« ist in [3.10] ausführlich dargestellt.

8.13.1 Übliche Paßfedervereinbarungen

Wenn Wellen oder Rotoren mit Paßfedern (zum Beispiel von drehenden elektrischen Maschinen) und die darauf zu montierenden Verbundteile getrennt gefertigt und erst am Aufstellungsort zusammengefügt werden, so muß die Wuchtungsmethode vereinbart werden. Derzeit bestehen drei Vereinbarungen:

- Voll-Paßfeder-Vereinbarung (»Vollkeil-Wuchtung«)
- Halb-Paßfeder-Vereinbarung (»Halbkeil-Wuchtung«)
- Keine-Paßfeder-Vereinbarung (Wuchtung ohne Paßfeder).

8.13.2 Neue internationale Festlegungen

Die Halb-Paßfeder-Vereinbarung wurde 1989 mit ISO 8821 eingeführt und 1991 als DIN ISO 8821 in das deutsche Normenwerk übernommen. Für die Umsetzung dieser für Maschinen aller Art gültigen Norm wurde zunächst das Jahr 1990 genannt. Für drehende elektrische Maschinen galt seit 1978 ein CENELEC-Harmonisierungsdokument (HD) mit der Vollkeilwuchtung, das 1992 durch ein neues HD mit der Halbkeilwuchtung abgelöst wurde. Als Ende der Übergangsfrist für die Fertigung von elektrischen Maschinen mit Vollkeilwuchtung wurde dort der 01.06.1998 festgelegt. Für drehende elektrische Maschinen wurde die allgemeine ISO-Forderung mit DIN EN 60034-14 / VDE 0530 Teil 14 [1.14] formal umgesetzt.

8.13.3 Kennzeichnung und Liefervereinbarung

Die Anwendung der Halbkeil-Wuchtung muß in der Nähe der Paßfedernut bleibend mit dem **Buchstaben »H«** gekennzeichnet werden – bei Motoren auf der Stirnfläche des Wellenstumpfes, bei Verbundteilen auf der nach der Montage sichtbaren Stirnfläche. Als zulässige Verfahren nennt die Norm Metallstempel, Schwing-Graviergeräte und unverwischbare Tinte. Wenn die Stirnfläche der Welle zu klein ist, nennt die Norm den Nutgrund als (aus Sicht der Praxis wenig geeignete) Alternative. Das zuständige Normen-Komitee sieht eine Kennzeichnung auf dem Leistungsschild als durchaus sinnvoll an.

Die Anwendung der **Vollkeil-Wuchtung** wurde bisher nicht gekennzeichnet; diese Praxis kann in Sonderfällen nach Vereinbarung zwischen Besteller und Hersteller beibehalten werden. Wenn diese Wuchtungsmethode gekennzeichnet werden soll, so ist als Kennzeichen »F« festgelegt (Full-key convention).

Seit 01.06.1998 sollte für die Hersteller von Motoren und Verbundteilen die Halbkeil-Wuchtung als Normalausführung gelten. **Eine abweichende Sonderausführung ist in jedem Einzelfall zu vereinbaren.**

8 Wahl der Übertragungsmittel

8.13.4 Mögliche Montagefehler

Aus der neuen Wuchtvereinbarung resultieren vor allem in der Einführungszeit viele mögliche Montagefehler. Drei naheliegende Fehlermöglichkeiten werden beschrieben:

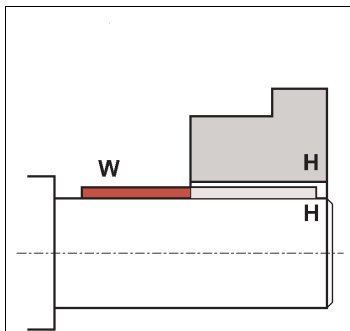


Bild 8.13.4.1

Fehlermöglichkeit: Welle mit Halbkeil-Wuchtung
Nabe mit Halbkeil-Wuchtung.

Längen-Überstand der Paßfeder erzeugt unausgeglichene Masse W.

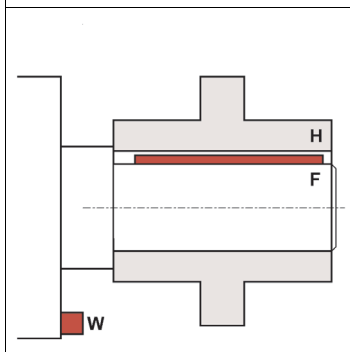


Bild 8.13.4.2

Fehlermöglichkeit: Welle mit Vollkeil-Wuchtung
Nabe mit Halbkeil-Wuchtung

Durchmesser-Überstand der Paßfeder ist am Blechpaket durch Zusatzgewicht »W« bezogen auf den Rotor ausgeglichen.

Das Wuchtgewicht W wäre bei einem Motor nach Methode »H« unnötig – es erzeugt bei dieser Kombination eine Unwucht.

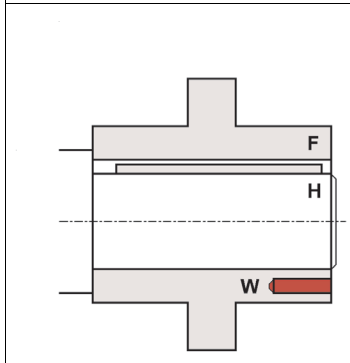


Bild 8.13.4.3

Fehlermöglichkeit: Welle mit Halbkeil-Wuchtung
Nabe mit Vollkeil-Wuchtung.

Fehlende Masse der Wuchtbohrung W in der Nabe wäre nach Methode »H« im Verbundteil unnötig – sie erzeugt bei dieser Kombination eine Unwucht.

9 Wälzlagerschmierung

Der Schmierstoff – im Bereich der Normmotoren in der Regel Fett – soll eine metallische Berührung zwischen Wälzkörpern, Laufbahnen und Käfig verhindern und damit den Verschleiß verringern. Gleichzeitig übernimmt der Schmierstoff den Korrosionsschutz für diese Teile. Wenn dem Lager gerade die Schmierstoffmenge zugeführt wird, die für die Schmierung ausreicht, stellt sich die günstigste Betriebstemperatur ein. Schnellaufende, überschmierte Lager erwärmen sich unnötig – das Fett altert und verliert seine Schmiereigenschaft.

Das Fett soll aber auch gegen Fremdkörper und Feuchtigkeit abdichten – deshalb sollten Lager und Gehäuse bei niedrigen Drehzahlen (z. B. an der Arbeitswelle von Getriebemotoren) ganz mit Fett gefüllt sein. Weitere Hinweise zum wichtigen Thema »Abdichtung« im Abschnitt 3.2.2.3.

9.1 Schmierstoffsorte

Für die Erstfüllung der Wälzlager von Elektromotoren im Normgrößenbereich wird meist ein lithiumverseiftes Schmierfett mit mineralischem Grundöl nach DIN 51825 verwendet. Für die Konsistenz wird unter normalen Bedingungen die NLGI-Klasse 2 oder 3 gewählt. Ein solches Fett wird nach DIN 51502 z.B. mit K-2K oder K-3K bezeichnet. Für besondere Einsatzbedingungen, wie extrem tiefe oder hohe Umgebungstemperaturen, kommen auch Sonderfette zur Anwendung, auf die dann durch besondere Beschriftung oder Beschilderung am Motor hingewiesen sein sollte. Die verschiedenen **Penetrationsbereiche** sind nach NLGI (National Lubricating Grease Institute) und DIN 51818 in **Konsistenzklassen** gemäß Tabelle 9.1 eingeteilt. Die Beschreibung des Zustandes ist nicht Gegenstand der Norm.

Tabelle 9.1 Einteilung der Konsistenzklassen für Schmierfette nach NLGI

NLGI-Konsistenzklasse	Penetration	Beschreibung
000	445 ... 475	fast flüssig
00	400 ... 430	halbflüssig
0	355 ... 385	teigig
1	310 ... 340	sehr weich
2	265 ... 295	weich
3	220 ... 250	mittelfest
4	175 ... 205	fast fest
5	130 ... 160	fest
6	85 ... 115	besonders fest

Übliche Klassen für Wälzlagerschmierung: 2 und 3

9.2 Schmierfrist

9.2.1 Schmierfrist nach Angaben der Wälzlagerhersteller

Einrichtungen zur Nachschmierung von Motorlagern – also Schmiernippel und Fettmengenregler – sind meist nur bei größeren Einheiten vorgesehen; im unteren und mittleren Leistungsbereich genügt die Erstfüllung für eine relativ lange Laufzeit. Diese Schmierfrist ist von Lagerdurchmesser, Art der Wälzkörper, Drehzahl, Temperatur, Belastung und Verschmutzung abhängig.

Da ein Teil dieser Einflüsse nur schwer erfassbar ist und darüber hinaus das Ende der Schmierfähigkeit nicht einfach zu definieren ist, sind für die Schmierfristen von Wälzlagern zum Teil recht unterschiedliche Angaben zu finden.

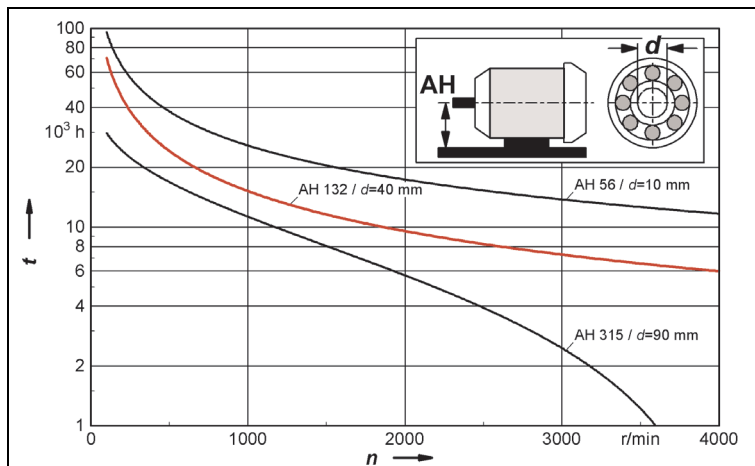


Bild 9.2.1.1
Schmierfristen für Wälzlager der Reihe 62 in Abhängigkeit von Lagerbohrung d , Motor-Achshöhe AH und Drehzahl n nach Angaben im SKF-Hauptkatalog

Im Bild 9.2.1.1 wurden die Empfehlungen eines Wälzlagerherstellers auf den Bereich von Normmotoren umgewertet. Die hier vorgeschlagenen Schmierfristen liegen nach allgemeiner Erfahrung und auch nach anderen Veröffentlichungen dieses Herstellers recht niedrig und damit auf der sicheren Seite. Das auf drei Achshöhen (AH) reduzierte Diagramm soll den starken **Einfluss der Drehzahl** zeigen, der sich vor allem bei den großen Baugrößen (im Beispiel $AH = 315$) bemerkbar macht.

Derselbe Wälzlagerhersteller berichtet in seiner Werkszeitschrift über einen Langzeitversuch unter definierten Einsatzbedingungen, bei dem wesentlich längere Schmierfristen zugelassen wurden. Voraussetzung für diese derzeit als obere Grenze anzusehenden Wartungsintervalle ist jedoch, dass die Umgebungsbedingungen günstig sind. Hierzu gehören vor allem die Vermeidung von Schmutz und Wasser und eine relativ niedrige Betriebstemperatur unter etwa 50 °C .

Wertet man diese Empfehlungen für den praxisüblichen 4poligen Drehstrom-Asynchronmotor mit 1500 r/min um, so ergibt sich das in Bild 9.2.1.2 dargestellte Streuband für die Schmierfrist t (in Jahren) über der Nennleistung P_N . Zwischen den Grenzwerten liegt eine Spanne von $1 : 3$ bis $1 : 5$; dies zeigt, dass Schmierfristen von Wälzlagern nicht als absolute Größe angegeben werden können, sondern sehr stark von den Einsatzbedingungen abhängen. Ob man sich im Einzelfall mehr an die obere oder an die untere Grenze hält, hängt nicht zuletzt auch von der für ein Gerät oder eine Anlage verlangten Betriebssicherheit ab.

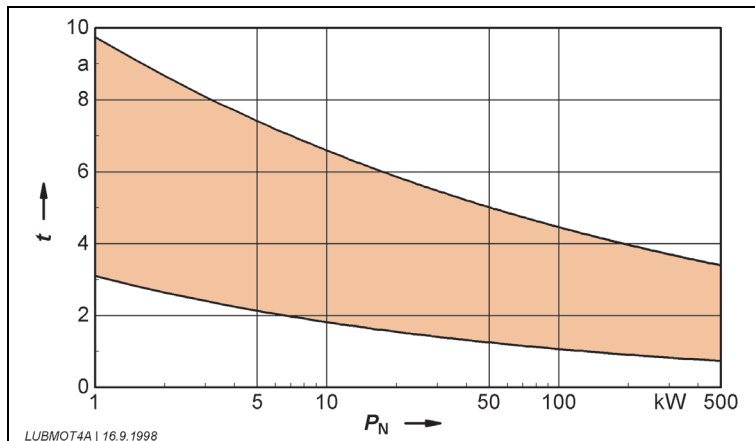


Bild 9.2.1.2
Wälzlager-Schmierfrist t
(in Jahren)
bei 4-poligen Drehstrom-
Käfigläufermotoren
in Abhängigkeit von der
Bemessungsleistung P_N

9.2.2 Schmierfrist nach Anforderungen des VIK

Der »Verband der industriellen Kraftwirtschaft (VIK)« hat »Technische Anforderungen für Drehstrom-Asynchronmotoren« ausgearbeitet, die für viele Betriebe der Chemie und der Grundstoffindustrie als Richtlinie dienen und die in diesem Zusammenhang interessant sind:

"Es sind Lager mit Lebensdauerschmierung mit einer Gebrauchsdauer von mindestens 20 000 Betriebsstunden bei 4- und mehrpoligen Motoren und 10 000 Betriebsstunden bei 2poligen Motoren bei einer Kühlmitteltemperatur von 40 °C vorzusehen.

Bei einer Absenkung der Kühlmitteltemperatur um 15 K ist eine Gebrauchsdauer von etwa 40 000 Betriebsstunden bei 4- und mehrpoligen Motoren und etwa 20 000 Betriebsstunden bei 2poligen Motoren zu erwarten.

Motoren ab Achshöhe 250 können Nachschmiereinrichtungen mit Fettmengenregler erhalten. Die Nachschmierfrist soll möglichst 5000, muss jedoch mindestens 4000 Betriebsstunden bei 4- und mehrpoligen Motoren und möglichst 2500, jedoch mindestens 2000 Betriebsstunden bei 2poligen Motoren bei einer Kühlmitteltemperatur von 40 °C betragen.

Bei einer Absenkung der Kühlmitteltemperatur um 15 K ist eine Nachschmierfrist von etwa 10 000 bzw. 8000 Betriebsstunden bei 4- und mehrpoligen Motoren und etwa 5000 bzw. 4000 Betriebsstunden bei 2poligen Motoren zu erwarten."

Auch hier zeigt sich also – ähnlich wie bei der Alterung der Wicklungsisolierung – der starke Einfluss der Betriebstemperatur.

9.2.3 Schmierfrist nach Entwurf für Betriebsart S1

Unter der Kurzbezeichnung »Betriebsart S1« gab es den Entwurf eines Beiblattes 1 zu DIN VDE 0530 mit dem Titel »Leitfaden für Installations- und Betriebsbedingungen für Niederspannungs-Käfigläufer-Induktionsmotoren für allgemeine Zwecke mit Kugel- oder Rollenlagern und Betriebsart S1 und Leistungen bis 315 kW«. Zum Thema »Schmierfrist« ist hier folgendes gesagt: "Sind Herstellerangaben nicht vorhanden, beträgt der Revisionsabstand bei Aufstellung im Freien nicht mehr als 2,5 Jahre oder bei Innenraum-Aufstellung nicht mehr als 4 Jahre. Diese Angabe dient der Information des Betreibers, sie begründet keinen Garantieanspruch."

9.3 Temperaturbereich

Die untere Grenze des zulässigen Temperaturbereichs ergibt sich aus der Forderung nach einem sicheren Anlauf. Bei einem kleinen Motor für extrem »weichen« Anlauf – z. B. an einem elektronischen Sanftanlaufgerät – kann man nicht die gleichen tiefen Temperaturen zulassen wie bei einem relativ großen Antrieb für Direkteinschaltung am starren Netz. Je höher die Temperatur, um so rascher altert der Schmierstoff. Die entstehenden Alterungsprodukte beeinträchtigen die Schmierung. Da Alterung immer ein Ergebnis von Temperatur *und* Zeit ist, sind beide Faktoren entsprechend zu berücksichtigen. Für die meistverwendeten lithiumverseiften Fette empfiehlt SKF einen **Gebrauchstemperaturbereich** von –30 bis +110 °C. Unter Berücksichtigung der Lagererwärmung ergeben sich Richtwerte für die **Umgebungstemperatur** nach Bild 9.3.

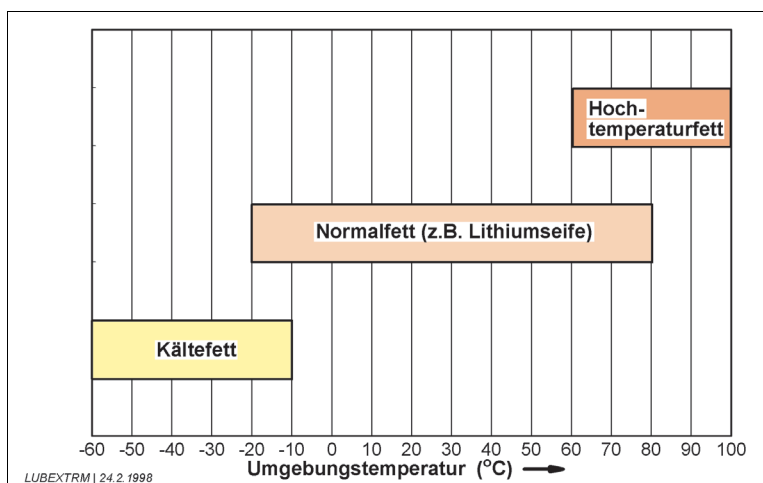


Bild 9.3
Richtwerte für den
Temperatur-Einsatzbereich
von üblichen und speziellen
Wälzlagerschmierstoffen

9.4 Belastbarkeit

Der hohe Entwicklungsstand aller namhaften Schmierstoffhersteller lässt nur graduelle Unterschiede zwischen den einzelnen Marken erwarten. Mit Bild 9.4 soll nur eine der vielen Prüfungen angedeutet werden, die bei der Entwicklung eines Schmierstoffs durchgeführt werden und die der Anwender voraussetzen darf.

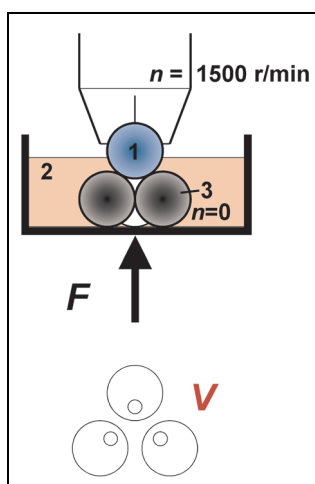


Bild 9.4
Prüfung der Belastbarkeit von Wälzlagerfetten mit dem
SHELL-Vierkugelapparat (VKA)

- 1 eine rotierende Kugel
- 2 Prüfmuster (Fett)
- 3 drei feststehende Kugeln
- F Belastung
- V Verschleiß als Maßstab der subjektiven Beurteilung

9.5 Nachschmiereinrichtung

Aus dem Zwang zur Rationalisierung auch im Instandhaltungsbereich ergibt sich die Forderung, für elektrische Maschinen möglichst Wälzlager mit Dauerschmierung zu verwenden. Das Diagramm 9.1 zeigt allerdings, dass die zu erwartenden Schmierfristen mit zunehmenden Lagerdurchmessern (= Achshöhen) und hohen Drehzahlen relativ kurz sind. Größere Maschinen haben daher Nachschmier-einrichtungen (z. B. nach Bild 9.5.1) für die Wälzlager.

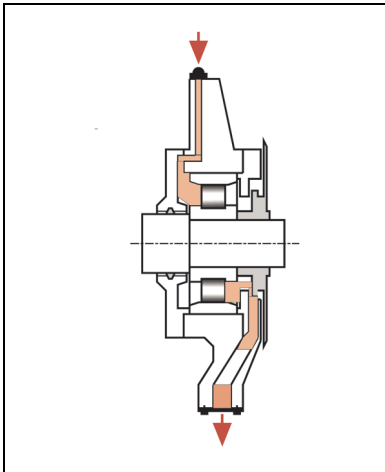


Bild 9.5.1
Schema einer Nachschmiereinrichtung für Wälzlager bei Elektromotoren ab Achshöhe 200

Quelle : Danfoss Bauer GmbH

In den »Technischen Anforderungen für Drehstrom-Asynchronmotoren« des VIK (Verband der industriellen Kraftwirtschaft e.V.) werden Nachschmiereinrichtungen mit Fettmengenregler bei Motoren ab Achshöhe 250 zugelassen. Die katalogmäßige Serienausführung der meisten Hersteller von Normmotoren entspricht dieser Forderung (Tabelle 9.5.2).

Tabelle 9.5.2

Nachschmiereinrichtung als serienmäßige Ausführung nach Katalogangaben von sieben deutschen Herstellern von Normmotoren

Fabrikat	A c h s h ö h e				
	200	225	250	280	315
A	□	□	□	■	■
B	□	□	□	□	■
C	□	□	□	■	■
D	□	□	□	□	■
E	0	0	0	■	■
F	0	□	□	□	■
G	0	0	■	■	■

- 0 Nachschmiereinrichtung nicht lieferbar
- Nachschmiereinrichtung als Sonderausführung gegen Mehrpreis lieferbar
- Nachschmiereinrichtung ist Normalausführung

9.6 Verträglichkeit

Bei nachschmierbaren Lagern muss auf die Verwendung von chemisch und schmiertechnisch verträglichen Schmierstoffsorten geachtet werden, weil sonst unvorhersehbare Veränderungen der Konsistenz und Schmiereigenschaften auftreten können. Dies gilt besonders für Schmierfette mit synthetischen Grundölen. Die Tabelle 9.6 ist einer Veröffentlichung des NLGI (National Lubricating Grease Institute) entnommen:

Tabelle 9.6 Verträglichkeit von Wälzlagerschmierstoffen (nach NLGI)

Seifenbasis ⇒ ↓		A	B	C	D	E	F	G	H
Aluminium-Komplex	A	■	0	0	0	0	0	■	0
Barium-Komplex	B	0	■	0	0	0	0	0	0
Kalzium	C	0	0	■	0	■	■	■	0
Kalzium-Komplex	D	0	0	0	■	0	0	■	■
Kalk	E	0	0	■	0	■	0	0	0
Lithium	F	0	0	■	0	0	■	■	0
Lithium-Komplex	G	■	0	■	■	0	■	■	0
Polyharnstoff	H	0	0	0	■	0	0	0	■

0 - unverträglich
 ■ - verträglich

9.7 Lagerabdichtung

Aus Abschnitt 3.2.2.3 wird deutlich, dass die Gebrauchsdauer eines Wälzlagers in hohem Maße von der Abdichtung gegen äußere Einflüsse (Staub, Wasser) abhängt. Bei Getriebemotoren ist nur das B-seitige Lager exponiert; es wird deshalb bei der in den Bildern 9.7.1 und 9.7.2 gezeigten Konstruktion durch einen Wellendichtring geschützt.

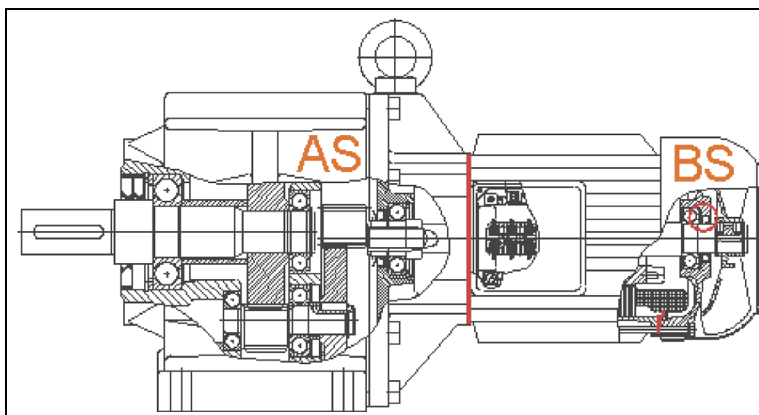


Bild 9.7.1
 Lager AS und BS eines Getriebemotors mit unterschiedlicher Beanspruchung durch äußere Einflüsse

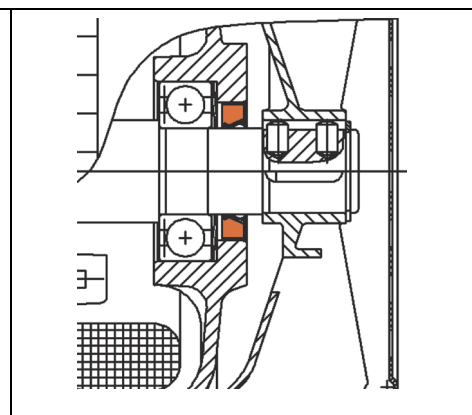


Bild 9.7.2
 BS-Lager mit Abdichtung durch Wellendichtring
 Bild: Danfoss Bauer

10 Getriebeschmierung

Im Gegensatz zu den teilweise genormten Elektromotoren gibt es bei den Untersetzungsgetrieben große Unterschiede in Konstruktion, Ausnutzung und Ausführung. Die nachfolgenden, allgemein gehaltenen Hinweise sind daher in jedem Fall durch die speziellen Wartungsvorschriften für die jeweilige Bauart zu ergänzen.

10.1 Penetration von Getriebefließfetten

Eine wichtige Voraussetzung für die Wirksamkeit einer Fettschmierung in Getrieben ist die **Fließfähigkeit** des Schmierstoffes, da zu feste Fette (z. B. Wälzlagerfette!) abgeschleudert werden, also sog. Tunnel bilden und zwangsläufig zum Trockenlauf der Räder führen.

Als Maßzahl für das Fließvermögen eines Fettes kann die **Penetration** benutzt werden: Sie wird nach DIN 51804 ermittelt, indem die Spitze eines Prüfkonus auf die Oberfläche der Fettprobe aufgesetzt und seine Eindringtiefe innerhalb von 5 s gemessen und in Zehntelmillimetern angegeben wird. Die Penetrationszahl stellt also die »**Weichheit**« eines Fettes dar (Tabelle 9.1 und Bild 10.1.1).

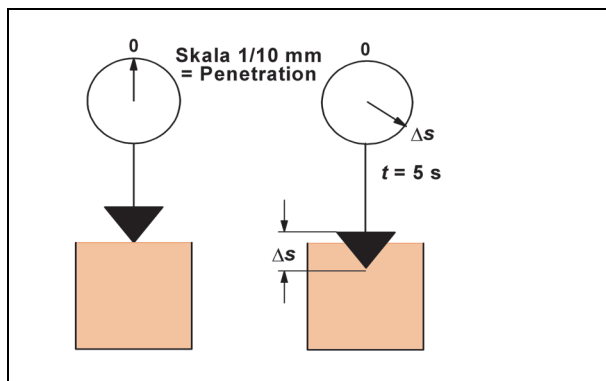


Bild 10.1.1
Ermittlung der Penetration eines Schmierfettes mit einem Prüfgerät nach DIN 51804

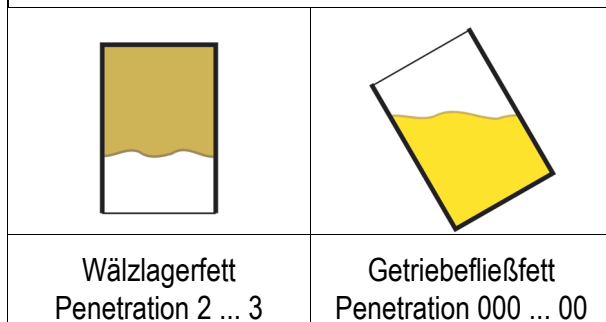


Bild 10.1.2
Praxistest zur Unterscheidung von Wälzlagerfett und Getriebefließfett

Während für die Schmierung von Wälzlagern allgemein Fette der Penetrationsklasse 2 oder 3 verwendet werden, liegen die für eine Getriebeschmierung anwendbaren Getriebefließfette in den Klassen 00 oder 000 (Bild 10.1.2). Meist ist die Penetrationsklasse Bestandteil der Sortenbezeichnung; sie sollte als wichtige Grundvoraussetzung stets beachtet werden.

Der im Vergleich zu Getriebeölen geringe Bedarf hat dazu geführt, dass Qualität und Verfügbarkeit der Getriebefließfette nicht im gleichen Maße weiterentwickelt wurden wie die der Öle. Fettschmierung wird daher nur noch bei **kleinen** Untersetzungsgetrieben und in Sonderfällen angewandt.

10.2 Viskosität

Die Viskosität (**Zähigkeit**) eines Öls ist zusammen mit dem Viskositäts-Temperatur-Verhalten (dargestellt im VT-Diagramm) vor allem für den Anlauf bei niedrigen Umgebungstemperaturen und für die Abdichtbarkeit bei hohen Betriebstemperaturen maßgebend. Für die **Druckaufnahmefähigkeit** ist sie bei langsamlaufenden, hoch belasteten Getrieben von sekundärer Bedeutung. In Bild 10.2 sind einige in der Praxis gebräuchliche Viskositätsklassen gegenübergestellt. Die Einteilung in **ISO-Viskositätsklassen** (ISO VG) wurde international eingeführt und wird von den Mineralöllieferanten angewandt. Die früher gebräuchlichen **Engler-Grade** wurden in den Vergleich einbezogen, weil sie mit ihrer Relation zur Auslaufzeit von Wasser (1 °E) sehr anschaulich sind.

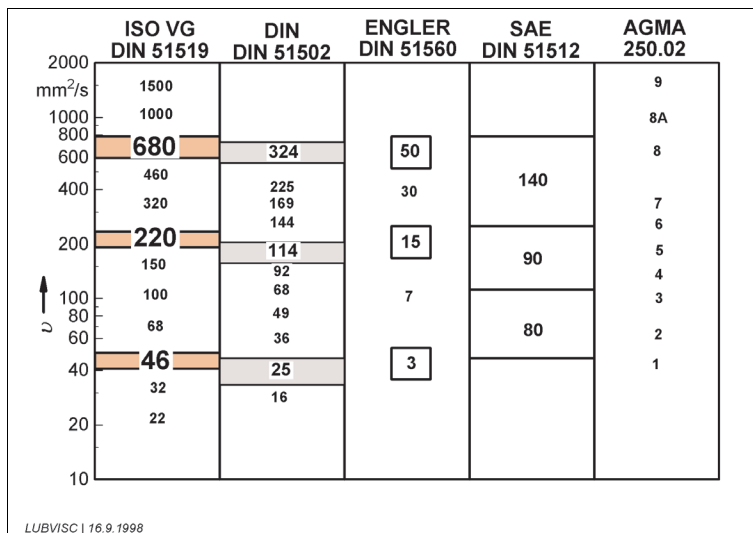


Bild 10.2
Vergleich von international
gebräuchlichen
Viskositätsklassen
(kinematische Viskosität ν
bei Bezugstemperatur
40 °C)

Das Viskosität-Temperatur-Verhalten eines Öls, also die ansteigende Viskosität mit abnehmender Temperatur, wird im VT-Diagramm dargestellt. Die Steigung dieser Linie wird als **Viskositätsindex (VI)** bezeichnet. Mineralöle haben die in Bild 10.6 gezeigte, grundsätzlich ähnliche Tendenz, die auch mit sog. VI-Verbesserern nicht wesentlich geändert werden kann. Bei gewissen synthetischen Ölen ist ein flacherer Verlauf der VT-Linie zu erwarten, weshalb diese teuren Sorten gelegentlich bei stark schwankenden Betriebstemperaturen verwendet werden (s. Abschn. 10.6).

10.3 Hochdruckeigenschaften von Schmierstoffen

Bei Gleitlagern bildet sich zwischen der schnell umlaufenden Welle und der Lagerschale ein mit Schmierstoff gefüllter **Keilspalt**. Abhängig von Gleitgeschwindigkeit und Viskosität wird ein Staudruck erzeugt, der die Last trägt (Bild 10.3.1).

Ein vergleichbarer Vorgang findet zwischen zwei Zahnflanken statt. Der **hydrodynamische Traganteil** ist in geringem Maß von der Viskosität des Öls und entscheidend von der Geschwindigkeit (Drehzahl) abhängig. Bild 10.3.2 zeigt, dass im markierten Drehzahlbereich der Getriebemotoren dieser hydrodynamische Effekt sehr wenig zur Tragfähigkeit beiträgt.

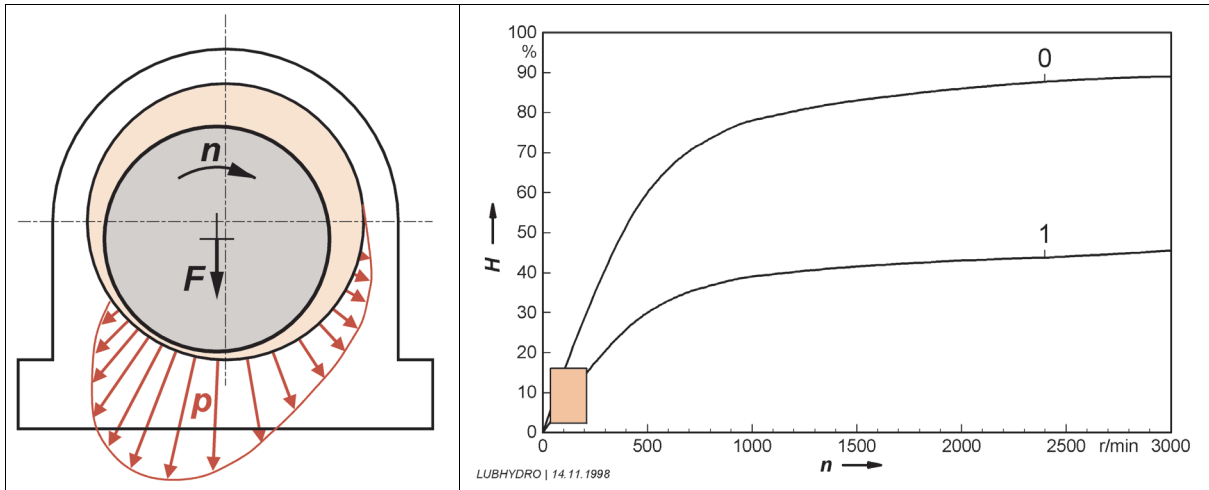


Bild 10.3.1
Prinzip der Ausbildung eines (elasto)hydrodynamischen Druckes p in einem Gleitlager

Bild 10.3.2
Hydrodynamischer Traganteil H zwischen Zahnflanken bei Drehzahlen n und Belastungen (0 ... 1).
Hauptanwendungsbereich der Getriebemotoren markiert (nach *Bartz*: Getriebebeschmiierung).

Da bei Untersetzungsgetrieben in den langsamlaufenden Stufen kein hydrodynamischer Schmierkeil zwischen den Zahnflanken zustande kommt, werden in moderne Hochleistungsschmierstoffe chemisch wirkende Zusätze eingebracht, die an der Flankenoberfläche eine Grenzschicht aufbauen und so auch unter hohem Zahndruck den metallischen Kontakt verhindern: Das Öl wird »gedopt« oder »legiert«. Die Wirksamkeit dieser **Hochdruckzusätze** oder **EP-Additivs** (EP = extreme pressure) kann durch verschiedene Versuchsanordnungen geprüft werden. Am besten übertragbar auf die Praxis sind die Ergebnisse der in DIN 51354 genormten **FZG-Zahnradverspannungsprüfung** (FZG = Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau).

In Bild 10.3.3 ist das Prinzip der FZG-Prüfung gezeigt: In einem Prüfgetriebe laufen die definierten Prüfräder mit Tauchschmierung durch den zu prüfenden Schmierstoff bei konstanter Drehzahl und festgelegter Anfangstemperatur. Die Beanspruchung der Zahnräder wird an der Verspannungskupplung in 12 Kraftstufen gesteigert. Nach jeder Laststufe wird die Gewichtsabnahme der Prüfräder durch Verschleiß bestimmt und das Erscheinungsbild der Flankenschäden beschrieben (Bild 10.3.4).

Hochwertige Schmierstoffe überstehen die Prüfung bis zur Kraftstufe 12 ohne Umsprung in die Verschleißhochlage (Bild 10.3.5).

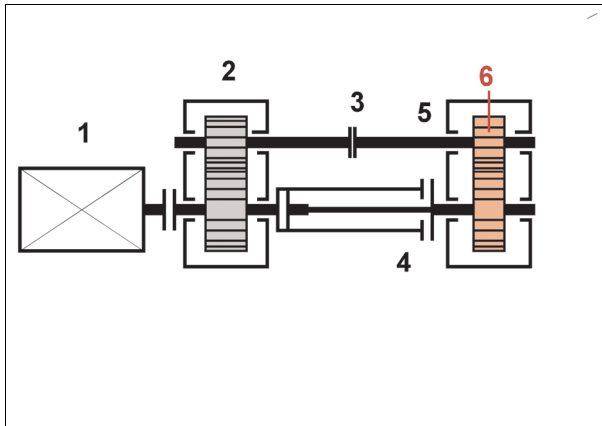


Bild 10.3.3
Prinzip der
FZG-Zahnradverspannungsprüfung
für Schmierstoffe nach DIN 51354

- 1 Elektromotor
- 2 Übertragungsgetriebe
- 3 Verspannungskupplung
- 4 Drehmoment-Messkupplung
- 5 Prüfgetriebe
- 6 Prüfräder



Bild 10.3.4
Prüfräder im FZG-Prüfstand zur Prüfung
der Hochdruckeigenschaften von
Schmierstoffen unter extremen
Bedingungen wegen ungünstiger
Zahnform

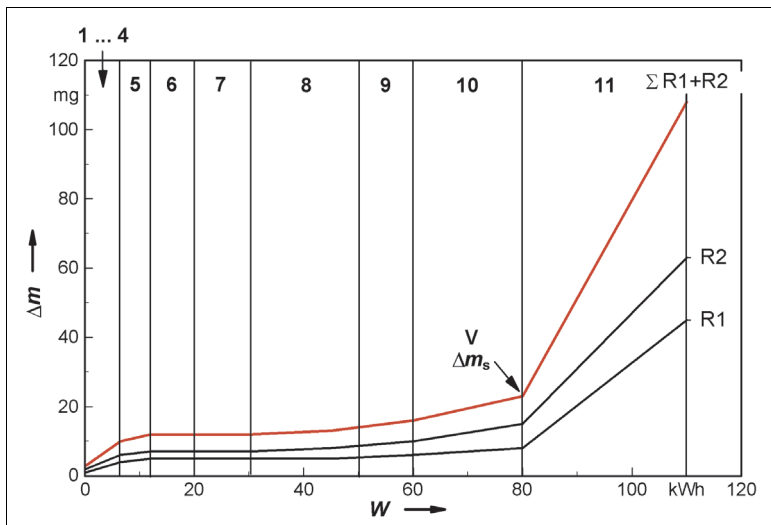


Bild 10.3.5
Verschleiß Δm der Prüfräder
(Ritzel R1 und Rad R2) beim
Durchlaufen der Kraftstufen
(1 ... 11) mit Umsprung in
die Verschleiß-Hochlage
(Riefen oder Fresser) bei
Punkt V (Kraftstufe 10) in
Abhängigkeit von der
insgesamt übertragenen
Arbeit W

Die Mindestanforderungen an die Eigenschaften von Schmierstoffen für die Zweitbefüllung sind in DIN 51517-3 für Schmieröle CLP beschrieben oder können den Betriebsanleitungen des Getriebeherstellers (meist in Form von konkreten Sortenangaben) entnommen werden.

Da diese Unterlagen erfahrungsgemäß im entscheidenden Augenblick in der Werkstatt nicht zur Verfügung stehen, ist es zweckmäßig, wenn am Getriebe ein Hinweisschild angebracht ist (Bilder 10.3.6 und 10.3.7).

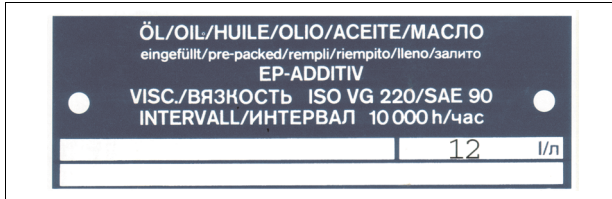


Bild 10.3.6
Beispiel für ein früher verwendetes Hinweisschild für den Schmierstoffwechsel mit international verständlichen Abkürzungen



Bild 10.3.7
Beispiel für die derzeit verwendeten Hinweise auf dem Hauptschild mit international verständlichen Abkürzungen

10.4 Alterungsbeständigkeit von Schmierstoffen

Unter dem Einfluss von Temperatur und Zeit ändern sich die Eigenschaften eines Schmierstoffs – er altert. Vor allem bei Antrieben, für die wegen schlechter Zugänglichkeit eine regelmäßige Wartung in Frage gestellt ist, empfiehlt sich daher die Verwendung von Schmierstoffen mit hoher Alterungsbeständigkeit, also mit einem sehr langsamen Abfall der Anfangseigenschaften.

Definiert man als **Lebensdauer** eines Schmierstoffes die Gebrauchsdauer bis zum Unterschreiten bestimmter Mindestwerte von Druckaufnahmevermögen und anderen Kenndaten, so gilt die Faustregel, dass eine Erhöhung der Betriebstemperatur um etwa 10 K die Lebensdauer **auf etwa die Hälfte** senkt. Diese Regel ist wichtig beim Einsatz von Getrieben bei hohen Umgebungstemperaturen über etwa 30 °C. In diesen Anwendungsfällen empfiehlt sich die Einhaltung oder Verkürzung der üblichen Wartungsfristen, vor allem wenn der Antrieb dauernd unter Vollast arbeitet.

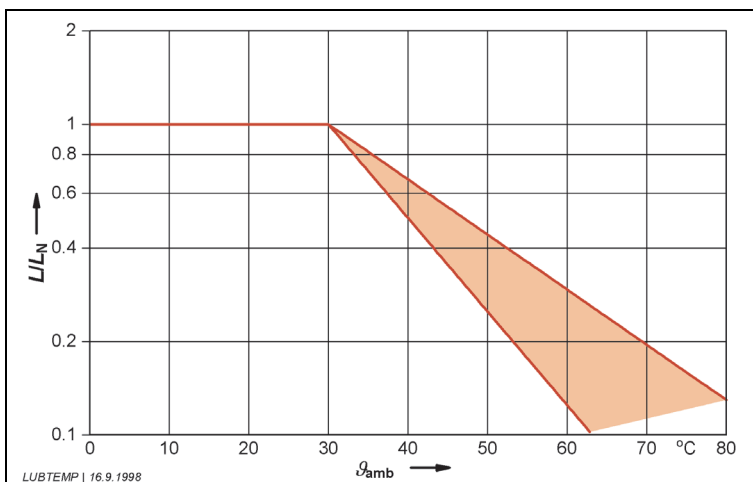


Bild 10.4
Relative Lebensdauer L/L_N eines Schmierstoffs bei verschiedenen Umgebungstemperaturen ϑ_{amb}

Der theoretische Zusammenhang zwischen Temperatur und Lebensdauer eines Schmierstoffs nach Bild 10.4 kann selbstverständlich nur die Tendenz aufzeigen; die praktischen Grenzen der Gebrauchsdauer lassen sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebsbedingungen letztlich nur durch Erfahrungen festlegen.

10.5 Schmierfrist

Die Betriebstemperatur hat starken Einfluss auf die Lebensdauer eines Mineralöles. Pauschale Angaben für die richtige Schmierfrist sind daher recht problematisch. Als Anhaltspunkt für die Praxis hat sich eine Schmierfrist von etwa 10 000 ... 15 000 Betriebsstunden, längstens jedoch etwa 3 ... 4 Jahre, bewährt. Dieses relativ lange Intervall erscheint für den Anwender zumutbar, vor allem wenn man es mit den bei einem KFZ-Getriebe üblichen Schmierfristen vergleicht: Das hier übliche Wartungsintervall von 50 000 km ergibt bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h eine Betriebszeit von nur 1 000 Stunden! Es erscheint darüber hinaus angebracht, die Schmierfrist von 10 000 Stunden bzw. 3 Jahren einmal mit den in der Praxis üblichen Laufzeiten zu vergleichen (Bilder 10.5.1 und 10.5.2):

Bei der üblichen 5-Tage-Woche (5 d/w) darf die tägliche Laufzeit bis zu etwa 13 Stunden (13 h/d) betragen, ohne dass der Grenzwert von 3 Jahren = 36 Monate (36 m) vermindert wird. Erst bei täglicher Benützung von mehr als 13 h/d dominiert die 10 000-Stunden-Grenze und vermindert die Wartezeit bis zum nächsten Ölwechsel. Bei einer 7-Tage-Woche (7 d/w) liegen die Grenzwerte gilt Bild 10.5.2.

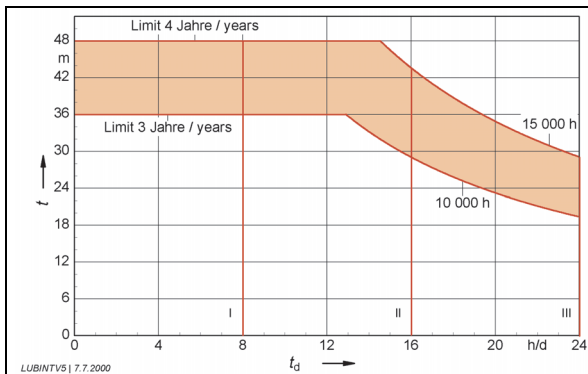


Bild 10.5.1
5-Tage-Woche

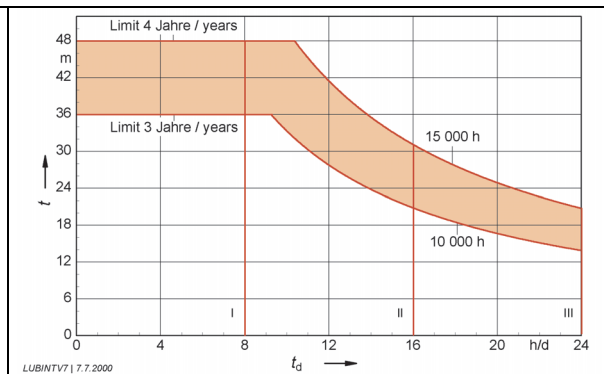


Bild 10.5.2
7-Tage-Woche

Wartezeit t (in Monaten m) für den Ablauf einer Schmierfrist von 10 000 ... 15 000 Stunden bzw. 3 ... 4 Jahren bei verschiedenen Betriebszeiten t_d in Stunden pro Tag

5-Tage-Woche

Beispiel	Schichten pro Tag	Stunden pro Tag	Schmierfrist in Monaten
I	1	8	36 ... 48
II	2	16	29 ... 43
III	3	24	19 ... 29

7-Tage-Woche

Beispiel	Schichten pro Tag	Stunden pro Tag	Schmierfrist in Monaten
I	1	8	36 ... 48
II	2	16	21 ... 31
III	3	24	14 ... 21

Die Diagramme zeigen, dass bei den meisten praxisüblichen Laufzeiten die Schmierfrist von 3 ... 4 Jahren in Anspruch genommen werden kann. Dies gilt für übliche Umgebungstemperaturen (bis zu etwa 30 °C) und für hochwertige Mineralöle.

Eine **Einlauf-Schmierfrist** (z. B. 200 oder 300 Stunden) ist nur notwendig, wenn mit dem Einschluss von Fremdkörpern im Getriebegehäuse oder mit einem Abrieb der Zahnflanken gerechnet werden muss.

Werden die Gehäuse gründlich gereinigt und mit einer gut haftenden Farbe innen gestrichen und kommen reichlich bemessene, einsatzgehärtete und genau bearbeitete Zahnräder zum Einsatz, so kann auf diesen zusätzlichen ersten Schmierstoffwechsel ohne Nachteil verzichtet werden.

10.6 Synthetische Schmierstoffe

Neben Mineralölen, deren Eigenschaften bei den meisten Anwendungsfällen ausreichen, werden synthetische Schmierstoffe (z. B. Schmieröle PGLP – Polyglykole und synthetische Kohlen-wasserstoffe) angeboten, die hauptsächlich folgende **Vorteile** bieten:

- hoher Viskositätsindex (VI), also Eignung für extrem große Temperaturbereiche,
- gute Oxidations- und Alterungsstabilität, also längere Lebensdauer,
- niedriger Reibungskoeffizient, der vor allem bei Getrieben mit hohem Gleitanteil (Schneckengetriebe) zu niedrigeren Verlusten und längerer Lebensdauer beitragen kann.

Nachteilig sind

- die Beeinträchtigung gewisser Werkstoffe im Getriebe (z. B. Innenanstrich, Dichtungsmaterialien, Kunststoff-Lagerkäfige bei Temperaturen über etwa 120 ... 130 °C)
- schlechtere Verfügbarkeit,
- höherer Preis,
- Polyglykole sind mit Mineralölen nicht mischbar und nicht verträglich,
- besondere Entsorgung.

Die im Zusammenhang mit synthetischen Schmierstoffen gelegentlich verwendeten Begriffe wie **»Lebensdauerschmierung«** oder **»sealed for life«** sind kritisch zu betrachten, da Wartungsintervalle und Lebensdauer eines Getriebes nicht nur vom Schmierstoff abhängen.

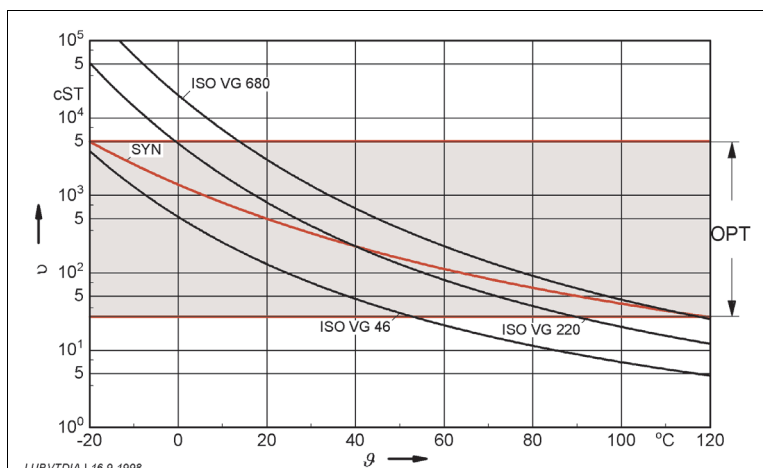


Bild 10.6
Kinematische Viskosität ν
in Abhängigkeit von der
Temperatur ϑ
(VT-Verhalten) von
Mineralölen
ISO VG 46, 220 und 680 im
Vergleich zu einem
synthetischen Öl (SYN)

Im mit »OPT« markierten Viskositätsbereich (Bild 10.6) kann das synthetische Öl ohne Sortenänderung bei Temperaturen von -20 °C ... +120 °C eingesetzt werden. Bei gleichen Anforderungen an eine optimale Viskosität sind bei einem Mineralöl zwei Viskositätsstufen erforderlich.

10.7 Schmierstoffmenge

Bei Stirnrad-Getrieben rechnet man mit einem Verlust von etwa 2 % pro Stufe, bezogen auf die Endauslastung des Getriebes. Fast die Hälfte dieser Verluste tritt schon im Leerlauf auf – hauptsächlich als Planscharbeit im Schmierstoff (Bild 10.7), die mit der Drehzahl und mit dem Füllgrad etwas ansteigt.

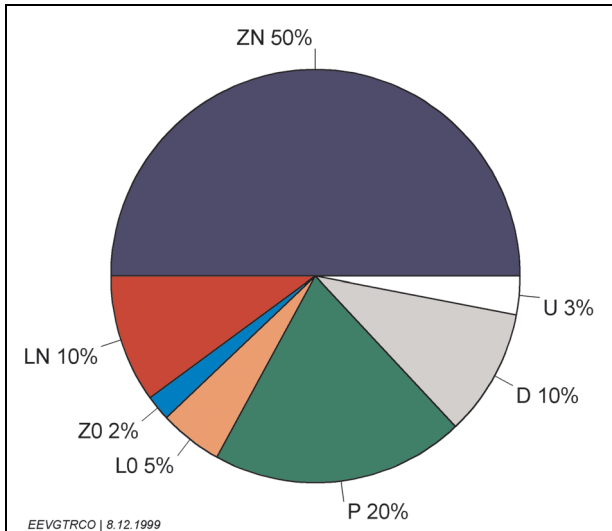


Bild 10.7
Komponenten der Getriebeverluste bei ölgeschmierten Stirnrad-Getrieben

Leerlauf:

- ZO - Verzahnung
- LO - Lager
- P - Planschen**
- D - Dichtungen
- U - Zusatz

Nennlast:

- ZN - Verzahnung
- LN - Lager

Bei der Festlegung der Schmierstoffmenge ist daher in Optimum zwischen Wärmeezeugung und Wärmeabfuhr anzustreben

10.7.1 Schmierstoffpegel

In der Literatur werden optimale **Schmierstoffpegel** empfohlen, die sich am Modul des eintauchenden Zahnrades orientieren (Bild 10.7.1.1). Diese geringen Eintauchtiefen haben für schnellaufende, stationäre Getriebe mit laufender Überwachung des Ölpegels Berechtigung. In Getriebemotoren, die bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen arbeiten, hat sich ein wesentlich **höherer Pegel** bewährt (Bilder 10.7.1.2 und 10.7.1.3).

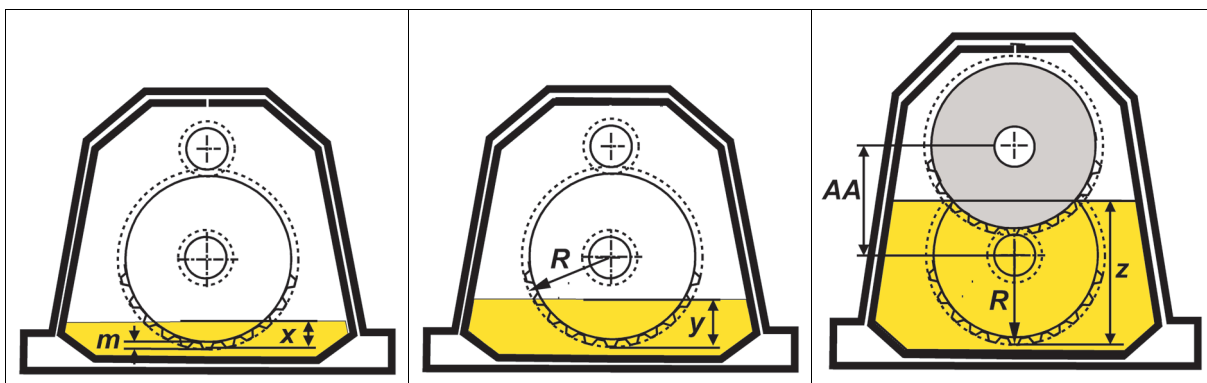


Bild 10.7.1.1
Theoretischer Ölpegel (1stufig)
 $x = (3 \dots 5) \cdot m$
x Eintauchtiefe
m Modul

Bild 10.7.1.2
Praktischer Ölpegel (1stufig)
 $y = 0,5 \cdot R$
y Eintauchtiefe
R Radius des Rades

Bild 10.7.1.3
Praktischer Ölpegel (2stufig)
 $z = R + 0,5 \cdot AA$
z Eintauchtiefe
AA Achsabstand

Bei senkrechter Anordnung gelten andere Gesichtspunkte: Da das Endrad nur sehr langsam umläuft (z. B. mit einer Drehzahl unter 1 r/min), kann nicht mit einer Benetzung durch Turbulenz oder Ölnebel gerechnet werden. Der Ölpegel muss daher mindestens bis zur halben Breite des oberen Rades reichen (Bild 10.7.1.4).

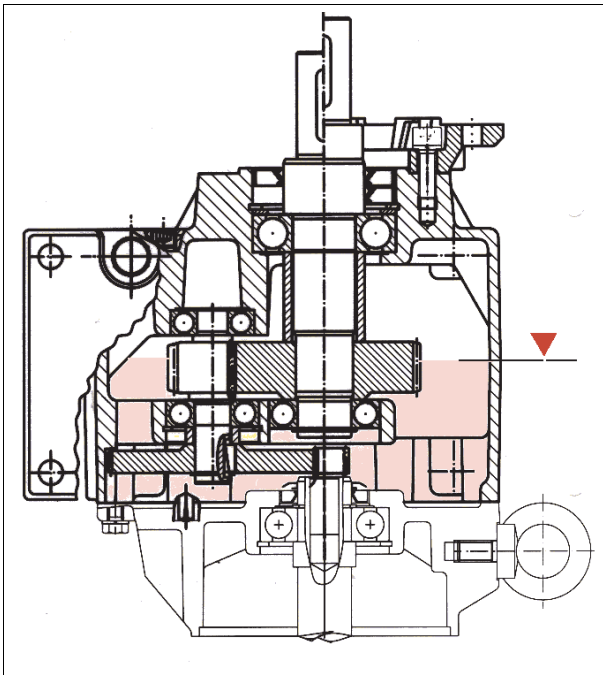


Bild 10.7.1.4
Ölpegel bei senkrechter Aufstellung mit nach oben gerichteter Arbeitswelle (z. B. V6);

obere Lager und ihre Zwischenräume vollständig mit Lagerfett gefüllt

Die dem Pegel entsprechende Ölmenge (in kg oder l) wird für jeden Getriebetyp für jeder Aufstellungsart experimentell ermittelt und in der Dokumentation (Betriebsanleitung, Katalog, Schmerschild) genannt (Tabelle 10.5.5).

Ölstandsgläser oder andere, von außen zu kontrollierende Pegelanzeiger werden nur in Sonderfällen und auf ausdrücklichen Wunsch des Anwenders angebracht. Gegen eine Verwendung von Ölstandsanzeigern bei Serien-Getriebemotoren sprechen u. a. folgende Gründe:

- kein Zugang bei verdecktem Einbau,
- schlechte Ablesbarkeit nach längerer Betriebszeit,
- aufwendige, aufstellungsbezogene Bearbeitung des Getriebegehäuses,
- Getriebegehäuse nicht universell verwendbar – Ersatzlieferung nicht ab Lager möglich,
- Verpflichtung für den Anwender zu laufender Überwachung – erhöhter Personalaufwand in der Instandhaltung.

10.7.2 Schmierstoffbedeckung als Zündschutzart »k«

Zum "neuen Ansatz" der seit 01.07.2003 allein gültigen Richtlinie 94/9/EG "Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen" (kurz ATEX 95) gehört auch die formale Einbeziehung der "nicht-elektrischen Geräte" – z. B. des Getriebeteils von Getriebemotoren. Der Hersteller hat zu bewerten, welche Zündgefahren bei bestimmungsgemäßer Verwendung und bei vorhersehbaren Störungen (Kategorie 2) auftreten können und er hat die zur Vermeidung solcher Zündgefahren notwendigen Maßnahmen festzulegen. Das Ergebnis wird in einer EG-Konformitätserklärung (Bild 10.7.2.1) und auf dem Kennzeichnungsschild des Getriebes (Bild 10.7.2.2) dokumentiert

EG-Konformitätserklärung

nach ATEX-Richtlinie 94/9/EG (ATEX 95)
für Getriebe der Zündschutzarten "c" und "k"
B 000.1200-01 Stand: 11/03 EE-gr/ef
File : KonfErkl_ATEX_ck_B000_1200_01_DE.doc (ersetzt Exc_Konferkl_DE)



Die **Getriebe der Baureihen BG, BF, BK, BS, BM**
entsprechen den Anforderungen der folgenden Europäischen Richtlinie(n) in ihrer aktualisierten
Fassung

94/9/EG

Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der
Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in
explosionsgefährdeten Bereichen;

nachgewiesen durch die Einhaltung folgender Normen und Bestimmungen:

Bewertung der Zündgefahr (hinterlegt bei der benannten Stelle PTB, Kenn-Nr. 0102) nach:

- EN 1127 Explosionsschutz; Grundlagen und Methodik
- EN 13463 Nichtelektrische Geräte zum Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen
- EN 13463-1 Grundlagen
- EN 13463-5 Konstruktive Sicherheit "c"
- EN 13463-8 Flüssigkeitskapselung "k"

Hinweise:

Getriebe mit der Kennzeichnung  **II 2G c k II T3 / II 2D c k T<160°C / EN 13463-1/ -5 / -8**

dürfen verwendet werden bei Gefahr durch:

- Gasexplosionen in Zonen 1 und 2 (Kategorien 2 und 3), Temperaturklasse T3**
Auswahl von Leistung, Eintriebsdrehzahl und Aufstellung nach Festlegung des Danfoss Bauer Fachpersonals
- Staubexplosionen in Zonen 21 und 22 (Kategorien 2 und 3), Zünd- oder Glimmtemperatur > 240 °C**
für alle listenmäßigen Aufstellungen und Eintriebsdrehzahlen bis 3000 r/min
- Explosionen in diesen Zonen durch hybride Gemische** aus explosionsfähigem Gas und brennbarem
Staub, sofern die für eine Zündung maßgebenden Kennwerte des Gemisches (z. B. die Zündtemperatur) nicht
ungünstiger sind als die Kennwerte für die Komponenten des Gemisches.

Für den Motorteil von Getriebemotoren gilt eine getrennte Konformitätserklärung.

Die Sicherheitshinweise der mitgelieferten Produktdokumentation (z. B. Betriebsanleitung) sind zu beachten.

Esslingen, Datum der Erstausgabe 06.03.2003

Danfoss Bauer GmbH



i.V. Dipl.-Ing. Kübler
(Leiter ME)



i.V. Dipl.-Ing. Fuchs
(Leiter QW)

Für Bereiche mit Gasen der **Temperaturklasse T4** wurde die Eignung für folgende Parameter
überprüft:

Getriebe mit der Kennzeichnung  **II 2G c k II T4 / II 2D c k T<135°C / EN 13463-1/ -5 / -8**

Typ:

Artikelnummer:

Bemessungsleistung: (kW)

max. Eintriebsdrehzahl: (r/min)

Aufstellung:

Sonstige Bedingungen:

Danfoss Bauer GmbH
Autorisierte interne Stelle

Diese Erklärung beinhaltet keine Zusicherung von Eigenschaften im Sinne der Produkthaftung.

BAUER geared motors

BAUER geared motors	
Danfoss Bauer GmbH D-73734 Esslingen	
GETRIEBE / REDUCER / REDUCTEUR	
CE	
No	A /
Type	
⊕ II 2 G c k II T / ⊕ II 2 D c k T<160 °C / EN 13463-1/ -5/ -8	
Reduction i	
max. n ₁	/min
max. M ₂	Nm
max. P	kW
BF/SF f _B	

Bild 10.7.2
Kennzeichnung eines
Getriebes mit den
Zündschutzarten "c" und "k"
zur Verwendung in
explosionsgefährdeten
Bereichen der Kategorien 2
G und 2 D (Zonen 1 und 21)

Die Zündschutzart "k" ist in der Norm prEN 13463-8 definiert (vorläufige Übersetzung):

Eine Zündschutzart, bei der mögliche Zündquellen unwirksam gemacht werden oder von der entzündbaren Atmosphäre getrennt werden, indem sie entweder vollkommen in eine Schutzflüssigkeit eintauchen oder indem sie teilweise eintauchen und ihre wirksamen Oberflächen dauernd benetzt werden, so dass eine explosionsfähige Atmosphäre über der Flüssigkeit oder außerhalb dem Gehäuse des Gerätes nicht entzündet werden kann.

Beispiel d) in der Einführung zur Norm:
Ölgefüllte Getriebegehäuse

Ein hoher Füllgrad und eine gute Abdichtung gegen Schmierstoffverlust ist also auch zur Aufrechterhaltung des Explosionsschutzes relevant.

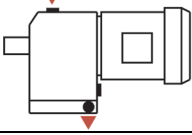

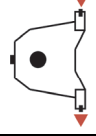
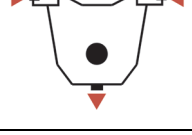





Bauform und Aufstellung		Getriebetyp (Beispiele)		
		G 02, G 03	G 62, G 63	G 102, G 103
IM B3		0,35	4,7	20
IM B6		0,4	5,0	21
IM B7		0,4	5,0	21
IM B8		0,4	5,0	21
IM B5		0,3	4,2	18
IM V1		0,6	8,5	37
IM V3		0,6	8,5	37
IM V5		0,7	9,5	41
IM V6		0,7	9,5	41

Bild 10.7.1 Auszug aus der Schmierstofftabelle einer Reihe von Stirnradgetrieben
Schmierstoffmenge in kg oder l in Abhängigkeit von Bauform,
Aufstellung und Größe G des Getriebes

10.8 Schmierstoffwechsel

Die Getriebegehäuse sind für einen Schmierstoffwechsel am Einsatzort vorbereitet. Die Bohrungen und Verschlusschrauben sind so angebracht, dass bei jeder üblichen Aufstellung eine **Einfüllschraube** und eine oder mehrere **Ablassschraube(n)** vorgefunden werden (Bild 10.8).

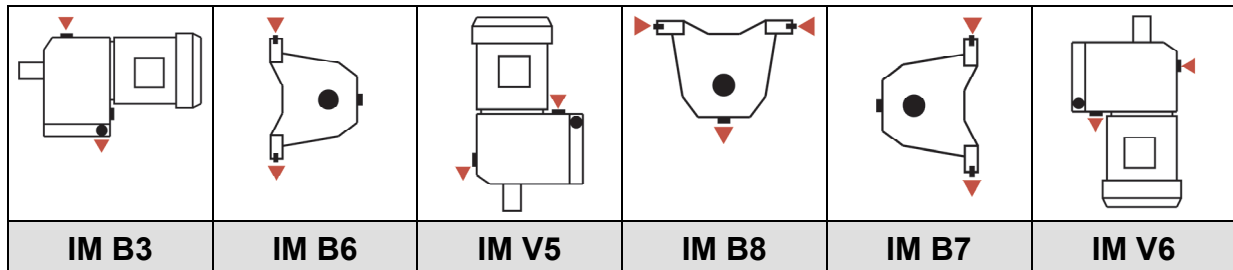


Bild 10.8 Beispiele für die Mehrfachverwendung von serienmäßigen Bohrungen im Getriebegehäuse für einen Ölwechsel vor Ort

Falls erforderlich, wird dem alten Schmierstoff zur Verdünnung **Spülöl** (z. B. Spindelöl – kein Kaltreiniger, Petroleum oder Tri) zugegeben. Nach einigen Minuten Leerlauf kann die Mischung abgelassen werden. Durch mehrmaliges Nachspülen bei ebenfalls leerlaufendem Getriebe – zweckmäßigerweise mit wechselnder Drehrichtung – werden auch die Reste des alten Schmierstoffs erfasst und abgelassen.

Bei stillstehendem Motor wird nun der neue Schmierstoff nach den Richtwerten der Schmierstofftabelle in der Betriebsanleitung oder nach den Angaben auf dem am Getriebegehäuse angebrachten Schmierstoffschild eingefüllt.

Es wird empfohlen, nur den **ersten** Schmierstoffwechsel (nach 10 ... 15 000 Betriebsstunden oder spätestens drei bis vier Jahren) vor Ort vorzunehmen. Für den **zweiten** Schmierstoffwechsel (also nach etwa 20 ... 30 000 Betriebsstunden) sollte der Antrieb für eine Demontage und Inspektion in die Werkstatt gebracht und auf eventuelle Dichtungs- und Lagerschäden untersucht werden. Danach kann wieder abwechselnd ein Ölwechsel vor Ort und eine Inspektion in der Werkstatt vorgenommen werden.

10.9 Schmierstoffsorte

Es eignen sich Getriebeöle mit der genormten Kurzbezeichnung **CLP 220**. In dieser für alle Schmierstofflieferanten gültigen Bezeichnung nach DIN 51517-3 bedeuten:

- C Schmieröl,
- L mit Wirkstoffen zum Erhöhen von Korrosionsschutz und/oder Alterungsbeständigkeit,
- P mit Wirkstoffen zum Herabsetzen der Reibung und des Verschleißes im Mischreibungsgebiet und/oder zur Erhöhung der Belastbarkeit,
- 220 ISO-Viskositätsklasse ISO VG 220.

Der Schmierstoff muss einen reibungsarmen und fast verschleißfreien Dauerbetrieb ermöglichen. Die Schadenslaststufe beim FZG-Test nach DIN 51354 soll über der Laststufe 12 und der spezifische Verschleiß unter 0,27 mg/kWh liegen. Der Schmierstoff soll nicht schäumen, vor Korrosion schützen und den Innenlack, die Wälzlager und Zahnräder sowie die Dichtungen nicht angreifen. Schmierstoffe verschiedener Sorten dürfen nicht gemischt werden, da sonst die Schmiereigenschaften beeinträchtigt werden können. Nur bei Verwendung nachweisbar gleichwertiger Schmierstoffe ist eine lange Gebrauchsdauer gewährleistet.

Sofern die Umgebungstemperatur etwa -10 °C nicht unterschreitet, wird die ISO-Viskositätsklasse VG 220 (SAE 90 bzw. SAE 85W-90) empfohlen, in Nordamerika AGMA 5 EP. Für tiefere Umgebungstemperaturen sollten Öle einer geringeren Nenn-Viskosität mit entsprechend besserem Anlaufverhalten verwendet werden, z. B. ISO VG 46 (SAE 75) bzw. AGMA 1 EP. Diese Sorten können auch schon im Temperaturbereich um den Gefrierpunkt notwendig werden, wenn das Losbrechmoment eines Antriebs mit Rücksicht auf sanften Anlauf vermindert wurde oder wenn der Motor eine verhältnismäßig geringe Leistung hat. Für Umgebungstemperaturen dauernd über $+30\text{ °C}$ sind Öle ISO VG 680 (SAE 140) bzw. AGMA 8 EP einzusetzen.

Die vom Werk für die Erstbefüllung getroffene Schmierstoffwahl ist aus einem Hinweisschild am Getriebe ersichtlich oder durch Rückfrage im Werk zu erfahren. Die Betriebsanleitung sollte eine aktuelle Liste der vom Werk zur **Zweitbefüllung** freigegebenen Schmierstoffsorten enthalten. Ein typischer Auszug ist in Tabelle 10.9 wiedergegeben. Bei größeren Schneckengetrieben Viskosität 460.




















Hersteller	Logo	Stirrad- und Kegelradgetriebe	Schneckengetriebe
AGIP		Blasia 220	-
ARAL		Degol BMB 220 oder Degol BG 220	Degol GS 220
BEICHEM RHUS		Staroil SMO 220	-
BP		Energol GR-XP 220	Energol SP-XP 220
CASTROL		Alpha SP 220 oder Hypoy EP	Alphasyn PG 220
DEA		Falcon CLP 220	-
ELF		Reductelf SP 220	-
ESSO		Spartan EP220 oder Getriebe-Öl GP90	-
FINA		Giran 220	-
FUCHS		Renolin CLP 220 oder Renolin CLPF Super	Renolin PG 220
HOUGHTON		Molygear VG 220	-
KLÜBER		Klüberoil GEM 1-220	Syntheso HAT 220 oder Klübersynth GH 6-220
MOBIL		Mobilgear 630 oder Mobilube GX 85 W-90A	Glygoyle HE 220 oder Glygoyle 30
OPTIMOL		Optigear 220	Optiflex 220
SHELL		Omala Oil 220	Tivela Oil WB
OEST		Gearoil C-LP 220	-
TEXACO		Geartex EP-A SAE 85W-90	-
TOTAL		Carter EP 220	-
WINTERSHALL	 <small>BASF Gruppe</small>	Ersolan 220	-

Tabelle 10.9 Schmierstoffempfehlung für die Zweitbefüllung

10.10 Dichtungen

Bei der Konstruktion, Fertigung und Prüfung von Getrieben ist ein verhältnismäßig hoher Aufwand notwendig, um eine sichere und langanhaltende Abdichtung zu erreichen. Unter ungünstigen Betriebsbedingungen können in Einzelfällen geringe Leckagen auftreten. Meist bleibt der Ölverlust in solch engen Grenzen, dass dank der reichlichen Originalbefüllung (vgl. 10.7) ein Trockenlauf nicht zu befürchten ist. Neben der Betriebssicherheit des Getriebes ist bei gewissen Einsatzfällen (Lebensmittelverarbeitung, Lackierstraßen) auch an die Störung oder Gefährdung der Produktion zu denken.

10.10.1 Passflächen

Für die Abdichtung von Passflächen am Getriebe werden meist streichfähige, hochelastische chemische Dichtungsmittel verwendet. Im Zuge der Instandsetzung sind die Dichtungsreste sorgfältig zu entfernen und die Flächen mit einer Dichtungsmasse gleicher Qualität zu versehen.

Diese Methode ist für die Werkstatt günstiger als der Ersatz von Flächendichtungen aus gepresstem Flachmaterial, die in der Regel vom Getriebe-Hersteller bezogen werden müssen.

10.10.2 Radial-Wellendichtringe

An den Wellen werden meist genormte Radial-Dichtringe (RWD) nach DIN 3760 aus hochwertigen Gummiwerkstoffen (Elastomere) verwendet, deren schneidenförmige Lippe durch die Vorspannung einer Spiralfeder an der feinstbearbeiteten Welle anliegt. Der Schmierstoffilm soll abgeschnitten werden, ohne dass die Gummilippe selbst völlig trockenläuft und sich zu sehr erwärmt. Zitat eines Dichtring-Herstellers: "100 % Abdichtung sind unerwünscht!". Der an sich widersprüchliche Dichtungsvorgang wird durch die Wirkung von Kapillarkräften erklärbar (Bild 10.10.2.1).

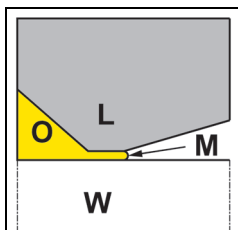


Bild 10.10.2.1
Prinzip der Abdichtung durch
Kapillarkräfte

L - Dichtlippe
O - Öl
W - Welle
M - Meniskus im Dichtspalt

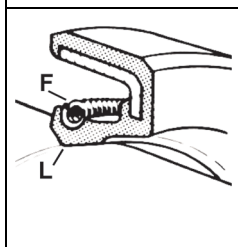


Bild 10.10.2.2
Betriebsbedingte Einflüsse
auf die Wellendichtung
(nach Fa. GOETZE)

1 Thermische Ausdehnung
2 Materialrisse
3 Zersetzung der Mischung
4 Härteänderung der Mischung
5 Korrosion der Welle
6 Schmiermittel-Ausfall
7 Alterung der Dichtlippe
8 Einkerbungen, Einschnitte
9 Stick-Slip-Effekt
10 Schwingungen
11 Verschleiß
12 Übermäßige Exzentrizität
13 Gehäuseundichtheit

10.10.3 Dichtstelle zwischen Motor und Getriebe

Da sich vor allem an der Dichtung der Läuferwelle eine von Temperatur und Zeit abhängige Abnutzung nicht vermeiden lässt, wird diese Dichtstelle zusätzlich mit einer berührungsfreien Labyrinth- oder Spaltdichtung kombiniert.

Funktion dieser Dichtscheibe:

- schleudert Öl weg
- fängt Öldruck auf
- wirkt als Labyrinth
- ist bei Einlauf auswechselbar.

Die Wirkung dieser Dichtung hängt in hohem Maße von einem schlagfreien, zentrischen Lauf mit kleinstem Abstand vom feststehenden Teil ab: Diesen Punkten ist beim Wiedereinbau besondere Beachtung zu schenken (Bild 10.10.3).

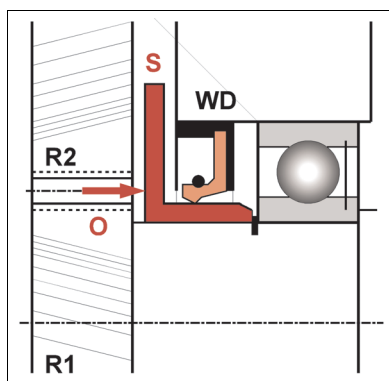


Bild 10.10.3

Prinzip der Dichtstelle zwischen Motor und Getriebe

WD - Wellendichtring

S - Schleuderscheibe (Labyrinthteller)

R1 - Ritzel

R2 - Zahnrad

O - Ölstrahl (Stärke und Richtung u.a. abhängig von Umfangsgeschwindigkeit, Schrägungswinkel, Drehrichtung)

Wichtig ist auch ein seitenrichtiger Einbau des Wellendichtringes (WD), so dass die Gummilippe vom Überdruck des Schmiermittels gegen die Welle gepresst wird, während eventuell vorhandene Staublippen immer außen liegen müssen.

Die schleifende Wellendichtung ist ein Verschleißteil und daher anlässlich des Schmierstoffwechsels auf ihre Wirkung zu untersuchen und nötigenfalls zu ersetzen. Bild 10.10.2.2 zeigt ausschnittsweise nach Unterlagen der GOETZE-Werke, wie zahlreich und komplex die Einflüsse auf dieses Bauteil sind, so dass pauschale Angaben für die Lebensdauer einer Radial-Wellendichtung nicht möglich sind.

Da sich die Gummilippe der Wellendichtung auch in Metall einarbeiten kann, ist es zweckmäßig, wenn als Gegenstück nicht die Welle, sondern ein leicht austauschbares Teil (wie eine Hülse oder die in Bild 10.10.3.1 gezeigte Schleuderscheibe) benutzt wird.

10.10.4 Konstruktive Ausführung der Dichtung an der Läuferwelle

Die aufwendige BAUER-Konstruktion der Abdichtung an der Läuferwelle zwischen Motor und Getriebe ist in Bild 10.10.4.1 gezeigt. Sie bedingt eine »integrale Bauweise«, bei der Motor AS-Lagerschild und Getriebedeckel ineinander übergehen. Aus Gründen der Ersatzhaltung verlangen manche Abnehmergruppen den Anbau **von Norm-Flansch-Motoren** an das Untersetzungsgetriebe. Abgesehen von der ungünstigen konstruktiven Gestaltung und Anordnung des Ritzels haben solche Normmotoren entweder gar keine Wellendichtung (Ausführung 1 in Bild 10.10.4.2) oder einen sogenannten **»öldichten Lagerflansch«** am Wellenaustritt (Ausführung 2), der die zusätzlichen Dichtungsfunktionen einer integralen Konstruktion nicht aufweist.

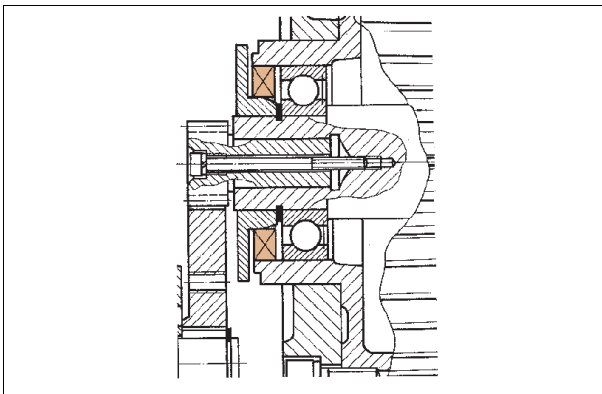


Bild 10.10.4.1
Konstruktive Ausführung der Dichtstelle zwischen Motor und Getriebe bei einem als »integrale Einheit« konzipierten Getriebemotor

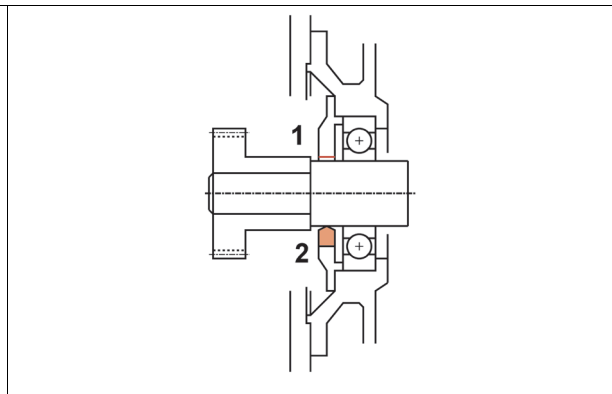


Bild 10.10.4.2
Abdichtung am Wellenaustritt bei einem Norm-Flansch-Motor an einem Untersetzungsgetriebe
1 - Normale Ausführung Spaltdichtung ohne Öldichtheit
2 - Sonderausführung öldichter Lagerflansch

10.10.5 Prüfung von Wellendichtringen

Wellendichtringe können ihre Aufgabe nur erfüllen, wenn die Dichtlippe auf dem ganzen Umfang der Welle mit der richtigen Vorspannung anliegt. Zu starke Vorspannung führt zu erhöhter Erwärmung und Abnützung und muss deshalb ebenso vermieden werden wie ein unzureichender Kontakt zwischen Lippe und Welle. Eine einfache und bewährte **»Lichtspaltprüfung«** ist in Bild 10.10.5 gezeigt.

<p>Prinzip der »Lichtspaltprüfung« für Wellendichtringe</p>	<p>Normaler Dorndurchmesser kein Licht Befund : gut</p>	<p>Normaler Dorndurchmesser Lichtstelle Befund : schlecht</p>	<p>Reduzierter Dorndurchmesser Rundspalt Befund : gut</p>

Bild 10.10.5 Lichtspaltprüfung von Wellendichtringen

10.10.6 Temperatur-Einsatzbereiche von Wellendichtringen

Die Betriebstemperatur hat einen starken Einfluss auf Dichtwirkung und Alterung der Dichtlippen. In DIN 3760 sind die nachfolgenden Grenzen empfohlen:

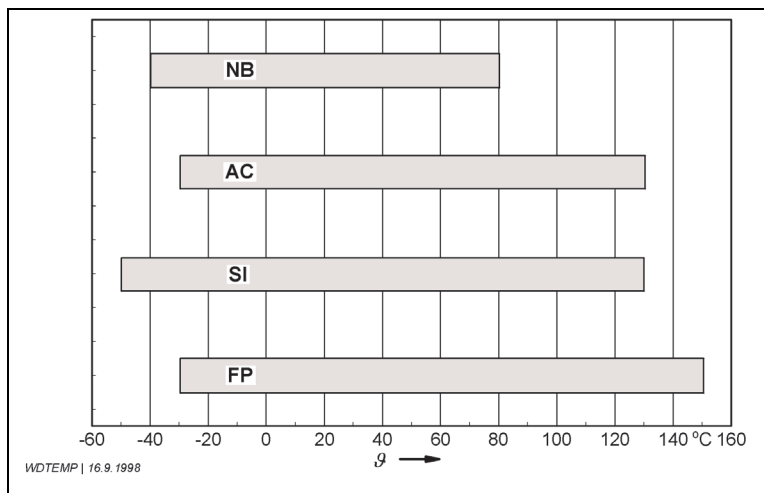


Bild 10.10.6

Richtlinie für den Bereich der Einsatztemperatur von Radial-Wellendichtringen nach DIN 3760

NB (NBR):

Nitril-Butadien-Kautschuk (übl. Qualität)

AC (ACM):

Acrylat-Kautschuk (übliche Qualität)

SI (MQ):

Silicon-Kautschuk (Sonderqualität)

FP (FPM):

Fluor-Kautschuk (Sonderqualität)

10.10.7 Anwendungsbeispiel

Bei der Anwendung nach Bild 10.10.7 sind die Schwierigkeiten einer Anordnung mit Welle nach oben (V3) mit den hohen Reinlichkeits-Anforderungen eines modernen Mühlenbetriebes vereinigt.



Bild 10.10.7

Beispiel für die hohen Anforderungen an die Dichtheit eines Getriebemotors Aufstellung mit Welle nach oben (V3) an Zellenradschleusen in einer Müllerei

11 Langzeitige mechanische Überlastung

Eine Überlastung der Motorwicklung entsteht meist durch die Einwirkung von Temperatur und Zeit. Mechanische Bauteile werden dagegen durch Kräfte oder Drehmomente überlastet, wobei die Wirkungsdauer extrem kurz sein kann. Dieser grundsätzliche Unterschied ist bei der Auswahl der Schutzeinrichtungen zu beachten.

Für den Schutz der Wicklungen elektrischer Maschinen haben sich vor allem zwei einfache und preisgünstige Systeme bewährt :

- stromabhängig verzögerte thermische Überstromschutzeinrichtungen mit Bimetallauslösern,
- thermischer Maschinenschutz (TMS) mit Kaltleiter-Temperaturfühlern.

Beide Schutzeinrichtungen reagieren **temperaturabhängig**: Das Bimetall indirekt auf die Heizwirkung des Motorstromes, der Thermistor direkt auf die Wicklungstemperatur. Die dadurch bedingte Zeitverzögerung ist gewollt: Sie erlaubt es, die Überlastungskapazität des Motors auszunutzen und verhindert ein vorzeitiges, unnötiges Ansprechen der Schutzeinrichtung. Bei richtiger Auswahl, Installation und Einstellung der Schutzeinrichtung kann die Wicklung eines Elektromotors sicher gegen Überlastung geschützt werden.

Dieser Schutz erstreckt sich jedoch nicht auf die mechanischen Bauteile, wie im folgenden Abschnitt gezeigt werden soll. Stellvertretend für viele mechanische Übertragungselemente (Wellen, Passfedern, Lager, Kupplungen, Riemen usw.) wird ein Antrieb mit einem Getriebemotor angenommen.

11.1 Drehmomentüberlastung wegen flacher Stromkennlinie

Bei Antrieben mit steigender Stromkennlinie nach Bild 11.1.1 repräsentiert die Stromaufnahme recht gut die jeweilige Leistungsabgabe des Motors und damit die Drehmomentbelastung des Getriebes.

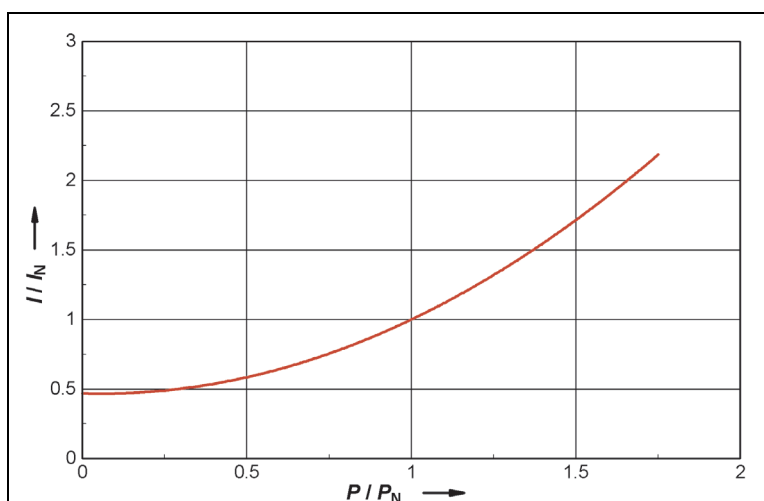


Bild 11.1.1
Typische Stromkennlinie von
4poligen Elektromotoren
mittlerer Größe

Vor allem bei kleinen und hochpoligen Antrieben ist die Stromaufnahme aber vorwiegend durch den Magnetisierungsbedarf bestimmt: Die Stromkennlinie hat daher eine flache Tendenz und stellt damit kein eindeutiges Kriterium für die mechanische Abgabe dar.

Es kann dann im Rahmen der nach internationalen Normen geltenden Toleranzen eine recht erhebliche Überlastung des Getriebes auftreten, ohne dass der Motor thermisch gefährdet ist. Bild 11.1.2 zeigt diese Gefahr an einem Beispiel: Wenn die Auslösekennlinie des verwendeten Relais an seiner oberen Toleranzgrenze nach DIN VDE 0660 Teil 104 / IEC 60292 liegt, also beispielsweise den 1,15fachen Einstellstrom dauernd führen kann, so ergibt sich ein Betriebspunkt X bei 1,4-fachem Nenn Drehmoment. Während der Motor also im Strom um 15% und thermisch etwa um 30% überlastet ist, wird dem Getriebe eine Überlastung um 40% zugemutet, ohne dass das ordnungsgemäß gebaute und eingestellte Motorschutzrelais anspricht.

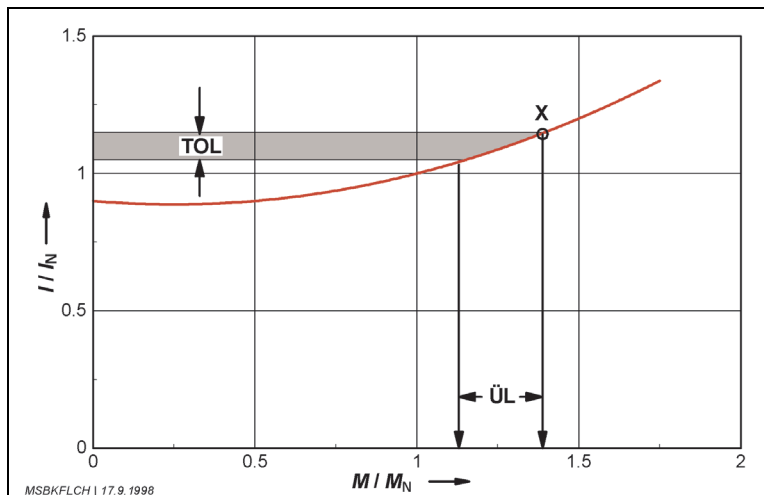


Bild 11.1.2

Mögliche Getriebeüberlastung am Betriebspunkt X bei einem Ansprechstrom des Relais von $1,15 I_N$ (Stromkennlinie kleiner oder hochpoliger Motoren)

TOL: Ansprechtoleranz nach DIN VDE 0660 Teil 102 / IEC 60292 für ein Motorschutzrelais

ÜL: möglicher Überlastbereich des Getriebes als relatives Drehmoment M/M_N

11.2 Überwachung durch Temperaturfühler

Durch direkte Temperaturüberwachung in der Motorwicklung ist ein Schutz des Getriebes gegen langanhaltende Überlastung nur dann gewährleistet, wenn der Motor bei Abgabe der Nennleistung gerade mit der zulässigen Grenz-Übertemperatur arbeitet und wenn auch die Umgebungstemperatur an der oberen Grenze von 40 °C liegt. Abweichungen von diesen Voraussetzungen können zu erheblichen mechanischen Überlastungen für das Getriebe führen, ohne dass die thermische Schutzeinrichtung anspricht.

11.2.1 Motoren mit großen thermischen Reserven

Vor allem bei den kleinen Baugrößen im unteren Leistungsbereich ist der Aufwand an aktivem Material vorwiegend durch die geforderten Anzugs- und Kippmomente bestimmt, so dass oft erhebliche thermische Reserven vorhanden sind. Bild 11.2.1 zeigt, dass bei Betrieb an der vom thermischen Motorschutz (TMS) kontrollierte Grenztemperatur selbst bei maximal zulässiger Umgebungstemperatur eine erhebliche mechanische Überlastung des Getriebes auftreten kann. Bei Nennlast $P/P_N = 1$ habe die Wicklung eine Nenn-Übertemperatur von $\Delta \vartheta_N = 50\text{ K}$, was zusammen mit der Umgebungstemperatur $\vartheta_{amb} = 40\text{ °C}$ eine Nenntemperatur von $\vartheta_N = 90\text{ °C}$ ergibt. Wird dieser Antrieb an der Grenztemperatur $\vartheta_{lim} = 130\text{ °C}$ betrieben, so ist die relative Leistungsabgabe fast 150 % der Nennleistung.

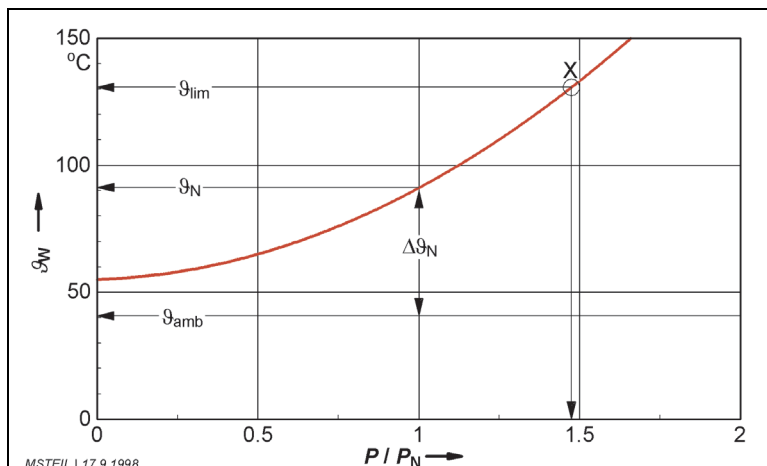


Bild 11.2.1
Mögliche
Getriebeüberlastung P/P_N
am Betriebspunkt X durch
Ausnutzung der Grenz-
temperatur ϑ_{lim} bei einem
Motor mit relativ niedriger
Nenntemperatur ϑ_N und
maximal zulässiger
Umgebungstemperatur ϑ_{amb}

11.2.2 Betrieb bei niedrigen Umgebungstemperaturen

Wird ein Getriebemotor bei Umgebungstemperaturen betrieben, die erheblich unter dem nach den VDE-Bestimmungen zulässigen Maximalwert von 40 °C liegen, so führt die Ausnutzung der dadurch geschaffenen thermischen Reserve zu einer **höheren Leistungsabgabe**. Ohne Gefährdung des Motors und im Rahmen der durch den TMS gesetzten Temperaturgrenzen kann das Getriebe dabei gemäß Bild 11.2.2 erheblich überlastet werden.

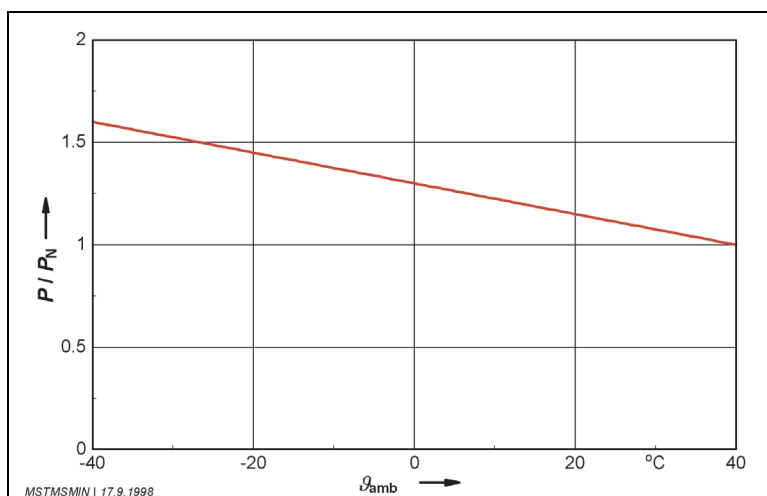


Bild 11.2.2
Mögliche
Getriebeüberlastung P/P_N
durch Ausnutzung der mit
TMS kontrollierten Grenz-
temperatur bei
Umgebungstemperaturen ϑ_{amb}
unterhalb des
Normwertes von 40 °C

11.3 Radiale Wellenbelastung

Normmotoren sind vor allem bei Abtrieb über Keilriemen oft sehr hohen, teilweise durch unnötige Vorspannung überhöhten Radialkräften auf die Welle ausgesetzt. Die zulässigen Grenzwerte sind den Herstellerangaben zu entnehmen. Bild 11.3 zeigt, dass auch bei Normmotoren ein erhebliches Streuband vorhanden ist.

Hinweise zum Rechengang und für Grenzwerte bei Getriebemotoren s. Abschn. 8.

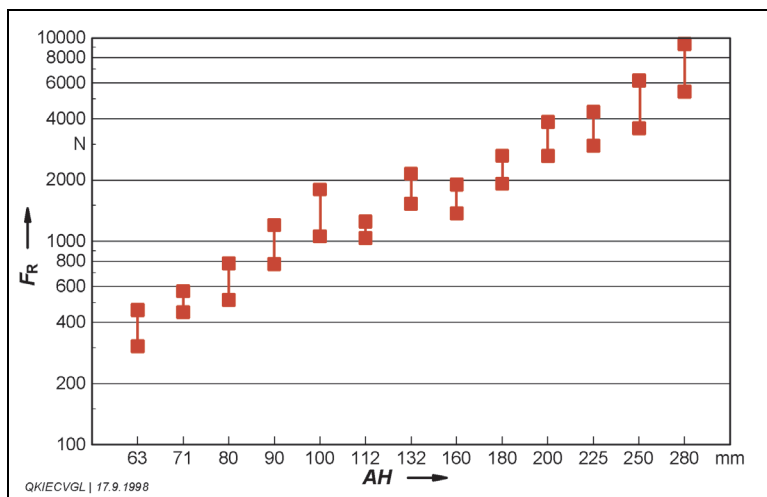


Bild 11.3
Zulässige Radialkraft F_R auf den Wellenstumpf von Normmotoren der Achshöhen $AH = 63 \dots 280$ mm als Streuband nach Katalogangaben mehrerer Hersteller

11.4 Axiale Wellenbelastung

Grenzwerte für die axiale Belastbarkeit der Wellenlager können nicht in pauschaler Form angegeben werden, weil sich die Gesamtbelastung der Wälzlager je nach Richtung und Höhe von Axialkraft, Radialkraft und Rotorgewicht ändert. Vor allem bei größeren Maschinen hat das Eigengewicht einen erheblichen Anteil an der Gesamtbelastung. Im Katalog eines Herstellers werden acht Belastungsfälle nach Bild 11.4 unterschieden:

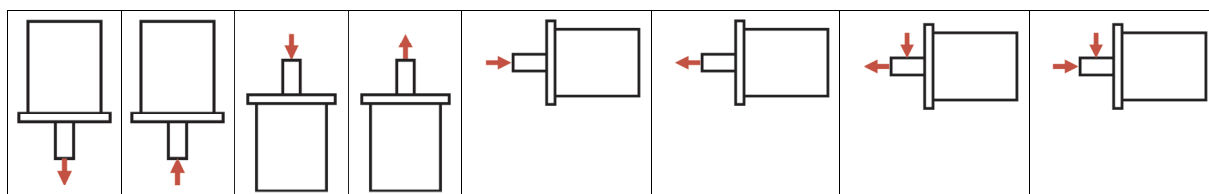


Bild 11.4 Unterscheidung von acht Belastungsfällen für die Axialkräfte auf das Wellenende von Normmotoren (nach Katalogangabe SIEMENS)

12 Kurzzeitige, kontrollierte Drehmomentstöße

In diesem Abschnitt werden die mechanischen Auswirkungen von betriebsmäßig zu erwartenden, relativ langsam (quasistationär) verlaufenden Drehmomentstößen behandelt. **Höhe und Dauer dieser Stöße sind kontrolliert.**

12.1 Definition

- Motorisch erzeugte Drehmomente liegen im Rahmen der **Überlastbarkeit** von Drehstrom-Normmotoren, d.h. nach Norm mindestens bei 1,6-fachem Bemessungsmoment [1.6] und üblicherweise maximal bei etwa 2,5 ... 3-fachem Bemessungsmoment (s. Bild 5.1.2.4).
- Bei kontrolliert ablaufenden Überlastungen werden keine nennenswerten, dynamisch aus Massenwirkungen erzeugten Drehmomentspitzen erzeugt.
- Zur Bildung der Drehmomente werden entsprechende Ströme benötigt, über deren **thermische Auswirkungen die Dauer der Überlastung** mit den in Abschn. 6 beschriebenen Mitteln begrenzt wird.

Als »nicht kontrolliert« im Sinne dieser Definition sind allerdings die bei der **generatorischen Rückbremsung** vom Motor erzeugten Drehmomente zu betrachten, weil sie wegen der relativ geringen thermischen Auswirkung vom Überlastungsschutz nur unzureichend erfasst werden. Bei polumschaltbaren Motoren können hier Drehmomentstöße bis zum 8-fachen Bemessungsmoment entstehen (s. Bild 5.3.8.4). Abhängig vom Verhältnis externe Masse : Rotormasse fließt ein mehr oder weniger großer Anteil dieses Bremsmoments über Welle und Übertragungsmittel nach außen (Bilder 12.1.1 und 12.1.2). Bei hohen Trägheitsfaktoren (z. B. $FI > 2$) und betriebsmäßig häufiger Rückbremsung empfiehlt sich eine Klärung mit dem Hersteller von Motor und Übertragungsmitteln.

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

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

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

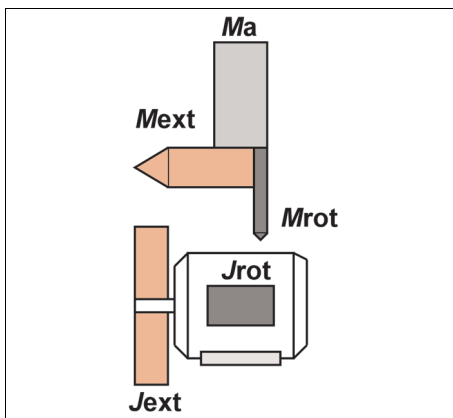


Bild 12.1.1
Moment geht nach Masse

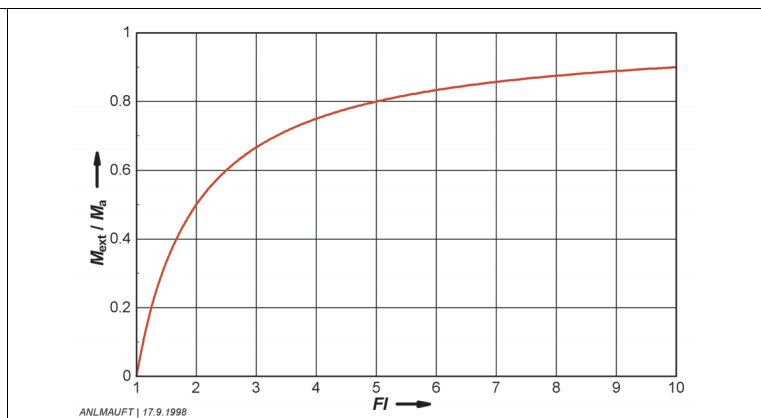


Bild 12.1.2
Externer Anteil des Moments

Der nach außen fließende Anteil des Beschleunigungs- oder Verzögerungsmomentes ist im Diagramm 12.1.2 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.

12.2 Mechanische Bauteile des Motors

Kurzzeitige, kontrollierte Drehmomentstöße nach der im Abschnitt 12.1 gegebenen Definition können i. allg. von den mechanischen Bauteilen eines Elektromotors (Wellen, Passfedern, Lager) ohne Schaden aufgenommen werden, weil diese Komponenten meist sehr reichlich bemessen sind.

12.3 Getriebe und andere mechanische Übertragungsmittel

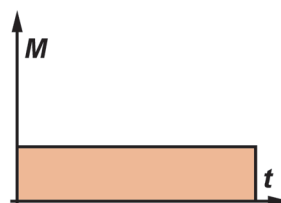
Für diese Bauteile werden die Drehmomentstöße mit einem **Stoßgrad** im Rahmen eines zwar nicht genormten, aber bei den meisten Herstellern üblichen **Betriebsfaktors** berücksichtigt.

Serienmäßig angebotene Übertragungsmittel (Kupplungen, Kettenräder, Getriebe) müssen an die unterschiedlichsten Belastungsbedingungen angepasst werden. Die Beispiele in den Bildern 12.3.1 und 12.3.2 sollen diese weite Spanne zeigen.



Betriebsfaktor
geprägt durch die
Zeit

Bild 12.3.1
Aerator zur
Anreicherung eines
Trinkwasserbeckens mit
Sauerstoff

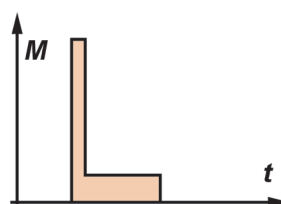


Dauerbetrieb:
24 h/d (Std. pro Tag),
365 d/a (Tage pro Jahr)



Betriebsfaktor
geprägt durch das
Moment

Bild 12.3.2
Kraftwerkskran zur
Revision von Turbine
und Generator



Kurzzeitbetrieb:
Wenige min/a
(Minuten pro Jahr)

Zur Bewertung der beiden Antriebsfälle muss jeweils ein **fiktives Drehmoment** (Bild 12.3.3) gebildet und verglichen werden. Diese aus dem jeweiligen Lastkollektiv errechneten Drehmomente sollen äquivalent sein, d. h., sie sollen bei Dauerbetrieb zur gleichen Lebensdauer der entsprechenden Getriebegrößen führen wie bei Belastung mit dem tatsächlichen Drehmoment.

Die zurückgezogene Richtlinie VDI 2151 gab sinngemäß folgende Definition des Betriebsfaktors: Der Betriebsfaktor f_B ist die Zahl, mit der das Nennmoment M_L der Arbeitsmaschine multipliziert werden muss, um ein fiktives Drehmoment M_N zu erhalten, das bei zeitlich konstanter, beliebig langer Einwirkung auf die Abtriebswelle des Getriebes die gleiche Sicherheit gegen Getriebeschäden gewährleistet wie das tatsächlich wirksame zeitlich veränderliche Drehmoment.

Die Auslegung des Getriebes ist richtig, wenn seine Dauerbelastbarkeit gleich dem fiktiven Drehmoment M_N ist.

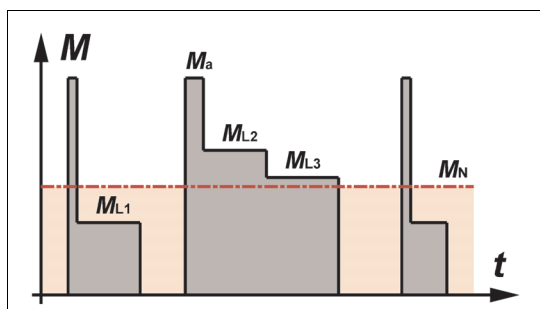


Bild 12.3.3

Definition des Betriebsfaktors

 M_a Beschleunigungsmoment M_L Lastmomente 1, 2, 3 M_N fiktives Nennmoment (Bemessungsmoment) für äquivalente Dauerbelastung bei gleicher Lebensdauer und Sicherheit

Die Bildung eines äquivalenten Bemessungsmoments aus dem Lastkollektiv M_a , M_{L1} , M_{L2} , M_{L3} unter Berücksichtigung der jeweiligen Einwirkzeiten und der Gesamtlaufzeit erfordert einen erheblichen Berechnungsaufwand. In dem für Getriebemotoren und andere Übertragungsmittel üblichen, vereinfachten Verfahren werden die über das Nennmoment **der Arbeitsmaschine** hinausgehenden Drehmomente (z. B. M_a , M_{L2} und M_{L3}) durch einen **Stoßgrad** erfasst und berücksichtigt.

Mit dem Stoßgrad soll vor allem eine bekannte oder vorhersehbare Drehmomentzunahme berücksichtigt werden, die durch die bestimmungsgemäße Arbeitsweise der angetriebenen Maschinen verursacht wird. Solche Überlastungen können z. B. auftreten durch

- Schwergängigkeit bei tiefen Umgebungstemperaturen
- Anfangswiderstand eines zähen Rührmediums
- gelegentlicher Transport eines überschweren Stückgutes
- Hartstellen bei der Entrindung eines Baumstammes
- Zerkleinern von Hartteilen beim bestimmungsgemäßen Gebrauch eines Brechers oder Mixers.

Entsprechend dieser Definition sind die Überlastungen beim Stoßgrad III auf 2faches Bemessungsmoment begrenzt – diese Grenze ergibt sich schon aus Rücksicht auf die externen Übertragungselemente und die Bemessung der angetriebenen Maschine.

Im Gegensatz zu fast allen genormten oder üblichen Systemen für die Ermittlung des Betriebsfaktors sollten statt subjektiv interpretierbarer Begriffe klare objektive Grenzwerte für den Stoßgrad genannt werden [2.9] (Tabelle 12.3.4).

Tabelle 12.3.4
Stoßgrade in subjektiver Beschreibung und objektiver Festlegung

Stoßgrad	Beschreibung	Kurzzeitig zulässige Überlastung
I	gleichförmig ohne Stöße	$M/M_N \leq 1$
II	mäßige Stöße	$1 < M/M_N \leq 1,6$
III	heftige Stöße	$1,6 < M/M_N \leq 2$

Keinesfalls kann über den Stoßgrad und einen entsprechenden Betriebsfaktor die extreme Überbeanspruchung abgedeckt werden, die sich aus einem unsachgemäßen Gebrauch einer Arbeitsmaschine ergeben kann, z. B. bei

- Blockierung eines Brechers durch zu große oder zu harte Teile
- Aufprall eines Kranfahrwerkes auf einen Puffer
- Anlauf eines Mischers gegen festgebackenes Material
- Blockierung eines Kettentriebes durch Fremdkörper.

Drehmomentspitzen, die aus einem derartigen, unkontrollierbaren und blockierungsartigen Vorgang resultieren, können nur durch die Verwendung eines mechanischen Überlastschutzes (Rutschkupplung, Flüssigkeitskupplung, Rutschnabe, Scherbolzen) abgebaut werden (s. Abschn. 13).

12.4 Service Factor für Motoren

Bei **Getriebemotoren** wird der **Betriebsfaktor** in Europa immer und in Nordamerika meist als eine **mechanische** Kenngröße für das Getriebe – also in dem in Abschnitt 12.3 festgelegten Sinne – verstanden. Es gibt jedoch in Nordamerika auch einen **Service Factor SF für Elektromotoren**, der von vielen Herstellern auf dem Leistungsschild des Motors angegeben wird und der dann bei Getriebemotoren falsch interpretiert werden kann.

Eigentlich ist in NEMA MG1-1.43 klar definiert: "Der Service Factor eines Drehstrommotors ist ein Faktor, der angibt, wie hoch die Bemessungsleistung unter den in MG1-14.36 festgelegten Bedingungen erhöht werden darf". Im einzelnen ist festgelegt, dass

- die erhöhte Leistung im Dauerbetrieb verfügbar ist,
- die Wicklungstemperatur dabei um 10 K höher sein darf als der Wärmeklasse zugeordnet (NEMA MG1-12.42.1.b),
- Wirkungsgrad und Leistungsfaktor sich ändern,
- nur bei **offenen, durchzugbelüfteten (ODP) Motoren** ein Service Factor > 1,0 anwendbar ist,
- geschlossene, oberflächenbelüftete (TEFC) Motoren einen Service Factor 1,0 haben.

Trotz dieser Festlegungen gehört der Service Factor SF zu den oft missverstandenen Festlegungen der NEMA. Er wird beispielsweise in der US-Praxis häufig auch auf **geschlossene Normmotoren (TEFC)** angewandt, wenn diese mit Isolierstoffen der Wärmeklasse F isoliert, aber nach Klasse B ausgenutzt sind (übliche Angabe SF = 1,15).

In NEMA MG1-10.38 ist festgelegt, dass der **Service Factor auf dem Leistungsschild** nur angegeben werden muss, wenn er von 1,0 abweicht, bei Normmotoren IP54 (TEFC) also normalerweise nicht.

13 Extreme Drehmomentspitzen

Unter **extremen Drehmomentspitzen** werden im Rahmen dieser Ausführungen stoßartige Überlastungen verstanden, die **weit über die vom Motor entwickelten Maximalmomente** hinausgehen und daher die Übertragungsmittel gefährden können, auch wenn die üblichen Sicherheitsfaktoren bei der Konstruktion berücksichtigt wurden.

13.1 Mechanische Abgabe und elektrische Aufnahme

Für den **stationären** Betrieb besteht bei jedem Motortyp ein fester Zusammenhang zwischen mechanischer Leistungsabgabe und elektrischer Leistungsaufnahme (s. Abschn. 5.1.1). Diese Belastungskennlinie, die für jeden listenmäßigen Motortyp durch Messung ermittelt wird und beim Hersteller vorliegt, erlaubt aufgrund einer einfachen Betriebsmessung einen sicheren Rückschluss auf den Belastungsgrad, wobei natürlich die ungünstigsten Betriebsverhältnisse erfasst werden müssen. Aus Bild 13.1.1 wird deutlich, dass vor allem bei Motoren kleiner Bemessungsleistung die elektrische Leistungsaufnahme ein wesentlich besseres Abbild der Abgabe ist als die Stromaufnahme. Das Bild zeigt die Gradienten des Anstieges von Strom I und Aufnahmeleistung P_1 in Abhängigkeit von der Leistungsabgabe (alles in relativer Darstellung) für Motoren mit Bemessungsleistungen 0,37 und 5,5 kW. Im Bereich der Überlastung ($P > P_N$) steigen die Leistungsaufnahmen der beiden Motoren und die Stromaufnahme des 5,5 kW-Motors praktisch linear an. Die Stromaufnahme des kleinen Motors ist im Bereich $< P_N$ nicht aussagekräftig.

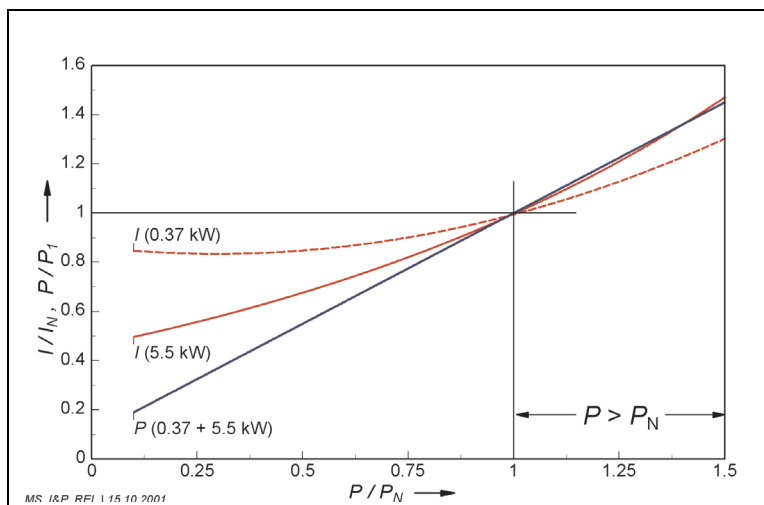


Bild 13.1.1
Abhängigkeit der
Leistungsaufnahme (P/P_1)
und
der Stromaufnahme (I/I_N)
von der mechanischen
Abgabe (P/P_N);
jeweils in relativer
Darstellung

Bei **stoßartig verlaufenden** Vorgängen versagt dieses einfache Verfahren, da bei einer raschen Abbremsung der langsam laufenden Welle die Schwungradenergie des schnell rotierenden Motorläufers zur Wirkung kommt und mit um so höheren Drehmomenten und Kräften den alten Bewegungszustand aufrechtzuerhalten versucht, je rascher die Drehzahländerung erfolgt. Diese Vorgänge sind unabhängig von der Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik des Motors und benötigen keine Energie aus dem Netz, sind also auch nicht mit extrem schnell schreibenden **elektrischen** Leistungsschreibern nachweisbar.

In Bild 13.1.2 ist daher deutlich zu erkennen, dass zwar beim Anlaufvorgang das Anzugsmoment $M_A = 1$ durch eine entsprechende elektrische Leistungsaufnahme P_{el} repräsentiert wird, während bei einem plötzlichen Belastungsstoß P_{crit} ein Spitzenmoment $M_{max} = 2M_A$ auftritt, das keinen entsprechend hohen Niederschlag in der elektrischen Aufnahme findet. Solche Spitzenmomente sind nur durch eine **direkte Drehmomentmessung** (z. B. mit Drehmoment-Messnabe oder Dehnungsmessstreifen) zu ermitteln, die aber einen erheblichen messtechnischen Aufwand und einen Eingriff in den Wellenstrang bedeuten.

Abgesehen von der im Abschnitt 6 geschilderten Notwendigkeit einer thermischen Zeitkonstante von Überstromrelais und TMS ergibt sich aus den Darlegungen dieses Abschnitts die Erkenntnis, **dass es nicht möglich ist, stoßartige Überlastungen des Getriebes auf elektrischem Wege zu erfassen und zu verhindern.**

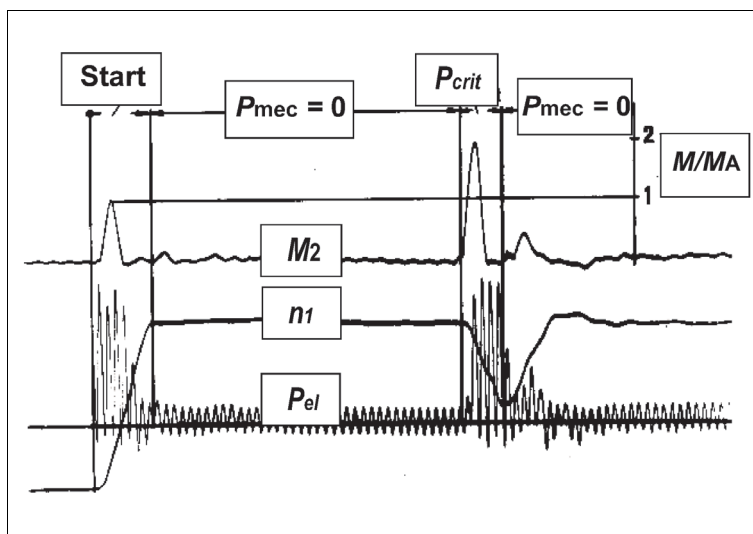


Bild 13.1.2
Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} mit der mechanischen Drehmomentabgabe M_2 bei einem Anlaufvorgang (Start) und einem aus dem Energieinhalt des Läufers gedeckten Belastungsstoß P_{crit}

Ein Grundsatzversuch soll diese Aussage belegen:

In einem Versuchsaufbau nach Bild 13.1.3 wurde ein an der Arbeitswelle eines Getriebemotors angebrachter stabiler Hebel gegen eine harte Unterlage aus vollem Lauf blockiert. Das dabei entstehende Drehmoment wird mit einer Messnabe aufgenommen. Bild 13.1.4 zeigt das Oszillogramm dieser harten Blockierung, bei der eine Drehmomentspitze von **5fachem Anzugsmoment** registriert wurde. Durch Rückprall und erneuten Aufprall entstehen etwa weitere acht scharf ausgeprägte Spitzen, bis sich der Vorgang mit dem Druck des Anzugsmomentes auf die Unterlage beruhigt. Für diesen Endwert – und nur für diesen – ist der Motor "verantwortlich". Die Überhöhungen um den Faktor 5 werden aus der Rotationsenergie des Läufers gespeist. Dies wird bewiesen durch Bild 13.1.5: Hier wurde ein Endschalter so installiert, dass der Motor kurz vor dem Auftreffen des Hebels auf seinen Anschlag vom Netz getrennt wurde. Es entsteht eine einmalige Drehmomentspitze von 4fachen Anzugsmoment, die ausschließlich aus der **Schwungradenergie des Läufers** gespeist wird. Selbst eine hochsensible »elektronische Rutschkupplung« könnte diese Spitze nicht verhindern, denn sie schaltet nicht **vor** dem Anschlag, sondern erst nach dem Aufbau eines Drehmomentes – signalisiert durch einen Anstieg der Wirkleistungsaufnahme – ab.

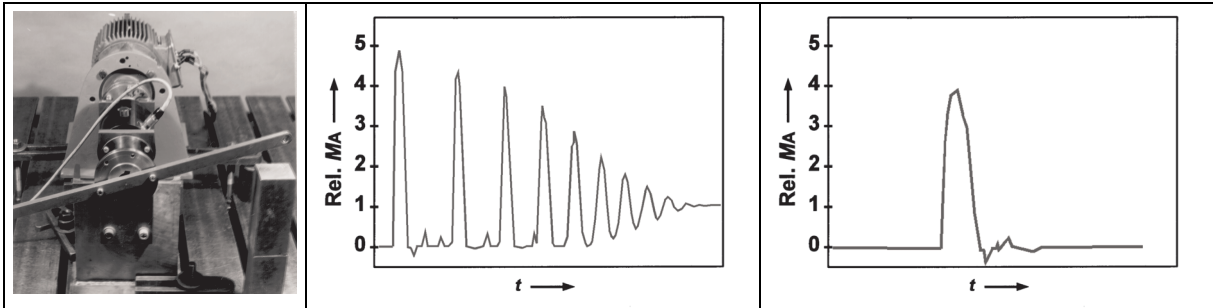


Bild 13.1.3
Versuchsanordnung für eine satte Blockierung aus vollem Lauf

Bild 13.1.4
Drehmomentspitzen fast bis zum 5fachen Anzugsmoment

Bild 13.1.5
Drehmomentspitzen $4M_A$ bei Abschaltung (ohne Bremsung) vor dem Anschlag

13.2 Formen mechanischer Energie

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass die stoßartige Überlastung von mechanischen Bauteilen aus der im Rotor gespeicherten kinetischen Energie gespeist wird.

Mechanische Energie kann in verschiedenen Formen auftreten (Tabelle 13.2):

Tabelle 13.2 Energieformen

Energie form	Kinetische Energie einer rotierenden Masse (Rotationsenergie)	Energie der Lage (potentielle Energie)	Energie einer linear bewegten Masse (kinetische Energie)	Verformung einer Feder
Prinzip				
Formel	$W_{\text{rot}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$	$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$	$W_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$	$W_{\text{feder}} = \frac{F_{\text{max}} \cdot s}{2}$

Erläuterung der Abkürzungen :

W	Arbeit (Energie)	in	Nm
J	Massenträgheitsmoment	in	kgm^2
ω	Winkelgeschwindigkeit	in	1/s
m	Masse	in	kg
g	Erdbeschleunigung	in	m/s^2
h	Höhe (Lage)	in	m
v	lineare Geschwindigkeit	in	m/s
F	Kraft	in	N
s	Federweg	in	m

13.3 Schwungradenergie = Schadenspotential

13.3.1 Rechenbeispiel

Die folgende Rechnung soll deutlich machen, welche Energie (= Zerstörungsarbeit!) in der rotierenden Masse eines mittleren Elektromotors gespeichert ist.

Diese Energie kann frei werden, ohne dass der Motor »Nachschub« aus dem Netz bezieht. Sie wirkt auch dann, wenn der Motor kurz vor einer mechanischen Blockierung **vom Netz getrennt würde**.

Annahme: 4poliger Normmotor $P_N = 7,5 \text{ kW}$
 Leerlaufdrehzahl $n_N = 1500 \text{ r/min}$
 Massenträgheitsmoment $J_{\text{rot}} = 0,045 \text{ kgm}^2$

Kinetische Energie der rotierenden Läufermasse

$$W_{\text{rot}} = \frac{J_{\text{rot}} \cdot \omega^2}{2} = \frac{J_{\text{rot}} \cdot n^2}{182,5} = \frac{0,045 \cdot 1500^2}{182,5} = 555 \text{ Nm}$$

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

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

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

$$m = \frac{W_{\text{rot}}}{g \cdot h} = \frac{555 \text{ Nm}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m}} = 56,6 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = 56,6 \text{ kg}$$

Bei einem freien Fall der »äquivalenten Masse« von 56,6 kg aus einer Höhe von 1 m lässt sich die **Aufprallgeschwindigkeit** auf zwei Arten berechnen:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m}} = 4,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

oder

$$W_{\text{pot}} = W_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot W}{m} = \frac{2 \cdot 555 \text{ Nm}}{56,6 \text{ kg}} = \frac{1110 \text{ kgm} \cdot \text{m}}{56,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^2} = 19,61 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$v = \sqrt{19,61 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 4,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Beim Aufprall der »äquivalenten Masse« von 56,6 kg mit einer Geschwindigkeit von 4,43 m/s tritt eine erhebliche **Verformungsarbeit** auf.

Die maximale Kraft F_{max} hängt von der Steifigkeit der »Feder« ab.

Hierzu zwei Annahmen:

- a) Elastischer Gummipuffer mit einer Durchfederung $s = 10 \text{ mm}$

$$F_{\max} = \frac{2 \cdot W}{s} = \frac{2 \cdot 555 \text{ Nm}}{0,01 \text{ m}} = 111\,000 \text{ N} = 11,3 \text{ Tonnen (Kraft)}$$

- b) Metall auf Metall (z. B. Passfeder in einer Nut) mit Verformung $s = 0,2 \text{ mm}$

$$F_{\max} = \frac{2 \cdot W}{s} = \frac{2 \cdot 555 \text{ Nm}}{0,0002 \text{ m}} = 5550 \cdot 10^3 \text{ N} = 566 \text{ Tonnen (Kraft)}$$

Es wird deutlich, dass es bei solchen Kräften nicht bei der angenommenen Verformung einer Passfeder Verbindung von nur 0,2 mm bleiben würde: Es kommt zwangsläufig zu einem Totschaden von Nut, Passfeder und Welle!

13.3.2 Richtwerte für das Arbeitsvermögen und das Schadenspotential

Nach den Formeln in 13.3.1 wurde das Arbeitsvermögen der 4poligen Rotoren bei einer Drehzahl von 1500 r/min berechnet und im Diagramm 13.3.2.1 dargestellt

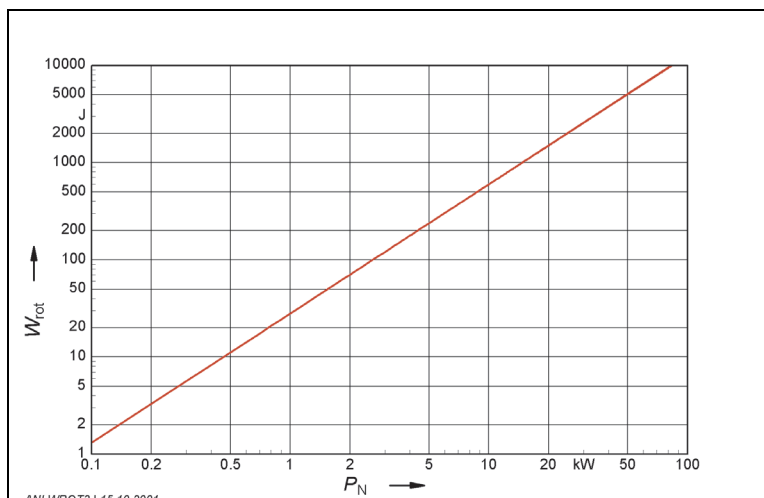


Bild 13.3.2.1
Richtwerte für das
Arbeitsvermögen W_{rot}
der Rotoren von 4poligen
Normmotoren
im Leistungsbereich
 $P_N = 0,1 \dots 100 \text{ kW}$

Da die Größe »Energie« mit der Einheit J nicht sehr anschaulich ist, wurde die Rotationsenergie in ein »Potential der Lage« umgewertet und im Diagramm 13.3.2.2 dargestellt.

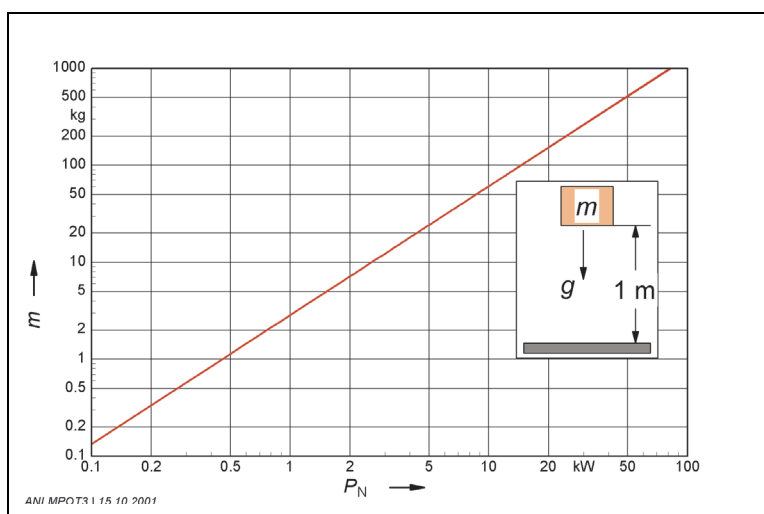


Bild 13.3.2.2
Richtwerte für das
Arbeitsvermögen als
Potential der Lage W_{pot}
der Rotoren von 4poligen
Normmotoren im
Leistungsbereich
 $P_N = 0,1 \dots 100 \text{ kW}$

13.4 Mechanischer Überlastungsschutz

Es ergeben sich u. a. folgende Schlussfolgerungen:

- Thermische Überlastungsschutzeinrichtungen wirken zuverlässig für den Schutz von Wicklungen, können aber aus physikalischen Gründen keinen Schutz von mechanischen Bauteilen gegen stoßartige Überlastung übernehmen.
- Aus der Schwungradenergie des rotierenden Läufers einer elektrischen Maschine können im Blockierungsfall außerordentlich hohe Kräfte resultieren, die zwangsläufig zur Beschädigung von mechanischen Bauteilen (Wellen, Passfedern, Kupplungen) führen.
- Ein sicherer Überlastungsschutz für mechanische Bauteile lässt sich nicht auf »elektrischem Weg«, sondern nur durch eine mechanische Begrenzung von Drehmomentspitzen (z. B. durch Rutschkupplungen, hochelastische Übertragungselemente oder federnde Puffer) erreichen.

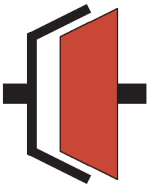
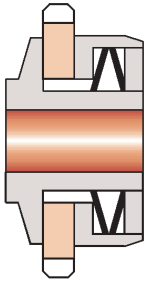
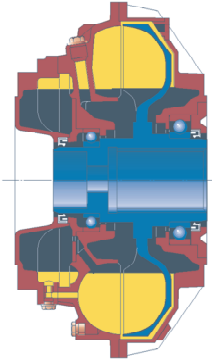
Prinzip	Vorteile	Nachteile
 <p>Rutschkupplung</p>	Einfacher Aufbau	Eingriff in Wellenstrang, Einstellmöglichkeit reduziert; Große Ansprechtoleranz Verschleiß bei häufiger oder längerer Funktion
 <p>Rutschnabe für Kettenrad</p>	kein Eingriff in den Wellenstrang, platzsparend	Einstellmöglichkeit reduziert Große Ansprechtoleranz Verschleiß bei häufiger oder längerer Funktion
 <p>Hydrodynamische Kupplung</p>	Gute Einstellmöglichkeit über Ölmenge, kein Verschleiß; Auslegung für Dauerschlupf	Eingriff in Wellenstrang, Komplizierter Aufbau, hohe Kosten Quelle: VOITH

Bild 12.4
Beispiele für mechanische Kupplungen mit Überlastschuttfunktion

Weiterführende Angaben zu diesem Thema siehe [2.5], [2.6], [2.9].

13.5 Stoßverstärkende Übertragungsmittel

Drehstrom-Asynchronmotoren sind schnelle Starter – vor allem bei Leeranlauf. Schon eine **geringe »Lose«** im Übertragungsweg, multipliziert mit der Getriebe-Untersetzung, stellt den für einen »Leeranlauf« notwendigen freien Weg zur Verfügung. Je nach Härte des Anschlages wurden **Drehmomentspitzen bis zum 18fachen Bemessungsmoment** nachgewiesen.

13.5.1 Leer-Hochlaufzeit

Unter Hinweis auf die Drehmoment-Charakteristik nach Bild 13.5.1.1 gilt für die Hochlaufzeit die bekannte Beziehung

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

t_a Beschleunigungszeit in s
 J Massenträgheitsmoment in kgm^2
 n Drehzahl in 1/min
 M_a Beschleunigungsmoment in Nm

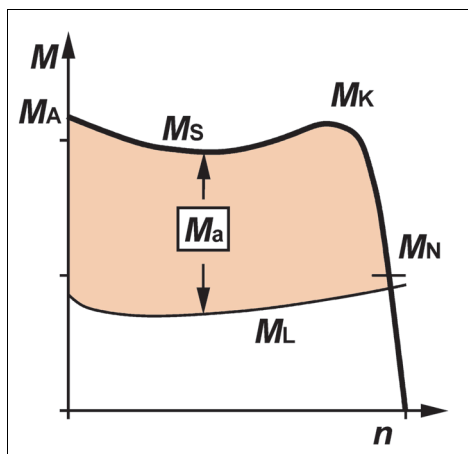


Bild 13.5.1.1
 Typische Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Käfigläufermotors mit den Kennwerten
 n Drehzahl
 M Drehmoment
 M_N Bemessungsmoment
 M_A Anzugsmoment
 M_K Kippmoment
 M_S Sattelmoment
 M_L Lastmoment
 M_a Beschleunigungsmoment

Bei einem Leeranlauf – also Anlauf ohne Last und ohne äußere Massenträgheitsmomente – kommen normale Drehstrom-Asynchronmotoren innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde auf volle Drehzahl.

Richtwerte für die Leer-Hochlaufzeit von listenmäßigen Motoren sind Bild 13.5.1.2 zu entnehmen.

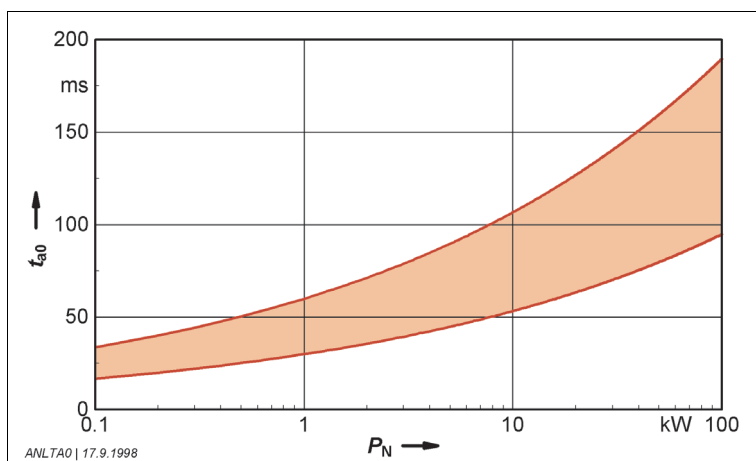


Bild 13.5.1.2
 Richtwerte für die Leer-Hochlaufzeit t_{a0} bei listenmäßigen Getriebemotoren mit Bemessungsleistung P_N

13.5.2 Leer-Hochlaufweg

Bei Leeranlauf benötigt der Läufer eines Drehstrom-Asynchronmotors einen überraschend geringen Weg, um auf volle Drehzahl zu kommen: Die meisten listenmäßigen Normmotoren durchlaufen während der Beschleunigungsperiode weniger als eine Läuferumdrehung. Bei konstanter Winkelbeschleunigung, also stetigem Drehzahlanstieg von 0 auf n_1 , ist

$$\varphi_{a01} = \frac{\omega_1 \cdot t_{a0}}{2} = 3 \cdot n_1 \cdot t_{a0}$$

- φ_{a01} Leer-Hochlaufweg der Läuferwelle in °
- ω_1 Winkelgeschwindigkeit des Läufers in °/s
 $1^\circ/\text{s} = \frac{\pi}{180} \text{ rad/s}; \quad 1 \text{ rad/s} = 57,4^\circ/\text{s}$
- n_1 Drehzahl des Läufers in r/min
- t_{a0} Leer-Hochlaufzeit in s nach Bild 13.5.1.2

Richtwerte für den Leer-Hochlaufweg des Läufers listenmäßiger Normmotoren sind Bild 13.5.2 zu entnehmen. Man findet hieraus den Leer-Hochlaufweg der Arbeitswelle

$$\varphi_{a02} = \frac{\varphi_{a01}}{i} = \varphi_{a01} \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

- n_2 Drehzahl der Arbeitswelle in r/min
- φ_{a02} Leer-Hochlaufweg der Antriebswelle in °
- i Untersetzung

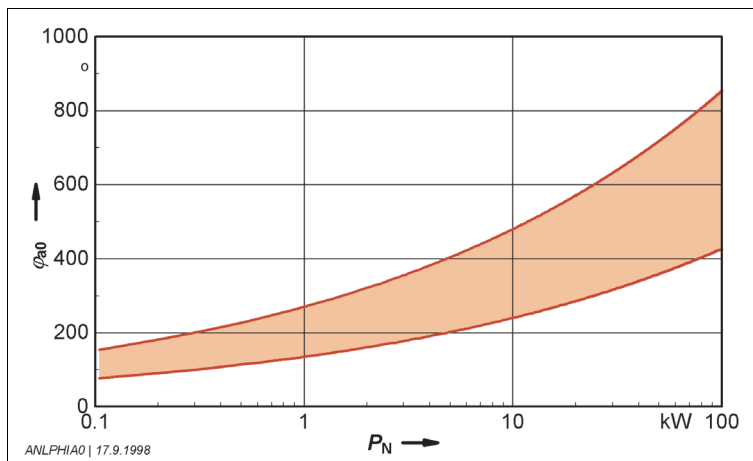


Bild 13.5.2
Richtwerte für den Leer-Hochlaufweg φ_{a01} bei listenmäßigen Normmotoren, bezogen auf die Läuferwelle

Bei der gängigen Untersetzung $i \approx 30$ (für die häufig benötigte Drehzahl an der Arbeitswelle von etwa 50 r/min) genügen also etwa 5 ... 15° freier Weg an der Arbeitswelle, um dem Motor einen »Leeranlauf« zu gestatten, obwohl die Last gekuppelt ist.

Eine Lose dieser Größenordnung ist bei Kettenantrieben und leider auch bei manchen Kupplungsarten – vor allem nach längerer Gebrauchsdauer – durchaus üblich.

13.5.3 Versuchsergebnisse

Die messtechnische Erfassung von Drehmomentspitzen erfordert einen großen Aufwand: Entweder müssen **Dehnungsmessstreifen (DMS)** aufgeklebt und mit Schleifringen verbunden werden, oder der Wellenstrang muss auf der Abtriebsseite des Getriebes unterbrochen werden, so dass eine **Drehmoment-Messnabe** eingefügt werden kann. Mit einer solchen Anordnung wurden die folgenden Messergebnisse gewonnen (Bilder 13.5.3.1 bis 13.5.3.3). Die dabei verwendete Kupplung mit betriebsmäßig stark erhöhtem Drehspiel ist in Bild 7.6.1 gezeigt.

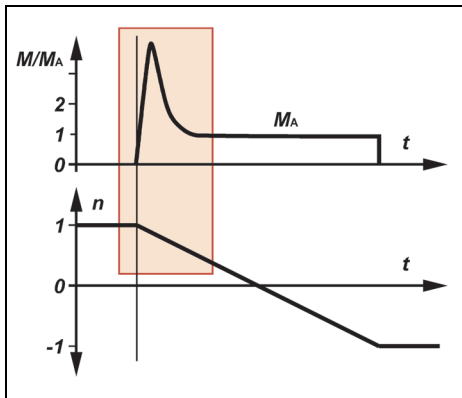


Bild 13.5.3.1

Schema einer Reversierung
Der markierte Ausschnitt ist in den Oszillogrammen 13.5.3.2 und 13.5.3.3 durch direkte Aufnahme der Drehmomentspitze M (mit Messnabe) und der Drehzahl n (mit Tacho) über der Zeit t mittels x-y-Schreiber dargestellt

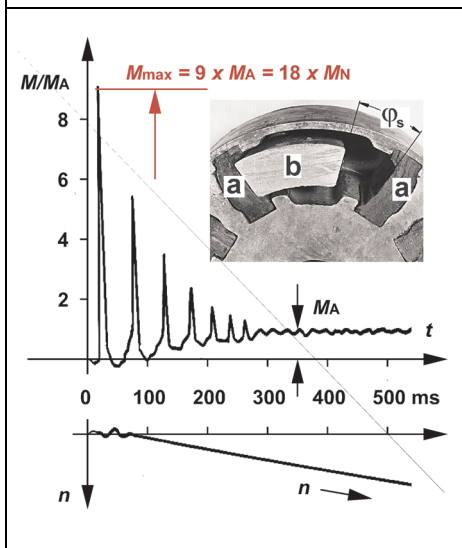


Bild 13.5.3.2

Aus der kinetischen Energie erzeugte Drehmomentspitze M_{\max} im Vergleich zum motorisch entwickelten Anzugsmoment M_A bei einem Reversiervorgang mit spielbehafteter Klauenkupplung nach Bild 8.1.2

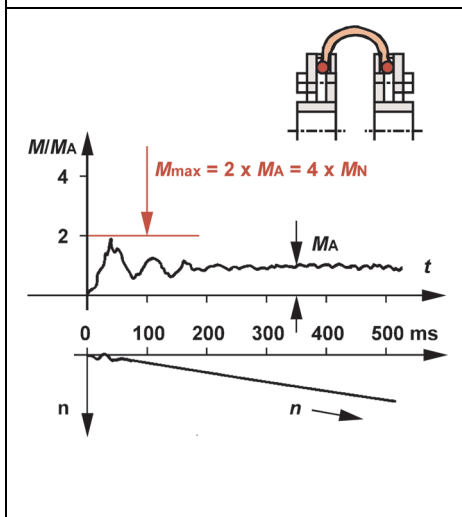


Bild 13.5.3.3

Aus der kinetischen Energie erzeugte Drehmomentspitze M_{\max} im Vergleich zum motorisch erzeugten Anzugsmoment M_A bei einer hochelastischen, spielfreien Wellenreifenkupplung nach Bild 8.1.3 und Ref. A in Tabelle 8.1.4

13.6 Stoßdämpfende Übertragungsmittel

Neben den bekannten, teilweise aufwendigen mechanischen Überlastungssicherungen (z. B. auf der Basis von Rutschnaben, Scherbolzen, Klinken, Flüssigkeit) soll in diesem Rahmen eine Lösung erwähnt werden, die schon im Bild 13.5.3.3 ihre stoßdämpfende Wirkung beim Reversieren bewiesen hat.

Wenn das elastische Glied eine extrem hohe Verdrehung erlaubt, kann es die Schwungradenergie des Motorläufers aufnehmen und sogar die Wirkung einer Rutschkupplung ersetzen. Bild 13.6.1 zeigt die in der Versuchsanordnung nach Bild 13.1.3 mit einer Drehmoment-Messnabe aufgenommenen und mit einem Schreiber aufgezeichneten Drehmomentspitzen bei einer harten Blockierung Stahl auf Stahl. Wird bei sonst gleichbleibenden Bedingungen eine hochelastische **Wellenreifenkupplung** in den Drehmomentfluss zwischengeschaltet, so wird die Drehmomentspitze gemäß Bild 13.6.2 erheblich reduziert.

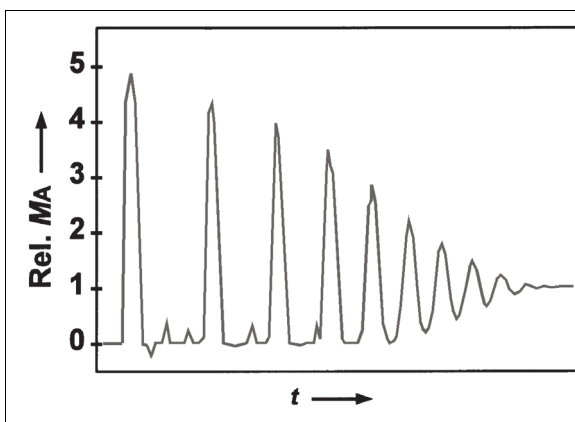


Bild 13.6.1
Drehmomentspitzen bei harter Blockierung Stahl auf Stahl (siehe Bild 13.1.3)

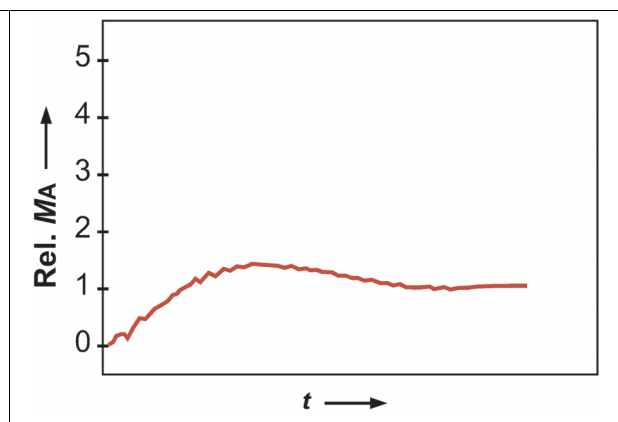


Bild 13.6.2
Drehmomentdämpfung bei weicher Blockierung durch Zwischenschaltung einer hochelastischen Wellenkupplung

Bild 13.6.3 zeigt Prinzip und Anwendung einer hochelastischen Wellenkupplung, bei der ein Gummireifen als Übertragungsmittel verwendet wird.

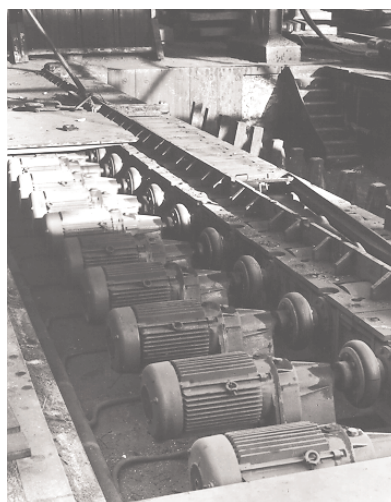
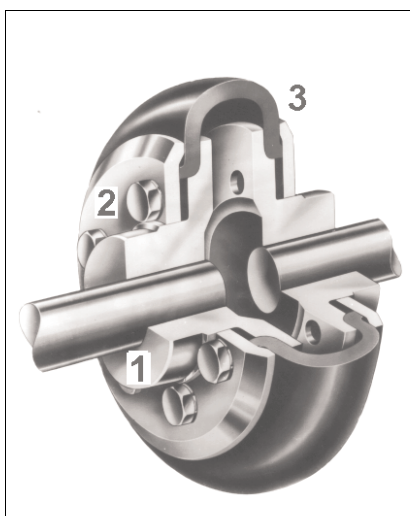


Bild 13.6.3
Hochelastische, spielfreie Kupplung, bestehend aus Nabe (1), Druckstück (2) und Wellenreifen (3) aus Gummi mit Gewebeeinlage (System PERIFLEX, Fabrikat STROMAG) Prinzip (links) und Anwendung an einem Knüppel-Scherenrollgang (rechts)

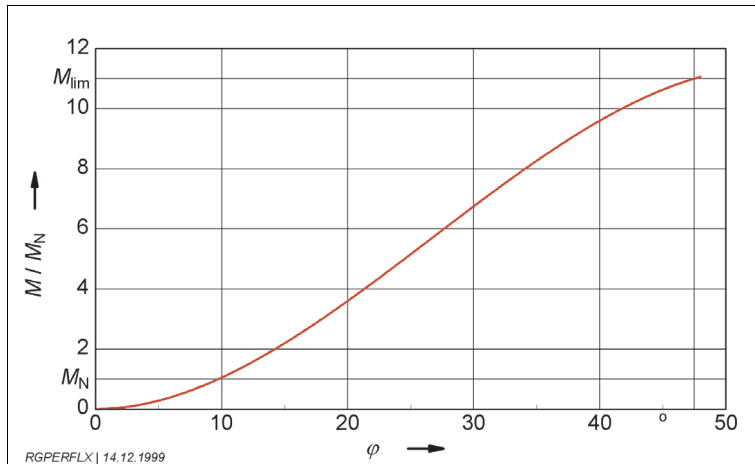


Bild 13.6.4
Typische Verdrehcharakteristik einer hochelastischen Kupplung mit Wellenreifen (System PERIFLEX, Fabrikat STROMAG), Verdrehwinkel φ in Abhängigkeit vom Drehmoment M bis zum Bruch M_{lim}

Das Bild 13.6.4 ist repräsentativ für diese Kupplungsreihe. Es zeigt, dass eine sehr große Verdrehung φ auftreten kann, ehe der Gummireifen reißt. Damit ist die Voraussetzung für **einen Abbau von Drehmomentspitzen** gegeben. Wenn die Kupplung in einem Notfall die Funktion von Scherstiften oder einer Rutschkupplung übernimmt, so wiegt der Verlust des Wellenreifens gering im Vergleich zu den Schäden, die sonst am Getriebe oder an der Arbeitsmaschine entstehen könnten. Ein Tausch des Wellenreifens ist ohne Abbau von Antrieb und Arbeitsmaschine leicht möglich, wie Bild 7.12 zeigt.

Die stoßdämpfende Wirkung des hochelastischen Wellenreifens erklärt sich aus folgenden Zusammenhängen: Die **Rotationsenergie** im Läufer des Elektromotors wird bei einer Blockierung in **Verformungsarbeit** umgesetzt:

$$W = \frac{J_{rot} \cdot \omega^2}{2} = \frac{M_{max} \cdot \varphi}{2}$$

- W Arbeit (Energie)
- J_{rot} Massenträgheitsmoment des Rotors
- ω Winkelgeschwindigkeit des Rotors
- M_{max} maximales Stoßmoment am Ende der elastischen Verdrehung
- φ elastischer Verdrehwinkel

Da die Arbeit W (und damit die Fläche der »Stoßdreiecke« im Bild 13.6.5) konstant ist, wird das maximale Stoßmoment M_{max} am Ende des Verdrehwinkels um so geringer, je größer der Weg der elastischen Verformung φ ist.

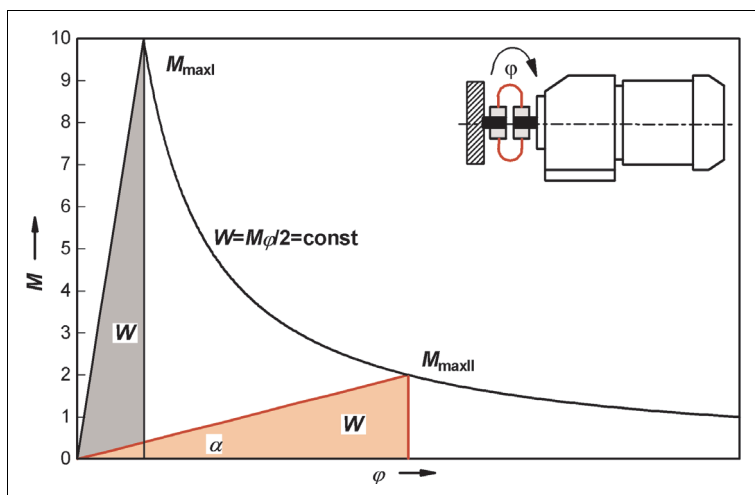
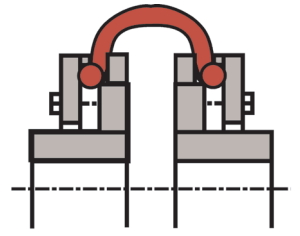
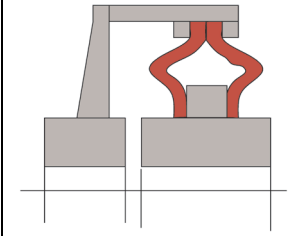
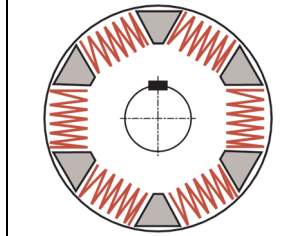
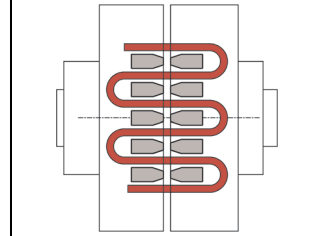


Bild 13.6.5
Maximale Stoßmomente M_{max} in Abhängigkeit von der elastischen Verformung φ von Kupplungen mit verschiedener Drehsteifigkeit $\tan \alpha$ bei Aufnahme einer bestimmten kinetischen Energie W

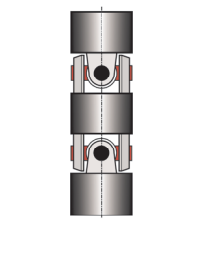
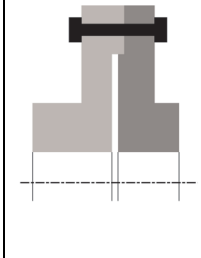
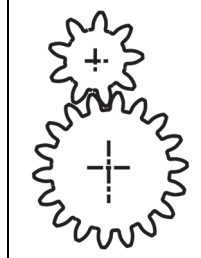
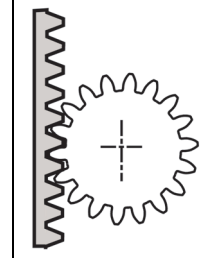
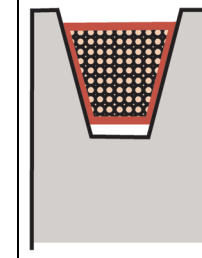
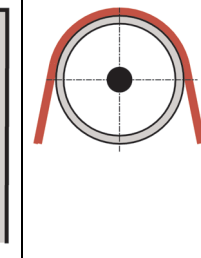
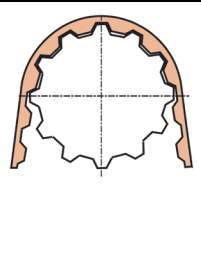
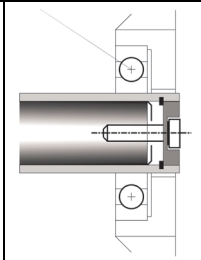
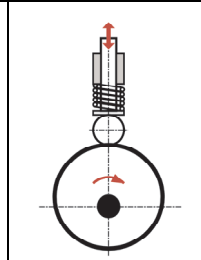
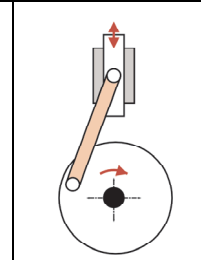
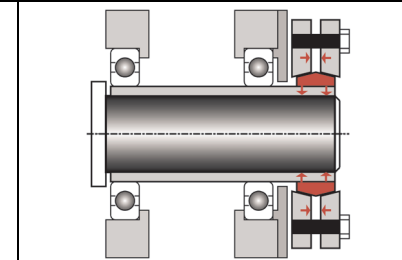
13.7 Beispiele für die Klassifizierung von Übertragungsmitteln

Als wesentliches Element geht die folgende Klassifizierung in den BAUER-Betriebsfaktor ein:

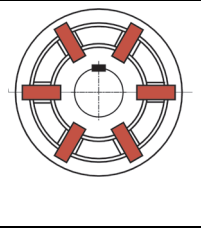
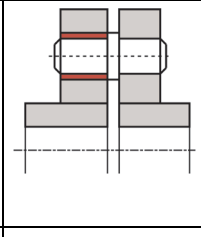
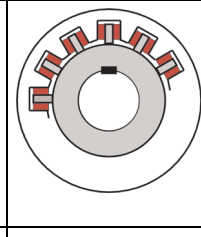
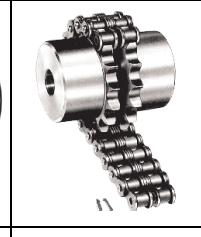
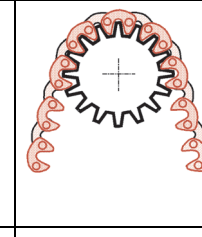
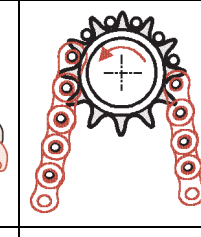
13.7.1 Stoßdämpfend

			
Gummireifen	Gummiwulst	Schraubenfedern	Schlangenfeder

13.7.2 Stoßneutral

					
Gelenkwelle	Scheibenkupplung	Zahnräder	Zahnstange	Keilriemen	Flachriemen
					
Zahnriemen	Hohlwelle (Passfeder)	Exzenter	Kurbel	Hohlwelle (Schrumpfscheiben-Verbindung)	

13.7.3 Stoßverstärkend

					
Klauen-Kupplung	Bolzen-Kupplung	Druckstollen-Kupplung	Ketten-Kupplung (Kette geöffnet)	Zahnkette	Rollenkette

Einzelheiten zur zahlenmäßigen Bewertung dieser Klassifizierung und zur Bestimmung des Betriebsfaktors siehe [2.9].

13.8 Schalten in Phasenopposition

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde für Anzugsstrom und Anzugsmoment der quasistationäre Zustand vorausgesetzt. In der »alten« 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 (Bild 13.8). 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:

- Spitzenwert des Stromes $I_{\max} (2 \dots 5) \cdot I_A$,
- Spitzenwert des Moments $M_{\max} (3 \dots 6) \cdot M_A$.

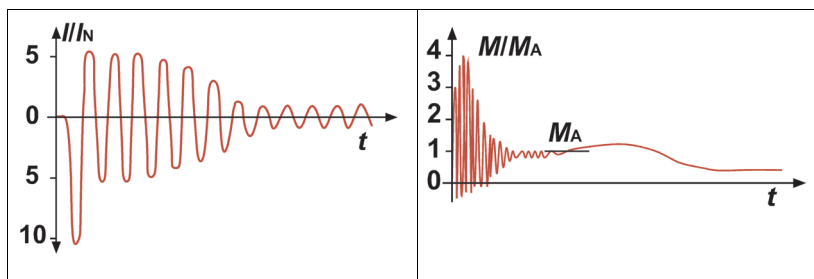


Bild 13.8
Spitzenwerte beim
Einschalten vor dem
Einschwingen in den
stationären Zustand
links: Strom
rechts: Moment

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 von 8 bis 10fachem Bemessungsmoment zu erwarten: Dies ist eine außergewöhnlich hohe Beanspruchung für die mechanischen Übertragungselemente. Die Forderung ist überzogen 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 bis 8fachem Bemessungsmoment liegen.

13.9 Stern-Dreieckschaltung kein Sanftanlauf

Bei Y- Δ -Anlauf gegen Schwerlast oder Vollast wird die Anlaufspitze von Moment und Strom ungenügend gedämpft, wie Bild 13.9.1 zeigt.

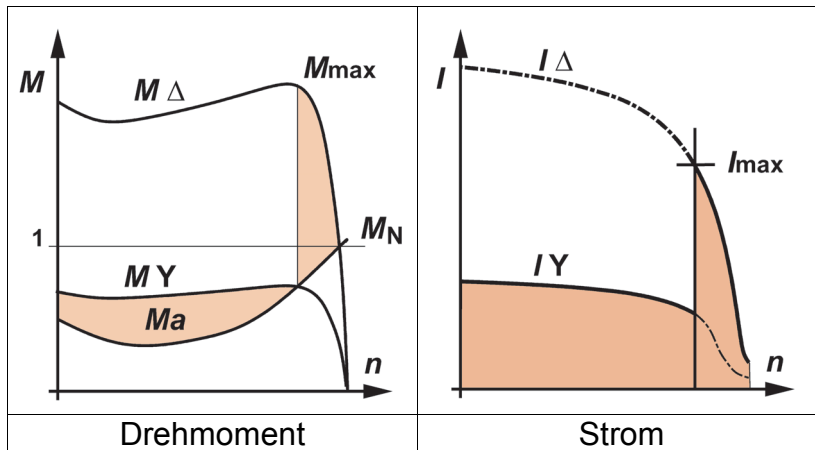


Bild 13.9.1
Spitzenwerte von Moment M_{max} und Strom I_{max} bei ungünstiger Umschaltung von Y auf Δ wegen Anlauf gegen zu hohe Last

Weitaus gravierender sind jedoch Vorgänge, die von *Bunzel* in einer umfangreichen und mathematisch anspruchsvollen Analyse [3.14] beschrieben wurden: Beim Stern-Dreieck-Anlauf von Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern entstehen in der Umschaltphase je nach Phasenlage von **Restfeld** und Wiedereinschaltvorgang hohe Strom- und Drehmomentspitzen, die bei Belastung des Motors durch eine Arbeitsmaschine mit einem hohen Massenträgheitsmoment zu Kupplungsschäden führen können. Typisch für einen derartigen Schadenshergang ist, dass die Rückseite der Passfeder beschädigt wird – der Schaden also offensichtlich durch einen **negativen Drehmomentenstoß** verursacht wird. Eine Simulationsrechnung ergab negative Drehmomentspitzen bis fast zum 15fachen Bemessungsmoment (Bild 13.9.2).

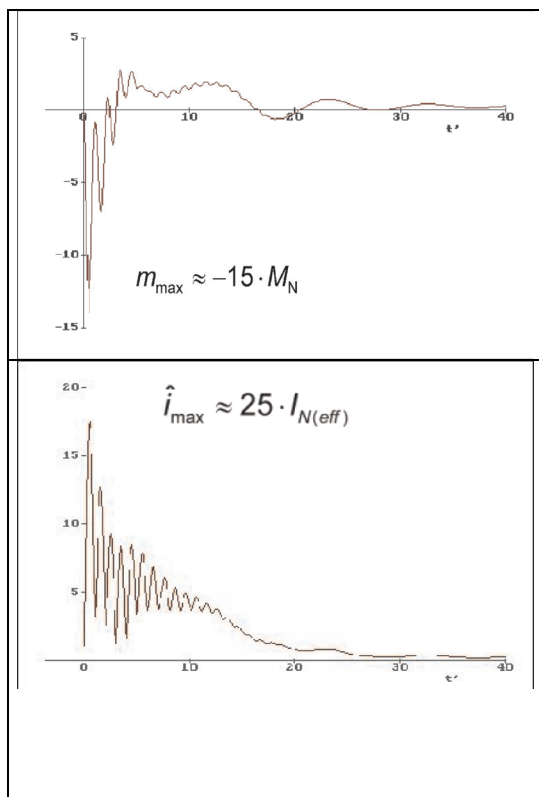


Bild 13.9.2
Simulation des Drehmomentverlaufes bei Stern-Dreieck-Umschaltung mit 5 ms Schaltverzug, hohe negative Drehmomentspitze fast 15faches Bemessungsmoment

Bild 13.9.3
Simulation des Stromverlaufes bei Stern-Dreieck-Umschaltung mit 5 ms Schaltverzug; hoher Spitzenwert des Stromes ca. 25facher Effektivwert des Bemessungsstromes





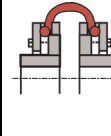


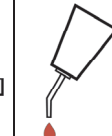
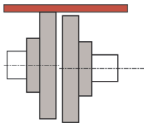
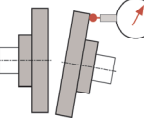
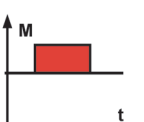
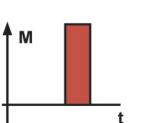
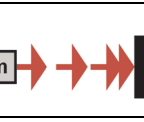
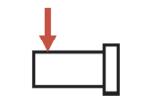
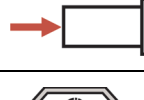
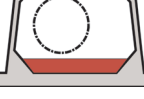
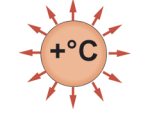

Quelle der Bilder 13.9.2 und 13.9.3:
Dr. Bunzel, VEM motors

Diese Betrachtungen zeigen, dass die Stern-Dreieck-Einschaltung bei vielen Anwendungsfällen den Ansprüchen eines »sanften Anlaufs« nicht genügt.

14 Schutzmöglichkeiten für mechanische Bauteile

Die Tabelle 14.1 zeigt schematisch einige der häufig vorkommenden mechanischen Überlastungsarten und die Schutzmöglichkeiten.

Tabelle 14.1 Schutzwirkung üblicher Schutzelemente bei mechanischer Überlastung

Überlastungsart	Schutzelement							
								
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼	■	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼	■	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	▼	▼	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼	■	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼	■	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■

kein Schutz ▼ bedingter Schutz ■ voller Schutz

Tabelle 14.2 Erläuterungen zu den Schutzelementen in Tabelle 14.1





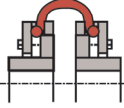



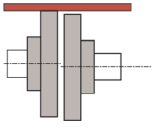
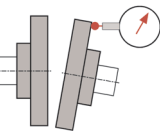
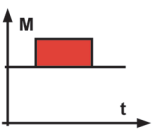
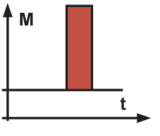

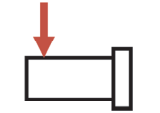

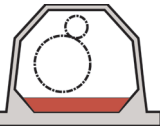
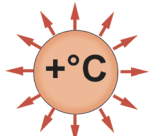

Symbol	Erklärung
	träge Schmelzsicherung Nennwert $(1,6 \dots 2,5) \cdot I_N$
	stromabhängig verzögerter thermischer Überstromauslöser (Bimetallrelais = Motorschutzschalter) Einstellwert $I_E = I_N$
	thermischer Motorschutz TMS (Thermistor-Auslösegerät) NAT nach Abschnitt 6.2.6 Ankoppelungszeit $T_K < 6$ s
	Kupplung mit relativ hoher Drehsteifigkeit, z. B. Klauenkupplung, Bolzenkupplung
	Kupplung mit relativ hoher elastischer Verdrehung, z. B. mit Wellenreifen, Federn
	Rutschkupplung, Sicherheitskupplung, hydraulische Kupplung, Schersbolzen, Kettenrad mit Rutschnabe, Stoßdämpfer, elastischer Puffer
	richtige Planung
	zweckmäßige und rechtzeitige Schmierung

Tabelle 14.3 Erläuterungen zu den Überlastungsarten in Tabelle 14.1

Symbol	Erklärung	siehe Abschnitt
	Achsversatz (Fluchtungsfehler)	7.3
	Winkelversatz (Fluchtungsfehler)	7.3
	langzeitige Überlastung, z. B. $M \geq 1,2 \cdot M_N$	11, 12
	kurzzeitiger Drehmomentstoß, z. B. $M \geq 2 \cdot M_N$	13
	Blockierung	13
	zu hohe Radialkraft	7.7, 11.3
	zu hohe Axialkraft	8
	Schmierstoffmangel (Qualität oder Menge)	10
	langzeitig zu hohe Umgebungstemperatur $\geq 30 \text{ °C}$	4.2
	beim Anlauf zu tiefe Umgebungstemperatur $\leq -20 \text{ °C}$	4.2.3

15 Schutzmöglichkeiten für Getriebe und Motoren

Lagerschäden bei Elektromotoren und Getriebeschäden bei Getriebemotoren machen den relativ höheren Anteil des Reparaturaufkommens bei der Instandsetzung elektrischer Maschinen aus.

Die wichtigsten Gründe: Während für den thermischen Überlastungsschutz der Wicklung ausgereifte und relativ kostengünstige Möglichkeiten zur Verfügung stehen, sind die mechanischen Komponenten den unkontrollierten Stoßbelastungen schutzlos ausgeliefert (Bild 15).

Falsche oder vernachlässigte Schmierung ist ein anderer wichtiger Grund.

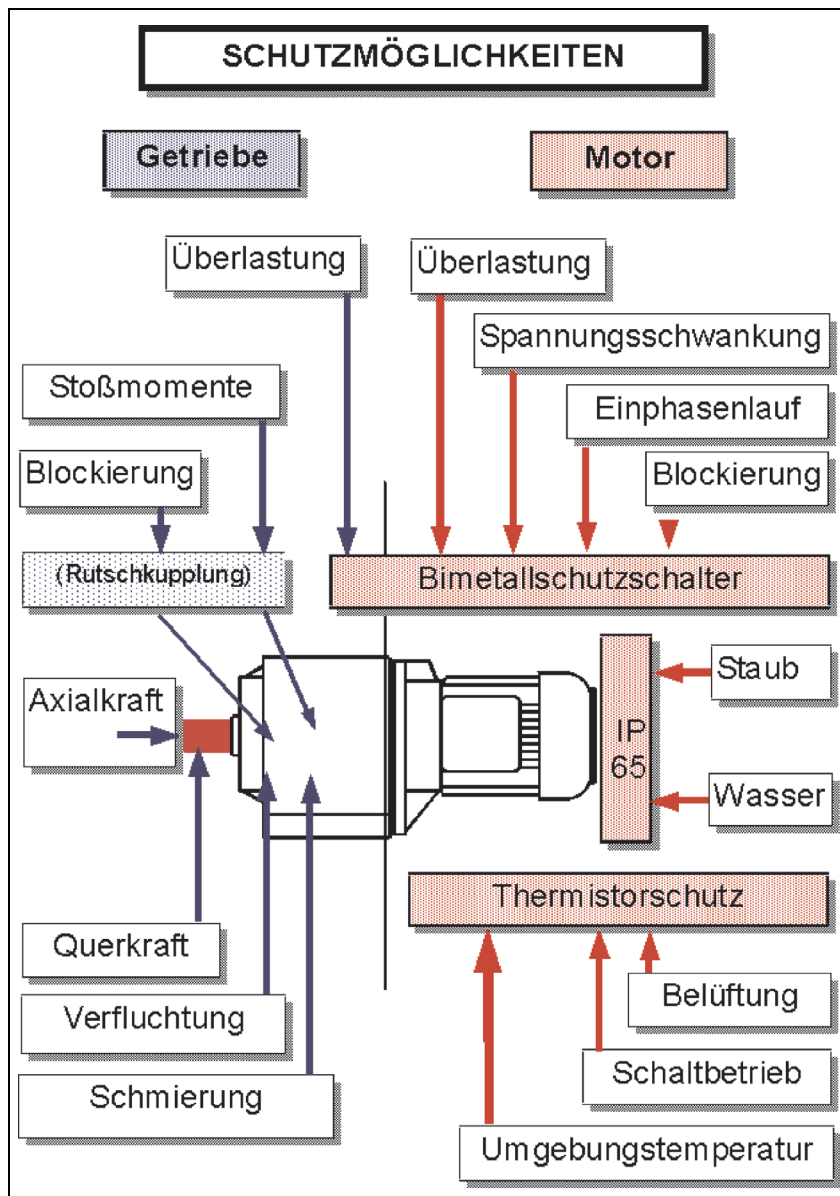


Bild 15 Schema der Schutzmöglichkeiten für Getriebe und Motoren
Begründung für den relativ hohen Anteil mechanischer Schäden an der Gesamtzahl der Instandsetzungsarbeiten

LITERATURVERZEICHNIS

1 Normen, Bestimmungen, Vorschriften

- 1.1 DIN EN 60529 / VDE 0470 Teil 1
Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)
- 1.2 DIN VDE 0100-510 / VDE 0100 Teil 510
Errichten von Starkstromanlagen bis 1000 V;
Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel; Allgemeine Bestimmungen
- 1.3 DIN VDE 0100-737 / VDE 0100 Teil 737
Errichten von Niederspannungsanlagen;
Feuchte und nasse Bereiche und Räume; Anlagen im Freien
- 1.4 DIN IEC 721 Teil 2-1
Klassifizierung von Umweltbedingungen; Natürliche Einflüsse; Temperatur
und Luftfeuchte
- 1.5 DIN IEC 721 Teil 2-2
Klassifizierung von Umweltbedingungen; Natürliche Einflüsse; Niederschlag
und Wind
- 1.6 DIN EN 60034-1 / VDE 0530 Teil 1
Drehende elektrische Maschinen; Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten
- 1.7 DIN EN 60947-4-1 / VDE 0660 Teil 102
Niederspannungs-Schaltgeräte Teil 4-1; Elektromechanische Schütze und
Motorstarter
- 1.8 DIN 44080 (zurückgezogen)
Temperaturabhängige Widerstände; Kaltleiter; Technische Werte und
Prüfbestimmungen
- 1.9 DIN 44081
Temperaturabhängige Widerstände; Kaltleiter; Thermischer Maschinenschutz
- 1.10 DIN VDE 0660-302 / VDE 0660 Teil 302
Thermischer Maschinenschutz für umlaufende elektrische Maschinen;
Temperaturfühler und Auslösegeräte
- 1.11 IEC 60034-17
Cage induction motors when fed from inverters; Application guide
- 1.12 DIN 43760 (zurückgezogen)
Elektrische Temperaturlaufnehmer
- 1.13 DIN EN 60034-7 / VDE 0530 Teil 7
Drehende elektrische Maschinen; Klassifizierung der Bauarten,
der Aufstellungsarten und der Klemmenkastenlage (IM-Code)
- 1.14 DIN EN 60034-14 / VDE 0530 Teil 14
Drehende elektrische Maschinen; Mechanische Schwingungen von
bestimmten Maschinen mit einer Achshöhe von 56 mm und höher.
Bewertung und Grenzwerte der Schwingungen
- 1.15 DIN IEC 60038
IEC-Normspannungen
- 1.16 DIN VDE 0165 / VDE 0165 (überholt)
Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen

- 1.17 DIN EN 60079-14 / VDE 0165 Teil 1
Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen;
Teil 14: Elektrische Anlagen in gasexplosionsgefährdeten Bereichen (ausg.
Grubenbaue)
- 1.18 EN 60034-5 / DIN VDE 0530 Teil 5
Drehende elektrische Maschinen;
Schutzarten aufgrund der Gesamtkonstruktion von drehenden elektrischen
Maschinen (IP-Code); Einteilung
- 1.19 DIN EN 50281-1-1 / VDE 0170/0171 Teil 15-1-1
Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem
Staub;
Teil 1-1: Elektrische Betriebsmittel mit Schutz durch Gehäuse; Konstruktion
und Prüfung
- 1.20 *Fährlich, R.; Mattes, H.:*
Explosionsschutz; Kommentar zur ExVO und BetrSichV;
Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2002
- 1.21 DIN EN 50102 / VDE 0470 Teil 100
Schutzarten durch Gehäuse für elektrische Betriebsmittel (Ausrüstung) gegen
äußere mechanische Beanspruchung (IK-Code)
- 1.22 DIN EN 60034-6 / VDE 0530 Teil 6
Drehende elektrische Maschinen
Einteilung der Kühlverfahren (IC-Code)
- 1.23 DIN EN 60204-32 / VDE 0113 Teil 32
Elektrische Ausrüstung von Maschinen; Anforderungen für Hebezeuge

2 Bücher, Broschüren

- 2.1 *Greiner, H.:*
IP-Schutzarten
Sonderdruck SD 197 der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.2 *Falk, K.:*
Der Drehstrommotor – Ein Lexikon für die Praxis; Berlin: VDE-Verlag, 1997
- 2.3 *Rentzsch, H.:*
Elektromotoren; Turgi (Schweiz): ABB-Handbuch, 1992
- 2.4 *Greiner, H.:*
Elektrische Antriebe mit Getriebe-Motoren
Sonderdruck SD 496 der Fa. Bauer Antriebstechnik, Esslingen
- 2.5 *Greiner, H.:*
Installation und Instandhaltung von Getriebe-Motoren
Publikation der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.6 *Greiner, H.:*
Überlastungsschutz bei Getriebe-Motoren
Sonderdruck SD 1589 der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.7 *Greiner, H.:*
Umrichter-Motoren
Sonderdruck SD 2996 der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.8 *Greiner, H.:*
Anlaufen, Bremsen, Positionieren mit Drehstrom-Asynchronmotoren
Publikation der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.9 *Greiner, H.:*
Betriebsfaktoren
Sonderdruck SD 3296 der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.10 *Sturm, W. u. a.:*
Schalten, Schützen, Verteilen in Niederspannungsnetzen;
SIEMENS-Handbuch; Erlangen und München: Publicis MCD Verlag, 1997
- 2.11 Anwendungshandbuch Technische Informationen der Fa Moeller
- 2.12 *Rosenberg, W.:*
VDE-Prüfung nach VBG4; VDE-Schriftenreihe 43; Berlin: VDE-Verlag, 1997
- 2.13 *Sonnenfeld, E.:*
Wo steht was im VDE-Vorschriftenwerk; VDE-Schriftenreihe 1;
Berlin: VDE-Verlag, 1995
- 2.14 *Christner, V.:*
Jahrbuch Elektromaschinenbau; Heidelberg: Hüthig und Pflaum,
- 2.15 *Kiefer, G.:*
VDE 0100 und die Praxis, Berlin: VDE-Verlag, 1996
- 2.16 *Dreier, H.; Stadler, H.; Engel, U.; Wickboldt, H.:*
Explosiongeschützte Maschinen der Schutzart "Erhöhte Sicherheit" (Ex)e;
Band 3 der PTB-Prüfregeln; Braunschweig: Deutscher Eichverlag, 1978
- 2.17 *Hörmann, W.; Nienhaus, H.; Schröder, B.:*
Schnelleinstieg in die neue VDE 0100-410; Schutz gegen elektrischen Schlag;
VDE-Schriftenreihe 140; Berlin: VDE-Verlag, 1997

- 2.18 *Hofmann, J.; Falk, K.:*
LOHER Technische Schriften 3; Aufstellen und Kuppeln von
Drehstrommotoren
- 2.19 *Nowak, K.:*
Normen und Schutzarten für die Elektro-Installation;
München: Pflaum Verlag, 1985
- 2.20 Technische Information Motorschutz der Fa. Kriwan, Forchtenberg
- 2.21 *Olenik, H.; Greiner, H. u. a.:*
Elektrotechnik und Explosionsschutz; Elektrische und elektronische Anlagen
in Betriebsstätten mit Explosionsgefährdung;
Heidelberg: Hüthig Fachverlage, 1998
- 2.22 *Greiner, H.:*
Anlaufen, Bremsen, Positionieren mit Drehstrom-Asynchronmotoren
Publikation der Fa. Danfoss Bauer GmbH, Esslingen
- 2.23 *Esser, H-W.:*
Schaltgeräte für den Schutz elektrischer Motoren
Handbuch der Fa. Moeller, Bonn, 1998
- 2.24 *Esser, H-W.:*
Systematik der Schutzsysteme in der Niederspannungs-Technik
Handbuch der Fa. Moeller, Bonn, 1998
- 2.25 *Lenzkes, D. und Kunze, H.J.:*
Elektrische Ausrüstung von Hebezeugen;
Erläuterungen zu DIN EN 60204-32 / VDE 0113 TI. 32
VDE-Schriftenreihe Band 10 (2000); VDE Verlag Berlin und Offenbach

3 Fachaufsätze

- 3.1 *Rudolph, W.:*
Umwelteinflüsse der Tropen auf elektrische Anlagen.
etz-b (1976), H. 1, S. 15 ... 17
- 3.2 *Lehmann, K. H.; Steinbach, F. K.:*
Der Phasenausfallschutz, ein Randproblem des Motorschutzes.
BBC-Nachrichten, Juni 1963
- 3.3 *Sperling, P. G.:*
Betrieb eines Drehstrommotors bei Ausfall einer Phase.
SIEMENS-Druckschrift 43 H. 2, 1969,
- 3.4 *Hörmann, W.:*
Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Körperströme bei
frequenzumrichter gesteuerten Drehstrommotoren. de (1995) H. 6
- 3.5 *Hörmann, W.:*
Beeinflussung von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen durch Umrichter.
de (1995) H. 22
- 3.6 *Grass, H.:*
Das Verhalten von Drehstrom-Asynchronmotoren im
Frequenzumrichterbetrieb.
Sonderdruck der Fa. Felten und Guillaume
- 3.7 *Kaufhold M.; Börner G.:*
Langzeitverhalten der Isolierung pulsumrichter gespeister
Niederspannungsasynchronmaschinen.
Tagungsunterlagen zum ZVEI/FV 1 Erfahrungsaustausch Umrichterspeisung
- 3.8 *Sauer, K.:*
Aufbau und Einsatz von Widerstands-Temperatur-Sensoren. ep (1995) H. 8
- 3.9 *Berth, M.; Eberhardt, M.; Kaufhold, M.; Speck, J.; Auinger, H.:*
Elektrische Belastung und Ausfallverhalten der Wicklungsisolierung von
Asynchronmaschinen mit Umrichterspeisung.
Beitrag zu den ETG-Fachtagen, 1995
- 3.10 *Greiner, H.:*
Halbkeilwuchtung bei Elektromotoren; Hintergründe der neuen Norm und
Auswirkungen für den Anwender.
de (1998) H. 18
- 3.11 *Greiner, H.:*
Umstellung der Einführungsgewinde von Pg auf metrisch.
ema (1998) H. 10
- 3.12 *Dorner, H.:*
Betrieb von Umrichtern und FI-Schutzschaltern in einer Anlage
ant (2000) H. 4

Stichwortverzeichnis

A	Abschnitt
Abbau von Drehmomentspitzen	13.6
Abbild, thermisches	6.2
Abdeckung	2.1.2
Abdichtung am Klemmenkasten	3.2.2.2
Abdichtung der Wälzlager	3.2.2.3
abgeschlossene Betriebsstätte	2.1.2
Abkühlzeit	5.3.3
Abkühl-Zeitkonstante	5.3.3
Abschaltvorgang	5.2.3.1
Abschrankung	2.1.2
absichtliches Berühren	2.1.3
Abstand, ausreichender	3.1
Abstandshalter	2.1.2
Abstufung der Einführungsgewinde	3.4.1
AGMA (Öl)	10.9
Alleinschutz	6.2.5
Alterungsbeständigkeit	10.4
Ankoppelungszeit	6.2.3.2
Anlauf am Umrichter	5.3.10.1
Ansprechwerte von Bimetallauslösern	5.2.4.5
Anstiegsgeschwindigkeit	6.2.5
Anteil der Drehstrommotoren	1.1
Anteil der Getriebemotoren	1.2
Antriebstechnik	1
Anwendung an Deck	4.4.1
Anwendungsbeispiel für senkrechte Aufstellung	10.10.7
Anzugsmoment	5.1.2
Anzugsstrom	5.1.2
Arbeitsmaschine	12.3
Arbeitsmaschine	5.1
Arbeitsvermögen	13.3.2
ATEX	10.7.2
Aufstellung	7
Aufstellung an Deck	4.4.1
Aufstellung im Freien	4.7.1
Aufstellung im Freien, Art des Betriebsmittels	4.7.3
Aufstellung im Freien, Errichtungsbestimmungen	4.7.2
Aufstellung im Freien, Normbezüge	4.7
Aufstellungshöhe	4.3
Aufstellungsort	7.1
Aufziehen der Übertragungsmittel	8.8
Ausfallursache, Wälzlager	3.2.2.3
AusgangsfILTER	5.2.3.2
Ausgleichsvorgang	13.7
Auslaufbremsung, elektrodynamische	5.3.8
Ausrichtung	7.3
Ausscheidung	4.5.5
Außenleiter	5.2.4

Außenlüfter	2.1.2
Aussetzbetrieb	5.3
Aussetz-Schalbetrieb	5.3
Austauschbarkeit der Einführungsgewinde	3.4.2
axiale Wellenbelastung	11.4
B	
Bauform	7.2
Befestigung	7.4
Begrenzung der Öffnungsweite	3.1.4
Beharrungstemperatur	5.3.2
Belastbarkeit der Arbeitwelle	8.4
Belastung	5.1.1
Belastungskennlinie	5.1.1
Bemessungsmoment, äquivalentes	12.3
Bemessungsstrom	5.1.2
Bereich A	5.2.1.2
Bereich B	5.2.1.2
Berührungsschutz	2
Berührungsschutz im IP-Code	3.1
Berührungsschutz nach der ersten Kennziffer	3.1.4
Berührungsschutz nach Zusatzbuchstaben	3.1.3
Beschleunigung, maximale	4.8.3
Betriebsarten	5.3
Betriebsfaktor	12.3
Betriebskennlinie	5.1.1
Betriebsmittel, industrielle	2.1.3
Betriebsverhalten bei Spannungsänderung	5.2.2
Bimetallauslöser	5.2.4.5
Bimetallrelais	6.1.2
Blockierung	5.1.2
Blockierzeit	5.3.9
Bremsarbeit, mechanische	5.3.9
Brems-Chopper	5.3.10.2
Bremsung am Umrichter	5.3.10.2
Bremsung, frequenzgeführt	5.3.10.2
Bremsung, frequenzgeführte generatorische	5.3.10.2
Bremsung, übersynchrone, generatorische	5.3.8.1
Bremswächter	5.3.8.2
Buchstabe, ergänzender	4.4.1
C	
CLP 220	10.9
D	
Dahlanderschaltung	5.3.8.4
Dauerbelastbarkeit	12.3
Dauerberieselung	4.4.6
Dauerbetrieb	5.3.2
Definition für Drehmomentstöße	12.1
Dehnungsmessstreifen	13.5.3
Dichtbereich	3.4.1
Dichtstelle zwischen Motor und Getriebe	10.10.3
Dichtung	10.10

Dichtung an der Läuferwelle	10.10.4
Dichtungen	10.10
Direktanlauf	5.3.10.1
direkte Drehmomentmessung	13.1
direktes Berühren	2.1
Draht	3.1.2
Drehmoment, fiktives	12.3
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	5.1.2
Drehmomentkennlinie, generatorische	5.3.8.1
Drehmoment-Messnabe	13.5.3
Drehmomentspitzen	13
Drehmomentspitzen, Abbau von	13.6
Drehmomentstoß, heftiger	12.3
Drehmomentstoß, mäßiger	12.3
Drehmoment-Überlastbarkeit	5
Drehmomentüberlastung, flache Stromkennlinie	11.1
Drehrichtung und Krafrichtung	8.6
Drehrichtungs-Umschaltung	5.3.6
Drehstrom-Asynchronmotor	1
Drehstrommotor	1
Drehzahl	1
Drehzahl, niedrige	5.4.3
Drehzahländerung, frequenzgeführte	5.3.10.1
Drehzahlbedarf	1.2
Drehzahl-Umschaltung	5.3.7
Drehzahlwächter	5.3.8.2
Dreieckschaltung	5.2.4.3
Druckaufnahmefähigkeit (Schmierstoff)	10.3
Durchlauf-Schaltbetrieb	5.3
Durchzugbelüftete Maschinen (z. B. IC01, IC06)	6.2.2.2
E	
EG-Konformitätserklärung	10.7.2
Einbettung der TMS	6.2.2.3
Eindringtiefe	2.1.3
Einfluss der Ankoppelungszeit T_K	6.2.4
Einfluss der Stromdichte	6.2.5
Einführung in den Anschlusskasten	3.4.3
Einführungsgewinde	3.4
Einlauf-Schmierfrist	10.5
Einphasenlauf	5.2.4
Einphasenspannung	5.2
Einteilung der Betriebsarten	5.3.1
Einzelantrieb	1
elektrische Betriebsstätte	2.1.2
elektrodynamische Auslaufbremsung	5.3.8
elektronische Überlastrelais	6.5
Energie, mechanische	13.2
Engler-Grade	10.2
EP-Additiv	10.3
Erdungsleiter	2.2.1
Errichtungsbestimmung, Umgebungsbedingungen	4.7.2

Eurospannung	5.2.2.1
explosionsgefährdete Betriebsstätten	2.2.2
Explosionsschutz	4.9
Explosionsschutz bei Getrieben	10.7.2
extreme Drehmomentspitzen	13
extreme pressure	10.3
F	
fakultativer Zusatzbuchstabe	3.1.1
Fehlerschutz	2.2.1
Fehlerstromschutzschalter, allstromsensitiver	2.3
Feuchte, relative	4.5.1
Feuchtigkeit	4.6.1
feuergefährdete Betriebsstätten	2.2.2
FI	12.1
Finger	3.1.2
fingersicher	2.1.1
Flächenisolierstoff	4.6
Fließfähigkeit	10.1
Flussdichte, magnetische	5.2.2
Flüssigkeit	3.3
Formen mechanischer Energie	13.2
Freiluftklimare	4.6.2
Fremdbelüftung	5.4.3
Fremdkörper, grobe	3.2.1
Fremdkörperschutz	3.2
Fremdlüfter	5.4.3
Fremdwasser	4.5.5
Frequenzanlauf	5.3.10.1
Frequenzgeführte Drehzahländerung	5.3.10.1
Frischluf	4.2.2
funktionstüchtig bei Spannungsschwankung	5.2.1.2
FZG-Prüfung	10.3
G	
gefährliche aktive Teile	2.1.1
gefährliche mechanische Teile	2.1.2
Gegendrehfeldbremsung	5.3.8.2
Gegenstrombremsung	5.3.8.2
Getriebe, Beheizung	4.2.3
Getriebefließfett	10.1
Getriebemotor	1.2
Getriebschmierung	10
Gleichfehlerströme, nichtpulsierende	2.3
gleichförmig	12.3
Gleichstrom-Auslaufbremsung	5.3.8.3
Grenztemperatur	4.1
Grenz-Übertemperatur	4.1
Grobe Fremdkörper	3.2.1
H	
Halbkeilwuchtung	8.9.1
Handrücken	3.1.2
Heizspannung	4.2.3

Hochdruckeigenschaft von Schmierstoffen	10.3
Hochdruckreinigung	4.4.5
Hochdruckzusatz	10.3
hohe Umgebungstemperaturen	4.2.2
hottest spot	4.1
Hydrodynamische Kupplung	13.4
I	
IC-Code	5.4
Inbetriebnahme, erste	4.5.5
indirektes Berühren	2.2
Induktion	5.2.2
Industrieantrieb	1
IP-Code	3
IP-Schutzarten	3
ISO-Feingewinde, metrisches	3.4
Isolationswiderstand	4.6.5
Isolierstoff, Lebensdauer	4.1
Isolierstoffklasse	4.1
Isoliersystem	4.2.1
Isoliersystem	5.2.3.3
ISO-VG	10.2
J	
K	
Kabeldurchmesser	3.4.2
Kälte-Schmierstoff	4.2.3
Kaltleiter-Temperaturfühler	6.2.1
Keilspalt (Schmierung)	10.3
Kennziffer, erste	3.1.4
Kettenräder	8.2.2
Kinderfinger	2.1.3
Kippmoment	5.1.2
Kippmoment, generatorisches	5.3.8.1
Klassifizierung von Umgebungsbedingungen	4.7.2
Klemmenkasten	3.2.2.2
Klimastutzen	4.5.4
Kondenswasser	4.5.5
Kondenswasser, Schutz gegen	4.5.4
Kondenswasserloch	4.5.3
Kondenswassermenge	4.5.2
Konformitätserklärung	10.7.2
Konsistenzklasse	9.1
Korrosion	4.7.3
Kraftangriff auf der Wellenstumpflänge	8.4.3
Kraftstufe	10.3
Kühlflüssigkeit	3.3
Kühlluftbedarf	4.2.2
Kühlluftstrom	4.2.2
Kühlmitteltemperatur	5.4.1
Kühlturm	4.4.6
Kühlluftzufuhr	5.4.2
Kühlung	5.4

Kühlwirkung, Verminderung	3.2.2.4
Kunststoff bei Kälte	4.2.3
Kupplungen	8.1
Kurzschlussfall des Motors	5.1.2
Kurzschlussstrom	5.1.2
Kurzschlussstromdichte	6.2.5
Kurzzeitbetrieb	2.3
Kurzzeitige, kontrollierte Drehmomentstöße	12
L	
Labyrinthdichtung	10.10.3
Laienanwendung	2.1.3
landwirtschaftliche Betriebsstätten	2.2.2
Langsamer Temperaturanstieg (Betriebsart S1)	6.2.3.1
Lebensdauer (Schmierstoff)	10.4
Lebensdauer-Diagramm	4.1
Lebensdauerschmierung	10.6
Leer-Hochlaufweg	13.5.2
Leer-Hochlaufzeit	13.5.1
Leerschalthäufigkeit	5.3.5
Leistungsabgabe	5.1.1
Leistungsbedarf	5.1.1
Leitungslänge	5.2.3.2
Lichtspaltprüfung	10.10.5
Lose (Spiel)	13.5.2
Löt- und Schweißstellen	5.5.2.3
Lufteintrittsöffnung	2.1.2
Lüfterabdeckung	2.1.2
Luftfeuchte, absolute	4.5.1
Lüftung, magnetisch verzögerte	5.3.9
Luftzwickel	5.5.2.3
M	
Magnetisierungsstrom	5.2.2
Maschine, durchzugbelüftet	6.2.2.2
Maschine, oberflächenbelüftet	6.2.2.1
Maschine, wettergeschützt	4.4.2
mechanische Abgabe und elektrische Aufnahme	13.1
mechanische Bauteile des Motors	12.2
mechanische Bremsung	5.3.9
mechanische Überlastung	11
mechanische Überlastung, langfristig	11
mechanische Übertragungsmittel	12.3
mechanischer Überlastungsschutz	13.4
Mindestschutzart (Staubexplosionsschutz)	3.2.2.5
Mindestschutzarten nach den Errichtungsbestimmungen	4.4.8
mögliche Montagefehler (Halbkeilwuchtung)	8.9.4
Montsinger	4.2.1
Motoren mit großen thermischen Reserven	11.2.1
Motorschutz, thermischer	6.2
Motorschutzrelais, elektronisches	6.5
Motorvollschutz	6.2

N

Nachschmiereinrichtung	9.5
NAT	6.2.1
NEMA	12.4
Nennansprechtemperatur	6.2.1
Nennansprechtemperatur NAT	6.2.6
Netz	5.2.2.1
Netzspannung	5.2.2.1
Netzspannung, DIN IEC 60038	5.2.1.1
niedrige Drehzahl	5.4.3
niedrigen Umgebungstemperaturen	11.2.2
Norm-Flansch-Motor (an Getriebe)	10.10.4

O

Oberflächenbelüftete Maschinen (z. B. IC411, IC416)	6.2.2.1
Oberschwingung	5.4.3
ODP	12.4
Öffnungsweite	3.1
öldichter Lagerflansch	10.10.4
Ölstandsglas	10.7
Ölstandsglas	10.7.1
Optimum der Induktion	5.2.2

P

Panzerrohrgewinde	3.4
Passfedervereinbarungen, früher übliche	8.9.1
Passfedervereinbarungen, international	8.9.1
Passfedervereinbarungen, Kennzeichnung	8.9.3
Passfedervereinbarungen, Liefervereinbarung	8.9.3
Passfläche	10.10.1
Penetration von Getriebefließfetten	10.1
Penetrationsbereich	9.1
Person, unterwiesene	2.1.3
Phase	5.2.4
Phasenausfallempfindlichkeit	5.2.4.6
Phasenausfallempfindlichkeit, Zusammenfassung	5.2.4.8
Phasenausfallschutz	5.2.4.6
Phasenausfallschutz bei Zündschutzart »e«	5.2.4.7
Phasenopposition	13.7
Phasentrennung	5.5.2.3
physikalischer Vorgang beim Kondensieren	4.5.1
Polpaarzahl	1
Polumschaltung	5.3.8.4
Polygoneffekt	8.5
Potentialausgleich	2.2.2
Prüfsonden	3.1.2
Pulsbreitenmodulation	5.2.3.2
Pulsumrichter	5.2.3.2

Q

R

radiale Wellenbelastung	11.3
Radial-Wellendichtring	10.10.2

rascher Temperaturanstieg	6.2.3.2
RCD	2.3
Regelklasse (RK)	4.8.3
Regeln für elektrische Maschinen	4.2.1
Regenmenge	4.7.1
Reinigungsmittel	4.4.5
Reinigungszusätze	4.4.5
Reversieren	5.3.6
Riementrieb	8.3.1
Rotationsenergie	13.6
Rückbremsung, generatorische	12.1
Rutschkupplung	13.4
Rutschnabe	13.4
S	
S1, Dauerbetrieb	5.3.2
S2, Kurzzeitbetrieb	5.3.3
S3, Temperaturverlauf	5.3.4
S4, Aussetz-Schaltbetrieb	5.3.5
Sättigungsgrenze	4.5.1
Schadensbild bei Einphasenbetrieb	5.2.4.4
Schadensbilder von Drehstrom-Ständerwicklungen	5.2.4.4
Schadensursache, Wälzlager	3.2.2.3
Schalten in Phasenopposition	13.7
Schalhäufigkeit	5.3.5
Schaltspannung bei Pulsumrichtern	5.2.3.2
Schaltverbindung	5.5.2.3
Schimmelpilze	4.6.3
Schlupfdrehzahl	1
Schmelzsicherungen	6.1.1
Schmierfrist, Getriebe	10.5
Schmierfrist, nach Betriebsart S1	9.2.3
Schmierfrist, nach VIK	9.2.2
Schmierfrist, nach Wälzlagerhersteller	9.2.1
Schmierfrist, Wälzlager	9.2
Schmierstoff, synthetischer	10.6
Schmierstoffmenge	10.7
Schmierstoffpegel	10.7
Schmierstoffpegel	10.7.1
Schmierstoffsorte, Getriebe	10.9
Schmierstoffsorte, Wälzlager	9.1
Schmierstoffwechsel	10.8
Schneidflüssigkeit	3.3
Schnellerregung	5.3.9
Schock	4.8.3
Schockfestigkeit	4.8.3
Schutz der Motorwicklung	6
Schutz gegen elektrischen Schlag	2.2.1
Schutzleiter	2.2.1
Schutzleiter-Schutzmaßnahmen	2.2.1
Schutzmöglichkeiten für Getriebe und Motoren	15
Schutzmöglichkeiten für mechanische Bauteile	14

Schutzmöglichkeiten für Motoren	6.6
Schwinggeschwindigkeit	4.8.2
Schwingstärke	4.8.2
Schwingungen	4.8.2
Schwungradenergie = Schadenspotential	13.3
sealed for life	10.6
Selbstinduktion	5.2.3.1
Service Factor für Motoren	12.4
Sicherheitsabstand	2.1.3
Sicherheitsgrad	4.8.3
single-phasing	5.2.4
Spaltdichtung	10.10.3
Spannungsänderung	5.2.2
Spannungsänderungsgeschwindigkeit	5.2.3.2
Spannungsschwankung	5.2.1.2
Spannungsspitzen	5.2.3
Spannungstoleranzen	5.2.1.2
Spritzwasser	3.3
Spritzwasser, Überflutung	4.4
Sprühwasser	3.3
Spülöl	10.8
Ständer-Stillstandsheizung	4.2.3
Ständerwicklung, getrennte	5.3.8.4
starkes Strahlwasser	3.3
Staub	3.2.2
staubdicht	3.2.2
Staubexplosionsschutz	3.2.2.5
staubgeschützt	3.2.2
Staubkammer	3.2.2.1
Staubschutz	3.2.2.1
Sternschaltung	5.2.4.3
Stoß	4.8.1
stoßdämpfend	13.7.1
Stoßfestigkeit	4.8.1
Stoßgrad	12.3
stoßneutral	13.7.2
Stoßprüfung	4.8.1
stoßverstärkend	13.7.3
Strahlwasser	4.4.4
Strang	5.2.4
stromabhängige Überstromauslöser	6.1
Stromdichte	6.2.5
Stromüberlastung	5
Strom-UV-Tauch-Imprägnierung	5.5.2.3
Synthetische Schmierstoffe	10.6
T	
TEFC	12.4
Teilkreisdurchmesser	8.2.1
Temperaturbereich (Wälzlagerfett)	9.3
Temperatur-Einsatzbereiche von Wellendichtringen	10.10.6
Temperaturfühler	6.2

Temperaturfühler, Einbau	6.2.2
Temperaturüberlauf	6.2.3
Temperaturverlauf in Wicklung und Fühler	6.2.3
Temperaturwächter	6.3
TE-resistente Lackschicht	5.5.2.3
Termiten	4.6.4
Thermischer Motorschutz durch Thermistoren	6.2
Thermistor	6.2
Thermistor-Motorschutz	6.2
Thermistor-Motorschutz, Wirkungsweise	6.2.1
Thermoschutzschalter	6.3
Thermostaten	6.3
tiefe Umgebungstemperaturen	4.2.3
Tieftemperatur	4.2.3
TMS	6.2
TMS, nachträgliche Anbringung	6.2.2.4
Traganteil, hydrodynamischer	10.3
Trägheitsfaktor FI	12.1
Tropen	4.6.2
Tropfwasser	3.3
U	
Übererregung	5.3.9
Überflutung	4.4.7
Überlastbarkeit (Motor)	12.1
Überlastung, mechanische	11
Überlastung, stoßartige	13
Überlastungsarten für den Motor	5
Überlastungsarten, Schutzmöglichkeiten	6.6
Überlastungskapazität	5.3.3
Überlastungsschutz, mechanischer	13.4
Überstromauslöser	6.1.2
Überstromauslöser, stromabhängiger	6.1
Überstromauslöser, thermisch verzögert	6.1.2
übersynchrone, generatorische Bremsung	5.3.8.1
Übertragungsmittel, stoßdämpfendes	13.6
Übertragungsmittel, stoßverstärkendes	13.5
Übertragungsmittel, Wahl	8
Überwachung durch Temperaturfühler	11.2
Umgebungsbedingungen	4
Umgebungseinflüsse	4.1
Umgebungstemperatur	4.2
Umgebungstemperatur nach den Normen	4.2.1
Umrechnung, linear-quadratische	5.3.2
Umrichterspeisung	2.3
Ungleichförmigkeit	8.5
Untertauchen	3.3
UV-Tauch-Imprägnierung	5.5.2.3
V	
Varistor	5.2.3.1
Verband der industriellen Kraftwirtschaft (VIK)	9.2.2
Vereisung	4.4.3

Verformungsarbeit	13.3
Verschmutzung, Wälzlager	3.2.2.3
Verschraubung	3.4
Versuchsergebnisse (Drehmomentstöße)	13.5.3
Verträglichkeit von Schmierstoffen	9.6
Verwendung unter besonderen Bedingungen	4.7.2
VIK	9.2.2
Viskosität	10.2
Viskositätsindex (VI)	10.2
Vollkeilwuchtung	8.9.1
Vollschutz	6.2.5
VT-Diagramm	10.2
W	
Wälzlagerschmierung	9
Wärmeklasse	4.1
Wasserschutz	3.3
Weichheit (Fett)	10.1
Wellenbelastung, axiale	11.4
Wellenbelastung, radiale	11.3
Wellendichtring	10.10.2
Wellendichtringe, Prüfung	10.10.5
Wellenfluchtung	7.3
Wellenreifekupplung	13.6
Weltnormspannung	5.2.2.1
Werkzeug	3.1.2
wettergeschützte Maschinen	4.4.2
Widerstand, temperaturabhängiger	6.2.1
Widerstandsthermometer	6.4
Winkelversatz	7.3
Wirkstrom	5.2.2
Wuchtung von Motoren und Verbundteilen	8.9
X	
Y	
Z	
Zeitkonstante	5.3.2
Zone, Staub	3.2.2.5
Zugang zu gefährlichen Teilen	3.1
Zugangssonde	3.1.2
Zündschutzart »k«	10.7.2
Zusatzbuchstabe W	4.4.2
Zusatzbuchstabe, fakultativ	3.1.1
Zusatzbuchstaben	3.1.3
Zusatzbuchstaben S und M	4.4.1
Zustandsschaubild	4.5.1
Zweileiterbetrieb	5.2.4
Zweileiterbetrieb, Stromaufnahme	5.2.4.2
Zweileiterbetrieb, Ursachen	5.2.4.1
Zweileiterbetrieb, Wicklungserwärmung	5.2.4.2
Zweiphasenlauf	5.2.4
Zweitbefüllung (Öl)	10.9



Der Schutz des Antriebsmotors ist bereits bei der Planung elektrischer Antriebe zu beachten und besitzt auch bei der Installation und im Betrieb einen hohen Stellenwert.

Ausgehend von den verschiedenen Schutzarten bietet dieses Buch einen fundierten Überblick über mögliche Umgebungseinflüsse und die zu treffenden Schutzmaßnahmen. Die verschiedenen Überlastungsarten des Motors werden detailliert dargestellt und insbesondere auf den Schutz der Motorwicklung besondere Aufmerksamkeit gerichtet. Probleme der Übertragung und der Schmierung werden ebenso diskutiert wie die Wahl des Aufstellungsortes. Besonderen Belastungsformen wie der langzeitigen mechanischen Überlastung, kurzzeitigen Drehmomentstößen und extremen Drehmomentspitzen werden eigene Kapitel gewidmet. Mit der Betrachtung von Schutzmöglichkeiten für mechanische Bauteile, Getriebe und Motoren schließt die Darstellung ab.

Der Autor, seit mehr als vierzig Jahren mit den Problemen der Entwicklung elektrischer Antriebe vertraut, schöpft aus einem umfangreichen Erfahrungsschatz und gibt mit diesem Buch dem Praktiker ein Kompendium an die Hand, das ihm bei Planung und Einsatz von Drehstromantrieben sicher schon bald unentbehrlich sein wird.

Danfoss GmbH

Motion Controls

Eberhard-Bauer-Straße 36 - 60
D-73734 Esslingen
Telefon 0711 - 3 51 80
Telefax 0711 - 3 51 83 81

BAUER geared motors

Danfoss GmbH

Motion Controls

Carl-Legien-Straße 8
D-63073 Offenbach
Telefon 069 - 89 02 - 0
Telefax 069 - 89 02 - 106
www.danfoss-sc.de

VLT[®] frequency converters