

Elektronik statt Mechanik?

Zur Ersetzbarkeit einer Rutschkupplung durch eine elektronische Lösung

H. Greiner, Aichwald

In [1] ist sinngemäß festgestellt: „Sicherheitsrutschkupplungen verhindern das Brechen von Teilen der Konstruktion beim Verklemmen oder Blockieren. Da sie relativ viel Platz brauchen, Verschleiß unterliegen und regelmäßig überprüft und gewartet werden müssen, liegt es nahe, nach einer kostengünstigen elektronischen Alternative zu suchen.“ In diesem Beitrag sollen die Grenzen einer rein elektrischen (elektronischen) Sicherheitseinrichtung aufgezeigt werden.

Wenn Maschinen und Übertragungsmittel durch betriebsbedingte, kurzzeitige und extreme Drehmomentspitzen gefährdet sind, werden Überlastsicherungen (z. B. mechanische oder hydraulische Rutschkupplungen bzw. reibschlüssige Rutschnaben nach Tafel 1) vorgesehen. Solche Einrichtungen haben sich wegen ihrer überschaubaren Wirkungsweise bewährt. Sie bedingen allerdings meist einen Eingriff in den Übertragungsstrang und daher eine rechtzeitige Planung. „Elektronische Rutschkupplungen“ [1] werden als kostengünstige Alternative angeboten, die ohne mechanische Montage und Einstellung auch nachträglich in den Schaltschrank eingebaut werden können und wartungsfrei arbeiten.

1 Einteilung der Überlastungsarten

Für die Bewertung der Wirksamkeit von mechanischen Überlastschutzeinrichtungen sollen die verschiedenen Arten von Drehmomentüberlastungen klassifiziert werden:

1.1 Langdauernde, gleichförmige Überlastung

Die erhöhte Stromaufnahme des elektrischen Antriebsmotors wird von der stromabhängig thermisch verzögerten Überlastschutzeinrichtung registriert. Die Auslösekennlinie in Bild 1 entspricht weitgehend der thermischen Belastbarkeit der Motorwicklung, für die nach DIN EN 60034-1 (VDE 0530 Teil 1) folgende Grenzen festgelegt sind:

- 1,5-facher Bemessungsstrom für mindestens 2 Minuten (Abschnitt 18.2 der Norm)

- 1,6-faches Bemessungsmoment für 20 Sekunden (Abschnitt 19.1 der Norm).

Im Allgemeinen verhindert der „Motorschutzschalter“ auch gravierende mechanische Schäden an Übertragungsmitteln und an der angetriebenen Maschine. Auf gewisse Einschränkungen zu dieser Aussage (flache Stromkennlinie, niedrige Umgebungstemperatur, Motoren mit großer thermischer Reserve) ist im Abschnitt 10 von [2] ausführlich hingewiesen.

1.2 Gelegentliche, betriebsbedingte Überlastung mit langsamem Drehmomentanstieg

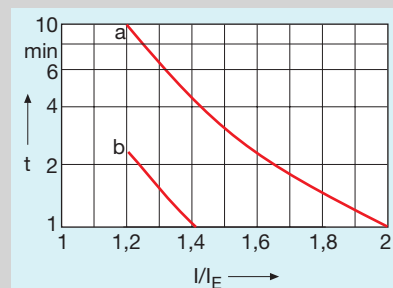
Wenn der Drehmomentbedarf langsam ansteigt und bald (nach einigen Sekunden) wieder abklingt, wird er bei $M > M_K$ (Bild 2) aus der Überlastbarkeit des Motors gedeckt. Die Motorwicklung ist durch die Funktion des Motorschutzschalters thermisch geschützt.

Wenn Drehmomentstöße dieser Art und Höhe für Arbeitsmaschine oder Übertra-

gungsmittel gefährlich werden können, ist eine strom- oder leistungsabhängige Auslöseeinrichtung ohne thermische Verzögerung vorzusehen. Bei mechanischen Rutschkupplungen ist die von Zahl und Dauer der Rutschvorgänge abhängige Erwärmung zu beachten. Die in [1] beschriebene „elektronische Rutschkupplung“ kann eine Alternative sein; sie muss jedoch den Anlaufvorgang mit erhöhtem Drehmomentbedarf (Bild 2) gestatten und darf auf vorhersehbare, betriebserforderliche Drehmomentspitzen nicht zu „hektisch“ reagieren.

1.3 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 Über-



1 Typische Auslösekennlinie eines Motorschutzschalters im Überlastbereich $I/I_E = 1,2 \dots 2$

- a) Bimetall auf Umgebungstemperatur
b) Bimetall betriebswarm
(Auslösezeiten etwa 25 % verglichen mit denen in kaltem Zustand laut [3])
I tatsächlicher Strom
 I_E Einstellwert
t Auslösezeit

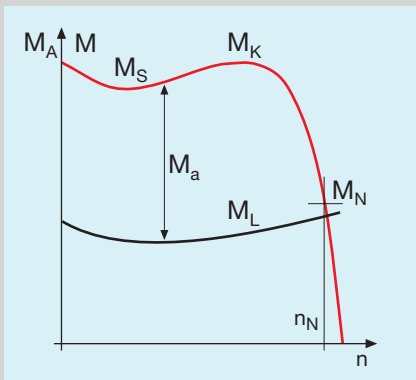
Tafel 1 Beispiele für mechanische Kupplungen mit Überlastschutzfunktion

Quelle: VOITH

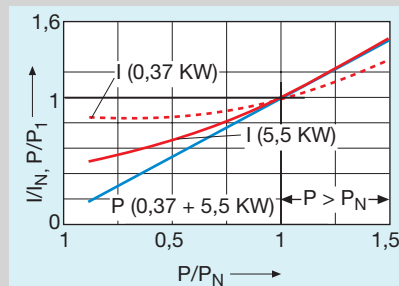
	Rutschkupplung für Kettenrad	Rutschnabe Kupplung	Hydrodynamische Kupplung
Vorteile	– Einfacher Aufbau	– kein Eingriff in den Wellenstrang – platzsparend	– gute Einstellmöglichkeit über Ölmenge – kein Verschleiß – Auslegung für Dauerschlupf
Nachteile	– Eingriff in den Wellenstrang – Einstellmöglichkeit reduziert – große Ansprechtoleranz – Verschleiß bei häufiger oder längerer Funktion	– Einstellmöglichkeit reduziert – große Ansprechtoleranz – Verschleiß bei häufiger oder längerer Funktion	– Eingriff in den Wellenstrang – komplizierter Aufbau – hohe Kosten

Autor

Obering. Helmut Greiner, Aichwald, war Mitglied in verschiedenen DKE- und IEC-Komitees und ist heute als beratender Ingenieur tätig.

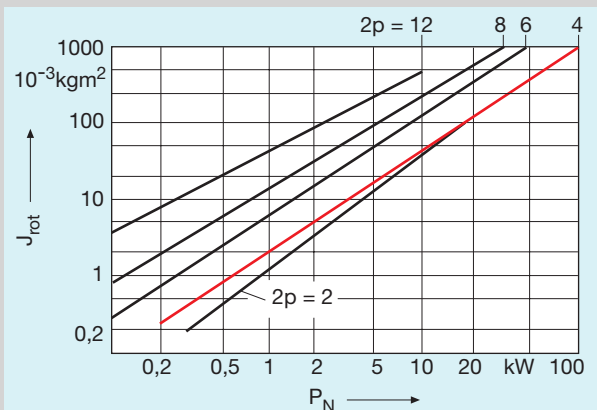


2 Typische Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines Käfigläufermotors mit den Kennwerten: n Drehzahl; M Drehmoment; M_N Bemessungsmoment; n_N Bemessungsdrehzahl; M_A Anzugsmoment; M_K Kippmoment; M_S Sattelmoment; M_L Lastmoment; M_a Beschleunigungsmoment



3 Gradienten des Anstiegs von Strom I und Aufnahmeleistung P_1 in Abhängigkeit von der Leistungsabgabe für Motoren mit Bemessungsleistungen 0,37 und 5,5 kW (alles in relativer Darstellung).

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.



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

tragungsmittel gefährden können, auch wenn die üblichen Sicherheitsfaktoren bei der Konstruktion berücksichtigt wurden.

2 Strom oder Leistung als Maßzahl für das Drehmoment

Bei 4-poligen Drehstrommotoren mit Bemessungsleistungen > 1 kW ändert sich der Strom mit der Abgabe (P oder M) so signifikant, dass er als einfachste Messgröße für die Beurteilung des Auslastungsgrades herangezogen werden kann [4]. Bei kleineren Bemessungsleistungen und vor allem bei höheren Polzahlen ($2p > 6$) ist der Gradient des Stromanstieges so niedrig, dass keine eindeutige Aussage möglich ist – vgl. Kurve I (0,37 kW) im Bild 3. Hier kann es empfehlenswert sein, die Leistungsaufnahme P_{el} als Kenngröße für den Auslastungsgrad zu verwenden – vgl. Kurve P (0,37 + 5,5 kW) im Bild 3. In der relativen Darstellung ist der Unterschied zwischen Motoren der Bemessungsleistungen 0,37 kW und 5,5 kW so gering, dass er im hier gewählten Maßstab nicht darstellbar ist.

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. Der messtechnische Aufwand zur Erfassung der elektrischen Wirkleistungsaufnahme ist im Vergleich zu einer Strommessung deutlich höher und nur bei entsprechenden Ansprüchen gerechtfertigt. Das in [1] beschriebene Wirkleistungsrelais signalisiert die Drehmomentbelastung besser als der Strom – die in den Abschnitten 3 und 4 dieser Abhandlung beschriebene Gefahr aus der Schwungradenergie des Läufers wird jedoch durch die andere Messgröße nicht beseitigt.

3 Schwungradenergie des Läufers als Schadenspotential

Die bisher beschriebenen elektrischen Überlastschutzeinrichtungen haben einen entscheidenden Nachteil, der auch durch den Einsatz von extrem sensiblen und

schnell schaltenden elektronischen Bauelementen nicht zu beseitigen ist: Sie trennen zwar den Antrieb vom Netz, beseitigen aber nicht die Schwungradenergie des ungebremst weiter rotierenden Läufers. Dieses Potential wird oft unterschätzt.

3.1 Rechenbeispiel

Ein Rechenbeispiel 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:

4-poliger Normmotor mit $P_N = 7,5$ kW
Leerlaufdrehzahl $n_N = 1500 \text{ min}^{-1}$
Massenträgheitsmoment $J_{rot} = 0,045 \text{ kgm}^2$

Kinetische Energie der rotierenden Läufermasse:

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

$$W_{rot} = \frac{J_{rot} \cdot n^2}{182,5} = \frac{0,045 \cdot 1500^2}{182,5} \text{ Nm}$$

$$= 555 \text{ Nm} = 555 \text{ J}$$

$$\text{mit: } \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \text{ s}^{-1}$$

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

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

$$m = \frac{W_{rot}}{g \cdot h} = \frac{555 \text{ Nm}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m}}$$

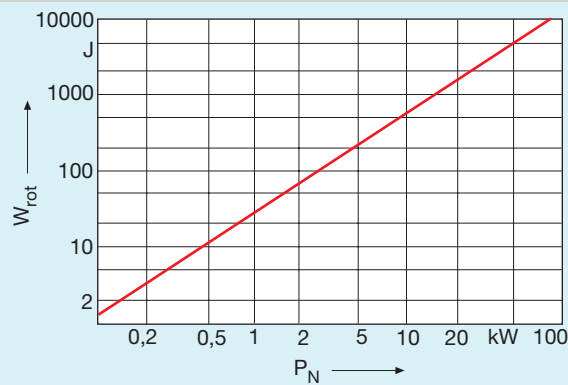
$$= 56,6 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = 56,6 \text{ kg}$$

3.2 Rotor-Massenträgheitsmoment von Normmotoren

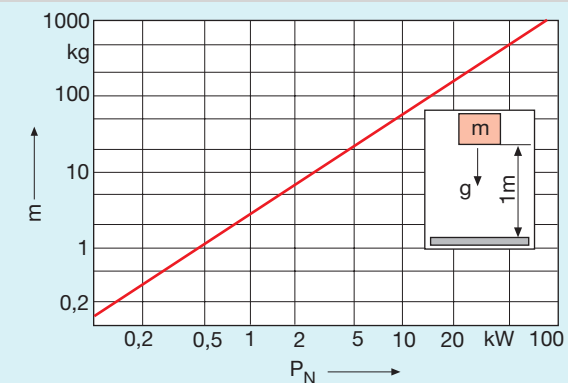
Das Rotor-Massenträgheitsmoment gängiger Motortypen kann den Herstellerkatalogen entnommen werden. Richtwerte als Mittelwert des stufenförmig verlaufenden Streubandes ergeben sich aus Bild 4. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass auch die Herstellerangaben nach EN 60034-1, Tabelle 8, mit $\pm 10 \%$ toleriert sind.

3.3 Richtwerte für Arbeitsvermögen und Schadenspotential

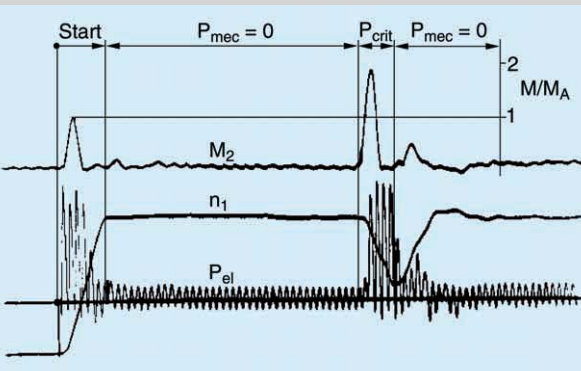
Nach den Formeln in 3.1 wurde das Arbeitsvermögen der 4-poligen Rotoren bei einer Drehzahl von 1500 U/min berechnet und in Bild 5 dargestellt.



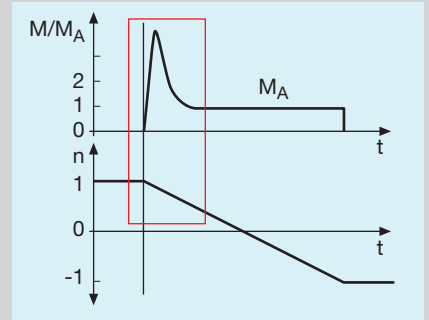
5 Richtwerte für das Arbeitsvermögen W_{rot} der Rotoren von 4-poligen Normmotoren im Leistungsbereich $P_N = 0,1 \dots 100 \text{ kW}$



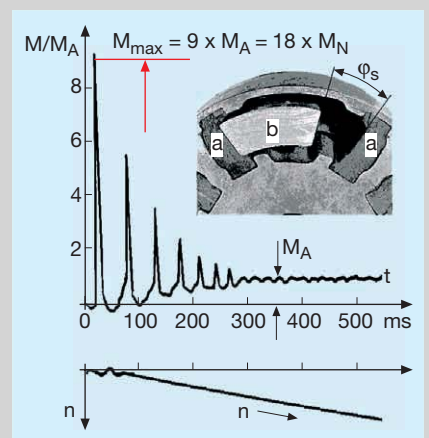
6 Richtwerte für das Arbeitsvermögen als Potential der Lage W_{pot} der Rotoren von 4-poligen Normmotoren im Leistungsbereich $P_N = 0,1 \dots 100 \text{ kW}$



7 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}



8 Schema einer Reversierung: Der markierte Ausschnitt ist im Oszillogramm im Bild 9 durch direkte Aufnahme der Drehmomentspitze M (mit Messnabe) und der Drehzahl n (mit Tacho) über der Zeit t mittels x-y-Schreiber dargestellt.



9 Aus der kinetischen Energie erzeugte Drehmomentspitze M_{max} im Vergleich zum motorisch entwickelten Anzugsmoment M_A beim Reversierungsvorgang mit einer Klauenkupplung mit stark überhöhtem Spiel ϕ_s der nachträglich abgesägten Klaue b zwischen den komprimierten Lederpaketen a

Da die Größe „Energie“ mit der Einheit J nicht sehr anschaulich ist, wurde die Rotationsenergie in ein „Potential der Lage“ umgewertet und in Bild 6 dargestellt.

4 Versuchsergebnisse

An drei Beispielen soll gezeigt werden, dass bei blockierungsartigen Vorgängen – beim wichtigsten Anwendungsfeld der mechanischen Sicherheits-Rutschkupplungen – extrem hohe Drehmomentspitzen entstehen, die weit über die vom Motor entwickelten Drehmomente hinausgehen und deren Energie nicht aus dem Netz gespeist wird.

4.1 Drehmomentspitze und elektrische Leistungsaufnahme

Stoßartige 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 7 ist daher auch deutlich zu erkennen, dass beim Anlaufvorgang das Anzugsmoment $M_A = 1$ durch eine entsprechende elektrische Leistungsaufnahme P_{el} repräsentiert wird. Bei einem plötzlichen Belastungsstoß P_{crit} tritt auf der anderen Seite jedoch ein Spitzenmoment $M_{\text{max}} = 2 \cdot M_A$ auf, 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. Dies bedeutet aber einen erheblichen messtechnischen Aufwand und einen Eingriff in den Wellenstrang.

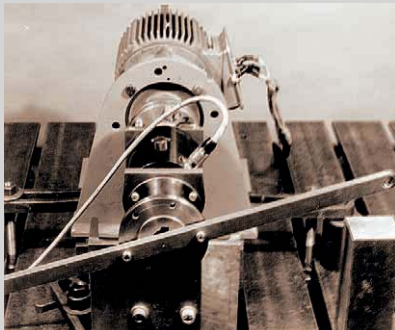
Abgesehen von der Notwendigkeit einer thermischen Zeitkonstante von Überstromrelais und TMS (Thermistoren) ergibt sich aus den Darlegungen dieses Abschnitts die Erkenntnis, dass es nicht möglich ist, stoßartige Überlastungen des Getriebes auf elektrischem Wege zu erfassen und zu verhindern.

4.2 Reversierung mit spielbehafteter Klauenkupplung

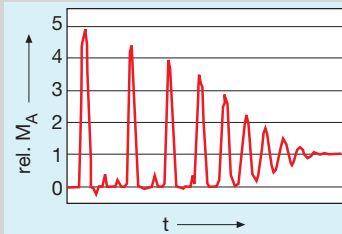
Zur messtechnischen Erfassung der Drehmomentspitzen wurde der Wellenstrang auf der Abtriebsseite des Getriebes unterbrochen und eine Drehmoment-Messnabe eingefügt. Mit dieser Anordnung wurden die in den Bildern 8 und 9 dargestellten Messergebnisse gewonnen. Die verwendete Klauenkupplung hatte ein betriebsmäßig stark erhöhtes Drehspiel, das eine Reversierung des Getriebemotors innerhalb dieses freien Weges erlaubte (Abschnitt 12 in [2]).

4.3 Blockierung aus vollem Lauf

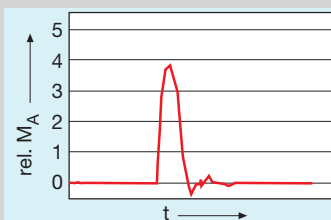
In einem Versuchsaufbau nach Bild 10 wurde ein an der Arbeitswelle eines Getriebemotors angebrachter stabiler Hebel gegen eine harte Unterlage aus vollem Lauf blockiert. Das dabei entstehende Drehmoment wurde mit einer Messnabe aufgenommen. Bild 11 zeigt das Oszillogramm dieser harten Blockierung, bei der eine Drehmomentspitze von 5fachem Anzugsmoment



10 Versuchsanordnung für eine satte Blockierung aus vollem Lauf



11 Drehmomentspitzen fast bis zum 5fachen Anzugsmoment



12 Drehmomentspitzen $4M_A$ bei Abschaltung (ohne Bremsung) vor dem Anschlag

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 12: 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 4fachem Anzugsmoment, die ausschließlich aus der Schwungradenergie des Läufers gespeist wird. Selbst eine hochsensible „elektronische Rutschkupplung“ könnte diese Spitze nicht verhindern, denn diese schaltet nicht vor dem Anschlag, sondern erst nach dem Aufbau eines Drehmomentes – signalisiert durch einen Anstieg der Wirkleistungsaufnahme – ab.

5 Zusammenfassung

„Elektronische Rutschkupplungen“ mit Wirkleistungsrelais [1] können eine Alternative zu stromabhängig thermisch

verzögerten Überlastschutzeinrichtungen sein, wenn ein langsamer (quasistationärer) Drehmomentanstieg sensibel registriert und durch Abschaltung unterbrochen werden soll. Sie können verschleißbedingte Schwergängigkeit signalisieren und Folgeschäden verhindern.

Der Bezeichnung „Rutschkupplung“ können sie jedoch aus physikalischen Gründen nicht gerecht werden, wenn bei einer harten, dynamischen Blockierung aus vollem Lauf extrem hohe Drehmomentspitzen auftreten, da deren Arbeitsvermögen nicht aus dem Netz (elektrisch), sondern aus der Schwungradenergie des Motorläufers (mechanisch) gespeist wird.

Literatur

- [1] Peter, T.: Elektronische Rutschkupplungen mit Wirkleistungsrelais. etz 10/2001, Seiten 40/41.
- [2] Greiner, H.: Schutzmaßnahmen bei Getriebemotoren. Publikation der Danfoss Bauer GmbH (1999), D-73726 Esslingen.
- [3] Esser, H.-W.: Schaltgeräte für den Schutz elektrischer Motoren. Publikation der Moeller GmbH (1998), D-53115 Bonn.
- [4] Greiner, H.: Elektrische Antriebe mit Getriebemotoren. Publikation der Danfoss Bauer GmbH (2001), D-73726 Esslingen.