

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Peter F. Brosch

Moderne Stromrichter- antriebe

Antriebssystem
Leistungselektronik
Maschinen
Mechatronik und
Motion Control

Peter F. Brosch

Moderne Stromrichterantriebe

Kamprath-Reihe

Prof. Prof. h.c. mult. Dr.-Ing. Peter F. Brosch

Moderne Stromrichterantriebe

Antriebssystem, Leistungselektronik,
Maschinen, Mechatronik und Motion Control,
Arbeitsweise drehzahlveränderbarer Antriebe
mit Stromrichtern und Antriebsvernetzung

5., überarbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

Prof. Prof. h.c. mult. Dr.-Ing. PETER F. BROSCH
Jahrgang 1934. Prof. Dr.-Ing. Peter F. Brosch absolvierte nach dem Abitur eine Lehre als Elektromechaniker und anschließend ein Studium im Bereich Elektrotechnik an der damaligen TH Hannover. Er promovierte 1967 bei Prof. Dr.-Ing. Heinz Jordan. Danach war er geschäftsführender Gesellschafter im Ingenieurbüro für Betriebs- und Fertigungsmittel, Hannover. Seit 1971 lehrt er an der Fachhochschule Hannover, Fakultät I Elektrotechnik und Informationstechnik und Fakultät II Maschinenbau, in den Bereichen Elektrische Maschinen, Antriebe und Leistungselektronik. Prof. Dr.-Ing. Peter F. Brosch ist Ehrenprofessor an der Zhejiang University of Sciences and Technology (ZUST), Hangzhou, und der Vereinigten Universität in Hefei in der Volksrepublik China.

Haftungsausschluss

Autor und Verlag haben alle Texte in diesem Buch mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Eine Haftung des Verlags oder des Autors, gleich aus welchem Rechtsgrund, ist ausgeschlossen. Die im Buch wiedergegebenen Bezeichnungen können Warenzeichen sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der Inhaber verletzen kann.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3109-0

5. Auflage, 2008

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1990 by Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg

Satzherstellung und digitale Bildbearbeitung:
Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

Vorwort

Motto: Praktische Tätigkeit ohne Wissen ist blind und Wissen ohne praktische Tätigkeit lahm!

Die anhaltende *Automatisierung* und die zunehmende *Mechatronik* – als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts – erfordern eine ganzheitliche Sicht der Antriebstechnik. Dieses Buch enthält diese Gesamtschau der eingesetzten Stromrichterantriebe, die drehzahlverstellbar, energiesparend und vernetzt arbeiten, und erklärt sowohl die Arbeitsweise der Komponenten als auch ihr Zusammenwirken im Antriebssystem bis hin zur Feldbusanbindung in betrieblichen und globalen Netzen.

Auf dem Stand der Technik erfahren Studierende und Praktiker alles über die Entwicklung der drehzahlvariablen Antriebe mit einem engen Bezug zur industriellen Praxis. So ist das Buch auch als übersichtliches Nachschlagewerk von großem Nutzen. Zusätzliche Informationen und Aktualisierungen erhält man unter www.vogel-buchverlag.de mit dem Onlineservice *InfoClick*.

Für die Antriebslösungen von Elektromotoren wird hauptsächlich der Leistungsbereich von 100 W bis 100 kW betrachtet, weil dieser mit großen Stückzahlen am Markt vorherrscht. Praxisnah verzahnten Querverweise Abschnitte und Kapitel. Vertiefungen werden in besonders kenntlich gemachten Einrahmungen behandelt. Fallbeispiele sowie Stromrichter- und Maschinenlisten versorgen den Praktiker mit wichtigen Daten. Internet- und Inserat-Adressen oder das Lieferantenverzeichnis des Verbandes Elektrischer Antriebe im ZVEI («www.zvei.org/antriebe/lieferantenverzeichnis») ermöglichen einen tagesaktuellen Datenzugriff.

Für Resonanz und Anregungen aus Nutzerkreisen bin ich immer dankbar. Den schnellsten Kontakt erfüllt eine E-Mail an: peter.brosch@fh-hannover.de.

Mein Dank gilt allen, die an diesem Buch mitgeholfen haben. Dem Vogel Buchverlag danke ich besonders für die gute Zusammenarbeit.

Hannover

Peter F. Brosch

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	13
1.1 Stand der Antriebstechnik	13
1.2 Besondere Eigenschaften	16
1.3 Qual der Auswahl	16
1.4 Komponenten	17
1.5 Direkt und ohne Mechanik – «Mechatronik»	18
1.6 Dezentral installiert	19
1.7 Gleichstrom- oder Drehstromlösung?	20
1.8 Kfz-(Hilfs-)Antriebe	21
1.9 Lebensdauerkosten	21
2 Das moderne Antriebspaket	23
2.1 Bestimmungsgrößen bei der Auswahl	23
2.2 Mikrorechner sorgen für Wirtschaftlichkeit	24
2.3 Vorteile der veränderbaren Drehzahl	25
2.4 Antriebsbeispiele	25
2.5 Drehzahlveränderbare Antriebe im Vergleich	27
3 Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik	29
3.1 Grundsystem des Antriebs	29
3.2 Physikalische Gesetze	30
3.3 Antriebsmomente elektrischer Maschinen	33
3.4 Grundtypen der Lastkennlinien (Arbeitsmaschinen)	35
3.5 Stabiler Betriebspunkt (Arbeitspunkt des Antriebs)	36
3.6 Erwärmung	38
3.7 Kühlung	41
3.8 Zeitkonstanten	42
3.9 Betriebsarten	43
3.10 Äquivalente Belastung (mittlere Belastung)	48
3.11 Mechanische Übergangsvorgänge	50
3.12 Energieumsatz	53
3.13 Wachstumsgesetze	57
4 Stromrichter-Komponenten	59
4.1 Versorgung über Stromrichter	59
4.2 Ventile: elektronische Leistungsschalter	60
4.3 Grundlagen der Halbleitertechnik	61
4.4 Schutz von Halbleiterschaltern	69
4.5 Signalelektronik	75
4.6 Ausfallraten	78
5 Elektrische Maschinen	85
5.1 Allgemeine Grundlagen	85
5.2 Erzeugung einer kontinuierlichen Drehbewegung	86

5.3	Bauformen	89
5.4	Schutzarten	89
5.5	Leistungsschild	89
5.6	Lager und Schmierung	93
5.7	Permanentmagnete in elektrischen Maschinen	93
5.7.1	Arbeitspunkt der Magnete	95
5.8	Bürstenstandzeiten	98
5.9	Maschinenschutz	98
5.10	Lüfter	98
5.11	Magnetlager	98
5.12	Polwicklung – verteilte Wicklung	100
5.13	Piezo-Motor	103
5.14	Tauchspulmotor (Voice-Coil-Motoren)	104
5.15	Lineare Motoren	105
5.15.1	Direkter Linearantrieb	106
5.15.2	Motoraufbau	107
5.15.3	Motortypen	108
5.15.4	Eisenloser Motor (Primärteil)	108
5.15.5	Eisenbehaftete Motoren (Primärteil)	108
5.15.6	Praxis-Tipp	109
5.15.7	Software	109
5.15.8	Linearantriebe – Einsatz	110
5.16	Transversalflussmotor	110
6	Stromrichterantriebe mit Stromwendermaschinen	113
6.1	Gleichstromantriebe mit Stromrichtern	113
6.1.1	Gleichstrommaschine	113
6.1.1.1	Aufbau	113
6.1.1.2	Betriebsverhalten der fremderregten Gleichstrommaschine (fGM)	116
6.1.1.3	Besonderheiten	118
6.1.1.4	Kennlinien	119
6.2	Netzgeführte Stromrichter	121
6.2.1	Übersicht	121
	Schaltungen	122
6.2.2	Schaltungen netzgeführter Stromrichter	125
6.2.3	Ausgangsspannung mit ungesteuerten Ventilen	127
6.2.4	Steuerung der Ausgangsspannung mit steuerbaren Ventilen	130
6.2.5	Steuerkennlinie	133
6.2.6	Kommutierung	133
6.2.7	Betriebskennlinien	138
6.2.8	Arbeitspunkt des Antriebs	140
6.2.9	Glättungsmittel	140
	Glättung und Lücken	145
6.2.10	Netzurückwirkungen	149
6.2.11	Regelung des netzgeführten Stromrichters	155
	Regelung im Stromrichter	161
6.2.12	Betrieb in den 4 Quadranten	163
6.2.13	4-Q-Diagramm	167
6.2.14	Umsteuervorgang	168
6.2.15	Umkehrstromrichter mit Kreisstrom und Brückenmodulation	169
6.2.16	Stromrichterbetrieb im Feldschwäcbereich	169
6.3	Gleichstromsteller (Chopper)	171
6.3.1	Tiefsetzsteller	171
6.3.2	1-Quadranten-Betrieb (Tiefsetzsteller)	174
6.3.3	4-Quadranten-Betrieb	174
6.3.4	Umsetzung der Bremsenergie	177
6.3.5	Regelung beim Steller	177
6.3.6	Netzurückwirkungen	178
6.3.7	Übersetzungsverhältnis beim Gleichstrom-Tiefsetzsteller	178
6.4	Reihenschlussmotor mit Wechselstromsteller	180

6.4.1	Reihenschlussmotor	180
6.4.1.1	Aufbau	180
6.4.1.2	Betriebsverhalten	182
6.4.1.3	Phasenanschnittsteuerung des Reihenschlussmotors	185
6.5	Kleinmaschinen	186
6.6	Pulsbetrieb der Reihenschlussmaschine	186
7	Stromrichterantriebe mit Drehfeldmaschinen	191
7.1	Übersicht	191
7.1.1	Entwicklung der AC-Antriebe	192
7.1.1.1	AC-Bewegungsantriebe / Bearbeitungsantriebe	193
7.1.1.2	AC-Kompaktantriebe als dezentrale Antriebe	193
7.1.1.3	AC-Positionierantriebe / Servoantriebe	193
7.1.1.4	Drehende und lineare AC-Direktantriebe	195
7.2	Drehfeldmaschinen	196
7.2.1	Aufbau der Drehstrommaschinen in der Übersicht	196
7.2.2	Drehstrom-Asynchronmaschine	196
7.2.2.1	Aufbau	196
7.2.2.2	Allgemeiner Betrieb	198
7.2.2.3	50-Hz-Betrieb	200
7.2.2.4	Betrieb mit variabler Speisefrequenz	202
7.2.2.5	Asynchron-Servomaschinen	206
7.2.2.6	Asynchrone Linearantrieb	206
7.2.3	Drehstrom-Synchronmaschine	207
7.2.3.1	Aufbau und 50-Hz-Betrieb	207
7.2.3.2	Betrieb mit variabler Frequenz	209
7.2.3.3	Synchron-Linearantriebe	211
7.2.4	Elektronisch kommutierte Maschine (EKM, AC-Servo)	211
7.2.4.1	Aufbau	211
7.2.4.2	Betrieb mit variabler Drehzahl	212
7.2.4.3	EK-Servomaschinen	212
7.2.4.4	EK-Linearantriebe	214
7.2.5	Reluktanzmaschine	214
7.2.5.1	Aufbau und Betrieb mit 50 Hz	214
7.2.6	Geschaltete Reluktanzmaschine (gRM)	215
7.2.6.1	Aufbau und Betrieb	215
7.2.6.2	Einsatz	215
7.2.7	Schrittmotoren – reiner Positionierantrieb	215
7.2.7.1	Aufbau	215
7.2.7.2	Positionierbetrieb	216
7.3	Umrichter mit <i>U</i> - und <i>I</i> -Zwischenkreis	219
7.3.1	Übersicht: Maschinen und Umrichter	219
7.3.2	Elektronische Drehspannungserzeugung	220
7.3.2.1	Umrichterarten	220
7.3.2.2	Aufbau der Zwischenkreisumrichter	222
7.3.3	Umrichter mit Spannungszwischenkreis (<i>U</i> -Umrichter)	222
7.3.3.1	Wechselspannungs-Wechselrichter (1-phasig)	222
7.3.3.2	Drehspannungserzeugung (Sinus)	224
7.3.3.3	Drehspannungen (Block)	224
	Schaltdiagramm	226
7.3.3.4	Spannungsraumzeiger	228
7.3.3.5	Drehfeld	228
7.3.3.6	Realisierung der <i>U/f</i> -Kennlinie beim <i>U</i> -Umrichter	229
7.3.4	Umrichter mit Stromzwischenkreis (<i>I</i> -Umrichter)	232
7.3.4.1	Drehfelderzeugung beim <i>I</i> -Umrichter	232
7.3.4.2	Strompulsen	234
7.3.4.3	<i>U/f</i> -Kennlinie beim <i>I</i> -Umrichter	237
7.3.4.4	Vorteile der «Sinus»-Pulsung	237
7.3.5	Modulationsverfahren bei <i>U</i> -Umrichtern	237
7.3.5.1	Allgemeines Ziel	237

7.3.5.2	Anforderungen an die Ventilsteuerung	238
7.3.5.3	Blockbetrieb-Grundfrequenztaktung	238
7.3.5.4	Unterschwingungsverfahren (PWM, Sinus- Δ -Modulation)	239
7.3.5.5	Verwandte Modulationsverfahren (Voltage-Vector-Control, Überlagerungsverfahren)	242
7.3.5.6	Pulserzeugung in der Steuerung	243
7.3.5.7	Raum-Zeiger-Modulation (RZM, SZM)	246
7.3.5.8	Drehspannungswechselrichter mit 2-Punkt- und 3-Punkt-Verhalten	248
7.3.5.8	Hysterese-Strom-Modulation (HSM, Pulsen mit Stromvorgabe, Toleranzbandregelung)	252
7.3.5.9	Steuerbausteine und Grenzen	253
7.3.6	Steuerteil und Software der Umrichter	253
7.3.6.1	Software	253
7.3.6.2	Schnittstellen, Parameter und Funktionen	257
7.3.6.3	Wichtige Parameter und ihre Auswirkungen	262
7.3.7	Drehzahl- und Drehmomentregelung (Verfahren)	267
7.3.7.1	Allgemeines	267
7.3.7.2	U/f -Kennliniensteuerung bzw. Frequenzregelung	267
7.3.7.3	Mehrmaschinenantriebe	268
7.3.7.4	Entwicklung der Drehmomentregelung	268
7.3.7.5	Feldorientierte Regelung (FOR, «Vektor»-Regelung) Raumzeiger	268 269
7.3.7.6	Direkte Selbstregelung (DSR)	275
7.3.7.7	FOR-Regelung beim I -Umrichter	279
7.3.7.8	Gegenüberstellung der Regelverfahren	279
7.4	Sonderfragen bei Umrichterantrieben	281
7.4.1	Erwärmung bei Umrichterbetrieb	281
7.4.2	Netzurückwirkungen	282
7.4.2.1	Allgemeiner Vergleich der Stromrichter	282
7.4.2.2	U -Umrichter	283
7.4.2.3	I -Umrichter	292
7.4.3	Bremsbetrieb	293
7.4.3.1	Allgemeines	293
7.4.3.2	U -Umrichter	293
7.4.3.3	I -Umrichter – nur Nutzbremsen	300
7.4.4	Pendelmomente	300
7.4.5	Geräusche	302
7.4.6	Vergleich U -Umrichter gegen I -Umrichter	306
7.5	Besonderer Betrieb von Umrichterantrieben	306
7.5.1	Hochwirkungsgradmotoren	306
7.5.2	Energieeinsparung	307
7.5.3	Netze	308
7.5.4	Motion-Funktionen	309
7.5.5	Asynchron-Servomaschinen	309
7.6	Umrichter und elektronisch kommutierte Maschine	311
7.6.1	Entwicklung und Einsatz	311
7.6.2	Arbeitsweise der EK-Maschine	313
7.6.2.1	Blockstrom	313
7.6.2.2	Arbeitsweise Sinus-Bestromung	316
7.6.2.3	Vergleich: Blockbetrieb und Sinus-Bestromung	318
7.6.3	Gebersysteme	318
7.6.4	Stromrichtereinheit und Regelung	323
7.7	Umrichter und «geschaltete Reluktanzmaschine» (gRM)	323
7.8	Drehstromsteller und Drehstrom-Asynchronmaschine	325
7.8.1	Arbeitsweise und Einsatzmöglichkeiten	325
7.8.2	Steller als Sanftanlaufgerät	326
7.8.3	Steller als Sanftauslaufgerät	328
7.8.4	Elektronische KUSA-Schaltung	328
7.8.5	Betrieb mit variabler Drehzahl	330
7.8.5.1	Gesteuerter Betrieb	330

7.8.5.2	Geregelter Betrieb mit Spannungsdosierung	330
7.8.6	Grenzen des Betriebs	331
7.8.7	Verluste bei Belastung	334
7.8.8	Argumente für den Einsatz	334
7.8.9	Energiesparfunktion	334
7.9	Stromrichterantriebe mit Schleifringläufern	334
7.9.1	Stromrichtererkaskade	335
7.9.1.1	Untersynchroner Betrieb	335
7.9.1.2	Bemessung	335
7.9.1.3	Übersynchroner Betrieb	335
7.9.2	Doppeltgespeister Schleifringläufer	337
7.10	Stromrichter und Schrittmotoren	338
7.10.1	Positionieren mit Schrittmotoren	338
7.10.2	Betrieb und Ansteuerung	338
7.10.2.1	Blockbestromung	338
7.10.2.2	Sinusbestromung	342
7.10.2.3	Kennlinien	344
7.10.2.4	Steuerung	346
7.11	Stromrichter-AC-Direktantriebe	348
7.11.1	Maschine und Mechanik	348
7.11.2	Elektroniksteuerung	348
7.11.3	Direkte Linearantriebe	348
7.11.3.1	Aufbau	348
7.11.3.2	Typische Einsatzgebiete	349
7.11.4	Direkte Drehantriebe	349
7.11.4.1	Aufbau	349
7.11.4.2	Typische Einsatzgebiete	351
7.12	Antriebe im Vergleich	351
7.12.1	Bewegungsantriebe	351
7.12.2	Positionierantriebe	355
7.12.3	Dezentrale Antriebe (Module)	359
7.12.3.1	Dezentrale Intelligenz (Submodule)	359
7.12.3.2	Subsysteme	360
7.13	Motion Control und Mechatronik	361
8	Antriebsvernetzung und dezentrale Installation bei Stromrichtern	371
8.1	Antriebsvernetzung	371
8.1.1	Einleitung	371
8.1.2	Produktionsfaktor Information	371
8.1.3	Trend	373
8.1.3.1	Neue Impulse	373
8.1.3.2	Verteilte Intelligenz in Modulen	373
8.1.4	Frequenzumrichter als intelligenter Busteilnehmer	373
8.1.5	Feldbussysteme	374
8.1.5.1	Topologie	374
8.1.5.2	Datenaustausch und Protokoll	375
8.1.5.3	Industrie-Bussysteme (offene Systeme)	376
8.1.5.4	Firmenspezifische Kommunikation	376
8.1.5.5	Echtzeit-Ethernet	378
8.1.5.6	Profinet	380
8.1.6	Bussystem-Nutzergruppen	381
8.1.7	Vorteile der Vernetzung	381
8.1.8	Vergleich und Entscheidung	381
8.2	Dezentrale Installation	382
8.3	Sicherheitsfunktionen elektrischer Antriebe	382
9	Auswahl und Bemessung drehzahlveränderbarer Stromrichterantriebe	387
9.1	Allgemeine Hinweise	387
9.2	Netzdrosseln, Netztransformatoren und Filter	390
9.2.1	Drosseln	390

9.2.2	Netztransformatoren	391
9.2.3	Filter	391
9.3	Checklisten zur Festlegung der Antriebsdaten	391
9.3.1	Netzgeführter Stromrichter und Gleichstrommaschine	391
9.3.2	U-Umrichter und Drehstromasynchronmaschine	391
9.3.3	Positionierantriebe	394
9.4	Maschinendaten	394
9.5	Fallbeispiele	394
9.5.1	Mechanik	394
9.5.2	Gleichstrom	395
9.5.3	Drehstrom	398
9.5.4	EK-Motor (Positionierantrieb)	405
9.5.5	Schrittmotor (Positionierantrieb)	407
9.6	Klemmkennzeichnung	410
9.7	DC/AC-Listenpreise	410
9.8	Normen und Vorschriften	410
9.9	Auslegungsprogramme PFAD und IndraSize	410
10	Messungen an drehzahlveränderbaren Stromrichterantrieben (Stromrichtermesstechnik)	413
10.1	Messungen allgemein	413
10.1.1	Besonderheiten	413
10.1.2	Aliasing-Effekt	414
10.1.3	Geräteanzeige	415
10.2	Elektrische Messungen am Antrieb	416
10.2.1	Netzgeführte Stromrichter	416
10.2.2	Umrichter und Drehstromsteller	416
10.2.2.1	Vorbemerkung	416
10.2.2.2	Messungen am Umrichter	417
10.3	Mechanische Messungen am Antrieb	422
10.3.1	Drehzahl und Drehmoment	422
10.3.2	Lager	424
10.3.2.1	Lagerschwingungen	424
10.3.2.2	Lagerströme	424
10.3.3	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	429
10.3.4	Erwärmungsmessungen	432
10.3.4.1	Erwärmung	432
10.3.4.2	Infrarot-Thermografie	432
10.4	Simulation	432
11	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	433
11.1	Gesetz zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)	433
11.2	Störungen	433
11.3	Ursache und Ausbreitung der Störungen bei Frequenzumrichtern	434
11.4	Störfestigkeit und Entstörung	436
11.4.1	Leitungsgebundene Störungen	436
11.4.2	Nichtleitungsgebundene Störungen	437
11.5	Neubeschaffung	437
11.6	Messungen	438
11.7	Anschlusshinweise	438
	Anhang (Tabellen, Daten für die Praxis)	443
	Formelzeichen (Auswahl)	469
	Abkürzungen und Begriffe (Auswahl)	471
	Literaturverzeichnis	473
	Ergänzende Literatur	479
	Inserentenverzeichnis	481
	Stichwortverzeichnis	483

1 Einleitung

1.1 Stand der Antriebstechnik

Mit einem geschätzten Weltmarktpotential von ca. 13 Mrd. € haben drehzahlveränderbare Antriebe ein erhebliches Wirtschaftsvolumen. Alle diese Antriebe sind «Stromrichterantriebe», wenn man von verschwindend kleinen Anteil mechanischer Verstellantriebe abieht. Stromrichterantriebe sind ein anhaltend innovatives Produktgebiet mit jährlich durchschnittlichen Wachstumsraten von über 5%. Viele Komponenten der Produkte sind noch keine 3 Jahre alt.

Heute arbeiten erst 12% der Industrieantriebe in Deutschland drehzahlvariabel. Bei Neuinstallationen sind es ca. 25%. Sinnvoll wäre ein Anteil aus energetischen Gründen eher bei 50% aller Antriebe (ZVEI).

Waren vor ca. 20 Jahren noch rund 80% der drehzahlveränderbaren Antriebe in Gleichstromtechnik (DC) ausgeführt, so gab es seit her einen enormen Strukturwandel, der die Situation heute mehr als umgekehrt hat. Drehstromantriebe (AC) liegen besonders bei Leistungen von 0,75...100 kW weit vorne, da die Fortschritte bei den Bauelementen der Leistungselektronik besonders bei der Hardware die Senkung der Kosten und Abmessungen ermöglicht haben (Bild 1.1) [1.1 bis 1.5, 1.8]. Durch den Einsatz von Intelligenten Power Modulen (IPM) weitet sich der Bereich besonders in Richtung kleiner Leistungen zunehmend aus.

Der Absatz von AC- und DC-Motoren ist in den letzten Jahren nahezu stabil geblieben (Bild 1.1c und d).

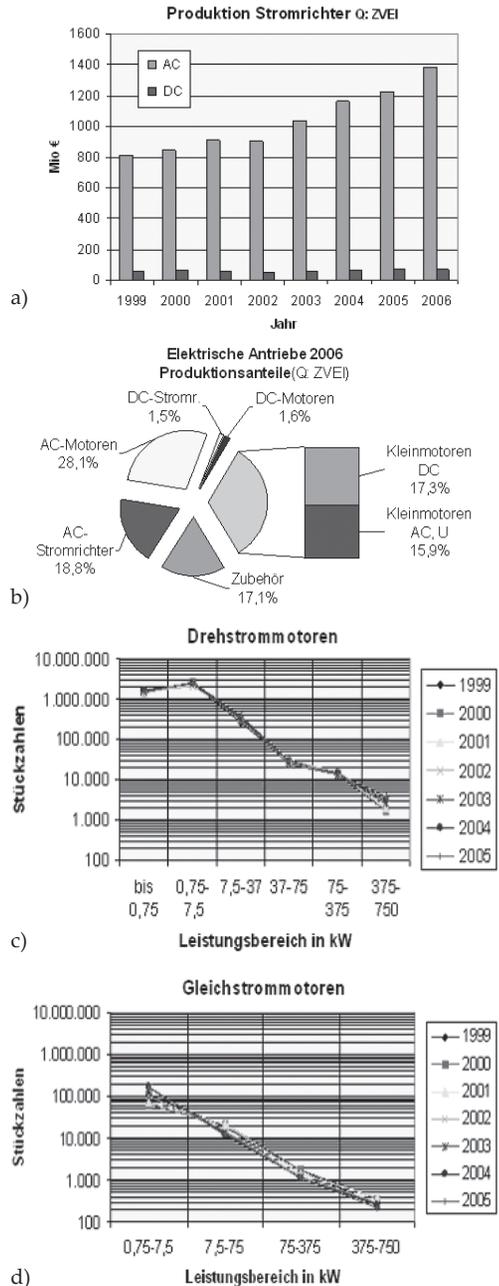


Bild 1.1 Entwicklungen der Antriebstechnik in der Bundesrepublik Deutschland (ZVEI)
a) Entwicklung der Produktionswerte für Stromrichter zum Einsatz bei drehzahlveränderbaren Antrieben (Gleichstrom (DC) und Drehstrom (AC)),
b) Produktionsanteile, U: Universalmotoren, c) Drehstromasynchronmotoren, d) Gleichstrommotoren

Immer schnellere Mikrorechner revolutionierten die Steuer- und Regelungstechnik. Die großen analogen Baugruppen wurden durch kleine Mikrorechnerplatinen ersetzt. Auf engstem Raum werden in den digitalen Geräten komplexe Funktionalitäten realisiert. Die Software ersetzt voluminöse Analogtechnik und ermöglicht die schnelle Drehmomentregelung bei Asynchronmaschinen, die heute den Grundstock dieser Entwicklung bildet. Selbsttests, Inbetriebnahmehilfen, Regleroptimierung und schnelle elektronische Synchronisation von Wellen sind weitgehend zu einem hohen Standard in der digitalen Antriebstechnik geworden.

All diese Entwicklungen ermöglichen den dezentralen intelligenten Antrieb in modularer Technik, der wiederum dem Maschinenbau die entscheidenden Kostenvorteile verschafft. Die Digitaltechnik brachte die digitalen Schnittstellen, die eine Datenvernetzung der Antriebseinheiten ermöglichte. Zur dezentralen Verteilung der Energieumsetzung in den Modulen kommt nun folgerichtig die dezentrale Installation. Die Antriebe sitzen in der Anlage genau dort, wo sie mechanisch gebraucht werden und werden dort «vor Ort» mit Energie und Daten versorgt. Die steuernde SPS wandert in den dezentralen

Antrieb und macht den zentralen Schaltschrank z.T. überflüssig.

Steckerverbindungen an den Geräten und Motoren ermöglichen den schnellen Austausch der Aggregate im Fehlerfall, ohne dass das Personal «elektrisch» geschult sein muss.

Die 80er-Jahre waren durch eine stark zunehmende industrielle Automatisierung gekennzeichnet, die auch nicht vor dem Pkw (Tabelle 1.1) Halt machte – einem Markt mit sehr großen Stückzahlen und hohen Anforderungen (Tabelle 1.2). Dies setzte sich auch in den 90er-Jahren – wenngleich gebremst durch die Konjunkturkrise und verschärft durch den notwendigen Strukturwandel in der Industrie – weiter fort. Heute sind dezentrale Module gefragt. So beobachtet man in den letzten Jahren eine ständig weiter wachsende Nachfrage nach reaktionsschnellen, wartungsarmen und möglichst kleinen Antriebssystemen in hoher Schutzart. Pneumatik, Hydraulik und Elektroantriebe stehen hier in einer gewissen Konkurrenz; wegen der einfacheren Steuerung und Regelung weitet sich der Bereich der Elektroantriebe – besonders der drehzahlveränderbaren – jedoch laufend aus.

Der wichtigste Trend der letzten Jahre war der Systemgedanke, der heute durch den Be-

Tabelle 1.1 Vernetzung der Fahrzeuge und der Umgebung (Quelle: DaimlerChrysler)

1949 170S	1990 S-Klasse	1999 S-Klasse
ca. 40 Kabel ca. 60 Kontaktierungen	ca. 1900 Kabel ca. 3800 Kontaktierungen Gewicht: ca. 39 kg Länge: ca. 3 km 40 Steuergeräte 90 Stellmotoren	3 Bussysteme 60 Steuergeräte 110 Stellmotoren

Tabelle 1.2 Anforderungen an die Elektronik (Quelle: Bosch)

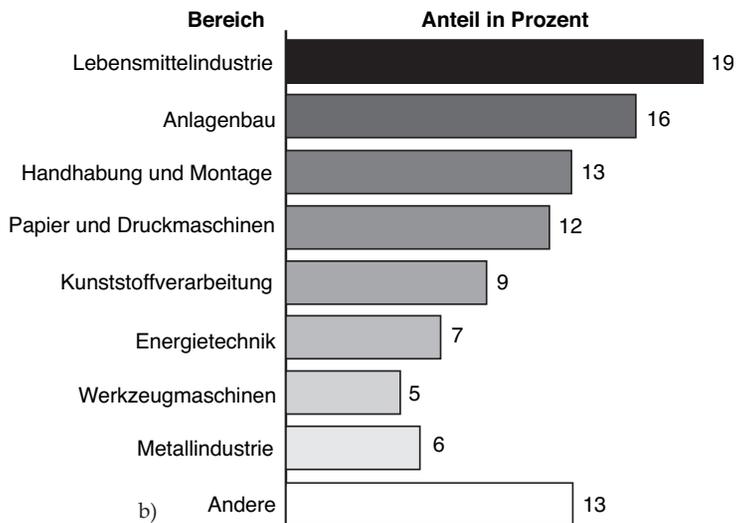
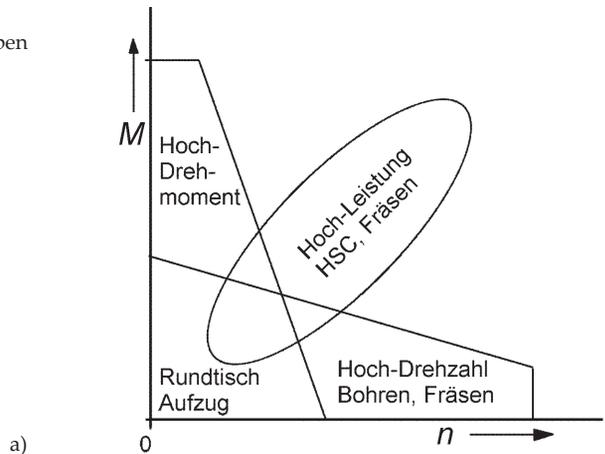
Markt-Parameter	Industrie	Automobil	Konsum
<i>Temperatur</i>	-10 °C...70 °C	-40 °C...85/155 °C	0 °C...40 °C
<i>Betriebsdauer</i>	5...10 Jahre	bis 15 Jahre	1...3 Jahre
<i>Feuchte</i>	Umwelt	0% r.F. bis Watttiefe	kaum
<i>tolerierter Feldausfallmenge</i>	<1%	Ziel: 0 Fehler	<10%
<i>Dokumentation</i>	bedingt	ja	keine
<i>Ersatz</i>	bis 5 Jahre	bis 30 Jahre	keine

griff «Mechatronik» gekennzeichnet wird. Nicht einzelne Komponenten stehen im Vordergrund, sondern das elektromechanische System «Elektrischer Antrieb – Motion Control» ergänzt durch den entsprechenden «Software»-Überbau. Die mechanischen Komponenten müssen in ein System eingebunden werden; dies ist auch der verbindende Grundgedanke des Buches. Elektrische Maschinen, Leistungselektronik und Software stehen nicht berührungslos nebeneinander, sondern sind eng verwoben. Die Grenzen der Disziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Software sind aufgehoben.

Die neuen Kompaktantriebe – Umrichter, Maschine und Getriebe als Einheit – sowie Motion Control bestätigen diesen Trend. Er setzt sich mit dem dezentralen, aber vernetzten Antriebsmodul in der Anlage weiter fort.

Elektrische drehzahlveränderbare Antriebe sind ein wichtiger und bestimmender Bestandteil vieler Maschinen geworden. Ihr Verhalten beeinflusst in starkem Maße die Qualität und die Kosten der erzeugten Produkte im weitesten Sinn! Die gewünschten Anpassungen der Antriebe an die optimalen Produktionsbedingungen erfordern immer mehr

Bild 1.2
Einsatz von drehzahlveränderbaren Antrieben in der Industrie
a) Kenngrößen der Bereiche
b) Einsatzfelder



dezentrale drehzahlveränderbare Antriebslösungen.

Die rein mechanischen Verstellmöglichkeiten der Drehzahl über Getriebe und die stufigen Verfahren, wie z.B. die Polumschaltung bei Asynchronmaschinen, werden in Zukunft sicher ihre Marktnischen behalten, aber an Bedeutung weiter verlieren. Fernziel ist sicher, möglichst alle infrage kommenden ca. 50% der Antriebe drehzahlvariabel arbeiten zu lassen – allein schon, um Energie einzusparen und die Lebensdauerkosten zu senken. Zur Art der drehzahlvariablen Antriebe und zu ihrem Einsatz in den verschiedenen Industriezweigen gibt Bild 1.2 Hinweise. Die Wünsche der Nutzer der Antriebe sind:

- maßgeschneiderte, innovative Antriebslösungen,
- Antriebskonzepte, die sich schnell und effizient erweitern und modifizieren lassen,
- Antriebskonzepte, die flexibel und wirtschaftlich auf Anforderungen eingehen,
- Senkung der Engineeringkosten,
- Verkürzung der Projektlaufzeiten und
- Senkung der Lebensdauerkosten.

1.2 Besondere Eigenschaften

Elektrische Antriebe haben besondere Eigenschaften, die mit zum verbreiteten Einsatz führten. Sie sollen kurz genannt werden:

- einfache Energiezufuhr über (biegbare) Leitungen «aus der Steckdose»,
- hohe Verfügbarkeit und sofort einsatzbereit,
- leichte Bedienbarkeit und umweltschonender Betrieb,
- geringe Leerlaufverluste und hoher Wirkungsgrad,
- kleine Abmessungen mit guten Anbaumöglichkeiten,
- lageunempfindliche Aufstellung,
- einfache Anpassung an den geforderten Drehzahl- und Drehmomentverlauf,
- großer Drehzahlbereich, verbunden mit großem Stellbereich,
- Drehzahl 0 ist möglich (Stillstandsbelastung),
- gute Regelbarkeit,

- hohe, kurzzeitige Überlastbarkeit,
- Nutzbremmung (Energierückspeisung) ist möglich,
- geräusch- und erschütterungsarmer Lauf,
- einfache, messtechnische Erfassung der Betriebszustände.

1.3 Qual der Auswahl

In den letzten Jahren gab es eine schnelle Weiterentwicklung bei elektronischen Bauteilen, z.B. bei den verschiedenen hochsperrenden, modernen Halbleiterschaltern und beim Einsatz der Mikroprozessoren und Signalprozessoren. Diese Fortschritte auf dem Gebiet der Leistungs- und Informationselektronik sowie der verstärkte Trend zum an die Antriebsaufgabe optimal angepassten Einzelantrieb (Modul) bestimmen das Bild in fast allen Industriezweigen, im Handwerk und im Haushalt. Im vorliegenden Buch wird die verwirrende Vielfalt am Markt bei drehzahlveränderbaren Antrieben (Bild 1.3):

- Gleich-, Wechselstrom- und Drehstrommaschinen,
- netzgeführten und selbstgeführten Stromrichtern,
- 1- oder Mehrquadrantenantrieben,
- 2- oder 6-pulsigen Stromrichtern antiparallel
- Umrichter mit Spannungs- oder Stromzwickelkreis sowie
- Gleichstrom- und Drehstromsteller usw.

mit System durchleuchtet werden, wobei zur besseren Übersicht lediglich der *Leistungsbereich von einigen 10 Watt bis zu rund 100 kW Wellenleistung* näher betrachtet wird. Im darunterliegenden niedrigeren Leistungsbereich und bei Leistungen über dem genannten Bereich überwiegen spezielle Auslegungen und Konstruktionen, die nicht mehr allgemein beschrieben und erfasst werden können. In Sonderfällen werden jedoch auch die im Kontext relevanten Aspekte außerhalb des abgegrenzten Leistungsbereiches aufgegriffen.

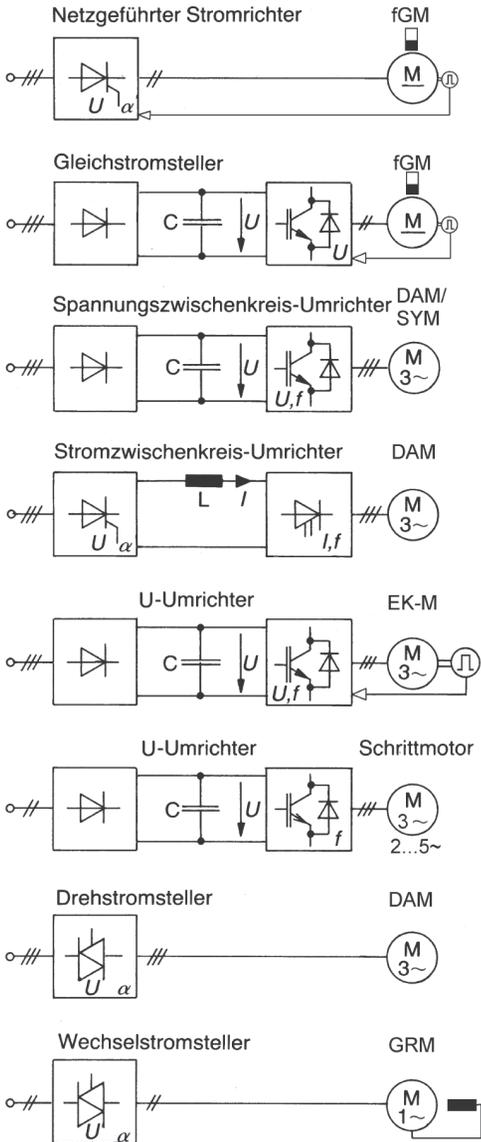


Bild 1.3 Vielfalt der drehzahlveränderbaren Antriebe mit Stromrichtern im Leistungsbereich bis ca. 100 kW

1.4 Komponenten

Elektrische drehzahlveränderbare Antriebe bestehen aus 3 Hauptkomponenten:

- ❑ dem *Stromrichter* als elektronischem Stellglied,
- ❑ der *elektrischen Maschine* als elektromechanischem Energiewandler und
- ❑ der *mechanisch angekoppelten Arbeitsmaschine*, dem «Verbraucher» der mechanischen Energie (Prozess), wie Bild 1.4 zeigt.

Während lange Zeit der *netzgeführte Stromrichter* zusammen mit der fremderregten Gleichstrommaschine – mit Nebenschlussverhalten (fGNM) – das Feld beherrschte, wird diese Lösung heute vermehrt durch umrichter gespeiste Drehfeldmaschinen – asynchroner (DAM) oder synchroner (SYM) Bauart – substituiert. Ziel der Bemühungen der letzten Jahre war es, die wartungsarme Drehfeldmaschine anstelle der stromwenderbehafteten Gleichstrommaschine einzusetzen. Erst die bereits erwähnten neueren Halbleiterentwicklungen ermöglichten den Ersatz der aufwendigen Thyristorumrichter durch kompakte Umrichter mit IGBT-Halbleitern bis etwa 10 MW, wobei die obere Grenze fließend ist. Der Einsatz von Mikroprozessoren mit komplexen Regelalgorithmen kann dem Drehstromantrieb heute die gleichen Eigenschaften verleihen, die bisher nur den Gleichstromantrieb auszeichneten.

Die neu entwickelten Kompaktantriebe mit Umrichter und Maschine als Einheit stellen einen weiteren Meilenstein dar. Bild 1.5 zeigt als Beispiel eine kleine Maschine mit integrierter Elektronik. Leistungsteil, Steuerteil und die elektronisch kommutierte Maschine

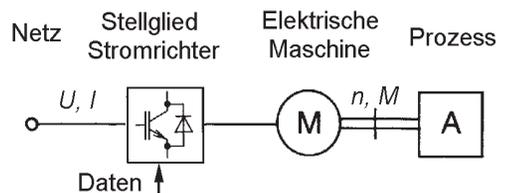


Bild 1.4 Grundsystem eines Stromrichterantriebs mit den Hauptkomponenten (Schema)

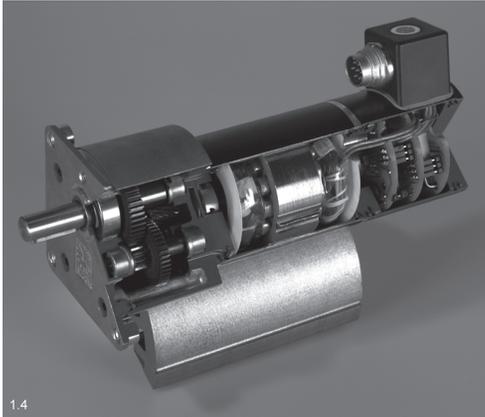


Bild 1.5 Kompaktantrieb; elektronisch kommutierte Maschine mit Getriebe (Quelle: Nekar-Mot.)

(EK) mit nachgeschaltetem Getriebe sind als Einheit entwickelt. Wegweisendes Beispiel dafür, dass die heutige Entwicklungsrichtung zu kompakten und komplexen Antriebslösungen führt. Bereits hier sei vermerkt, dass die endgültige Entscheidung über den Einsatz einzelner Antriebsvarianten, wegen der unterschiedlichen Wichtung der mannigfaltigen Auswahlkriterien, vom Planer und/oder Betreiber selbst zu fällen ist [1.6, 1.7].

1.5 Direkt und ohne Mechanik – «Mechatronik»

Elektrische Direkt-Linearantriebe und direktwirkende Drehantriebe finden als Positionierantriebe im Werkzeugmaschinenbereich oder der Handhabungstechnik zunehmendes Interesse. Sie werden meist als Drehstrommaschinen ausgeführt. Bild 1.6 zeigt einen direktwirkenden Drehantrieb aus dem Hebezeugbereich und einen direktwirkenden Linearantrieb. Ziel der Entwicklung ist es, die Mechanik, z.B. bei Textil- oder Druckmaschinen, möglichst zu reduzieren. Diese Entwicklung zeigt Bild 1.7 im Antriebsschema. Modular aufgebaute Maschinen wurden bisher mechanisch über Königswellen gekoppelt. Flexibler lässt sich das über schnelle Systembusse erreichen,

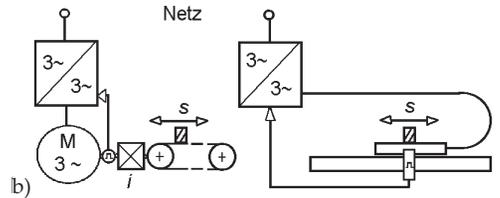
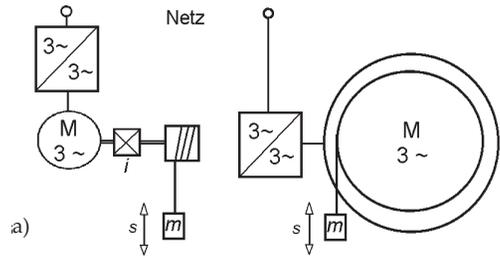


Bild 1.6 Direktantriebe
 a) Anpassung über Getriebe und Direktantrieb mit Sondermotor
 b) Anpassung über Getriebe und Transportband sowie Linearmotor

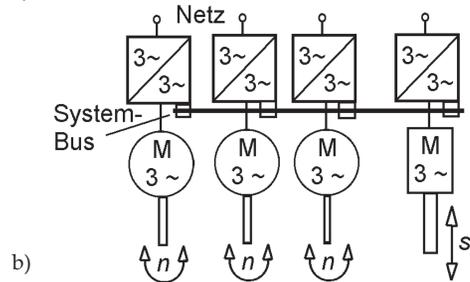
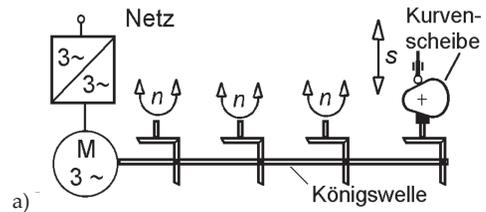


Bild 1.7 Kopplung von Antrieben
 a) Königswelle zur mechanischen Verteilung
 b) Systembus zur elektronischen Synchronisation der Antriebsmodule im mechatronischen System

wenn man damit Antriebsmodule koppelt und synchronisiert. So wird die starre Mechanik konstruktiv aufgelöst und durch Elektronik ersetzt. Die Mechatronik hält Einzug in die Anlagen.

1.6 Dezentral installiert

Statt des Hauptantriebs mit mechanischer Energieübertragung über Getriebe und Königswelle, sind die dezentralen modularen Antriebe im Einsatz, die ihre Daten über Bussysteme austauschen. Folgerichtig benötigen diese Antriebe auch eine dezentrale Installation. Dabei werden Energie- und Datenleitungen an die Maschine geführt und an Knoten bei «Bedarf» angezapft, wie in Bild 1.8 dargestellt ist. So ein Knoten kann auch komplette Stromrichter enthalten.

Bild 1.9 zeigt ein typisches Beispiel verteilter dezentraler Antriebe an einem Fördersystem.

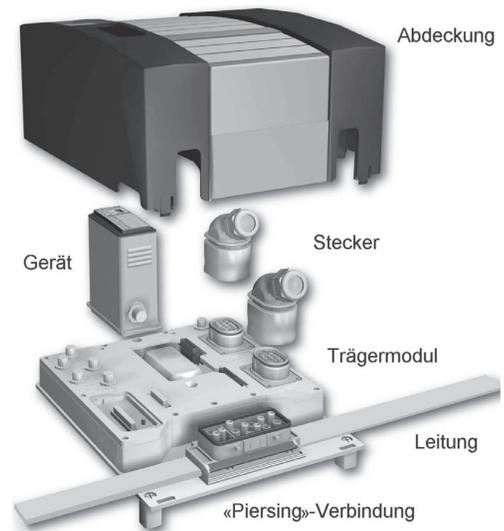


Bild 1.8 Dezentrale Installation mit Geräteträger. Die Leitungen werden «gepierst». (Quelle: Weiland)

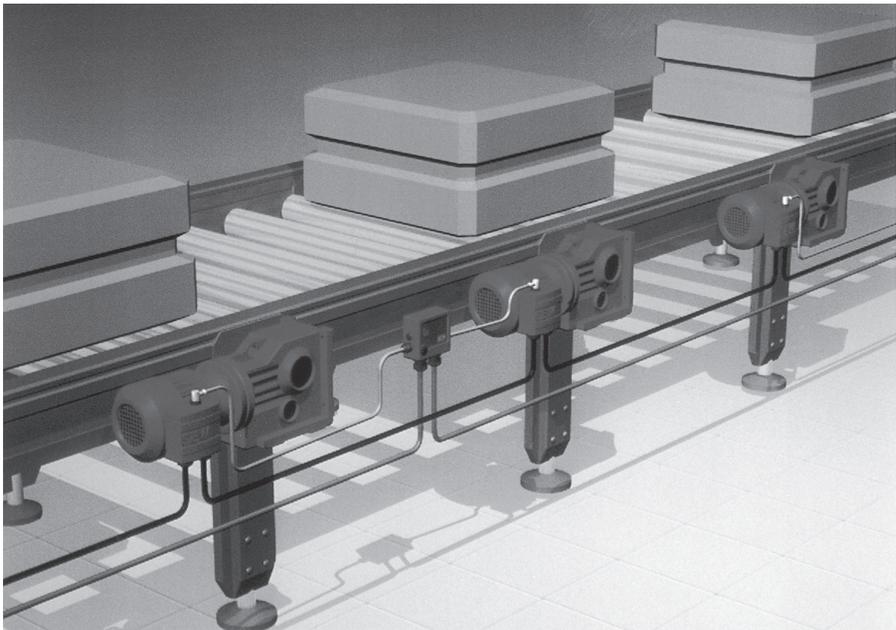


Bild 1.9 Dezentrale Antriebe mit dezentraler Installation für Bussystem und Energieleitung (SEW)

1.7 Gleichstrom- oder Drehstromlösung?

Die Frage, ob Gleichstrom oder Drehstromlösung, steht bei den Betrachtungen nicht mehr verbissen im Vordergrund, denn jede Variante hat ihre besonderen Eigenschaften, die der

Anwender technisch und wirtschaftlich optimal nutzen sollte. So konkurrieren die Lösungen teilweise miteinander oder ergänzen sich bei anderen Aufgaben. Der Trend bei Industrieantrieben – besonders in der Automatisierungstechnik und im Werkzeugmaschinenbereich – geht allerdings eindeutig zum dreh-

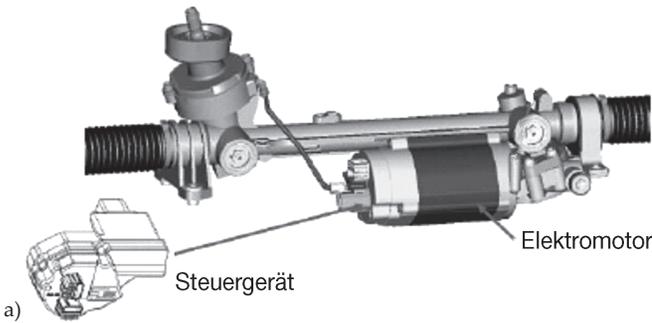
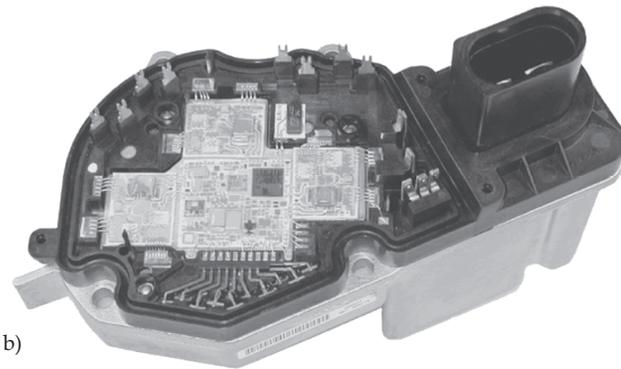


Bild 1.10 Pkw-Hilfsantriebe
(Quelle: Bosch)

- a) DAM-Lenkantrieb und Steuergerät mit Leistungsteil (Ströme bis 140 A): Die um das Leistungsteil angeordneten 3 Leistungsplatinen sind gut zu erkennen.
- b) Scheibenwischer-Kompakteinheit



zahlvariablen Drehstromantrieb mit Frequenzumrichter.

Bei Kleinantrieben ($P < 500 \text{ W}$) sieht die Verteilung anders aus. Besonders in der Kraftfahrzeugtechnik werden noch immer große Stückzahlen von Gleichstromantrieben eingesetzt, die immer öfter auch über Stromrichter gesteuert oder geregelt betrieben werden. Bei den Maschinen spielt der Verschleiß an Bürste und Stromwender kaum eine Rolle, da die Lebensbetriebszeiten in der Praxis sehr gering sind (oft unter 60 h).

1.8 Kfz-(Hilfs-)Antriebe

Hybridantriebe sind zz. beim Pkw hoch aktuell, wenngleich sie langfristig in der Prognose nur einen geringen Prozentanteil (<2%) ausmachen werden. Asynchron- und Synchronmaschinen werden aus der 300-V-Batterie über Frequenzumrichter mit 3- oder 6-phasigem Drehstrom gespeist.

Besonders Hilfsantriebe mit hohen Betriebsstundenzahlen, z.B. Lenkhilfsantriebe, werden als Umrichterantriebe gebaut und in Großserie eingesetzt. Bild 1.10 zeigt Hilfsantriebe.

1.9 Lebensdauerkosten

Die steigenden Energiepreise rücken die Lebensdauerkosten – Life-Cycle-Costs – immer stärker ins Blickfeld. Beim Betrieb einer An-

lage fallen die Investitionen im Vergleich zu den Energiekosten bei elektrischen Antrieben immer weniger ins Gewicht. Hochwirkungsgradmotoren können die Betriebskosten erheblich senken, auch wenn zunächst die Beschaffungskosten 10...20% höher ausfallen.

Bild 1.11 zeigt die grob aufgeschlüsselten Lebensdauerkosten für 3 Motoren mit unterschiedlichen Leistungen im betrachteten Bereich. Das Diagramm zeigt, dass der Kaufpreis und die Installation sowie die Wartung eine untergeordnete Rolle gegenüber den Energiekosten spielen.

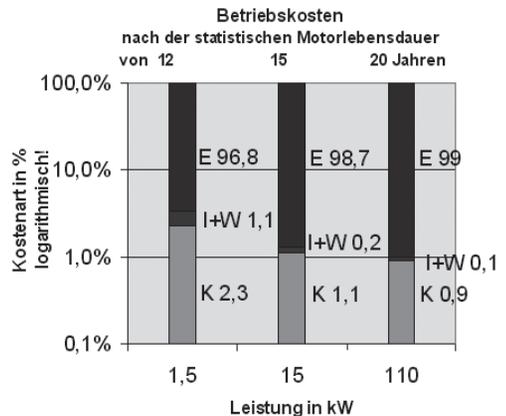


Bild 1.11 Lebensdauerkosten für 3 Motoren mit unterschiedlichen Leistungen und Betriebszeiten

2 Das moderne Antriebspaket

2.1 Bestimmungsgrößen bei der Auswahl

Bild 2.1 gibt einen Überblick über Bestimmungsgrößen bei der Auswahl eines Stromrichterantriebs. Bei der technischen Klärung und der Entscheidungsfindung zur Beschaffung sollten bereits 3 große Kostenblöcke ausgewogen berücksichtigt werden:

- Errichtungskosten (Investitionen),
- Betriebskosten – Lebensdauerkosten – und
- Umweltschutz.

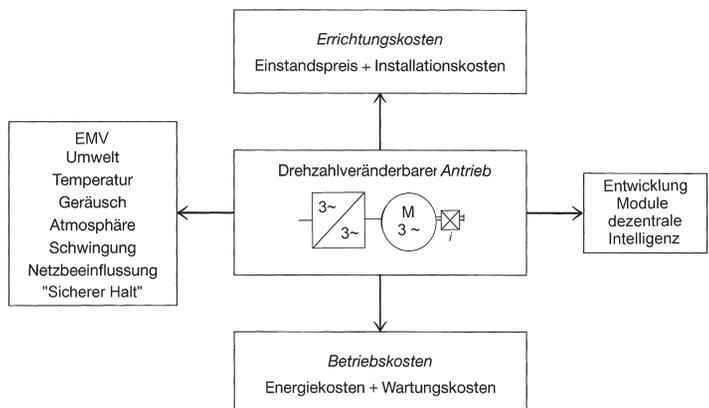
Große Kapazitäten bei Halbleiter- und Maschinenherstellern und der Kampf um Marktanteile führen zu verstärktem Kostendruck auf die Mitbewerber. Kostenvorteile der Serienfertigung werden weitergegeben und «verbessern» laufend die Einstandspreise der Drehstromantriebe gegenüber der traditionellen Gleichstromlösung, die an den Kostensenkungen kaum noch teilnimmt. Zusätzlich lassen sich Vorteile finden, wenn durch die geringeren Abmessungen der Drehstrommaschinen kostbarer Konstruktionsplatz für andere Maschinenkomponenten frei wird.

Lange Jahre wurde wenig auf die Kosteneinsparung beim Betrieb der Maschinen ge-

achtet, obwohl über die Möglichkeiten zur Erfassung der Einsparung mehrfach berichtet wurde [2.1, 2.2]. Neuerdings rücken auch die Betriebskosten – Lebensdauerkosten – stärker ins Blickfeld, ebenso wie die Wartungskosten (Service), wegen der steigenden Personalaufwendungen. Hochwirkungsgradmotoren werden vermehrt eingesetzt, um die Energiekosten zu senken. Die neuen mikroprozessorgesteuerten Stromrichter mit eingebauten Diagnoseroutinen bieten Vorteile, die man günstig zur Kostensenkung nutzen kann. Wartungsintervalle können so leicht erfasst und Stillstandszeiten besser eingeplant werden, die zustandsbezogene Wartung gewinnt an Bedeutung. Der Wartungsaufwand für den Stromwenderapparat der Gleichstrommaschine fällt zunächst bei solchen allgemeinen Vergleichen stark ins Gewicht, jedoch kann eine pauschale Betrachtung ohne Berücksichtigung einzelner Details leicht zu einer falschen Entscheidung führen. Bei modernen Gleichstrommaschinen entsprechen nach Herstellerangaben die Bürstenstandzeiten bei normalem Betrieb der Lagerlebensdauer.

Zwei wesentliche «Umweltschutzaspekte» gewinnen zunehmend an Bedeutung:

Bild 2.1
Bestimmungsgrößen für die Auswahl eines Stromrichterantriebs



- Netzurückwirkungen und
- Geräuschemission.

Die unerwünschte Rückwirkung der eingesetzten Stromrichter auf das speisende öffentliche Netz nimmt stark zu, da jeder Stromrichter ein Oberschwingungsgenerator ist; netzfreundliche Stromrichterschaltungen gewinnen so an Bedeutung. Der erfreulichen Reduzierung der Einschaltstromspitzen beim Maschinenanlauf durch den Stromrichter – besonders bei Drehstromasynchronmaschinen – stehen starke Netzurückwirkungen durch Oberschwingungen bei Strom und Spannung gegenüber, deren Grenzen in entsprechenden Vorschriften beschrieben sind [2.3]. Obwohl die Rahmenvorschriften eingehalten werden, kann die starke Zunahme der Zahl der eingesetzten Stromrichterantriebe zu Störungen der Aggregate untereinander führen.

Die Geräuschemission des Antriebspakets – Stromrichter, elektrische Maschine und angekuppelte Arbeitsmaschine – kann durch die Eigenschaften der Gesamtkonstruktion deutlich beeinflusst werden. Der Anteil und das unvermeidbare Spektrum an Oberschwingungen in den Betriebsgrößen von gleich- und sinusför-

migen Strömen sollte möglichst gering sein. 16-kHz-Pulsung – außerhalb des Hörbereiches des Menschen – ist bei Frequenzumrichtern anzustreben, um einen Teil der lästigen Geräusche zu eliminieren, z.B. bei Bühnen-Antrieben.

2.2 Mikrorechner sorgen für Wirtschaftlichkeit

Die Kostenstrukturen unterliegen dem laufenden Wandel, den der Anwender beachten muss, um die Langzeitentwicklung der Kosteneinzelposten am Einsatzplatz seiner Antriebe richtig zu erfassen. Die neuen Generationen der mikroprozessorgesteuerten Stromrichter bieten sich hierfür förmlich an, da fast alle Geräte über eine serielle Schnittstelle in beiden Richtungen Daten austauschen können.

Die Einführung des Mikroprozessors in die Stromrichtertechnik – verbunden mit dem Übergang zur direkten digitalen Regelung (DDC) – brachte in kurzer Zeit neue technische Lösungen auf dem Gebiet der prozessorientierten Antriebspakete. Die digitale Steuerung und Regelung des Stellglieds schafft gleichzeitig eine gute Möglichkeit, die aktuellen An-

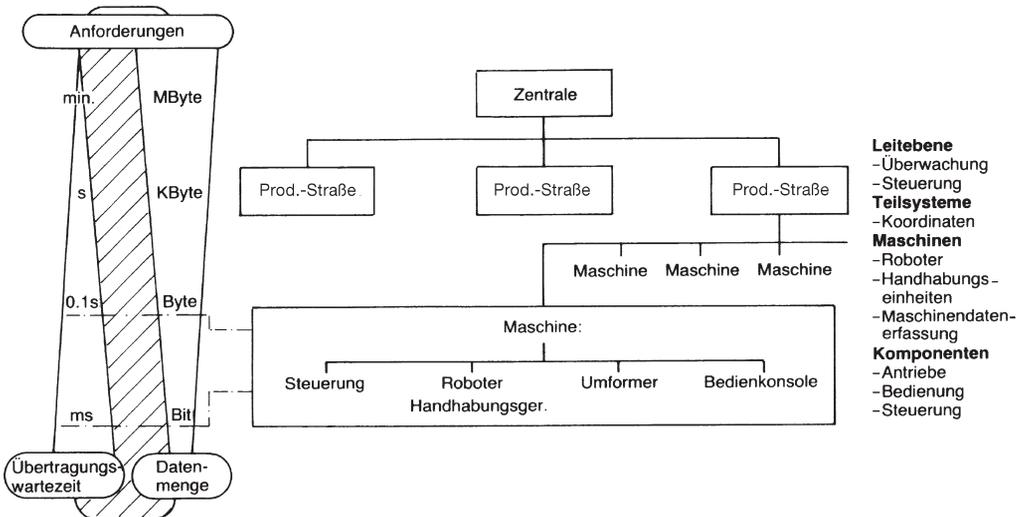


Bild 2.2 Betriebshierarchie und informationstechnische Verkettung. Leitreechner steuern und überwachen Schnittstellen, Produktionsstraßen, Maschinen und u.U. sogar den einzelnen Antrieb. Datenmenge und Übertragungswartezeit sind gegenläufig

triebszustände über Schnittstellen (RS232, RS486 usw.) an die Prozesssteuerung rückmelden zu lassen. Dadurch ist jeder Prozess leichter in eine Betriebshierarchie einzubinden [2.4] (siehe Bild 2.2). Prozessorientierte Antriebe sind so einfacher zu steuern, zu regeln und zu überwachen, wobei die Antriebskomponenten selbst intern auch noch rechnerüberwacht geschützt oder gewartet werden können.

2.3 Vorteile der veränderbaren Drehzahl

Die stufenlose Drehzahlverstellung eines Antriebs kann folgende Vorteile bieten:

- Energieeinsparung, z.B. bei Pumpen und Lüftern,
- Netzentlastung, da Anlaufstromspitzen reduziert werden,
- Prozessverbesserung, da Geschwindigkeiten dem Prozess optimal anpassbar,
- Qualitätsverbesserung, da Spitzenbelastungen und Laststöße von empfindlichen Anlagen ferngehalten werden,
- Wartungskostensenkung, da Verschleiß reduziert wird,
- Verbesserung der Arbeitsplatzbedingungen, weil z.B. die Transportgeschwindigkeit von Arbeitsbändern der Arbeitsleistung der Bediener angepasst werden kann.



Bild 2.3 Heimwerker-Bohr-Schrauber mit Rutschkupplung; ein Steller ermöglicht die Drehzahlverstellung des batteriegespeisten Motors.

2.4 Antriebsbeispiele

Einige Beispiele für drehzahlvariable Stromrichterantriebe vermitteln einen Einblick in die Praxis.

Im Haushalt findet man die Antriebe in

- Heimwerkergeräten (Bild 2.3) und Waschmaschinen.

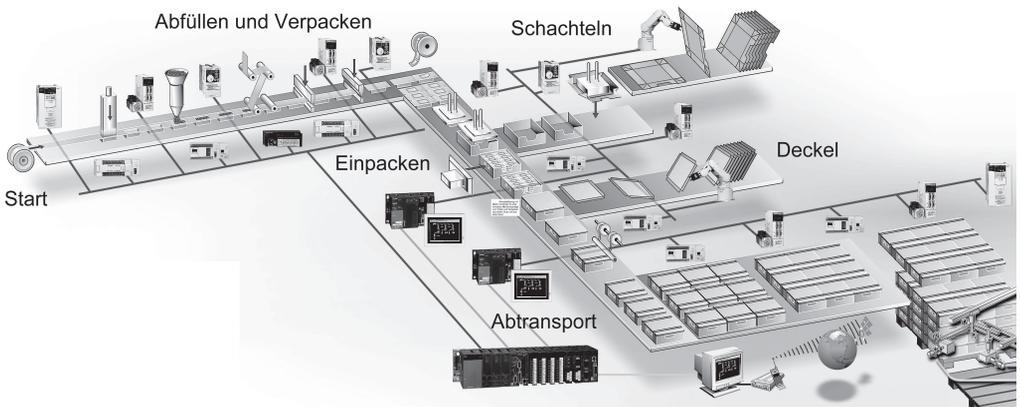


Bild 2.4 Komplettlösung einer komplexen Mehrachsanlage zum Füllen und Verpacken (Quelle: Mitsubishi)

Bei Industrieantrieben zeigt sich eine breite Palette von

- Lüftern, Pumpen, Förderanlagen, Handhabungsgeräten (Bild 2.4) und Werkzeugmaschinen (Bild 2.5) und Roboterantrieben (Bild 2.6) bis hin zu den Spezialantrieben bei
- Textilmaschinen (Bild 2.7), Verpackungsanlagen (Bild 2.4) oder Transferstraßen,
- Linearantrieben (Bild 2.8) oder
- direkten (getriebelosen) Hebezeugantrieben (Bild 2.9).

Die kurze Aufzählung mit den dargestellten Antrieben muss unvollständig sein. Sie sollte nur Hinweise auf den umfassenden Einsatz geben.

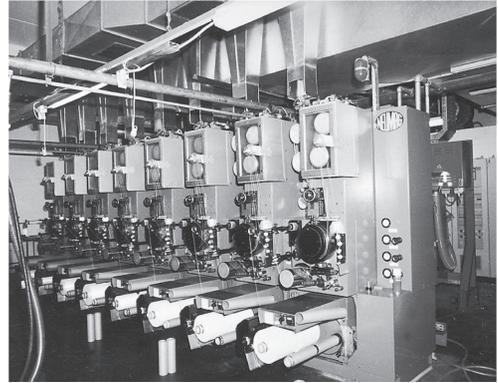


Bild 2.7 Texturiermaschine mit umrichtergespeisten Galettenantrieben (Reduktanzmotoren)

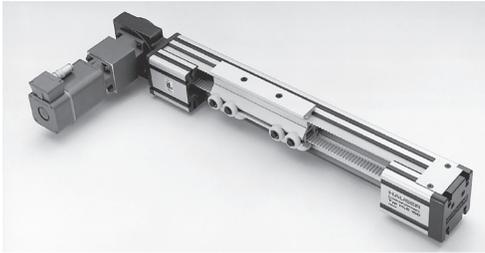


Bild 2.5 Werkzeugmaschinenantriebe Vario-Linearbaustein (Quelle: Hauser)

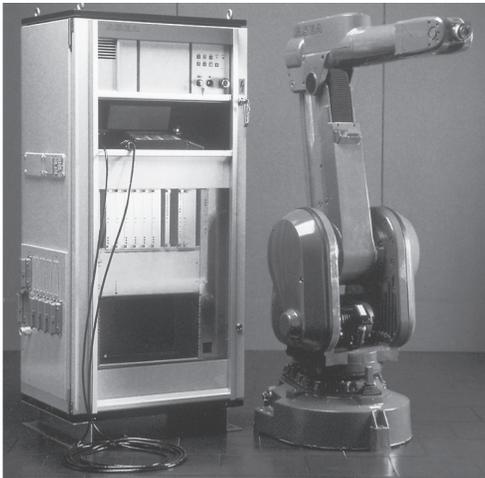
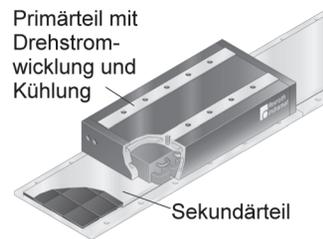


Bild 2.6 6-achsiger Roboter mit Steuerschrank (Quelle: ABB)



a)



b)

Bild 2.8 Linearantrieb Rexroth/Foto + Detail: (Quelle: Indramat)

- a) Frequenzumrichter mit verschiedenen Linearantrieben,
- b) Detailansicht

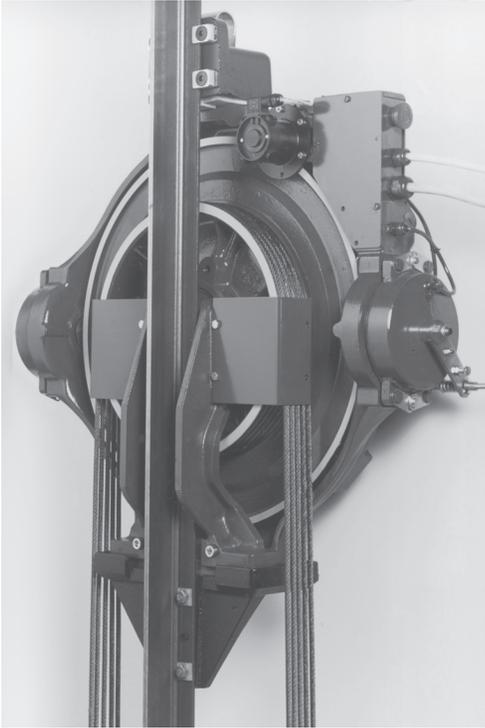


Bild 2.9 Aufzug-Direktantrieb (Quelle: Kone)

2.5 Drehzahlveränderbare Antriebe im Vergleich

Mechanische und elektrische Verstellmöglichkeiten konkurrieren auf dem Markt (Bild 2.10). Den prinzipiellen Kennlinienverlauf dieser beiden Antriebsvarianten zeigt Bild 2.11. Während das mechanische Verstellgetriebe im ganzen Arbeitsbereich mit konstanter Leistung (P) arbeitet, muss man beim Elektroantrieb zwei Betriebsbereiche beachten: den Bereich konstanten Drehmomentes (M) bis zur Eckdrehzahl (T) und den anschließenden Konstant-Leistungsbereich (P).

Wesentliche Unterschiede ergeben sich so im Bereich kleiner Drehzahlen. Dort kann eine Maschine kleiner Leistung über ein Getriebe große Drehmomente aufbringen (Getriebemotor). Beim Elektrodirektantrieb wäre hierfür eine sehr große Maschine erforderlich, da die

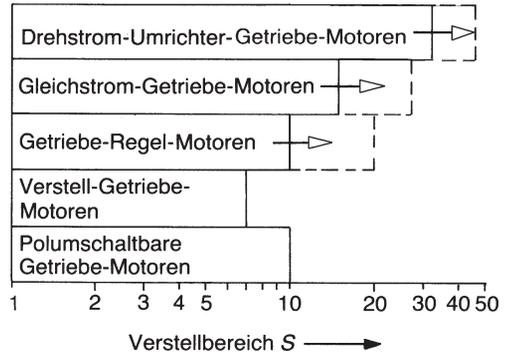


Bild 2.10 Verstellbereiche $S = 1 : n_{\text{Stell}}/n_{\text{Bezug}}$ verschiedener Antriebssysteme mit variabler Drehzahl elektrischer und mechanischer Bauart

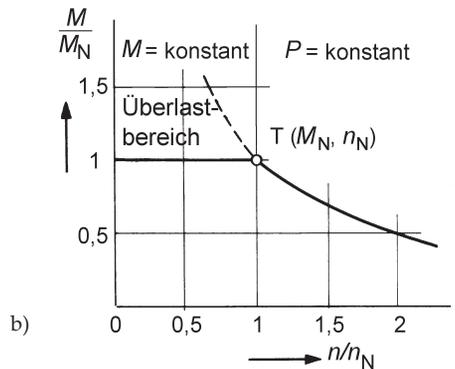
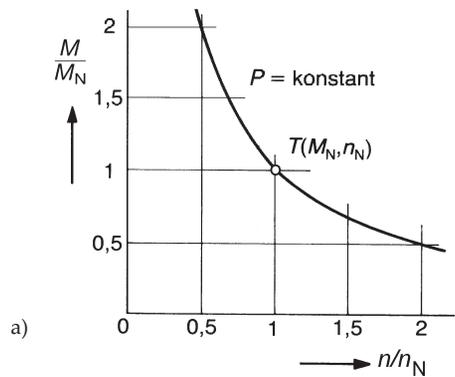


Bild 2.11 Kennlinienvergleich zwischen mechanischer und elektrischer Lösung: Verstellgetriebeantrieb (a) – Stromrichterantrieb (b);

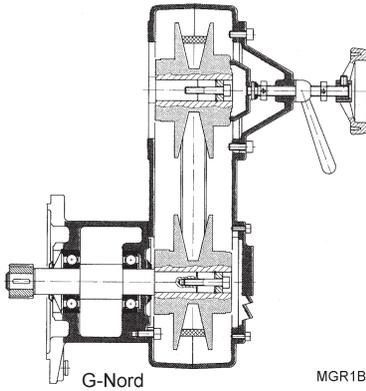


Bild 2.11 (Fortsetzung) (c) mechanisches Verstellgetriebe im Schnittbild ohne Motor (Quelle: Getriebebau NORD)

räumliche Größe eines Elektromotors vom Drehmoment und nicht von der Leistung bestimmt wird (Bild 2.12). Aus diesem Grund werden viele Getriebemotoren über Umrichter drehzahlvariabel betrieben.

Diese Problematik führt in der Praxis oft zu Fehleinschätzungen, wenn eine mechanische Drehzahlverstellung durch eine elektrische Lösung ersetzt werden soll (s. Bild 2.11). Durch die 29/87-Hz-Technik bei den Frequenzumrichtern sind aber gute Anpassungsmöglichkeiten gegeben.

Bevor näher auf die Antriebskomponenten eingegangen wird, sollen zunächst die antriebstechnischen Grundlagen betrachtet werden.

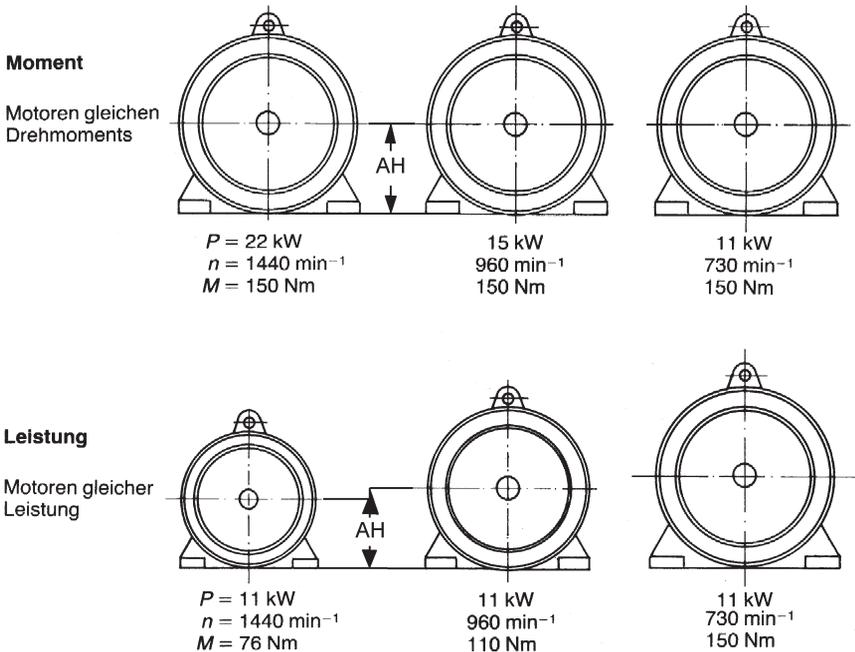


Bild 2.12 Systemvergleich
Größenvergleich der elektrischen Maschinen bei konstantem Drehmoment und konstanter Leistung
AH: Achshöhe

3 Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik

3.1 Grundsystem des Antriebs

Unabhängig vom Leistungsbereich lässt sich ein elektrischer Antrieb mit einfachen Systemgrößen beschreiben. Wie Bild 3.1 zeigt, sind für ein solches System im Allgemeinen zu berücksichtigen:

- ❑ das Netz,
- ❑ das elektronische Stellglied – der Stromrichter –,
- ❑ die elektrische Maschine, hauptsächlich antreibend im Motorbetrieb, daher meist kurz «Motor» genannt, und
- ❑ die angekuppelte meist passive Arbeitsmaschine.

Dabei ist es in der Antriebstechnik üblich, die einzelnen Systemkomponenten mit ihren Kennlinien zu beschreiben (siehe hierzu Bild 3.1 b). Dort sind die mechanischen Größen in der Winkelgeschwindigkeits- oder Drehzahl-Drehmoment-Ebene und die elektrischen in der Spannungs-Strom-Ebene dargestellt. Lei-

der ist die übliche Drehzahlangabe in Umdrehungen/Minute dem System der gesetzlichen Einheiten (SI) eigentlich fremd, jedoch zugelassen (siehe Tabelle 3.1). Zum besseren Verständnis wird bei mechanischen Darstellungen daher die Winkelgeschwindigkeit ω benutzt, während bei den Antrieben dann später praxisnah von der Drehzahl n gesprochen wird.

Der Drehzahlstellbereich ist definiert mit $S = 1 : n_{\text{Stell}}/n_{\text{Bezug}}$.

In Bild 3.2 a) sind die Kenngrößen für die Beschreibung des Antriebsgrundsystems abgebildet. Die angetragene positive Zählrichtung¹ ist frei, aber zweckmäßig gewählt. Sie gibt die positiven Zählrichtungen für alle ein-

¹ Oft werden die treibenden und bremsenden Drehmomente mit entgegengesetzten Zählrichtungen dargestellt. Dieses Vorgehen führt erfahrungsgemäß bei der Berechnung unbekannter Probleme zu Schwierigkeiten. U. U. ist das Drehmoment M über der Drehzahl n aufgetragen, weil diese Darstellung in der Praxis oft interessiert.

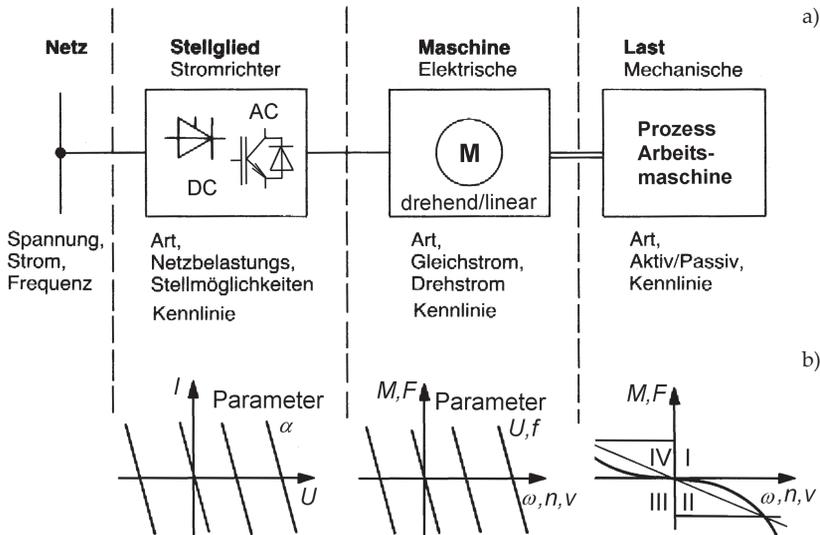


Bild 3.1 Grundsystem des Antriebs (a) mit den Kennlinien der Komponenten (b)