

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Peter F. Brosch

# Praxis der Drehstrom- antriebe

mit fester und  
variabler Drehzahl

---

Peter F. Brosch

Praxis der Drehstromantriebe



Kamprath-Reihe

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

# Praxis der Drehstromantriebe

mit fester und variabler Drehzahl

Maschinen, Leistungselektronik, Einsatz

Vogel Buchverlag

Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. PETER F. BROSCH  
Jahrgang 1934. Prof. Dr. 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. Anschließend war er geschäftsführender Gesellschafter im Ingenieurbüro für Betriebs- und Fertigungsmittel, Hannover. Seit 1971 lehrt er an der Fachhochschule Hannover, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, in den Bereichen Elektrische Maschinen, Antriebe und Leistungselektronik. Prof. Dr. Brosch ist Ehrenprofessor am Hangzhou-Institut für angewandte Technik (HIAT) in der Volksrepublik China.

#### **Haftungsausschluss**

Autor und Verlag haben alle Texte, Bilder und Tabellen 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.

---

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

#### **Brosch, Peter:**

Praxis der Drehstromantriebe : mit fester und variabler Drehzahl / Peter Brosch. – 1. Auflage. – Würzburg : Vogel, 2002  
(Kamprath-Reihe)  
ISBN 3-8023-1748-3

---

ISBN 3-8023-1748-3

1. Auflage. 2002

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 2002 by Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg

Satzherstellung: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

---

# Vorwort

---

Motto: *So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären!*

*Johann Wolfgang von Goethe*

Die Mehrzahl der Drehstromantriebe arbeiten immer noch mit festen Drehzahlen. Sie werden direkt ans Netz eingeschaltet oder über Stern-Dreieck-Anlauf usw. hochgefahren.

Die immer weiter zunehmende Automatisierung erfordert jedoch stark angepasste drehzahlveränderbare Antriebe. Diese Anforderungen erfüllen besonders Drehstromantriebe, die wegen ihrer Robustheit und Wartungsfreiheit in den letzten Jahren immer häufiger eingesetzt werden. Verschiedene Antriebslösungen sind auf dem Markt.

Für die «Praxis der Drehstromantriebe» wird der Leistungsbereich von 100 W...100 kW mit den großen Stückzahlen am Markt betrachtet. Bei kleineren Leistungen überwiegen gerätespezifische Sonderlösungen, und im Bereich höherer Leistungen sind projektgebundene Auslegungen im Einsatz, die sich einer allgemeinen Beschreibung weitgehend entziehen.

Der Antrieb wird als System beschrieben, was heutzutage übliche Praxis ist. Neben den Hardwarekomponenten spielt dabei die Software eine bedeutende Rolle. Sowohl diese Entwicklung als auch die Einbindung der Antriebe in betriebliche und globale Netze werden beschrieben.

Auf lange mathematische Ableitungen wurde verzichtet, grundlegende Ableitungen sind alle in einem besonderen Kapitel zusammengefasst. Bei zusätzlichem Bedarf hilft die angegebene weiterführende Literatur.

Querverweise verzahnen die Kapitel und erleichtern das Verständnis. Am Ende wichtiger Abschnitte fassen «*Schlussfolgerungen*» das Wichtigste zusammen. «*Praxishinweise*» stellen die Verbindung zum Tagesgeschäft her und «*Fallbeispiele*» beschreiben Rechenabläufe.

Motoren- und Gerätelisten im Anhang ermöglichen einen schnellen Zugriff auf Daten der Antriebspraxis. Die aktuellsten Daten entnimmt man den Internetseiten der Anbieter. Das Lieferantenverzeichnis des *Verbandes Elektrischer Antriebe* im ZVEI hilft hierbei weiter unter «[www.zvei.org/antriebellieferantenverzeichnis](http://www.zvei.org/antriebellieferantenverzeichnis)».

Alle wichtigen Daten für Praktiker, Techniker und Studierende, die sich in die Materie der Drehstromantriebe einarbeiten müssen oder sich informieren wollen, sind vorhanden. Deshalb ist das Buch auch als Nachschlagewerk gut nutzbar.

Über Resonanz aus Nutzerkreisen und Anregungen bin ich immer dankbar. Die moderne Kommunikation ermöglicht den schnellen Dialog über E-Mail: [brosch@etech.fh-hannover.de](mailto:brosch@etech.fh-hannover.de).

Mein Dank gilt allen, die bei diesem Buch mitgeholfen haben. Für die Umsetzung und gute Zusammenarbeit danke ich dem Vogel Buchverlag.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b> . . . . .	5
<b>1 Stand der Technik</b> . . . . .	13
1.1 Einleitung . . . . .	13
1.2 Komponenten der elektrischen Antriebe . . . . .	17
1.3 Antriebslösungen . . . . .	17
1.4 Antriebe mit Drehfeldmaschinen . . . . .	18
1.4.1 Entwicklung der drehzahlvariablen AC-Antriebe . . . . .	18
1.4.2 AC-Bewegungsantriebe . . . . .	19
1.4.3 Sanftanlauf . . . . .	19
1.4.4 AC-Positionierantriebe . . . . .	20
1.4.5 AC-Antriebsmodule zum Bewegen und Positionieren . . . . .	20
1.4.6 AC-Direkt-Antriebe . . . . .	20
1.4.7 Umrichterantriebe im Automobil . . . . .	21
1.5 Energieeinsparung . . . . .	22
1.6 Netzzrückwirkungen . . . . .	22
1.7 Dezentrale Installation . . . . .	22
<b>2 Drehfeldmaschinen</b> . . . . .	27
2.1 Asynchronmaschinen . . . . .	31
2.1.1 Aufbau . . . . .	31
2.1.2 Betrieb am 50-Hz-Drehstromnetz . . . . .	32
2.1.2.1 Streuungslose Asynchronmaschinen . . . . .	34
2.1.2.2 Reale streuungsbehaftete Asynchronmaschinen . . . . .	36
2.1.3 Betrieb am 50-Hz-Wechselstromnetz . . . . .	45
2.1.3.1 2-Strang-Maschinen (mit Widerstandshilfsstrang) . . . . .	46
2.1.3.2 2-Strang-Maschine mit Kondensator im Hilfsstrang (Kondensatormotor) . . . . .	47
2.1.3.3 3-Strang-Maschine am Wechselstromnetz (Kondensatormotor) . . . . .	48
2.1.3.4 Stufenlose Drehzahlverstellung (Frequenzsteuerung) . . . . .	49
2.1.3.5 Konstante Ständerflussverkettung . . . . .	50
2.1.3.6 Konstante Läuferflussverkettung . . . . .	51
2.1.3.7 Eingepägter Ständerstrom . . . . .	52
2.1.3.8 Betrieb der 50-Hz-Asynchronmaschine am 60-Hz-Netz . . . . .	53
2.1.3.9 Spannungsvariabler Betrieb am 50-Hz-Netz . . . . .	54
2.1.3.10 Betrieb am unsymmetrischen Netz – Satz von der Drehmomentenfläche (Anlaufmoment) . . . . .	54
2.2 Synchronmaschinen (SM) . . . . .	56
2.2.1 Aufbau und Betriebskennlinie . . . . .	56
2.2.2 Stromortskurve . . . . .	57
2.2.3 Konstruktion des Kreisdiagrammes . . . . .	60
2.2.4 Sonderbauformen der Synchronmaschine . . . . .	61
2.3 Direktantriebe . . . . .	63
2.3.1 Drehende und lineare Direktantriebe . . . . .	63
2.3.2 Maschinen und Elektronik . . . . .	64
2.3.3 Linearantriebe . . . . .	65
2.3.4 Direkte Drehantriebe . . . . .	65
2.4 Transversalflussmaschinen (TFM) . . . . .	67
2.4.1 Aufbau . . . . .	67
2.4.2 Leistungselektronik . . . . .	68
2.4.3 Einsatz . . . . .	68
2.5 Maschinen in der Praxis – Normen, Vorschriften und Konstruktives . . . . .	69

2.5.1	Leistungsschild und Toleranzen	69
2.5.2	Lager	69
2.5.3	Maschinenüberlastschutz	72
2.5.4	Anbauten: Kupplungen, Fremdlüfter, Drehzahlwächter (Drehzahlgeber), Lage- und Drehzahlgeber sowie Feststellbremsen	73
2.5.5	Schutzarten	78
2.5.6	Bauformen	78
2.5.7	Baugrößen (Achshöhe AH)	81
2.5.8	Erwärmungs- und Abkühlungsvorgang	81
2.5.9	Drehmomentgrenze	85
2.5.10	Kühlung	87
2.5.11	Betriebsarten	90
2.5.12	Wachstumsgesetze	98
<b>3</b>	<b>Mechanik der Antriebstechnik</b>	<b>101</b>
3.1	Grundsystem des Antriebs	101
3.2	Mechanik des Antriebs	103
3.2.1	Energiesatz	104
3.2.2	Dynamisches Grundgesetz	106
3.2.3	Antriebsmomente elektrischer Maschinen	107
3.2.4	Lastkennlinien der Arbeitsmaschinen	107
3.2.5	Stabiler Arbeitspunkt des Antriebs	110
3.3	Zeitkonstanten bei Antrieben	111
3.4	Mechanische Übergangsvorgänge	112
3.4.1	Hochlaufzeitkonstante	113
3.4.2	Proportionalmethode	115
3.4.3	Übergangsvorgänge bei Asynchronmaschinen	116
3.4.4	Anlaufwinkel (Hochlaufwinkel)	117
3.4.5	Getriebeeinfluss	118
3.5	Getriebearten	121
3.5.1	Axialgetriebe	121
3.5.2	Winkelgetriebe	122
3.5.3	Riemen- und Zahnriemengetriebe	122
3.5.4	Spindeln	122
3.5.5	Planetengetriebe	122
3.5.6	Splinegetriebe	122
3.5.7	Vergleich der Getriebearten	123
3.5.8	Mechanische Verstellgetriebe	124
3.5.9	Schmierung	124
3.5.10	Wahl der Getriebeübersetzung	124
3.6	Kupplung	125
3.7	Energieumsatz	126
3.7.1	Anlauf	126
3.7.1.1	Leeranlauf	127
3.7.1.2	Gestufter Anlauf – Energieeinsparung	128
3.7.2	Bremslauf	129
3.7.3	Lastanlauf	130
<b>4</b>	<b>Stromrichter und ihre Bauteile</b>	<b>133</b>
4.1	Übersicht	133
4.2	Grundfunktionen der Stromrichter	133
4.2.1	Grundfunktionen der Umformung	133
4.2.2	Betriebsquadranten	134
4.2.3	Stromrichterarten	135
4.2.4	Spannungsabsenkung	136
4.2.5	Phasenanschnittsteuerung am Wechselspannungsnetz	137
4.2.6	Pulsweitenmodulation (PWM) am Gleichspannungsnetz	138



4.2.7	Spannungsanhebung am Gleichspannungsnetz	139
4.2.8	Spannungsanhebung und Rückspeisung am Wechselspannungsnetz	139
4.2.9	Wechselrichten aus dem Gleichspannungsnetz	140
4.3	Elektronische Schalter für Stromrichter	141
4.3.1	Reale Schalter	141
4.3.2	Elektronische Schalter für Stromrichter	142
4.3.3	Schutz von Halbleitern	150
4.4	Elektronik	158
<b>5</b>	<b>Elektronische Stellglieder</b>	<b>161</b>
5.1	Elektronik am Antrieb	161
5.2	Steller (Sanftanlaufgeräte)	161
5.2.1	Übersicht	161
5.2.2	Gerät	163
5.2.3	Parametrisieren	165
5.3	Umrichter	165
5.3.1	Arten und Abgrenzung	165
5.3.2	Aufbau des Umrichters mit Spannungszwischenkreis ( <i>U</i> -Umrichter)	166
5.3.2.1	Drehspannungserzeugung (Blocksteuerung)	167
5.3.2.2	Raumzeigerdarstellung	170
5.3.2.3	Spannungsanpassung beim <i>U</i> -Umrichter	172
5.3.2.4	Modulationsverfahren bei <i>U</i> -Umrichtern	174
5.3.3	Steuerteil und Software	183
5.3.4	Drehmomentregelung	186
5.3.4.1	Feldorientierte Regelung (FOR: «Vektor-»Regelung)	186
5.3.4.2	Direkte Selbstregelung (DSR) – Direct Torque Control (DTC)	193
5.4	Stromrichter für EK-Maschinen	199
5.4.1	Arbeitsweise	199
5.4.2	Blockbestromung	200
5.4.3	Sinusbestromung	200
5.5	Umrichter für geschaltete Reluktanzmaschinen (GRM)	204
5.6	Servoumrichter	204
5.7	Umrichter für Transversalflussmaschinen	204
5.8	Eingangstromrichter (Netzstromrichter)	204
<b>6</b>	<b>Antriebspraxis mit Drehfeldmaschinen</b>	<b>207</b>
6.1	Aufgaben der Praxis	207
6.1.1	Antrieb und Schnittstellen	207
6.1.2	Schalter oder Stellglieder?	207
6.2	Asynchronmaschinen	209
6.2.1	Konventioneller Betrieb (ohne Elektronik) am 50-Hz-Netz	209
6.2.1.1	Direktschalten	209
6.2.1.2	Schweranlauf mit Rutschkupplung	211
6.2.2	Konventionelle elektrische Anlaufverfahren (Hochlauf)	212
6.2.2.1	Stern-Dreieck-Anlauf	212
6.2.2.2	Symmetrische Anlassvorwiderstände	214
6.2.2.3	Anlasstransformator	215
6.2.2.4	KUSA-Schaltung	216
6.2.3	Bremsschaltungen	216
6.2.3.1	Generatorbetrieb	218
6.2.3.2	Gegenstrombremsen	218
6.2.3.3	Gleichstrombremsen (DC-Bremsen)	218
6.2.4	Drehzahlsteuerung	221
6.2.4.1	Betrieb mit variabler Frequenz	221
6.2.4.2	Änderung der Polpaarzahl	221
6.2.4.3	Vergrößerung von Schlupf (Schlupfsteuerung)	222
6.2.4.4	Spannungsabsenkung bei Wechselstrombetrieb	223

6.2.5	Betrieb mit Leistungselektronik (Steller und Umrichter)	223
6.2.5.1	Betrieb am Drehstromsteller	223
6.2.5.1.1	Betrieb am Steller mit fester Enddrehzahl	226
6.2.5.1.2	Energieeinsparfunktion mit Steller	227
6.2.5.1.3	√3-Schaltung»	227
6.2.5.1.4	Unsymmetrische Stellerschaltungen	229
6.2.5.1.5	Elektronische KUSA-Schaltung	229
6.2.5.1.6	Sanftanlauf mit 2-Strang-Geräten	229
6.2.5.1.7	Sanfte Auslaufsteuerung	230
6.2.5.1.8	Betrieb am Steller mit variabler Drehzahl	230
6.2.5.1.9	Verluste bei Belastung	231
6.2.5.1.10	Asynchronmaschine mit Steller am Wechselspannungsnetz	232
6.2.5.1.11	Frequenzvariabler Betrieb mit Steller	232
6.2.5.2	Betrieb der Asynchronmaschine am Frequenzumrichter	235
6.2.5.2.1	Verfahren	235
6.2.5.2.2	Betrieb der Asynchronmaschine mit variabler Speisefrequenz	236
6.2.5.2.3	2 Betriebsbereiche: Konstantfluss- und Feldschwächbereich	237
6.2.5.2.4	Schnittstellen, Parameter und Verfahren	239
6.2.5.2.5	Steuer- und Regelverfahren sowie besondere Parameter	242
6.2.5.2.6	Bremsen bei Umrichterbetrieb	253
6.3	Synchronmaschinen	261
6.4	EK-Maschine und geschalteter Reluktanzmotor	263
6.5	Servoantriebe	264
6.6	Besondere AC-Antriebe	270
6.6.1	Getriebemotoren	270
6.6.2	Integral-, Umrichter- oder Kompaktantriebe	271
6.6.3	Kompaktantrieb mit Getriebe	272
6.6.4	Verstellgetriebe oder Kompaktantrieb mit Getriebe	272
6.6.5	Mechatronikantriebsmodule	273
6.6.6	Flexibler Antrieb	273
6.7	Drehende und lineare Direktantriebe	275
6.8	Netzrückwirkungen	276
6.8.1	Festdrehzahlantriebe	276
6.8.2	Steller (Sanftanlaufgerät)	277
6.8.3	U-Umrichter	277
6.8.3.1	AC- und DC-Drossel	278
6.8.3.2	Netz-Pulsstromrichter im Eingang (netzfreundlicher Eingangsstromrichter)	279
6.8.3.3	Aktive Netzfilter	282
6.8.3.4	Netzrückwirkungen im Vergleich	283
6.8.5	Netzstrom beim Anlauf	284
6.8.6	Strom im Neutralleiter	287
6.9	Checkliste für Drehstromantrieb	290
<b>7</b>	<b>Vernetzung, EMV und Energieeinsparung</b>	<b>291</b>
7.1	Antriebsvernetzung (Kommunikation)	291
7.1.1	Produktionsfaktor <i>Information</i>	291
7.1.2	Neue Sichtweise: verteilte Intelligenz	291
7.1.3	Fertigung und Prozess	292
7.1.4	Kommunikationssysteme	292
7.1.5	Daten im Feldbussystem	293
7.1.6	Feldbusteilnehmer	294
7.1.7	Zugriffsverfahren	294
7.1.8	Topologie	295
7.1.9	Synchronisierung von Busteilnehmern	295
7.1.10	Kommunikationssysteme	296
7.1.11	Vorteile der Antriebsvernetzung	300
7.2	Industriesysteme	300

7.2.1	Betrieb am IT-System (keine Unterbrechung)	300
7.3	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	303
7.3.1	EMV	303
7.3.2	Normen	304
7.3.3	Anschluss von Geräten	305
7.4	Energieeinsparung	310
7.4.1	Möglichkeiten	310
7.4.2	Stoffmengenregelung	311
7.4.3	Fördersystem	312
7.4.4	Amortisationszeit	312
<b>8</b>	<b>Fallbeispiele</b>	<b>315</b>
<b>9</b>	<b>Grundlegende Ableitungen</b>	<b>333</b>
9.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	333
9.2	Bezogene Größen	335
9.3	Drehmomentberechnung	335
9.4	Raumzeigerdarstellung	336
9.4.1	Allgemeines	336
9.4.2	Raumzeiger bei der Drehfeldmaschine	336
9.5	Feldorientierte Regelung (Prinzip)	338
9.5.1	Gleichstrommaschine	338
9.5.2	Drehmoment (allgemein)	339
9.5.3	Asynchronmaschine	339
9.5.4	Synchronmaschine	340
9.6	Drehmomentregelung (Ableitung)	340
9.6.1	Feldorientierte Regelung der DAM	340
9.6.2	Direkte Selbstregelung (DSR), Direct Torque Control (DTC) der DAM	344
9.7	Gegenüberstellung: Asynchronmaschine/Synchronmaschine	348
	<b>Anhang</b>	<b>351</b>
	<b>Formelzeichen</b>	<b>375</b>
	<b>Abkürzungen und Begriffe (Auswahl)</b>	<b>377</b>
	<b>Schaltungen und Abkürzungen</b>	<b>378</b>
	<b>Inserentenverzeichnis</b>	<b>378</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>379</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>383</b>



# 1 Stand der Technik

## 1.1 Einleitung

In diesem Buch werden schwerpunktmäßig elektrische Antriebe mit Drehfeldmaschinen – sog. AC-Antriebe – im Leistungsbereich von ca. 100 W...100 kW betrachtet.

Elektrische Antriebe sind heute wichtige und bestimmende Komponenten vieler Maschinen und Anlagen. Dabei teilen sich die Antriebe in verschiedene Varianten auf. Zu einem hohen Prozentsatz (ca. 80%) sind es einfache Antriebe mit festen Betriebsdrehzahlen. Immer häufiger nehmen jedoch die anspruchsvolleren Antriebe zu, die in weiten Bereichen drehzahlvariabel arbeiten. Der Markt fordert kostengünstige, robuste und wartungsarme Lösungen. Dadurch wurde der bewährte Gleichstromantrieb bei Neukonstruktionen im betrachteten Leistungsbereich zu Gunsten des Drehstromantriebs weitgehend verdrängt. Dies zeigen die Prozentzahlen des Diagramms in Bild 1.1 sehr deutlich. Betrachtet man die Verteilung der Stückzahlen auf die Leistungsklassen, die die statistische Erfassung des ZVEI [1.1] vorgibt, so erkennt man, dass die großen Stückzahlen im Leistungsbereich von 750 W...7,5 kW liegen (Bild 1.2). Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass 93% der Antriebe in die Leistungsklasse bis 7,5 kW und ca. nur 0,6% in die über 75 kW einzu-

ordnen sind. Aus diesem Grund beschränken sich die Ausführungen weitgehend auf den oben genannten Leistungsbereich mit den hohen Stückzahlen. Um die vielfältigen Antriebsaufgaben zu erfüllen, werden 4 Arten von elektrischen Antrieben eingesetzt (Bild 1.3):

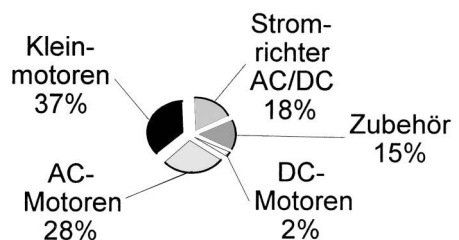
- *direkt geschaltete* Antriebe mit festen Betriebsdrehzahlen (Festdrehzahlantriebe),
- solche mit überwiegend festen Betriebsdrehzahlen, die zum *Anlassen* über Schalter oder Schütze sowie oft über Vorschaltelemente «*geschaltet*» werden,
- solche, die sanft starten und stillsetzen sowie
- solche mit überwiegend *variablen* Betriebsdrehzahlen, die zum Anlauf oder im Betrieb über elektronische Stellglieder «*gestellt*» oder «*geregelt*» betrieben werden.

Als elektronische Stellglieder zwischen Netz und elektrischer Maschine werden abhängig von der entsprechenden Aufgabe Drehstromsteller oder Frequenzumrichter eingesetzt.

Zur Klassifizierung teilt man die Antriebe ein in Bewegungs- oder Positionierantriebe, zu denen auch die hochdynamischen Servoantriebe zählen. Zur Verdeutlichung zeigt Tabelle 1.1 hierzu einige ausgeführte Beispiele. Bewegungsantriebe finden ein breites Einsatzfeld in der Industrie, in der Gebäude-

Bild 1.1  
Produktionsanteile elektrischer Antriebe 2000  
(Quelle: ZVEI)

**EI. Antriebe: Produktionsanteile 2000**  
(Quelle: ZVEI)



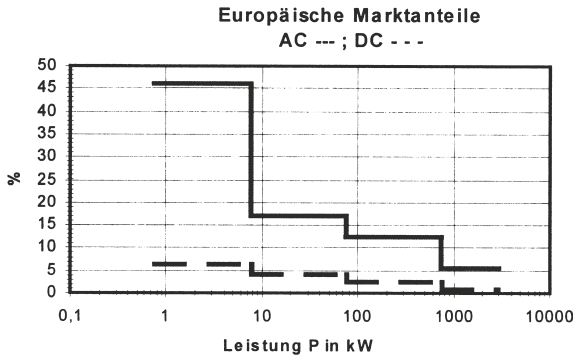


Bild 1.2  
Marktanteile in den Leistungsklassen  
von AC- und DC-Antrieben  
(Quelle: ZVEI)

technik und im Haushaltsbereich. Dabei überwiegen bei den eingesetzten elektrischen Maschinen eindeutig die Asynchronmaschinen mit Käfigläufer in Drehstrom- oder Wechselstromausführung [1.2]. Letztere Variante ist besonders im unteren Leistungsbereich (<2 kW) sehr stark vertreten; dort arbeiten jedoch nur wenige Antriebe drehzahlvariabel.

Im spezielleren Segment der hochdynamischen Positionier- oder Servoantriebe sind es

die Antriebe mit Synchron- und EK-Maschinen (elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen) neben Lösungen mit angepassten Asynchronmaschinen. Diese Antriebe arbeiten alle drehzahlvariabel und werden von Umrichtern gespeist.

Getriebemotoren mit Asynchronmaschine sind in vielfältiger Ausführung im Einsatz. Sie wurden zur Mechatronik weiterentwickelt und haben so einen hohen Reifegrad erreicht.

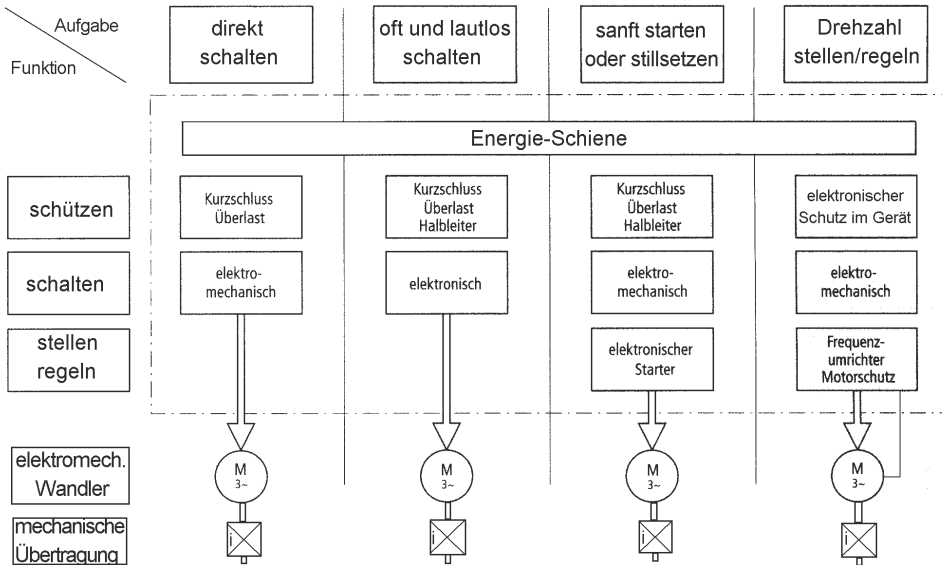


Bild 1.3 Antriebe mit fester und variabler Drehzahl direkt geschaltet, über Schütze oder über elektronische Stellglieder

Tabelle 1.1 Verschiedene Antriebsarten mit typischen Lastfällen

Auswahl typischer Anwendungsfälle			
Maschinenart	Einsatzfall	Antriebsart*	Eigenschaften
Baumwoll-Spinnmaschine	<input type="checkbox"/> Ersatz einer mechanischen Kopplung	B	<input type="checkbox"/> elektrische Welle <input type="checkbox"/> Netzausfallerkennung <input type="checkbox"/> Busvernetzung
Regalförderfahrzeuge mit mehreren Antrieben	<input type="checkbox"/> Schienenfahrzeuge	P	<input type="checkbox"/> Drehmomentkopplung mit Drehzahlklammerung <input type="checkbox"/> digitale Sollwertübertragung (Leitfrequenz)
Verpackungsmaschinen	<input type="checkbox"/> Positionierantrieb	P	<input type="checkbox"/> Drehzahlregler mit geringer Zykluszeit (250 $\mu$ s) <input type="checkbox"/> Encordenachbildung
Ablängeinheit hinter Extruder	<input type="checkbox"/> Schneiden auf Marke oder Länge	P	<input type="checkbox"/> Leitfrequenzkopplung <input type="checkbox"/> Touch-Probe-Eingang <input type="checkbox"/> Schnittpunktberechnung mit Funktionsblöcken
Kunststoff-Fasermaschinen	<input type="checkbox"/> Materialverstreckung	B	<input type="checkbox"/> elektrische Getriebe mit online veränderbaren Getriebefaktoren <input type="checkbox"/> Motorpotifunktion
Pumpstation für Wasserversorgung	<input type="checkbox"/> Pumpantrieb für Füllstandsregelung	B	<input type="checkbox"/> Füllstandsregelung <input type="checkbox"/> Mindestdrehzahl
Holzbearbeitungsmaschinen	<input type="checkbox"/> Lüfterantrieb für Spanabsaugung	B	<input type="checkbox"/> Druckregelung <input type="checkbox"/> Fangschaltung
Drahtziehmaschinen	<input type="checkbox"/> Wickelantrieb	B	<input type="checkbox"/> Tänzerlagerregelung <input type="checkbox"/> Liniengeschwindigkeit- und Druckmesserbewertung <input type="checkbox"/> Nachlaufregler
Fördereinrichtungen	<input type="checkbox"/> Kettenabtrieb	B	<input type="checkbox"/> Drehmomentregelung <input type="checkbox"/> Drehzahlbegrenzung
Spinnradmaschinen (Kardenmaschine)	<input type="checkbox"/> Walzantrieb	B	<input type="checkbox"/> Netzausfallerkennung <input type="checkbox"/> Fangschaltung

\*) B: Bewegungsantrieb (FU); P: Positionierantrieb (Servo)

Diese mechatronischen Antriebe werden als dezentrale intelligente Antriebsmodule eingesetzt (Bild 1.4). Antriebsmodule sind konstruktive Einheiten, die aus dem angepassten Getriebemotor mit integriertem Frequenzumrichter bestehen. Die erweiterte Software des Umrichters verleiht dem Modul eine dezentrale Intelligenz und die Vernetzung über Busanschlüssen eine hohe Flexibilität.

Die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Umrichter- und Anwendersoftware

lassen die bisher getrennten aufgabenorientierten Lösungen für Bewegungsantriebe und Positionierantriebe wieder zu einer vielseitig einsetzbaren universellen Gerätelösung – dem *Servounrichter* – zusammenwachsen (Bild 1.5). Diese neuen Gerätereihen überdecken mit zielorientiert einsetzbarer Software den gesamten Anwendungsbereich der Bewegungs- und Positionierantriebe mit einem Gerät. Die Digitaltechnik mit schnellen Signalprozessoren (DSP) ermöglicht in der AC-Antriebstech-

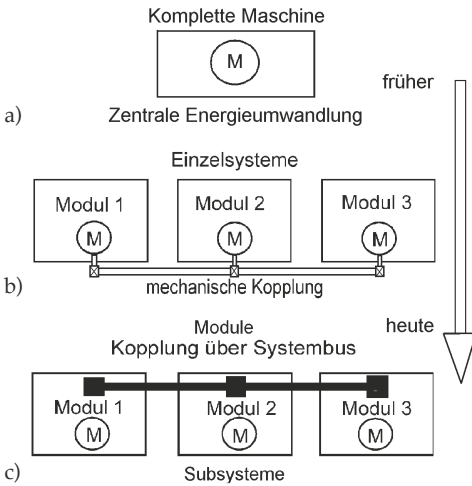


Bild 1.4 Wandel in der Antriebstechnik: a) Zentralantrieb, b) dezentraler Antrieb mit mechanischer Kopplung (Königswelle), c) dezentrale intelligente Antriebs-Module mit elektronischer Synchronisation über den Systembus

nik Regelverfahren, z.B. die der *feldorientierten Regelung* (FOR) oder der *direkten Selbstregelung* (DSR, digitaler Drehmomentregelung), die eine bessere Dynamik als die bisher eingesetzten Gleichstromantriebe erreichen. Bei Bewegungsantrieben wird dabei sogar oft auf besondere Drehzahlgeber verzichtet (sensorless

speed control, SSC) [1.3]. Dies funktioniert heute sogar auch bei Drehzahl 0 stabil!

Vorkonfigurierte Softwareblöcke mit Zusatzfunktionalitäten und Klein-SPS-Systeme im Umrichter übernehmen Technologiefunktionen und anwenderspezifische Steuerungsaufgaben, die bislang selbständige SPS-Einheiten ausgeführt haben. Dadurch entlasten diese intelligenten Einheiten, die übergeordneten Steuerungen. Durch die Gleichlauf-Technologiefunktionen werden die bisherigen mechanischen Wellenverbindungen durch rein elektronische Verbindungen abgelöst; Beispiele sind die Königswelle, das elektronische Getriebe oder koordinierte Bahnsteuerungen mehrerer Wellen.

Die Digitaltechnik in den Geräten ermöglicht die Datenvernetzung der Antriebe. Einzelantriebe erhalten über ihre serielle Schnittstelle Prozess- oder Parameterdaten «just in time» von einem übergeordneten Leitsystem oder einem anderen Modul, das umgekehrt die aktuellen Ist-Daten des Antriebs abfragen und auswerten kann. Die Digitaltechnik in den Stromrichtern gestattet über aufsteckbare *Busmodule* einen solchen bidirektionalen Datenverkehr über verschiedene Feldbussysteme ohne großen Zusatzaufwand [1.4]. Der weitere Datenfluss geht dann über Ethernet und global über das Internet.

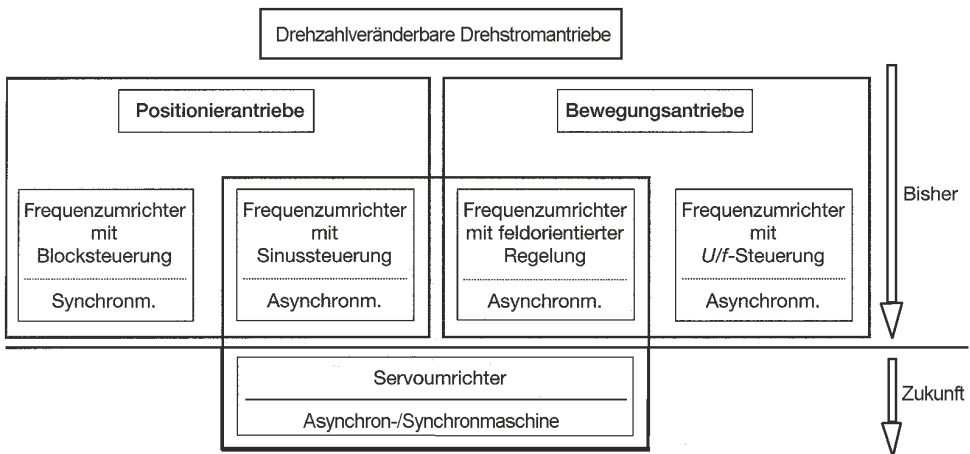


Bild 1.5 Entwicklung bei drehzahlveränderbaren Drehstromantrieben (AC-Antrieben)



Am öffentlichen Netz arbeiten die verschiedensten Verbraucher. Darunter auch solche, die sehr empfindlich auf Spannungsabsenkungen reagieren. Zu solchen Spannungseinbrüchen kommt es beim *Direkteinschalten* oder  $\lambda\Delta$ -Anlauf von größeren Asynchronmaschinen. Um Störungen zu reduzieren werden Anlaufdrosseln usw. oder Drehstromsteller vor die Asynchronmaschinen geschaltet, um sanft an- oder auszulaufen (Sanftanlaufgeräte, Softstarter). Sanft bedeutet dabei, dass sowohl das speisende Netz und die mechanischen Übertragungsglieder als auch die Arbeitsmaschine geschont werden. Bei Pumpenantrieben verhindert ein geführter sanfter Auslauf über Steller die gefürchteten Wasserschläge im Rohrsystem [1.5].

## 1.2 Komponenten der elektrischen Antriebe

Die Fortschritte bei der Entwicklung von Hardwarekomponenten führen zu immer kleineren Abmessungen bei den Leistungsteilen und somit auch zu stark schrumpfenden Abmessungen der elektronischen Geräte (Bild 1.6). Dies gilt sowohl für die leistungselektronischen Schalter (IGBT) als auch für Kondensatoren und Platinen. Die Entwicklung ist rasant; viele Komponenten in den Produkten sind jünger als 3 Jahre.

**Gehäusevolumen - Entwicklung Frequenzumrichter (U-Umrichter)**

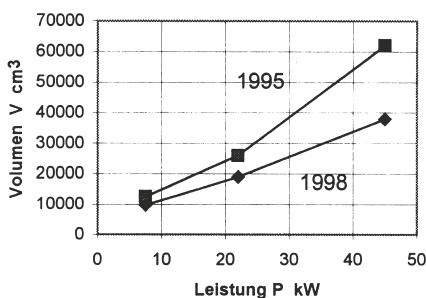


Bild 1.6 Volumenentwicklung bei Frequenzumrichtern

Elektrische Antriebe bestehen aus einem Schaltgerät oder einem elektronischen Stellglied, einer elektrischen Maschine, mechanischen Übertragungselementen und einer Arbeitsmaschine (Prozess). Aufgabe der Antriebe ist es, die vom Netz bereitgestellte elektrische Energie verlustarm in mechanische Energie umzuwandeln und dem Prozess optimal zuzuführen. Antriebe mit festen Drehzahlen haben sich dabei bewährt und sind weiter im Einsatz. Soll der technologische Prozess jedoch optimiert ablaufen, muss der Antrieb bei Drehzahl- oder Drehmoment stufenlos veränderbar arbeiten. Mechanische Verstellgetriebe lösen das. Wird jedoch eine verlustarme und hochdynamische Verstellung gefordert, so ermöglichen das elektronische Stellglieder zwischen dem Versorgungsnetz und der elektrischen Maschine. Dabei ersetzen moderne Stromrichterantriebe auch zunehmend Antriebe mit mechanischen Verstellgetrieben, um die Wartung zu reduzieren [1.6].

## 1.3 Antriebslösungen

Bei Festdrehzahlantrieben ist die *direkt* oder *indirekt* geschaltete Asynchronmaschine ideal und wird auch weiter die «1. Wahl» sein, wenn man mit einer oder mehreren festen Drehzahlen auskommt. Jede *feinstufige* Drehzahlverstellung erforderte aber lange einen großen Aufwand. Heute hat sich dafür der vorgeschaltete Frequenzumrichter durchgesetzt, der aus jedem Antrieb mit Drehstrommaschine auch einen drehzahlvariablen Antrieb macht.

Die Vielzahl der in der Praxis möglichen Antriebsvarianten lässt natürlich keine Patentrezepte für die optimale Auslegung von Antriebslösungen zu. Der Weg führt immer über

- die Ermittlung der Anforderungen aus dem gegebenen technologischen Prozess (Lastenheft),
- u.U. die Simulation des Antriebs,
- die Bestimmung der reduzierten Antriebs- oder Anlagenstruktur (Berechnung) und

- die dann folgende Auswahl und Bemessung der einzelnen elektrischen und mechanischen Antriebskomponenten.

Dieser Weg erfordert umfassende Spezialkenntnisse bei der Projektierung. Hersteller und Anwender sowie die befassten Antriebs-techniker müssen mit den Maschinen- und Anlagenbauer fachübergreifend und partnerschaftlich zusammenarbeiten. Nur so kommt man letztlich zu einem funktional optimalen und kostengünstigen Antrieb. «Simultaneous Engineering» – die ganzheitliche Sicht bei der Problemlösung bringt Kostenvorteile, wenn z.B. Investitions- und Betriebskosten gegeneinander abgewogen und mit berücksichtigt werden. Dann können z.B. auch etwas teurere *Hochwirkungsgradmotoren* eingesetzt werden, die sich aber schnell über geringere Betriebskosten amortisieren. Die abgestimmte Lösung «aus einer Herstellerhand» gibt klare Verantwortungen vor und reduziert die Zahl der immer «reibungsbefahenen» Schnittstellen.

### 1.4 Antriebe mit Drehfeldmaschinen

In den folgenden Abschnitten werden Antriebe mit Drehfeldmaschinen zum Bewegen und Positionieren beschrieben. Für die einzelnen Maschinenarten werden

- Lösungen mit einer oder mehreren *festen* Drehzahlen und
- Lösungen für *kontinuierliche* Drehzahlverstellung

behandelt. Bei den drehzahlvariablen Bewegungs- und Positionierantrieben sind es Lösungen mit

- Asynchron-, Synchron- und Reluktanzmaschinen am Frequenzumrichter,
- Maschinen mit elektronischer Kommutierung (EK-Maschinen und geschaltete EK-Maschinen) und
- Asynchronmaschinen mit Drehstromsteller.

Bild 1.7 zeigt in eine Übersicht Antriebe mit fester und variabler Drehzahl, die angesprochen werden. Die Stellmöglichkeiten sind angedeutet.

#### 1.4.1 Entwicklung der drehzahlvariablen AC-Antriebe

Bald nach der Erfindung der Asynchronmaschine durch Dolivo Dobrovolsky (1889) begann der Einsatz von Antrieben mit festen Drehzahlen in der sich damals rasch entwickelnden Industrie und im Handwerk. Aber erst ab ca. 1984 beginnt dann durch die Fortschritte bei den Bauteilen der Leistungs-

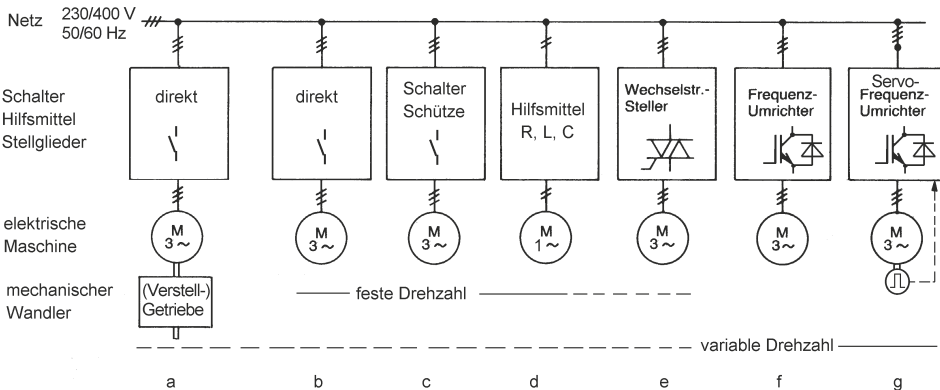


Bild 1.7 AC-Antriebsarten in der Übersicht: a) Getriebemotor oder Motor mit Verstellgetriebe, b) Direktgeschalteter Motor u. U. polumschaltbar, c) Motor mit Anlaufhilfen u. U. polumschaltbar, d) Drehfeldmotoren am Wechselspannungsnetz, e) Motor mit Steller (Softstarter), f) Motor mit Frequenzumrichter, g) Servoantrieb

elektronik die rasante Entwicklung und der breite Einsatz von drehzahlvariablen Drehstromantrieben mit Frequenzumrichter. Bis dahin beherrschte die Gleichstrommaschine mit vorgeschaltetem Stromrichter das Feld bei drehzahlverstellbaren Antrieben. Ihrem Einsatz sind wegen des anfälligen Stromwendersystems jedoch prinzipiell Grenzen gesetzt. Auch Kostenaspekte – sowohl bei der Beschaffung als auch im Betrieb – führten zum Schwenk in Richtung auf den wartungsarmen Drehstromantrieb.

### 1.4.2 AC-Bewegungsantriebe

In allen denkbaren Einsatzfällen können heute auch bei kleinen Leistungen – ab einigen 10 W – Antriebskonzepte mit drehzahlverstellbaren Drehfeldmaschinen kostengünstig realisiert werden, da die AC-Maschinen bei Betrieb über Frequenzumrichter nicht mehr nur an die vom 50-Hz-Netz vorgegebene starre, synchrone Drehzahl gebunden sind. Für solche drehzahlverstellbaren Antriebe (Bild 1.8a)

wird das «normale» 50-Hz-Netz durch ein elektronisch erzeugtes, frequenz- und spannungsvariables Netz ersetzt. Drehzahl und Drehmoment lassen sich aufgabenspezifisch einstellen. So müssen z.B. Wickel- und Walzantriebe feinfühlig geregelt werden, um unerwünschte «Marken» auf den Werkstücken zu vermeiden. Bild 1.8b zeigt die Komplexität eines solchen Gerätes mit den Verknüpfungen von mechanischen und elektrischen Daten.

Elektronisch kommutierte Maschinen mit angepassten drehzahlgetakteten Frequenzumrichtern finden große Einsatzgebiete bei Lüftern und Antrieben in Speicherlaufwerken von Rechnern usw. und im Bereich der dynamischen Antriebe (Servoantriebe).

### 1.4.3 Sanftanlauf

Sollen nur im Anlauf Stoßströme und Stoßdrehmomente kostengünstig reduziert werden, bietet sich der kostengünstige Drehstromsteller (angeboten als Sanftanlaufgerät)

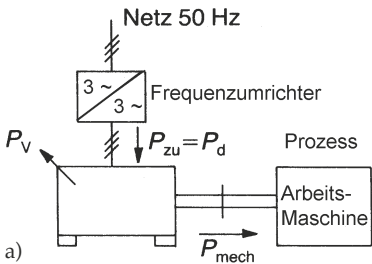
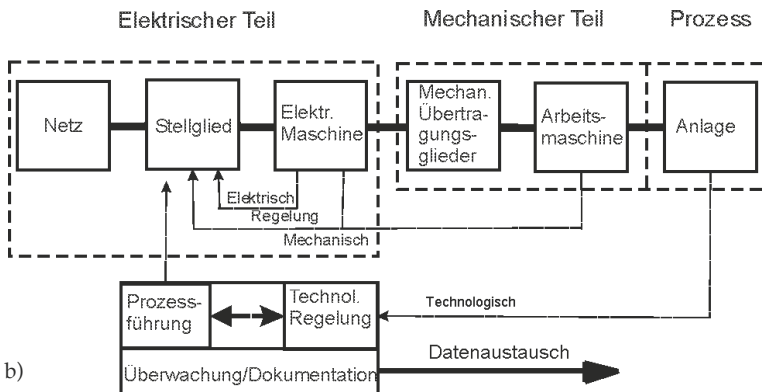


Bild 1.8 Bewegungsantrieb (Umrichterantrieb): a) Blockbild, b) Detail-Schaltbild mit Regelschleifen und Datenaustausch



an. Dabei arbeitet die Asynchronmaschine weiter mit fester Netzfrequenz, jedoch mit variabler Spannung. So können Strom und Drehmoment (leider nicht unabhängig voneinander) stufenlos reduziert werden. Dabei bleibt die Maschine jedoch weiter an die synchrone Drehzahl gebunden.

In begrenztem Umfang ist auch drehzahlvariabler Betrieb möglich, da wegen der Spannungsminderung das Drehmoment abnimmt und damit bei Belastung die Drehzahl absinkt.

### 1.4.4 AC-Positionierantriebe

Auch bei Positionierantrieben haben sich die Lösungen mit Drehfeldmaschinen weitgehend durchgesetzt. Die kompaktere Bauweise, der fehlende Stromwender und die Wartungsarmut waren dabei gute Argumente.

Bei kleinen Drehmomenten (<5 Nm) ist die Lösung mit Schrittmotoren (wegen der offenen Steuerkette) kaum zu schlagen. Die digitalen Positionsdaten kann man dort kostengünstig direkt in einen Drehwinkel umsetzen; Drehzahl und Drehmoment sind jedoch begrenzt. Sie werden nicht behandelt; hier wird auf die Literatur verwiesen.

Hochdynamische Positionierantriebe werden mit permanentmagneterregten EK-Maschinen oder optimierten Asynchronmaschinen im geschlossenen Regelkreis mit Rückführung realisiert. Die über Läuferlagegeber gesteuerten Stromrichter sind integraler Bestandteil dieser Positioniersysteme (Bild 1.9).

Das Umfeld der Antriebe ist für Störungen empfindlicher geworden. EMV-Probleme nehmen zu. Für die Geräte werden Funkentstör-

filter angeboten, die im Elektronikgehäuse integriert werden. Optional kann der Kunde neben Filtern der Klasse A auch Filter der Klasse B erhalten, womit einem Einsatz in Wohngebieten, z.B. in einer Klimaanlage oder einer Zentralheizung nichts mehr im Wege steht.

### 1.4.5 AC-Antriebsmodule zum Bewegen und Positionieren

Zunehmend kommen Module mit Asynchronmaschine und integriertem Frequenzumrichter auf den Markt. Der Leistungsbereich geht zz. bis ca. 22 kW. Der Steller oder Umrichter ist im «Klemmenkasten» integriert, aufgesattelt oder axial an die Maschine angebaut und liegt so im Luftstrom des (Fremd-)Lüfters (Bild 1.10a). Zur Anpassung des Drehmomentes werden Getriebe integriert [1.7], wie Bild 1.10b zeigt.

Bei den Kompaktmodulen erfolgt die Steuerung über Taster und Potentiometer oder über einen Feldbus am Steller oder Umrichter (Bild 1.10b). Dadurch wird der Antrieb zum intelligenten dezentralen Antrieb mit der Möglichkeit, kleine Programme abzufahren. Parameter und Prozessdaten kommen über den Bus. Der Schaltschrank einbau entfällt. Dies bringt Ersparnisse bei Verkabelung, Inbetriebnahmezeit sowie auf dem Sektor EMV-Festigkeit [1.8].

### 1.4.6 AC-Direkt-Antriebe

Umrichter gespeiste lineare oder drehende Direktantriebe nehmen für Sonderlösungen dort zu, wo mechanische Übertragungsglieder stören. Kleinere oder größere Linearbewegungen werden bei Werkzeugmaschinen und Handha-

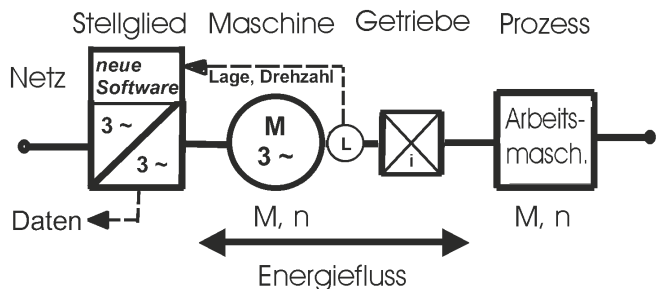
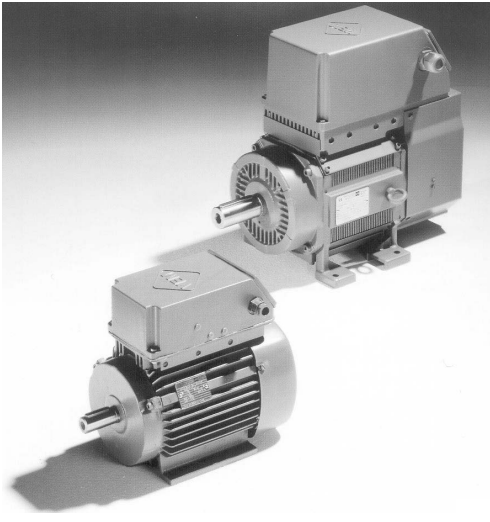


Bild 1.9  
Positionierantrieb



a)

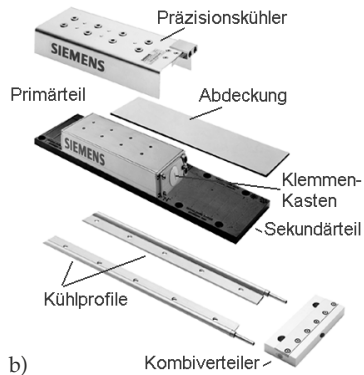


b)

Bild 1.10 Kompaktantrieb: a) Motor mit aufgebautem Umrichter (VEM), b) Getriebemotor mit Umrichter und Vernetzung über Bussystem (LENZE)



a)



b)

Bild 1.11 Direktantriebe: a) drehender Waschmaschinenantrieb (DOMEL), b) Linearantrieb (SIEMENS)

Geräten ohne den Umweg über drehende Elemente (Spindeln oder Zahnriemen) direkt realisiert, wie das Bild 1.11 a zeigt. Auch Direktantriebe für die Drehbewegung mit größerem Drehmoment zeigten neue Wege für den Konstrukteur auf, z.B. Direktantriebe für Drehtische, Rundschalttische oder Waschtrommeln von Haushaltswaschmaschinen, Werkzeugmaschinen und Hebezeuge (Bild 1.11b). Kosten-

günstige Frequenzumrichter ermöglichen diese Entwicklungen, da Geschwindigkeit und Drehzahl optimal gewählt werden können.

#### 1.4.7 Umrichterantriebe im Automobil

Die neue Bordnetzspannung von 42 V begünstigt den Einsatz von Elektronik bei den Hilfsantrieben im Automobil. Bild 1.12 zeigt 2 Bei-

spiele aus diesem jungen Bereich. Das innovative Starter-Generator-Aggregat (Integrated Starter Alternator Damper, ISAD) ist seit kurzer Zeit im Feldeinsatz. Über den Frequenzumrichter und den Motorgenerator wird der Verbrennungsmotor gestartet und im Normalbetrieb das Bordnetz mit Energie versorgt. Der Stromrichter ist ein wesentlicher Teil des Konzepts [1.9].

Da Klimageräte im Pkw hohe Betriebszeiten haben, werden elektronisch kommutierte Maschinen oder Asynchronmaschinen mit Umrichter als wartungsarme Antriebe eingesetzt (Bild 1.12b) [1.10]. Der Datenaustausch erfolgt über den CAN-Bus des Pkw.

### 1.5 Energieeinsparung

Betrachtet man den ganzen Energiefluss eines Antriebs von der Primärenergie bis zum Prozess, so haben die Wandel- und Übertragungsglieder unterschiedliche Wirkungsgrade. Man erkennt daraus sehr schnell, wo sich Verbesserungen lohnen (Bild 1.13). Obwohl elektrische Maschinen bereits mit hohen Wirkungsgraden arbeiten, werden z. z. verstärkt Hochwirkungsgradmaschinen angeboten, um die Energiekosten im Betrieb weiter zu senken. Besonders bei hohen Laufzeiten amortisieren sich die höheren Investitionen schnell.

Gerade die Mengenstromregelung mit drehzahlvariablen Antrieben statt über Drossel oder Bypass zeigt, dass noch viel Sparpotenzial im Bereich der Prozesse zu finden ist.

### 1.6 Netzrückwirkungen

Bild 1.14 zeigt die Hauptschnittstellen eines Antriebsstranges. Sie finden sich zum Prozess, zum Netz und zum Betreiber hin. Neben dem im oberen Teil gezeigten erwünschten Austausch von Wirkleistung treten in jedem System noch meist unerwünschte Nebenerscheinungen bei der Energieumsetzung auf. So wirkt die elektrische Maschine direkt oder über ein Stellglied auf das Netz zurück und belastet es mit Blindleistung, Oberschwingungsströmen oder erzeugt Spannungseinbrüche (2).

Mechanisch treten neben der Drehzahl und dem Drehmoment (1) unerwünschte Pendelmomente auf, die Drehschwingungen anregen können. Als besondere Schnittstelle gilt die Datenschnittstelle über die der Betreiber mit der Maschine Daten austauschen kann (3). Hier finden z. z. die schnellsten Innovationszyklen statt.

### 1.7 Dezentrale Installation

Bisher werden räumlich ausgedehnte Produktionsanlagen über eine zentrale Schaltanlage mit elektrischer Energie versorgt, gesteuert und überwacht. Die Konzentration in Schaltschränken benötigt Platz und führt zu langen und aufwendigen Verkabelungen. Deren Installation ist zeitraubend und die Überprüfung und Inbetriebnahme ist umständlich.

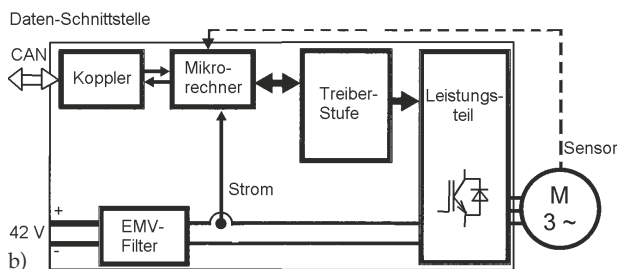
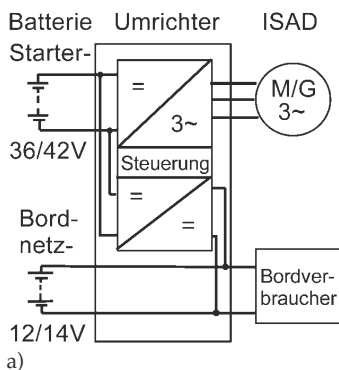


Bild 1.12 Hilfsantriebe im Automobil: a) ISAD-System (Continental), b) Elektronischer Antrieb für Hilfsaggregate (FH Wilhelmshaven)

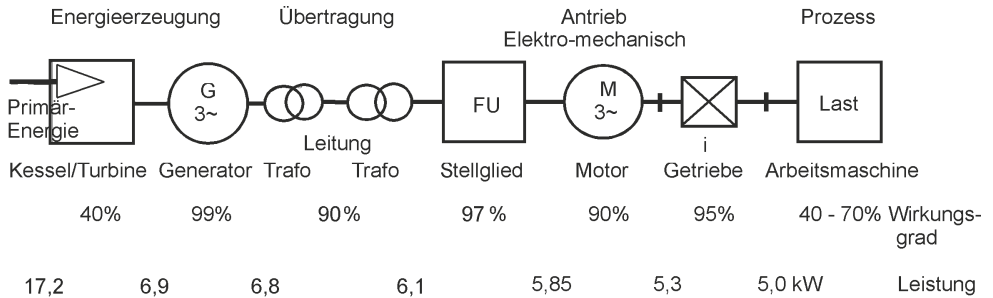


Bild 1.13 Energiekette eines 5 kW Antriebs

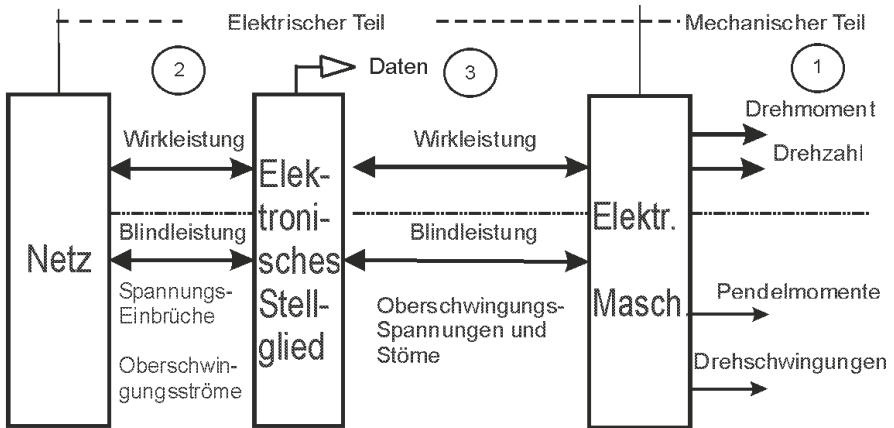


Bild 1.14 Antrieb mit den 3 (1...3) Schnittstellen: oben Wirkleistungsaustausch, unten unerwünschte Nebenwirkungen

Antriebssysteme mit modularem Aufbau und dezentraler Installation bringen hier Einsparpotenziale, die besonders bei ausgedehnten Anlagen erheblich sein können. Werden in der Weiterführung des Gedankens auch noch die Anschlusspunkte durch Steckverbindungen ersetzt, sind weitere Einsparpotenziale besonders im Servicefall gegeben.

Die Leitungen werden getrennt oder in sog. Hybridkabeln verlegt. Hybridkabel vereinen Kommunikation, Energieübertragung und falls erforderlich Steuerspannungen in einer Kabelhülle mit optimaler EMV-Schirmung. Sie werden konfektioniert mit Steckeranschlüssen angeboten. Im Servicefall kann die Verbindung auch ohne Fachkenntnisse abge-

zogen, Teile getauscht und die Verbindung wieder hergestellt werden. Das erhöht die Verfügbarkeit der Anlage erheblich.

Bild 1.15 zeigt das Schema solcher Anlagen mit Energie- und Datenleitung (Feldbussystem) für den Betrieb verschiedener Komponenten in einem solchen dezentralen Installationssystem. Im System A sind an den Abzweigen Feldverteiler eingesetzt (Bild 1.15a). Beide Systeme kommen durch die dezentralen Antriebsmodule ohne oder mit wesentlich weniger Schaltschrankvolumen aus. In Bild 1.15c ist ein Positionierantrieb mit Anschlusssteckern zu sehen. Der Service im Fehlerfall ist sehr einfach und benötigt keine Elektro-Fachkraft.

Die Eigenschaften einer dezentralen Installation sind

- ❑ komfortable Verdrahtungstechnik,
- ❑ Platzgewinn durch Ersatz von zentralen Schaltschränken,
- ❑ Verkürzung der Inbetriebnahmezeit,
- ❑ einfacher Service.

Diese Vorteile zeigt Bild 1.15d bei den Antrieben eines Förderbandes. Antrieb und Stellglied sind dort, wo sie gebraucht werden.

Lange sternförmige Installationswege entfallen.

Auf alle hier kurz angesprochenen Themen wird in den folgenden Kapiteln ausführlich eingegangen. Dazu werden zunächst die Komponenten eines Antriebs und ihr Betriebsverhalten beschrieben. In Kapitel 6 wird das Zusammenwirken dargestellt. Fallbeispiele und Tabellen mit den Daten der Komponenten zeigen die Praxis.

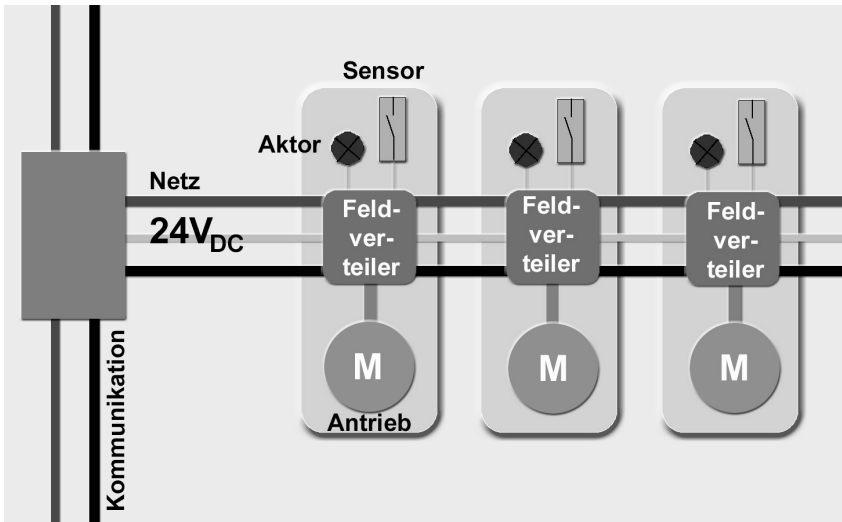


Bild 1.15 Dezentrale Installation von Antriebssystemen: a) Installationssystem (SEW) mit Feldverteilern



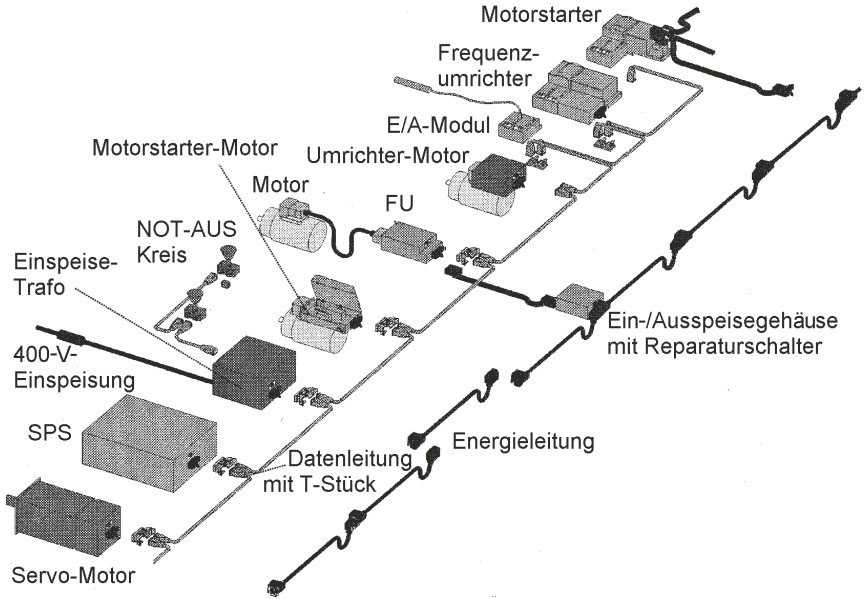


Bild 1.15 b) Installationssystem (Siemens) mit Steckverbindern

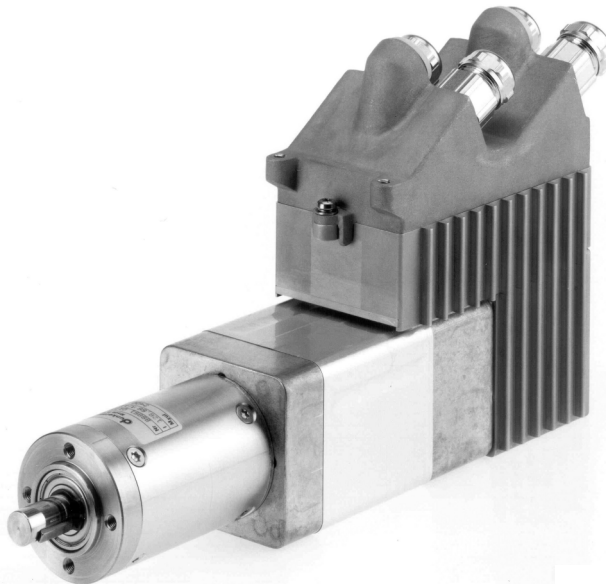


Bild 1.15 c) Positionier-Einheit (Motor, Getriebe und Umrichter) mit Steckern (Siemens)

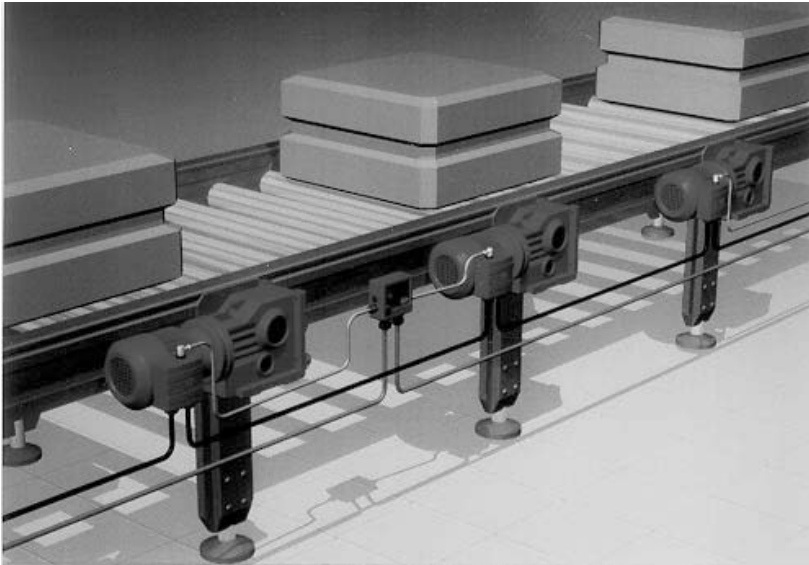


Bild 1.15 d) Transportband mit dezentralen Antrieben und dezentraler Installation (SEW)

# 2 Drehfeldmaschinen

Fast 90% aller Antriebe in Industrie, Handwerk und Haushalt arbeiten mit Drehfeldmaschinen, die geschaltet, gesteuert und zunehmend geregelt betrieben werden. Der große Vorteil der Drehfeldmaschinen besteht darin, dass sie robust und wartungsarm sind. Die Leistung wird berührungslos durch das Drehfeld vom Ständer über den Luftspalt auf den Läufer übertragen (Bild 2.1). Dadurch entfallen Verschleißteile wie bei der Gleichstrommaschine, bei der Bürsten und Stromwender die Energieübertragung mechanisch übernehmen. Darüber hinaus erfüllen Drehfeldmaschinen aber noch weitere Wünsche der Nutzer, z.B.:

- ❑ kostengünstige, lagermäßige Asynchronmaschinen (sog. Normmotoren),
- ❑ kleinbauende Maschinen,
- ❑ hohe Drehzahlen bis 60000  $\text{min}^{-1}$  und in Sonderfällen bis über 250000  $\text{min}^{-1}$  mit «Magnetlagerung»,

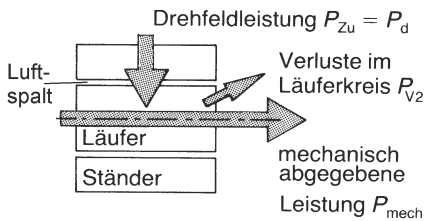


Bild 2.1 Bei Drehfeldmaschinen wird die Leistung durch das Drehfeld berührungslos vom Ständer über den Luftspalt induktiv auf den Läufer übertragen

- ❑ kostengünstige hohe Schutzart (vollständig geschlossen, IP55... IP67),
- ❑ keine mechanischen Einbauzwänge, da kein Zugang notwendig.

Die meisten Drehfeldmaschinen arbeiten als «geschaltete» Festdrehzahlantriebe am Netz (ca. 80%). Der Trend zu drehzahlvariablen Antrieben nimmt zu, um den Antrieb optimal anzupassen. Dabei war lange die feste Bindung an die von der festen Netzfrequenz vorgegebenen synchronen Drehzahlen der große Nachteil der Drehfeldmaschinen (Tabelle 2.1). Heute schafft der zwischen Netz und Maschine geschaltete Frequenzumrichter die Voraussetzungen für die verlustarme Drehzahlverstellung, weil er eine variable Speisefrequenz bereitstellt (Bild 2.2). So ist die Drehzahlverstellung in weiten Bereichen und mit einer sehr hohen Dynamik möglich.

Drehfeldmaschinen sind elektromagnetische Energiewandler, die die vom speisenden Drehstromnetz zugeführte elektrische Energie möglichst verlustarm in mechanische Energie umwandeln und an der Maschinenwelle abgeben (Motorbetrieb); im Generator-

Tabelle 2.1 Synchronen Drehzahlen der Drehfeldmaschinen mit verschiedenen Polpaarzahlen am 50-Hz-Netz

Polarzahl	1	2	3	4	...
Drehzahl 1/s	50	25	16,6	12,5	...
Drehzahl 1/min	3000	1500	1000	750	...

Drehstromnetz  
Konstante Frequenz  
Konstante Spannung

Maschine  
variable Frequenz  
variable Spannung

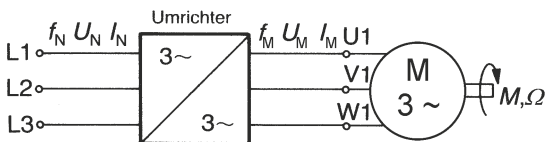


Bild 2.2 Drehzahlveränderbarer AC-Antrieb mit Frequenzumrichter zwischen Drehstromnetz und Maschine

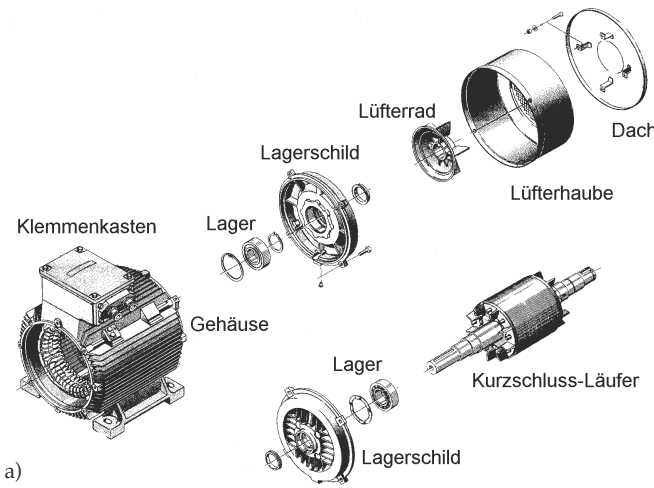
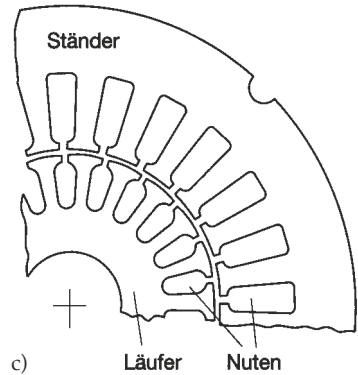
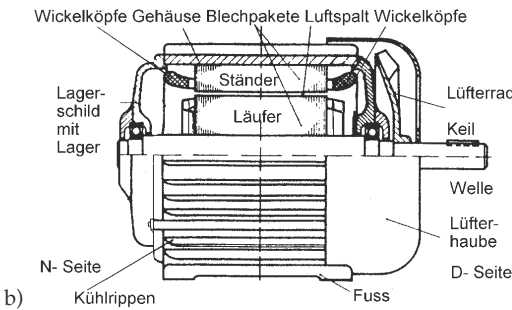


Bild 2.3  
 Aufbau einer Drehfeldmaschine  
 mit Ständer und Läufer:  
 a) Explosionsdarstellung,  
 b) Längsschnitt durch eine  
 Asynchronmaschine,  
 c) Ständer- und Läuferblech-  
 schnitte mit Nuten für die  
 Wicklungen



betrieb kann Bremsenergie zurückgespeist werden.

Den grundsätzlichen Aufbau einer Drehfeldmaschine mit Ständer und Läufer zeigt Bild 2.3. Der äußere, stillstehende Teil, der Ständer, besteht aus dem Gehäuse mit dem eingepressten Ständerblechpaket. Neuerdings wird das Blechpaket immer öfter selbsttragend ausgeführt; ein Gehäuse entfällt. Der innenliegende drehbare Teil ist der Läufer. Er ist in den beiden Lagerschilden gelagert. Zwischen Ständer und Läufer ist der durch die Mechanik bedingte kleine Luftspalt  $\delta$ .

Die Ständerwicklung ist in die am Innenumfang des Ständers angeordneten isoliert ausgekleideten Nuten des Blechpakets eingebettet. Sie ist aus isoliertem Kupferdraht gewickelt. Jede Drehstromwicklung hat 3 Stränge (Bild

2.4). Die Wicklungsanfänge (U, V und W) sind geometrisch und elektrisch um  $120^\circ$  phasenverschoben in die Nuten eingelegt. Eine Wicklung mit der Polpaarzahl  $p = 1$  hat 2 Polteilungen  $\tau_p$  am Innenumfang. Die Abwicklung in die Ebene zeigt dies deutlicher; der elektrische und der mechanische Winkel sind hierbei gleich. In der Praxis werden viele Maschinen mit einer Polpaarzahl  $p > 1$  eingesetzt. Bei diesen Maschinen sind mehrere Polpaare am Innenumfang aneinander gereiht. Ein Polpaar erstreckt sich dann auch nur über einen mechanischen Winkel von  $360^\circ/p$  (mechanischer Winkel = elektrischer Winkel/ $p$ ).

Die 6 Enden der 3-strängigen Wicklung sind an das Klemmbrett geführt. Dort werden sie im Betrieb in «Stern» (Y) oder «Dreieck» ( $\Delta$ , D) geschaltet (Bild 2.5).

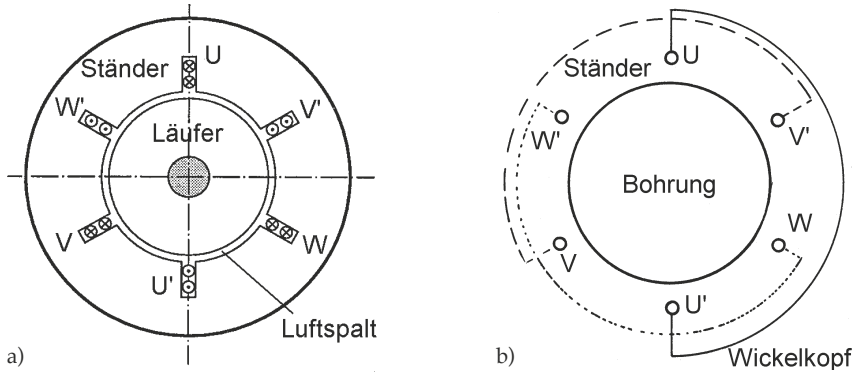


Bild 2.4  
 Ständer mit Wicklungen:  
 a) Querschnitt durch eine Maschine,  
 b) Ständer mit Wicklungen,  
 c) Abwicklung eines Polpaars

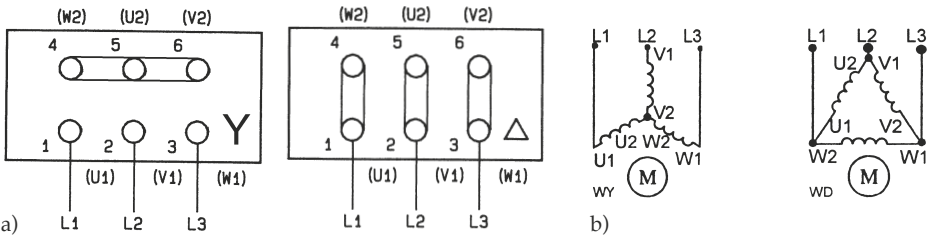
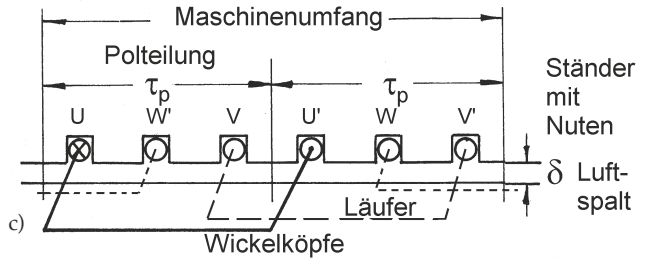


Bild 2.5 Klemmbrett a) und b) Wicklungsschaltung für Stern- und Dreieck-Schaltung der Ständerwicklung

In der Drehstromwicklung des Ständers erzeugen die 3  $120^\circ$  phasenverschobenen Ströme ein Luftspaltdrehfeld. Alle Drehfeldmaschinen arbeiten mit diesem Drehfeld und nutzen es zur Energieübertragung. Dabei legen die Speisefrequenz  $f$  und die Polpaarzahl  $p$  der Drehstromwicklung die synchrone Drehfelddrehzahl  $n_d$  (ideelle Leerlaufdrehzahl) fest zu:

$$n_{\text{synchron}} = n_0 = n_d = \frac{f}{p} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Das Drehfeld läuft gegenüber dem ruhenden Ständer mit der Drehzahl  $n_d$  um (Tabelle 2.1); die synchrone Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_d$  des Drehfeldes ist:  $\Omega_d = 2\pi \cdot n_d$ . Das Drehfeld legt in einer Periode der Speisespannung immer eine doppelte Polteilung  $\tau_p$  zurück. Bei höheren Polpaarzahlen  $p$  verringert sich so die mechanische Drehzahl der Maschine auf  $n = n_d/p$ . Bild 2.6 zeigt diese Zusammenhänge mit dem umlaufenden Drehfeld. Ergänzend sind Momentaufnahmen von Drehfeldern in 2- und 4-poligen Maschinen gezeigt. In der Praxis trifft man die 4-polige Drehfeldma-

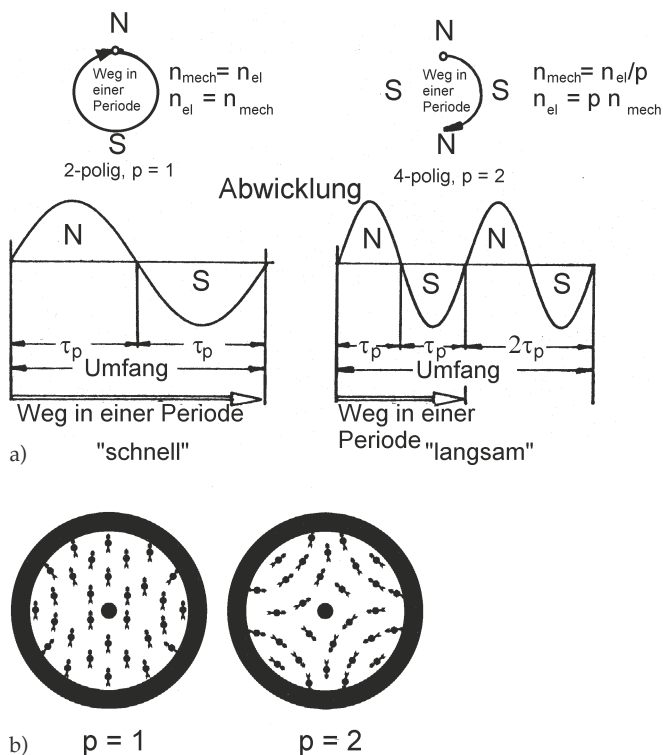


Bild 2.6  
 2- und 4-polige Maschinenfelder: a) 2- und 4-poliges Luftspaltfeld in der Abwicklung, b) Feld in der Bohrung

schine am häufigsten an; dies gilt besonders für Asynchronmaschinen.

Der Aufbau des Ständers ist bei allen Drehfeldmaschinen prinzipiell gleich; sie unterscheiden sich durch den Läuferaufbau und das dadurch bedingte unterschiedliche Betriebsverhalten. So teilt man die Drehfeldmaschinen nach ihrem Betriebsverhalten ein in:

- Drehstrom-Asynchronmaschinen und
- Drehstrom-Synchronmaschinen.

Verkürzend wird hier immer nur von Asynchron- oder Synchronmaschinen gesprochen. Maschinen mit Reluktanzläufer oder elektronisch kommutierte Maschinen (EK-Maschinen) sind vom Aufbau her Synchronmaschinen.

Im untersten Teil des betrachteten Leistungsbereichs (<1 kW) werden besonders viele Asynchronmaschinen für den direkten

Betrieb am Wechselstromnetz eingesetzt. Diese sog. «Hilfsphasen»-Maschinen haben nur 2 um 90° elektrisch versetzte Wicklungen; vor die Hilfswicklung werden phasenschiebende Bauteile (R, C) geschaltet (vgl. Bild 2.24).

Im Folgenden wird auf die Unterschiede im Aufbau der Läufer und die sich daraus ergebenden Differenzen bei den Betriebskennlinien näher eingegangen. Der Einfluss der Steuerung über Stellglieder wird in Kapitel 6 «Antriebspraxis» beschrieben. Dabei wird immer nur das Grundschwingungsverhalten der Maschinen am symmetrischen Netz im stationären Betriebszustand betrachtet, wenn nichts anderes gesagt wird. Die Einflüsse der auftretenden Oberfelder werden nur kurz angesprochen.

Bei den Ableitungen der Gleichungen für das Betriebsverhalten der Drehfeldmaschinen, gelten die vereinfachenden Annahmen: