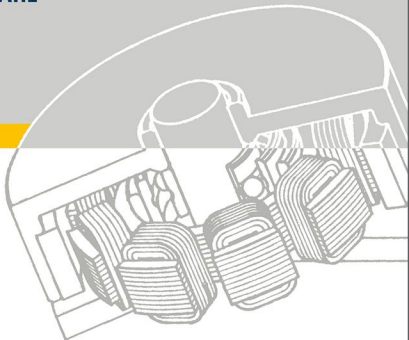


Peter F. Brosch

# ANTRIEBS- PRAXIS

ENERGIEEFFIZIENTE ANTRIEBSSYSTEME  
MIT FESTER ODER VARIABLER  
DREHZAHL



Ein Fachbuch von

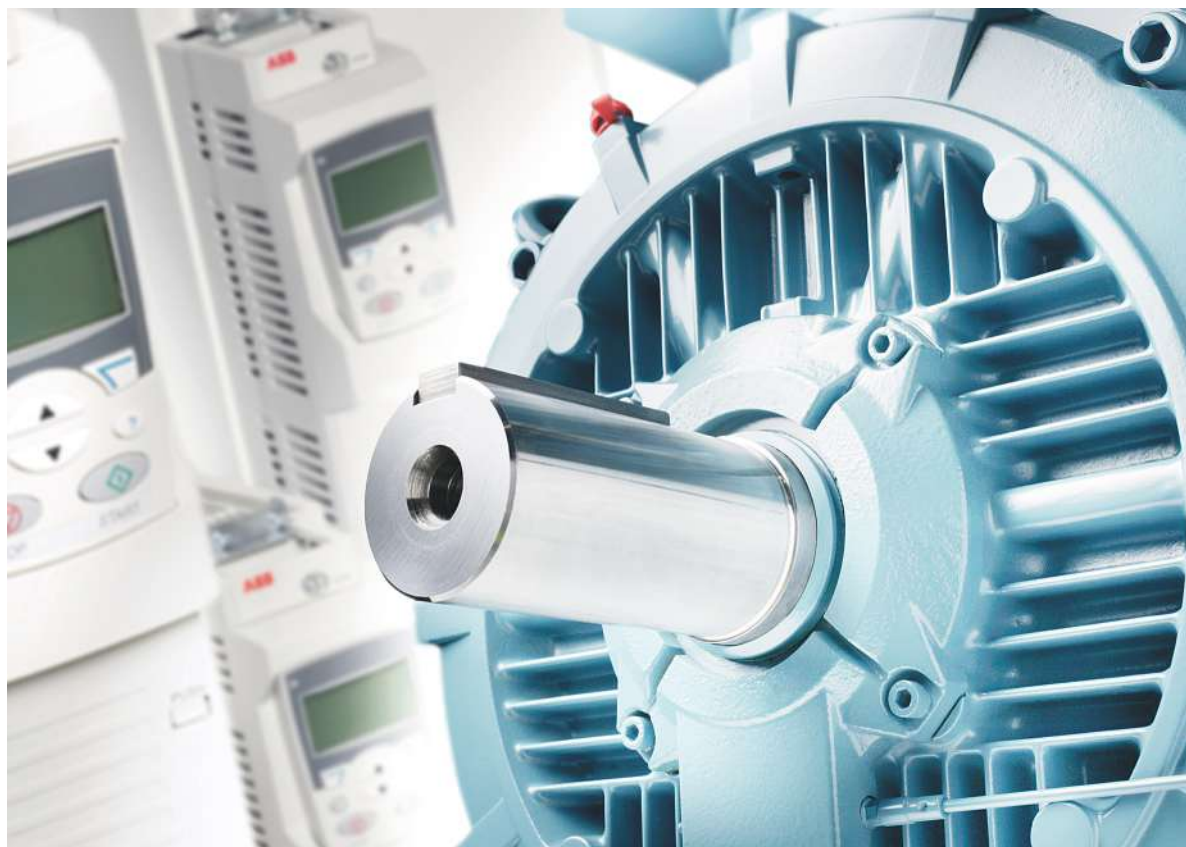
konstruktions  
praxis

elektro  
technik

ELEKTRONIK  
PRAXIS



Vogel Business Media



## Mehr Energieeffizienz, besseres Maschinen- design. Warum noch länger warten?



Der hocheffiziente Synchronreluktanzmotor bildet den Kern zweier ABB-Antriebspakete, die neue Möglichkeiten in puncto Energieeffizienz und Design eröffnen. Der Synchronreluktanzmotor mit seiner innovativen Rotor-Technologie ermöglicht Energieeinsparungen um mehr als 35 %. ABB bietet ihn zusammen mit einem Frequenzumrichter als IE4-Antriebspaket für höchste Energieeffizienz und als High-Output-Antriebspaket für hohe Leistungsdichte an. Beide bieten neue Chancen für Ihr Maschinendesign, weil sie weniger Verlustwärme erzeugen, leichter und kompakter sind.

Weitere Informationen über den ABB-Synchronreluktanzmotor finden Sie unter [www.abb.de/motors&drives](http://www.abb.de/motors&drives)

Power and productivity  
for a better world™



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

# Antriebspraxis

Energieeffiziente Antriebssysteme  
mit fester oder variabler Drehzahl

Vogel Business Media

**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 Hochschule Hannover, Fakultät I Elektrotechnik und Informationstechnik, 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 Universität in Hefei in der Volksrepublik China. Er lehrte noch im SS 2016 an der Hochschule Hannover und betreute Abschlussarbeiten.

**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.vbm-fachbuch.de**

Das Werk erschien vormals unter den Titeln:  
Moderne Stromrichterantriebe, 1. bis 5. Auflage  
Praxis der Drehstromantriebe, 1. Auflage

ISBN 978-3-8343-3400-8

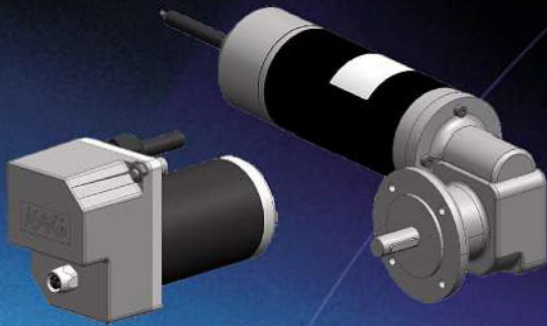
E-Book ISBN 978-3-8343-6218-6

1. Auflage. 2017

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 Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg



**excellent drives**

**Der Spezialist für  
kundenindividuelle  
Gleichstromantriebe  
aus Hannover!**



**Kählig Antriebstechnik GmbH, Pappelweg 4, 30179 Hannover  
www.kag-hannover.de, info@kag-hannover.de**

---

# Vorwort

---

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

*Industrie 4.0* mit der weitgehenden Vernetzung der industriellen Produktion im ganzen Wertschöpfungsbereich verlangt eine Digitalisierung aller Prozesse. Hinter fast jeder Bewegung im Planungs-, Bearbeitungs- und innerbetrieblichen Transportbereich steckt ein Elektroantrieb oder soll ein solcher eingebaut werden. Das führt zu weiter anhaltender *Automatisierung* und verstärkt zunehmender *Mechatronik* – quasi als Schlüsseltechnologie. Die Digitalisierung und Vernetzung erfordern eine ganzheitliche Sicht der Antriebstechnik, eingepasst in das ganze System. Genau das liefert dieses Buch, das eine Gesamtschau der eingesetzten elektrischen Antriebe enthält. Das Starten, Drehzahlverstellen, Energiesparen und das vernetzte Arbeiten werden beschrieben. Das Buch erklärt sowohl die Arbeitsweise der Komponenten als auch ihr Zusammenwirken im Antriebssystem bis hin zur Feldbusanbindung in betriebliche und globale Netze.

Auf dem Stand der Technik erfahren Studierende und Praktiker, die ihr Wissen auffrischen wollen, alles über die Entwicklung der 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.vbm-fachbuch.de](http://www.vbm-fachbuch.de) mit dem Onlineservice *InfoClick*.

Für die Antriebslösungen von Elektroantrieben wird hauptsächlich der Leistungsbereich von 100 W bis 100 kW betrachtet, weil dieser mit großen Stückzahlen am Markt vorherrscht. Praxisnah verzahnen Querverweise Abschnitte und Kapitel. Vertiefungen werden in besonders kenntlich gemachten Einrahmungen behandelt. Fallbeispiele versorgen den Praktiker direkt mit wichtigen Daten. Internet- und In-serat-Adressen oder das Lieferantenverzeichnis des Verbandes Elektrischer Antriebe im ZVEI («[www.zvei.org/antriebe/lieferantenverzeichnis](http://www.zvei.org/antriebe/lieferantenverzeichnis)») ermöglichen einen tagesaktuellen Datenzugriff auf Firmendaten und firmeneigene Auslegungsprogramme.

Für Resonanz und Anregungen aus Nutzerkreisen bin ich immer dankbar. Den schnellsten Kontakt erfüllt eine E-Mail an: [peter.brosch@hs-hannover.de](mailto:peter.brosch@hs-hannover.de).

Mein Dank gilt allen, die an diesem Buch mitgeholfen haben. Der Vogel Business Media danke ich besonders für die langjährige gute Zusammenarbeit.

Hannover, 2016

Peter F. Brosch

**Bühler**  
Motor



»» fast forward solutions

# Fast Forward Solutions



Mechatronische Antriebslösungen mit DC-/EC-Kleinmotoren, Kleintriebemotoren und Pumpen sind unsere Kernkompetenz.

Tief in die Systeme unserer Kunden einzutauchen, ist unsere Stärke.

Immer wieder neue Antworten auf ganz individuelle Herausforderungen zu finden, ist unsere Leidenschaft.

»» [www.buehlermotor.de](http://www.buehlermotor.de)

---

# Inhaltsverzeichnis

---

|  |     |
|--|-----|
| <b>Vorwort</b> .....   | 5   |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                    | 13  |
| 1.1 Stand der elektrischen 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 .....                              | 18  |
| 1.7 Gleichstrom- oder Drehstromlösung? .....                 | 19  |
| 1.8 Kfz-(Hilfs-)Antriebe .....                               | 20  |
| 1.9 Lebensdauerkosten .....                                  | 21  |
| <b>2 Das moderne Antriebspaket</b> .....                     | 23  |
| 2.1 Bestimmungsgrößen bei der Auswahl .....                  | 23  |
| 2.2 Mikrorechner sorgen für Wirtschaftlichkeit .....         | 24  |
| 2.3 Vorteile der veränderbaren Drehzahl .....                | 24  |
| 2.4 Antriebsbeispiele .....                                  | 25  |
| 2.5 Drehzahlveränderbare Antriebe im Vergleich .....         | 26  |
| <b>3 Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik</b> .....     | 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) ..... | 35  |
| 3.6 Erwärmung .....  | 37  |
| 3.7 Kühlung .....  | 40  |
| 3.8 Zeitkonstanten .....                                     | 42  |
| 3.9 Betriebsarten .....                                      | 43  |
| 3.10 Äquivalente Belastung (mittlere Belastung) .....        | 48  |
| 3.11 Mechanische Übergangsvorgänge .....                     | 49  |
| 3.12 Energieumsatz .....                                     | 52  |
| 3.13 Wachstumsgesetze .....                                  | 56  |
| <b>4 Controller-Komponenten</b> .....                        | 57  |
| 4.1 Versorgung am Netz oder über Stromrichter .....          | 59  |
| 4.2 Ventile: elektronische Leistungsschalter .....           | 58  |
| 4.3 Grundlagen der Halbleitertechnik .....                   | 60  |
| 4.4 Schutz von Halbleiterschaltern .....                     | 68  |
| 4.5 Signalelektronik .....                                   | 71  |
| 4.6 Ausfallraten .....                                       | 76  |
| <b>5 Elektrische Maschinen und Aktoren</b> .....             | 83  |
| 5.1 Allgemeine Grundlagen .....                              | 83  |
| 5.2 Erzeugung einer kontinuierlichen Drehbewegung .....      | 84  |
| 5.3 Bauformen .....  | 87  |
| 5.4 Schutzarten .....  | 87  |
| 5.5 Leistungsschild .....                                    | 87  |
| 5.6 Lager und Schmierung .....                               | 91  |
| 5.7 Permanentmagnete in elektrischen Maschinen .....         | 91  |
| 5.7.1 Arbeitspunkt der Magnete .....                         | 93  |
| 5.8 Maschinenschutz .....                                    | 95  |
| 5.9 Lüfter .....   | 95  |
| 5.10 Magnetlager .....                                       | 95  |
| 5.11 Wicklungen elektrischer Maschinen .....                 | 95  |
| 5.11.1 Gleichstrom .....                                     | 97  |
| 5.11.2 Entstehung des Drehmoments .....                      | 101 |
| 5.11.3 Drehfeldmaschinen .....                               | 102 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.11.4   | Wicklungen in der Maschine  | 104        |
| 5.12     | Polwicklung – verteilte Wicklung  | 105        |
| <b>6</b> | <b>Antriebspraxis mit Stromwendermaschinen</b>                          | <b>107</b> |
| 6.1      | Stromwendermaschinen  | 107        |
| 6.1.1    | Gleichstrommaschinen – fremderregt                                      | 107        |
| 6.1.1.1  | Aufbau  | 110        |
| 6.1.1.2  | Betriebsverhalten der fremderregten Gleichstrommaschine (fGM)           | 110        |
| 6.1.1.3  | Besonderheiten  | 112        |
| 6.1.1.4  | Kennlinien  | 114        |
| 6.1.1.5  | Betrieb der Gleichstrommaschine an konstanter Spannung                  | 114        |
| 6.1.1.6  | Drehzahlvariabler Betrieb der PM- und fremderregten Gleichstrommaschine | 114        |
| 6.2      | Drive Controller – Stromquellen für Maschinen mit Stromwendern          | 117        |
| 6.2.1    | Netzgeführte Stromrichter   | 117        |
| 6.2.1.1  | Stromquellen  | 118        |
| 6.2.1.2  | Schaltungen netzgeführter Stromrichter                                  | 123        |
| 6.2.1.3  | Ausgangsspannung mit ungesteuerten Ventilen                             | 125        |
| 6.2.1.4  | Steuerung der Ausgangsspannung mit steuerbaren Ventilen                 | 128        |
| 6.2.1.5  | Steuerkennlinie   | 129        |
| 6.2.1.6  | Kommutierung  | 130        |
| 6.2.1.7  | Betriebskennlinien  | 134        |
| 6.2.1.8  | Arbeitspunkt des Antriebs   | 135        |
| 6.2.1.9  | Glättungsmittel   | 137        |
| 6.2.1.10 | Netzurückwirkungen  | 147        |
| 6.2.1.11 | Regelung des netzgeführten Stromrichters                                | 150        |
| 6.2.1.12 | Betrieb in den 4 Quadranten   | 157        |
| 6.2.1.13 | 4-Q-Diagramm  | 161        |
| 6.2.1.14 | Umsteuervorgang   | 162        |
| 6.2.1.15 | Umkehrstromrichter mit Kreisstrom und Brückenmodulation                 | 163        |
| 6.2.1.16 | Stromrichterbetrieb im Feldschwäcbereich                                | 163        |
| 6.2.2    | Selbstgeführte Stromrichter – Gleichstromsteller (Chopper)              | 165        |
| 6.2.2.1  | Tiefsetzsteller – IQ-Betrieb  | 165        |
| 6.2.2.2  | 1-Quadranten-Betrieb (Tiefsetzsteller)                                  | 168        |
| 6.2.2.3  | 4-Quadranten-Betrieb  | 168        |
| 6.2.2.4  | Umsetzung der Bremsenergie  | 171        |
| 6.2.2.5  | Regelung beim Steller   | 171        |
| 6.2.2.6  | Netzurückwirkungen  | 172        |
| 6.2.2.7  | Übersetzungsverhältnis beim Gleichstrom-Tiefsetzsteller                 | 174        |
| 6.3      | Universalmotor (AC und DC) – Reihenschlussmotor                         | 174        |
| 6.3.1    | Aufbau  | 174        |
| 6.3.2    | Betriebsverhalten   | 175        |
| 6.3.3    | Phasenanschnittsteuerung des Reihenschlussmotors                        | 178        |
| 6.3.4    | Pulsbetrieb des Reihenschlussmotors                                     | 179        |
| 6.4      | Kleinmaschinen  | 182        |
| <b>7</b> | <b>Antriebspraxis mit Drehfeldmaschinen</b>                             | <b>183</b> |
| 7.1      | Übersicht   | 183        |
| 7.1.1    | Entwicklung der AC-Antriebe   | 184        |
| 7.1.1.1  | AC-Bewegungsantriebe / Bearbeitungsantriebe                             | 185        |
| 7.1.1.2  | AC-Kompaktantriebe als dezentrale Antriebe                              | 186        |
| 7.1.1.3  | AC-Positionierantriebe / Servoantriebe                                  | 187        |
| 7.1.1.4  | Drehende und lineare AC-Direktantriebe                                  | 188        |
| 7.2      | Drehfeldmaschinen   | 188        |
| 7.2.1    | Aufbau der Drehstrommaschinen in der Übersicht                          | 188        |
| 7.2.2    | Drehstrom-Asynchronmaschine   | 189        |
| 7.2.2.1  | Aufbau  | 189        |
| 7.2.2.2  | Allgemeiner Betrieb   | 190        |
| 7.2.2.3  | 50-Hz-Betrieb   | 192        |
| 7.2.2.4  | Betrieb mit besonderen Läuferarten                                      | 196        |
| 7.2.2.5  | Betrieb am 50-Hz-Drehstromnetz  | 199        |
| 7.2.2.6  | Direktschalten (Direct on Line, DOL)                                    | 200        |
| 7.2.2.7  | Konventionelle Anlaufverfahren (Hochlauf)                               | 201        |
| 7.2.2.8  | Bremsschaltungen  | 205        |



|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 7.2.2.9  | Drehzahlsteuerung von Asynchronmaschinen   | 207 |
| 7.2.2.10 | Betrieb am 50-Hz-Wechselstromnetz  | 208 |
| 7.2.2.11 | Betrieb mit variabler Speisefrequenz   | 213 |
| 7.2.2.12 | Asynchron-Servomaschinen   | 215 |
| 7.2.2.13 | Asynchron-Linearantrieb  | 215 |
| 7.2.3    | Drehstrom-Synchronmaschine   | 216 |
| 7.2.3.1  | Aufbau   | 216 |
| 7.2.3.2  | Betrieb mit variabler Frequenz   | 222 |
| 7.2.3.3  | Synchron-Linearantriebe  | 223 |
| 7.2.4    | Bürstenlose Gleichstrommaschinen – Elektronisch kommutierte Maschine (EKM, AC-Servo) | 223 |
| 7.2.4.1  | Aufbau   | 223 |
| 7.2.4.2  | Betrieb mit variabler Drehzahl   | 226 |
| 7.2.4.3  | EK-Servomaschinen  | 226 |
| 7.2.4.4  | EK-Linearantriebe  | 226 |
| 7.2.5    | Reluktanzmaschine  | 226 |
| 7.2.5.1  | Aufbau und Betrieb mit 50 Hz   | 226 |
| 7.2.5.2  | Synchron-Reluktanzmaschine   | 226 |
| 7.2.6    | Linear-Aktoren und Linear-Motoren  | 230 |
| 7.2.6.1  | Piezo-Aktoren  | 231 |
| 7.2.6.2  | Elastomer-Aktoren  | 231 |
| 7.2.6.3  | Linearantrieb  | 232 |
| 7.2.7    | Transversalflussmotor  | 233 |
| 7.2.8    | Geschaltete Reluktanzmaschine (gRM)  | 234 |
| 7.2.8.1  | Aufbau und Betrieb   | 234 |
| 7.2.8.2  | Einsatz  | 235 |
| 7.2.9    | Schrittmotoren – reiner Positionierantrieb   | 235 |
| 7.2.9.1  | Aufbau   | 235 |
| 7.2.9.2  | Positionierbetrieb   | 235 |
| 7.3      | Umrichter mit $U$ - und $I$ -Zwischenkreis   | 237 |
| 7.3.1    | Übersicht: Maschinen und Umrichter   | 237 |
| 7.3.2    | Elektronische Drehspannungserzeugung   | 237 |
| 7.3.2.1  | Umrichterarten   | 237 |
| 7.3.2.2  | Aufbau der Zwischenkreisumrichter  | 239 |
| 7.3.3    | Umrichter mit Spannungszwischenkreis ( $U$ -Umrichter)                               | 241 |
| 7.3.3.1  | Wechselspannungs-Wechselrichter (1-phasig)   | 241 |
| 7.3.3.2  | Drehspannungserzeugung (Sinus)   | 242 |
| 7.3.3.3  | Drehspannungen (Block)   | 242 |
| 7.3.3.4  | Spannungsraumzeiger  | 246 |
| 7.3.3.5  | Drehfeld   | 247 |
| 7.3.3.6  | Realisierung der $U/f$ -Kennlinie beim $U$ -Umrichter                                | 247 |
| 7.3.4    | Umrichter mit Stromzwischenkreis ( $I$ -Umrichter)                                   | 250 |
| 7.3.4.1  | Drehfelderzeugung beim $I$ -Umrichter  | 250 |
| 7.3.4.2  | Strompulsen  | 252 |
| 7.3.4.3  | $U/f$ -Kennlinie beim $I$ -Umrichter   | 254 |
| 7.3.4.4  | Vorteile der «Sinus»-Pulsung   | 255 |
| 7.3.5    | Modulationsverfahren bei $U$ -Umrichtern   | 255 |
| 7.3.5.1  | Allgemeines Ziel   | 255 |
| 7.3.5.2  | Anforderungen an die Ventilsteuerung   | 255 |
| 7.3.5.3  | Blockbetrieb-Grundfrequenztaktung  | 256 |
| 7.3.5.4  | Unterschwingungsverfahren (PWM, Sinus- $\Delta$ -Modulation)                         | 257 |
| 7.3.5.5  | Verwandte Modulationsverfahren (Voltage-Vector-Control, Überlagerungsverfahren)      | 260 |
| 7.3.5.6  | Pulserzeugung in der Steuerung   | 261 |
| 7.3.5.7  | Raum-Zeiger-Modulation (RZM, SZM)  | 263 |
| 7.3.5.8  | Hysterese-Strom-Modulation (HSM, Pulsen mit Stromvorgabe, Toleranzbandregelung)      | 269 |
| 7.3.5.9  | Steuerbausteine und Grenzen  | 269 |
| 7.3.6    | Steuerteil und Software der Umrichter  | 269 |
| 7.3.6.1  | Software   | 272 |
| 7.3.6.2  | Schnittstellen, Parameter und Funktionen   | 273 |
| 7.3.6.3  | Wichtige Parameter und ihre Auswirkungen   | 274 |
| 7.3.7    | Drehzahl- und Drehmomentregelung (Verfahren)   | 281 |
| 7.3.7.1  | Allgemeines  | 281 |
| 7.3.7.2  | $U/f$ -Kennliniensteuerung bzw. Frequenzregelung                                     | 282 |
| 7.3.7.3  | Mehrmaschinenantriebe  | 282 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 7.3.7.4 | Entwicklung der Drehmomentregelung                            | 282 |
| 7.3.7.5 | Feldorientierte Regelung (FOR, «Vektor»-Regelung)             | 283 |
| 7.3.7.6 | Direkte Drehmomentregelung – Direct Torque Control (DTC)      | 289 |
| 7.3.7.7 | FOR-Regelung beim <i>I</i> -Umrichter                         | 295 |
| 7.3.7.8 | Gegenüberstellung der Regelverfahren                          | 296 |
| 7.4     | Sonderfragen bei Umrichterantrieben                           | 298 |
| 7.4.1   | Erwärmung bei Umrichterbetrieb                                | 298 |
| 7.4.2   | Netzurückwirkungen  | 299 |
| 7.4.2.1 | Allgemeiner Vergleich der Stromrichter                        | 299 |
| 7.4.2.2 | <i>U</i> -Umrichter   | 299 |
| 7.4.2.3 | <i>I</i> -Umrichter   | 309 |
| 7.4.3   | Bremsbetrieb  | 309 |
| 7.4.3.1 | Allgemeines   | 309 |
| 7.4.3.2 | <i>U</i> -Umrichter   | 310 |
| 7.4.3.3 | <i>I</i> -Umrichter – nur Nutzbremsen                         | 315 |
| 7.4.4   | Pendelmomente   | 317 |
| 7.4.5   | Geräusche   | 318 |
| 7.4.6   | Vergleich <i>U</i> -Umrichter gegen <i>I</i> -Umrichter       | 321 |
| 7.5     | Besonderer Betrieb von Umrichterantrieben                     | 323 |
| 7.5.1   | IE/IES-Effizienzklassen – Wirkungsgrade                       | 323 |
| 7.5.1.1 | Effizienzklassen von Motoren                                  | 323 |
| 7.5.1.2 | Effizienzklassen von Controllern                              | 323 |
| 7.5.1.3 | Effizienzklassen von Antriebssystemen (Motorsysteme)          | 323 |
| 7.5.2   | Antriebsüberwachung   | 325 |
| 7.5.2.1 | Sonolyzer – einfache Leistungsmessung                         | 325 |
| 7.5.2.2 | Intelligente Zustandsüberwachung mit Sensor-Tag               | 326 |
| 7.5.3   | Energieeinsparung   | 326 |
| 7.5.4   | Netze   | 328 |
| 7.5.5   | Asynchron-Servomaschinen                                      | 330 |
| 7.6     | Umrichter und elektronisch kommutierte Maschine               | 330 |
| 7.6.1   | Entwicklung und Einsatz                                       | 330 |
| 7.6.2   | Arbeitsweise der EK-Maschine                                  | 331 |
| 7.6.2.1 | Blockstrom  | 331 |
| 7.6.2.2 | Arbeitsweise Sinus-Bestromung                                 | 333 |
| 7.6.2.3 | Vergleich: Blockbetrieb und Sinus-Bestromung                  | 337 |
| 7.6.3   | Gebersysteme  | 337 |
| 7.6.4   | Stromrichtereinheit und Regelung                              | 338 |
| 7.7     | Umrichter und «geschaltete Reluktanzmaschine» (gRM)           | 341 |
| 7.8     | Umrichter und Linearantriebe                                  | 343 |
| 7.8.1   | Piezo-Aktor   | 343 |
| 7.8.2   | Elastomer-Aktoren   | 344 |
| 7.8.3   | Tauchspulaktor (DC-Aktor)                                     | 345 |
| 7.8.4   | Linear-Motoren  | 346 |
| 7.8.4.1 | Motortypen  | 347 |
| 7.8.4.2 | Software  | 349 |
| 7.8.5   | Solenoid  | 349 |
| 7.8.6   | Linearantriebe – Einsatz                                      | 350 |
| 7.9     | Controller (Drehstromsteller) und Drehstrom-Asynchronmaschine | 351 |
| 7.9.1   | Arbeitsweise und Einsatzmöglichkeiten                         | 351 |
| 7.9.2   | Steller als Sanftanlaufgerät                                  | 352 |
| 7.9.3   | Steller als Sanftauslaufgerät                                 | 354 |
| 7.9.4   | Elektronische KUSA-Schaltung                                  | 354 |
| 7.9.5   | Betrieb mit variabler Drehzahl                                | 354 |
| 7.9.5.1 | Gesteuerter Betrieb   | 354 |
| 7.9.6   | Grenzen des Betriebs  | 357 |
| 7.9.7   | Verluste bei Belastung  | 358 |
| 7.9.8   | Argumente für den Einsatz                                     | 358 |
| 7.9.9   | Energiesparfunktion   | 358 |
| 7.9.10  | Drehstromsteller mit Unterschwingungen                        | 359 |
| 7.10    | Drehzahlstarter (Eaton)                                       | 359 |
| 7.10.1  | Aufbau  | 359 |
| 7.10.2  | Betrieb   | 359 |
| 7.10.3  | Parameter   | 361 |
| 7.10.4  | Auswahl   | 361 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.11     | Stromrichterantriebe mit Schleifringläufern   | 361        |
| 7.11.1   | Stromrichter-kaskade  | 362        |
| 7.11.1.1 | Untersynchroner Betrieb   | 362        |
| 7.11.1.2 | Bemessung   | 362        |
| 7.11.1.3 | Übersynchroner Betrieb  | 362        |
| 7.11.2   | Doppeltgespeister Schleifringläufer   | 363        |
| 7.12     | Controller und Schrittmotoren   | 364        |
| 7.12.1   | Positionieren mit Schrittmotoren  | 364        |
| 7.12.2   | Betrieb und Ansteuerung   | 365        |
| 7.12.2.1 | Blockbestromung   | 365        |
| 7.12.2.2 | Sinusbestromung   | 367        |
| 7.12.2.3 | Kennlinien  | 371        |
| 7.12.2.4 | Steuerung   | 372        |
| 7.13     | Besondere AC-Antriebe   | 374        |
| 7.13.1   | Getriebemotoren   | 374        |
| 7.13.2   | Integral- und Kompaktantriebe   | 376        |
| 7.14     | Stromrichter-AC-Direktantriebe  | 376        |
| 7.14.1   | Maschine und Mechanik   | 376        |
| 7.14.2   | Elektroniksteuerung   | 376        |
| 7.14.3   | Direkte Linearantriebe  | 376        |
| 7.14.3.1 | Aufbau  | 376        |
| 7.14.3.2 | Typische Einsatzgebiete   | 377        |
| 7.14.4   | Direkte Drehantriebe  | 378        |
| 7.14.4.1 | Aufbau  | 378        |
| 7.14.4.2 | Typische Einsatzgebiete   | 380        |
| 7.15     | Antriebe im Vergleich   | 380        |
| 7.15.1   | Bewegungsantriebe   | 380        |
| 7.15.2   | Servoantriebe – Positionierantriebe   | 382        |
| 7.15.3   | Dezentrale Antriebe (Module)  | 389        |
| 7.15.3.1 | Dezentrale Intelligenz (Submodule)  | 389        |
| 7.15.3.2 | Subsysteme  | 390        |
| 7.16     | Motion Control und Mechatronik  | 390        |
| 7.16.1   | Motion-Funktionen   | 390        |
| <b>8</b> | <b>Digitalisierung und Antriebsvernetzung, Industrie 4.0, dezentrale Module und Sicherheitsfunktionen</b> | <b>401</b> |
| 8.1      | Digitalisierung und Industrie 4.0   | 401        |
| 8.1.1    | Digitalisierung und Vernetzung  | 401        |
| 8.1.2    | Bussystem-Nutzergruppen   | 407        |
| 8.1.3    | Vorteile der Vernetzung   | 409        |
| 8.2      | Dezentrale Installation   | 409        |
| 8.3      | Sicherheitsfunktionen elektrischer Antriebe   | 409        |
| 8.4      | Antriebsintegrierte Sicherheit  | 412        |
| <b>9</b> | <b>Auswahl und Bemessung festdrehzahl- und drehzahlvariabler Stromrichter-Antriebe</b>                    | <b>415</b> |
| 9.1      | Allgemeine Hinweise   | 415        |
| 9.2      | Netz-drosseln, Netztransformatoren und Filter   | 418        |
| 9.2.1    | Drosseln  | 418        |
| 9.2.2    | Netztransformatoren   | 419        |
| 9.2.3    | Filter  | 419        |
| 9.3      | Checklisten zur Festlegung der Antriebsdaten  | 419        |
| 9.3.1    | Netzgeführter Stromrichter und Gleichstrommaschine  | 419        |
| 9.3.2    | U-Umrichter und Drehstrom-Asynchronmaschine   | 419        |
| 9.3.3    | Positionierantriebe – Motion Control  | 419        |
| 9.4      | Maschinendaten  | 422        |
| 9.5      | Fallbeispiele   | 422        |
| 9.5.1    | Maschinen   | 422        |
| 9.5.2    | Mechanik  | 425        |
| 9.5.3    | Gleichstrom   | 428        |
| 9.5.4    | Drehstrom   | 430        |
| 9.5.5    | EK-Motor (Positionierantrieb)   | 436        |
| 9.5.6    | Schrittmotor (Positionierantrieb)   | 438        |
| 9.6      | Klemmkennzeichnung  | 441        |
| 9.7      | Normen und Vorschriften   | 441        |
| 9.8      | Auslegungsprogramme   | 441        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>10</b> | <b>Messungen an Antrieben</b>                                | 445 |
| 10.1      | Messungen allgemein  | 445 |
| 10.1.1    | Besonderheiten   | 445 |
| 10.1.2    | Aliasing-Effekt  | 446 |
| 10.1.3    | Geräteanzeige  | 446 |
| 10.2      | Elektrische Messungen am Antrieb                             | 448 |
| 10.2.1    | Netzgeführte Stromrichter                                    | 448 |
| 10.2.2    | Umrichter und Drehstromsteller                               | 448 |
| 10.2.2.1  | Vorbemerkung   | 448 |
| 10.2.2.2  | Messungen am Umrichter                                       | 449 |
| 10.3      | Mechanische Messungen am Antrieb                             | 454 |
| 10.3.1    | Drehzahl und Drehmoment                                      | 454 |
| 10.3.2    | Lager  | 455 |
| 10.3.2.1  | Lagerschwingungen  | 455 |
| 10.3.2.2  | Lagerströme  | 457 |
| 10.3.3    | Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)                     | 461 |
| 10.3.4    | Erwärmungsmessungen  | 461 |
| 10.3.4.1  | Erwärmung  | 461 |
| 10.3.4.2  | Infrarot-Thermografie  | 461 |
| 10.4      | Simulation   | 461 |
| <b>11</b> | <b>Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)</b>              | 465 |
| 11.1      | Gesetz zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)         | 465 |
| 11.2      | Störungen  | 465 |
| 11.3      | Ursache und Ausbreitung der Störungen bei Frequenzumrichtern | 466 |
| 11.4      | Störfestigkeit und Entstörung                                | 467 |
| 11.4.1    | Leitungsgebundene Störungen                                  | 467 |
| 11.4.2    | Nicht leitungsgebundene Störungen                            | 467 |
| 11.5      | Neubeschaffung   | 470 |
| 11.6      | Messungen  | 470 |
| 11.7      | Anschlusshinweise  | 471 |
|           | <b>Anhang</b>  | 475 |
|           | <b>Formelzeichen (Auswahl)</b>                               | 479 |
|           | <b>Abkürzungen und Begriffe (Auswahl)</b>                    | 481 |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | 483 |
|           | <b>Stichwortverzeichnis</b>                                  | 489 |

# 1 Einleitung

## 1.1 Stand der elektrischen Antriebs-technik

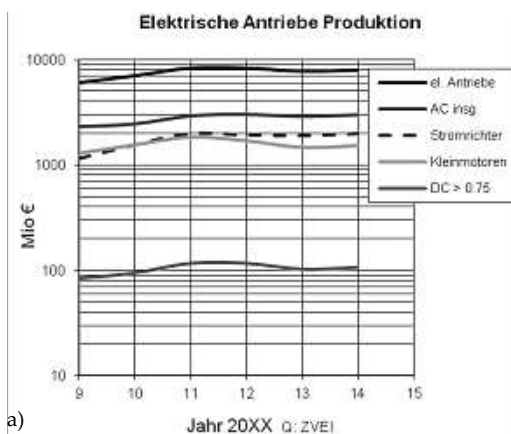
Mit einem geschätzten Weltmarktpotential von ca. 13 Mrd. € haben drehzahlveränderbare Antriebe ein erhebliches Wirtschaftsvolumen. Alle diese Antriebe sind «Stromrichterantriebe», wenn man vom verschwindend kleinen Anteil mechanischer Verstellantriebe absieht. Stromrichterantriebe sind ein anhaltend 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; Tabelle 1.1).

Waren vor ca. 20 Jahren noch rund 80% der drehzahlveränderbaren Antriebe in Gleichstromtechnik (DC) ausgeführt, so gab es seither 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 und Tabelle 1.2) [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.

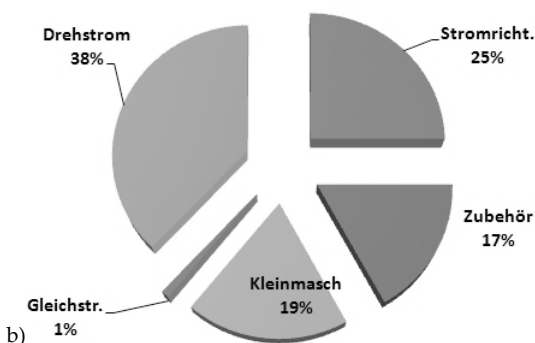
Der Absatz von AC- und DC-Motoren ist in den letzten Jahren nahezu stabil geblieben.

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.

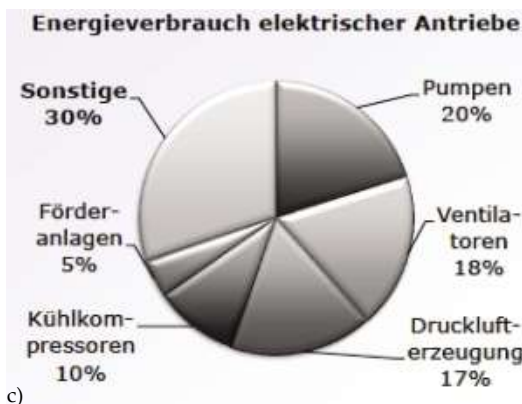


a)

El. Antriebe - Produktion 2014



b)



c)

Bild 1.1 Entwicklungen der Antriebstechnik in der Bundesrepublik Deutschland (ZVEI) – Entwicklung der Produktionswerte für elektrische Maschinen und Stromrichter Verteilung der Antriebe auf die Leistung

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 Halt machte – einem Markt mit sehr großen Stückzahlen und hohen Anforderungen. Dies setzte sich auch in

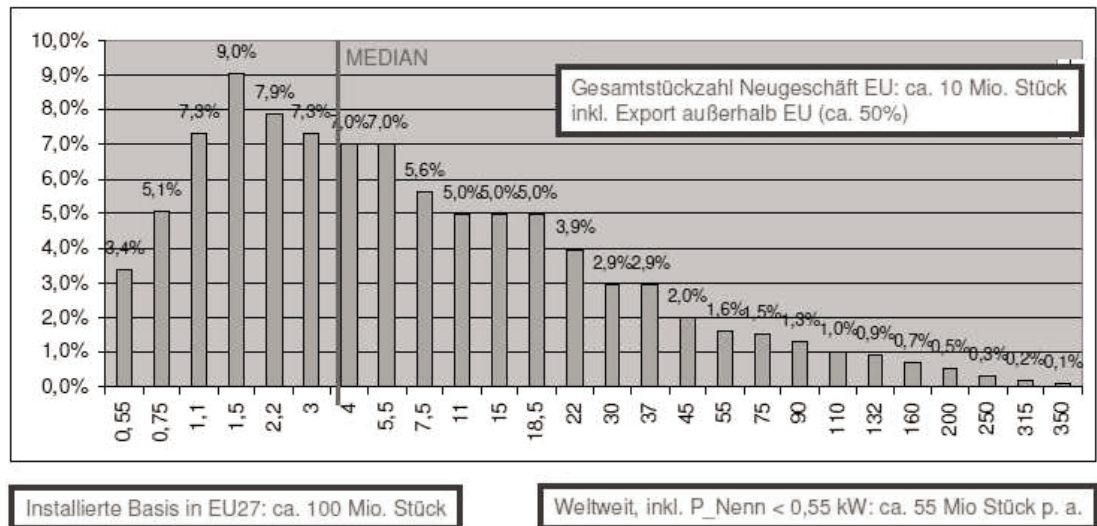
den 90er-Jahren – wenngleich gebremst durch die Konjunkturkrise und verschärft durch den notwendigen Strukturwandel in der Industrie – weiter fort. Heute sind dezentrale Module gefragt. So beobachtet man in den letzten Jahren eine ständig weiter wachsende Nachfrage nach reaktions-schnellen, wartungsarmen 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 Begriff «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.

Tabelle 1.1 Energieumsatz [Quelle: Siemens, 2015]

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>30%</b>  | <b>70%</b>   | <b>80%</b>  |
| <i>In Deutschland benötigt die Industrie fast 30% der End-Energie ...</i> | <i>... davon entfallen ca. 70% des Strombedarfs auf elektrisch angetriebene Systeme.</i> | <i>Die Energiekosten betragen mind. 80% der Lebenszyklus-Kosten eines elektrischen Antriebs</i> |

Tabelle 1.2 Verteilung der Gesamtstückzahl auf die Leistung [Quelle: Gontermann, KSB]



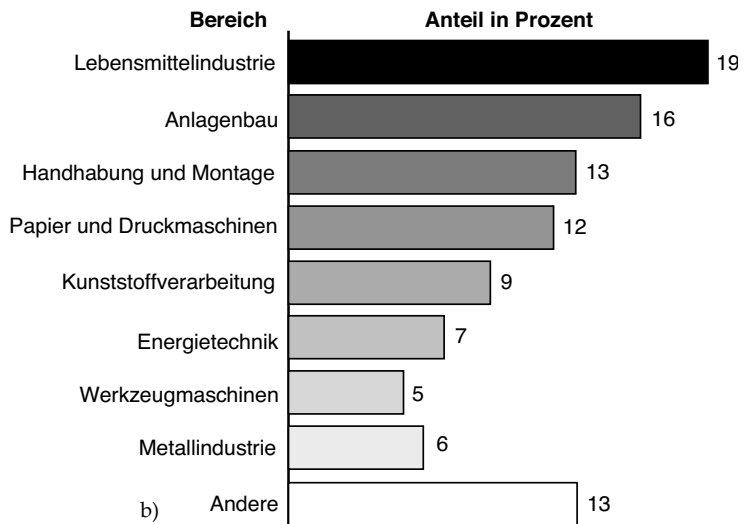
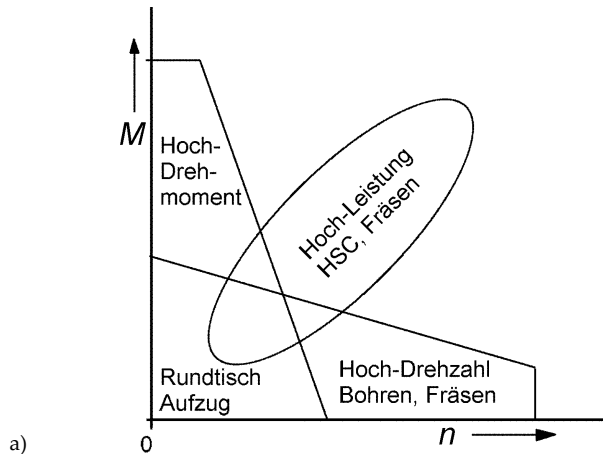
ander, sondern sind eng verwoben. Die Grenzen der Disziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Software sind aufgehoben. Die neuen Kompaktantriebe – Umrichter, Maschine und Getriebe als Einheit – sowie Motion Control bestätigen diesen Trend. Er setzt sich mit dem dezentralen, aber vernetzten Antriebsmodul 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 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,

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



- ❑ 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» oder Batterie,
- ❑ 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):

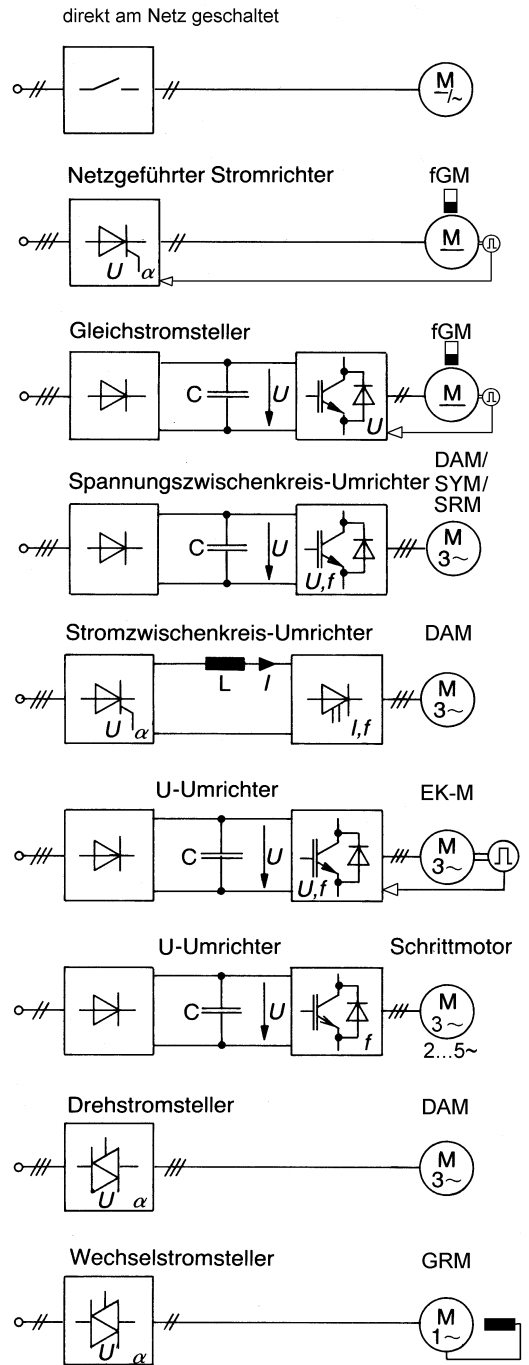


Bild 1.3 Vielfalt der drehzahlveränderbaren Antriebe mit Stromrichtern im Leistungsbereich bis ca. 100 kW



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

mit System durchleuchtet, 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.

## 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 Thyristorrichter 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 (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].

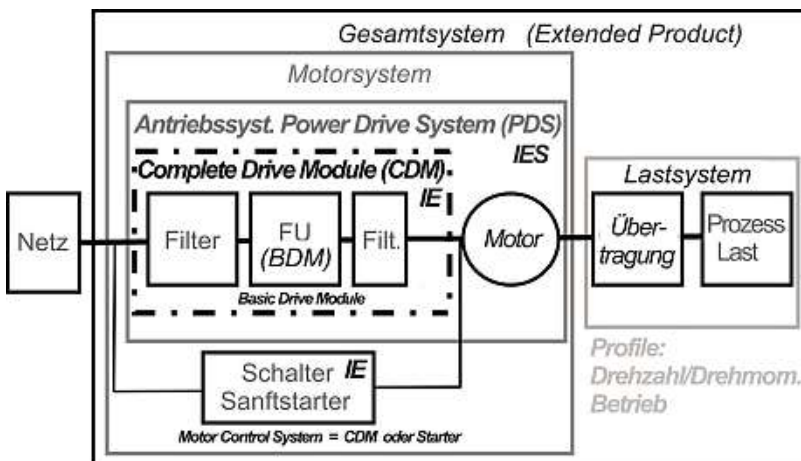


Bild 1.4  
Gesamtsystem eines Antriebs mit den einzelnen Komponenten



Bild 1.5 Kompaktantrieb; elektronisch kommutierte Maschine mit Getriebe [Quelle: Nekar-Mot.]

### 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 Antriebschema. Modular aufgebaute Maschinen wurden bisher mechanisch über Königswellen gekoppelt. Flexibler lässt sich das über schnelle Systembusse erreichen, 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 Ein-

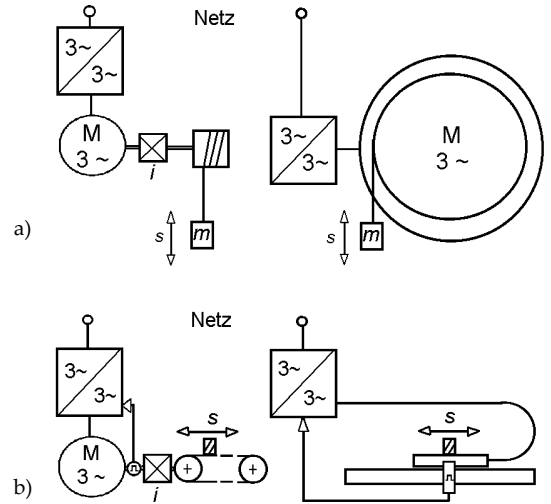


Bild 1.6 Direktantriebe  
 a) Anpassung über Getriebe und Direktantrieb mit Sondermotor  
 b) Anpassung über Getriebe und Transportband sowie Linearmotor

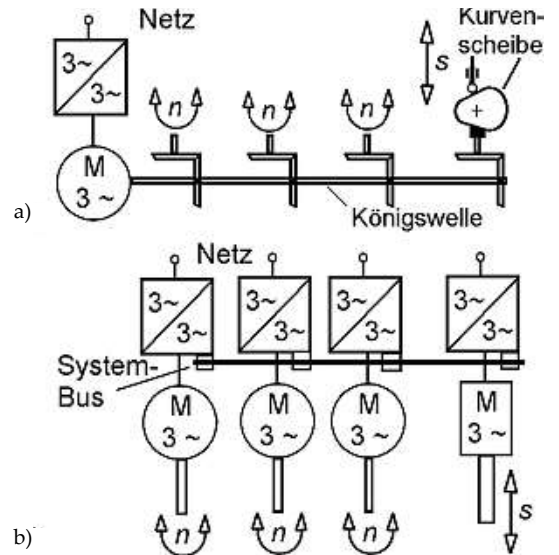


Bild 1.7 Kopplung von Antrieben  
 a) Königswelle zur mechanischen Verteilung  
 b) Systembus zur elektronischen Synchronisation der Antriebsmodule im mechatronischen System

satz, 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.

## 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 Werkzeugma-

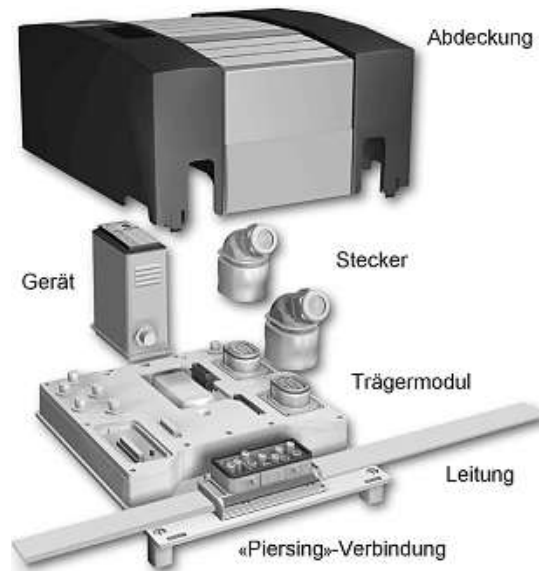


Bild 1.8 Dezentrale Installation mit Geräteträger. Die Leitungen werden «gepierst». [Quelle: Wieland]

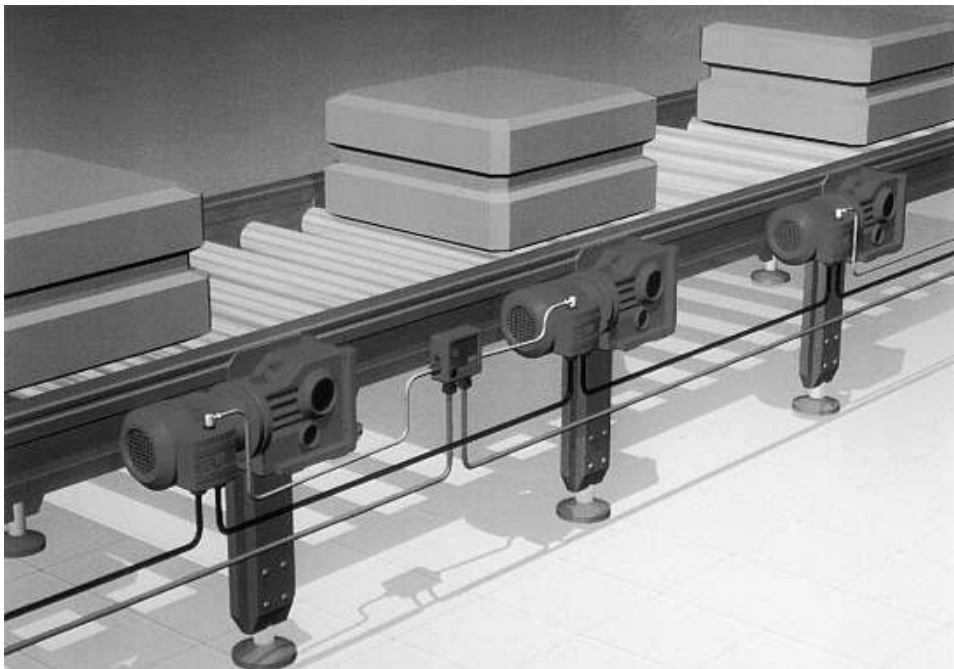


Bild 1.9 Dezentrale Antriebe mit dezentraler Installation für Bussystem und Energieleitung (SEW)

schinenbereich – geht allerdings eindeutig zum drehzahlvariablen 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.

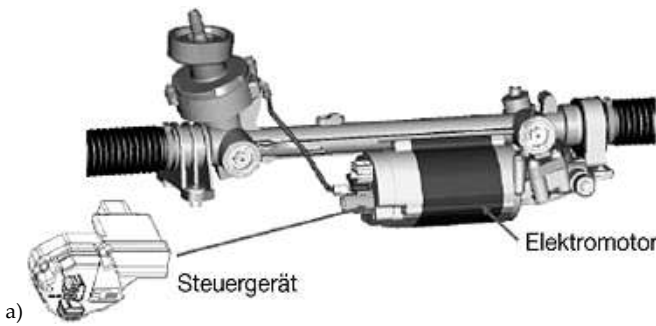
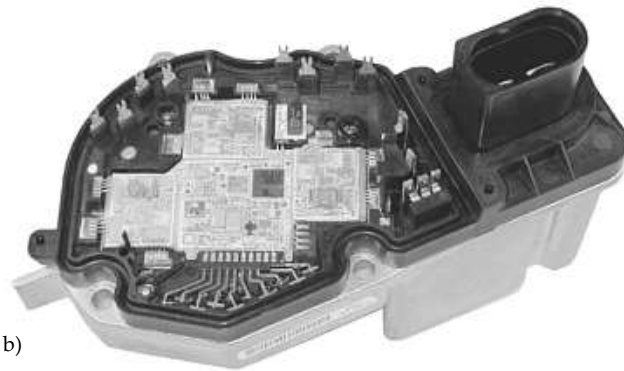


Bild 1.10 Pkw-Hilfsantriebe [Quelle: Bosch]

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



### 1.9 Lebensdauerkosten

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

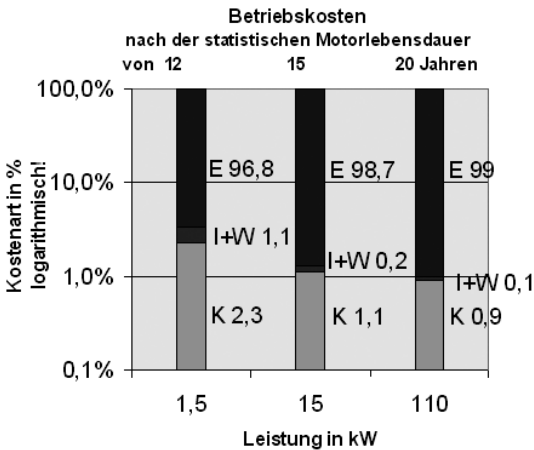


Bild 1.11 Lebensdauerkosten für 3 Motoren mit unterschiedlichen Leistungen und Betriebszeiten

### Industrie 4.0 [1.9]

In der Industrie verändert die voranschreitende Digitalisierung und Vernetzung der Produktion die Wertschöpfungsketten – diesen Wandel bezeichnen wir als Industrie 4.0. Der Begriff «Industrie 4.0» steht für das Zusammenspiel von drei Faktoren:

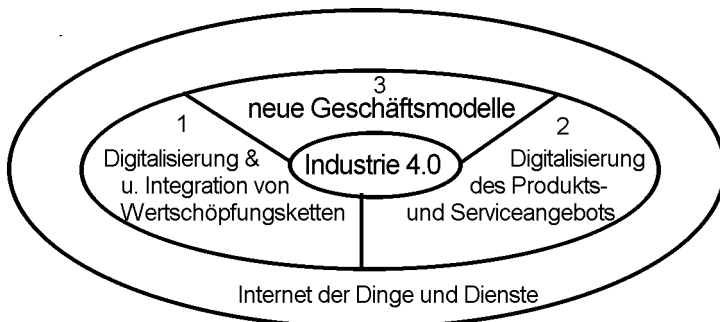
- zum einen geht es um die Digitalisierung und Integration von Wertschöpfungsketten hin zu Wertschöpfungsnetzwerken in der Industrie,
- zum zweiten um die Digitalisierung des Produkt- und Serviceangebots und
- zum dritten um neue Geschäftsmodelle.

Dabei entstehen neue Angebote im *Internet der Dinge, Dienste und Menschen*. Bild 1.12 fasst diese drei Aspekte von Industrie 4.0 zusammen.

Durch die Digitalisierung und Integration der Wertschöpfungsketten sind Daten aus unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus unternehmensübergreifend verfügbar – und das vom Angebotsprozess über die Fertigung bis hin zum Service vor Ort. Alle Unternehmen im Wertschöpfungsnetzwerk können so jederzeit auf die für sie relevanten Daten zugreifen. So erhalten die Konstrukteure der Hersteller beispielsweise die für sie entscheidenden Daten der Komponentenlieferanten und der Besteller bindet die digitalen Konstruktionsdaten der Lieferanten bereits vorab in das Design ihrer Fabrikhallen ein. Das führt zu einem Effektivitätsgewinn, von dem alle Beteiligten profitieren. Dafür müssen Informationen über Produkte und Dienstleistungen allerdings digital vorliegen.

Unter der Digitalisierung des Produkt- und Serviceangebots versteht man daher die vollständige virtuelle Beschreibung von Dienstleistungen und Produkten.

Bild 1.12 Die drei Aspekte von Industrie 4.0 [Quelle: ZVEI]



Die durchgängige Digitalisierung ermöglicht aber auch völlig neue, digitale Geschäftsmodelle.

Auf Basis von Daten, die zum Beispiel in einer Cloud (von SAP oder Microsoft) liegen, entstehen Dienste und Angebote, die dem Anwender entscheidende Vorteile bringen: Dazu gehört beispielsweise die effizientere und vorausschauende Wartung von Anlagen. Entsprechende Prognosen erwarten [1.10]:

- ❑ Wartungskosten minus 10 bis 40%,
- ❑ Ausfallzeiten der Maschinen minus 30 bis 50%,
- ❑ Kosten für Lagerung minus 20 bis 50%,
- ❑ Kosten für Qualitätsmaßnahmen minus 10 bis 20%.

Somit sind erhebliche Einsparungen im Mittel zu erwarten.

## 2 Das moderne Antriebspaket

### 2.1 Bestimmungsgrößen bei der Auswahl

Bild 2.1 gibt einen Überblick über Bestimmungsgrößen bei der Auswahl eines Antriebs. 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 geachtet, 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

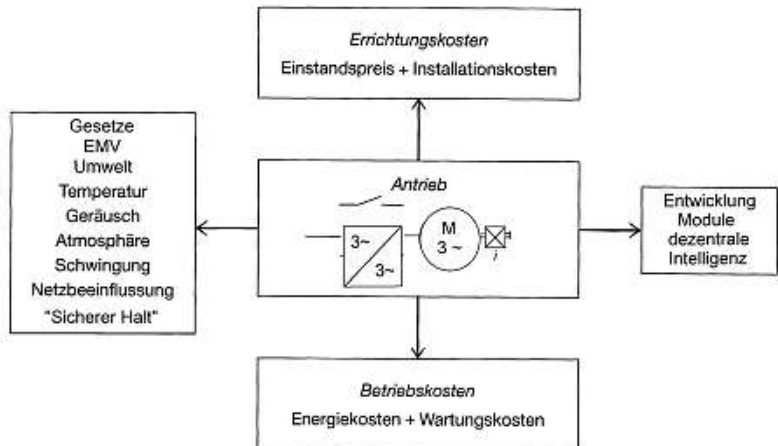
wie die Wartungskosten (Service), wegen der steigenden Personalaufwendungen. Hochwirkungsgradmotoren werden vermehrt eingesetzt, um die Energiekosten entsprechend der gesetzlichen Vorgaben zu senken. Die neuen mikroprozessorgesteuerten Stromrichter mit eingebauten Diagnoseroutinen bieten Vorteile, die 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:

- Netzurückwirkungen und
- Geräuschemission.

Die unerwünschte Rückwirkung der eingesetzten Stromrichter auf das speisende öffentliche Netz nimmt stark zu, da jeder Stromrichter ein Oberschwingungsgenerator ist; netzfreundliche Strom-

Bild 2.1  
Bestimmungsgrößen für die  
Auswahl eines Antriebs



richterschaltungen gewinnen so an Bedeutung. Der erfreulichen Reduzierung der Einschaltstromspitzen beim Maschinenanlauf durch den Stromrichter – besonders bei Drehstromasynchronmaschinen – stehen starke Netzzrückwirkungen 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 Antriebspaketes – 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 sinusförmigen Strömen sollte möglichst gering sein. 16-kHz-Pulsung – außerhalb des Hörbereiches des Menschen – ist bei Frequenzrichtern 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 mikroprozessor-gesteuerten 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 Antriebszustände über Schnittstellen (RS232, RS486, Smartphone 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,

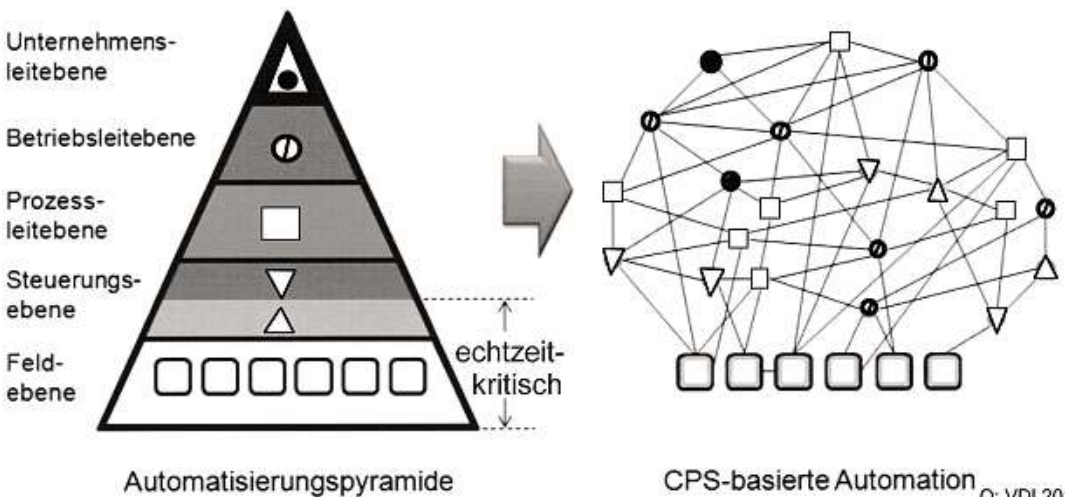


Bild 2.2 Automatisierungspyramide und Vernetzung (auch mit externen Partnern bis global, Industrie 4.0)



- ❑ Netzentlastung, da Anlaufstromspitzen reduziert werden,
- ❑ Prozessverbesserung im Teillastbereich, 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.

## 2.4 Antriebsbeispiele

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

Im Haushalt findet man diese Antriebe neben den vielen einfach geschalteten Festdrehzahlantrieben in

- ❑ Heimwerkergeräten (Bild 2.3) und Waschmaschinen.

Bei Industrieantrieben zeigt sich neben den vielen Festdrehzahlantrieben 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



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

- ❑ 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.

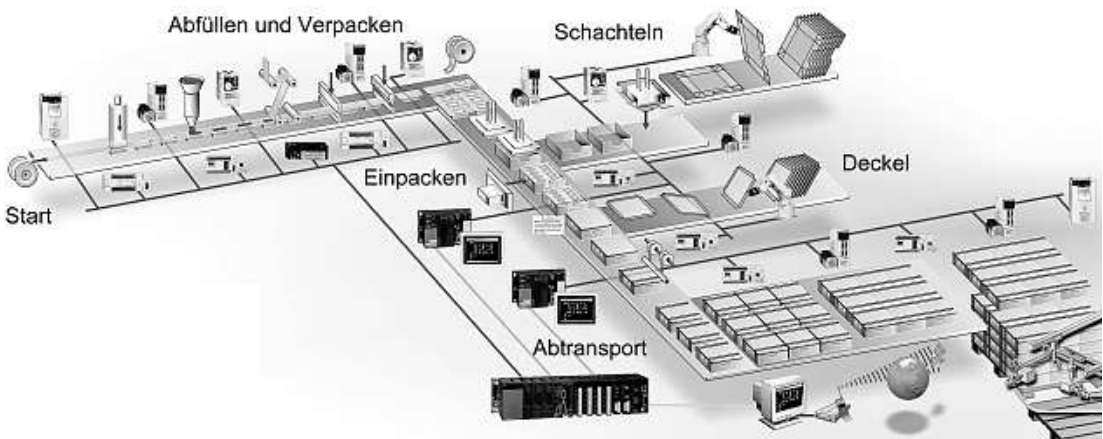


Bild 2.4 Komplettlösung einer komplexen Mehrachsanlage zum Füllen und Verpacken [Quelle: Mitsubishi]

## 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 ( $T$ ) mit steigender Leistung und den anschließenden Konstantleistungsbereich ( $P$ ).

Wesentliche Unterschiede ergeben sich so im Bereich kleiner Drehzahlen. Dort kann eine Maschine kleiner Leistung über ein Getriebe große Drehmomente aufbringen (Getriebemotor). Beim



Bild 2.5 Werkzeugmaschinenantriebe Vario-Linearbaustein [Quelle: Hauser]

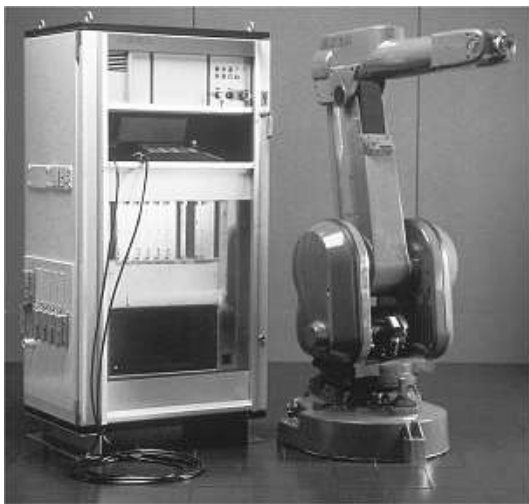


Bild 2.6 6-achsiger Roboter mit Steuerschrank [Quelle: ABB]

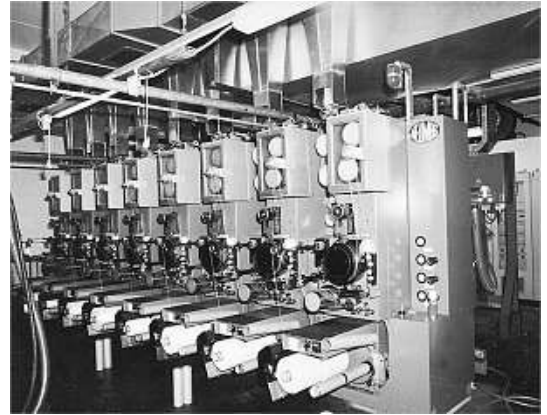


Bild 2.7 Texturiermaschine mit umrichtergespeisten Galettenantrieben (Reluktanzmotoren)



a)



b)

Bild 2.8 Linearantrieb Rexroth/Foto + Detail: [Quelle: Indramat]

a) Frequenzumrichter mit verschiedenen Linearantrieben,

b) Detailansicht

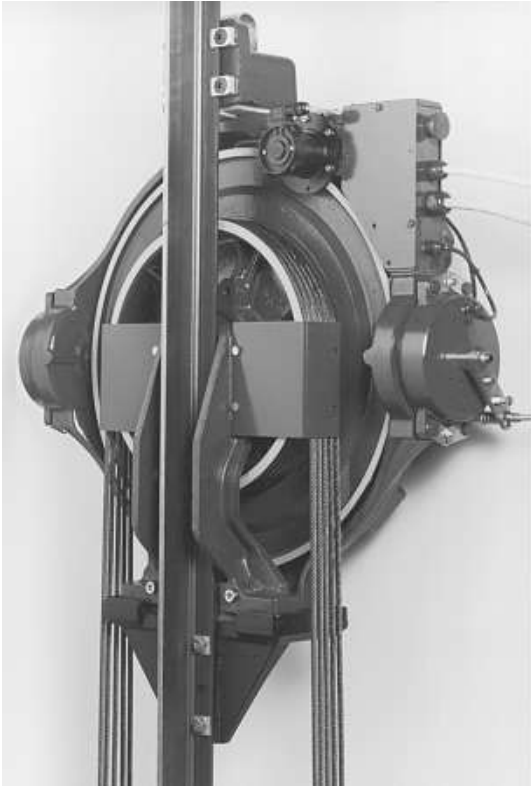
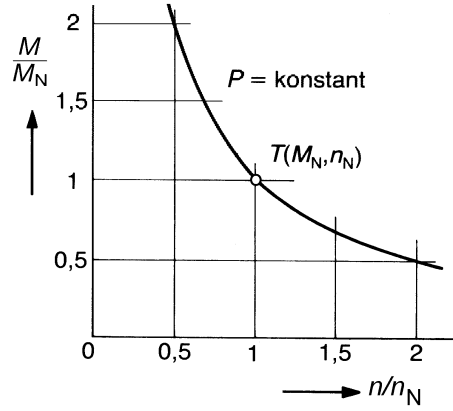
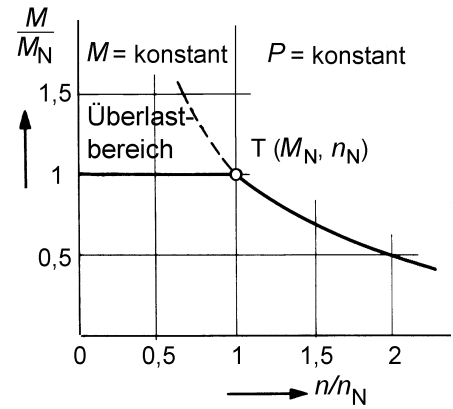


Bild 2.9 Aufzug-Direktantrieb [Quelle: Kone]



a)



b)

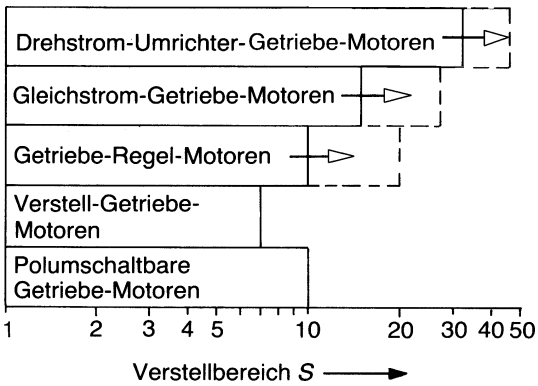
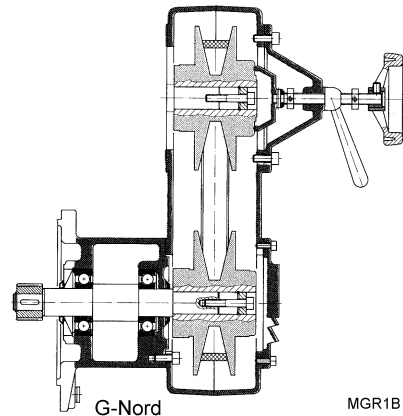


Bild 2.10 Verstellbereiche  $S = 1 : n_{\text{stell}}/n_{\text{bezug}}$  verschiedener Antriebssysteme mit variabler Drehzahl elektrischer und mechanischer Bauart



c)

Bild 2.11 Kennlinienvergleich zwischen mechanischer und elektrischer Lösung: Verstellgetriebeantrieb (a) – Stromrichterantrieb (b) – mechanisches Verstellgetriebe im Schnittbild ohne Motor (c) [Quelle: Getriebebau NORD]

Elektrodirektantrieb wäre hierfür eine sehr große Maschine erforderlich, da das Volumen ein Elektromotor vom Drehmoment und nicht von der Leistung bestimmt wird (Bild 2.12). Aus diesem Grund werden viele Getriebemotoren über Umrichter drehzahlvariabel betrieben, wenn man nicht auf die Torque-Motoren mit ihren großen Drehmomenten auch bei kleinen Drehzahlen ausweichen kann.

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.

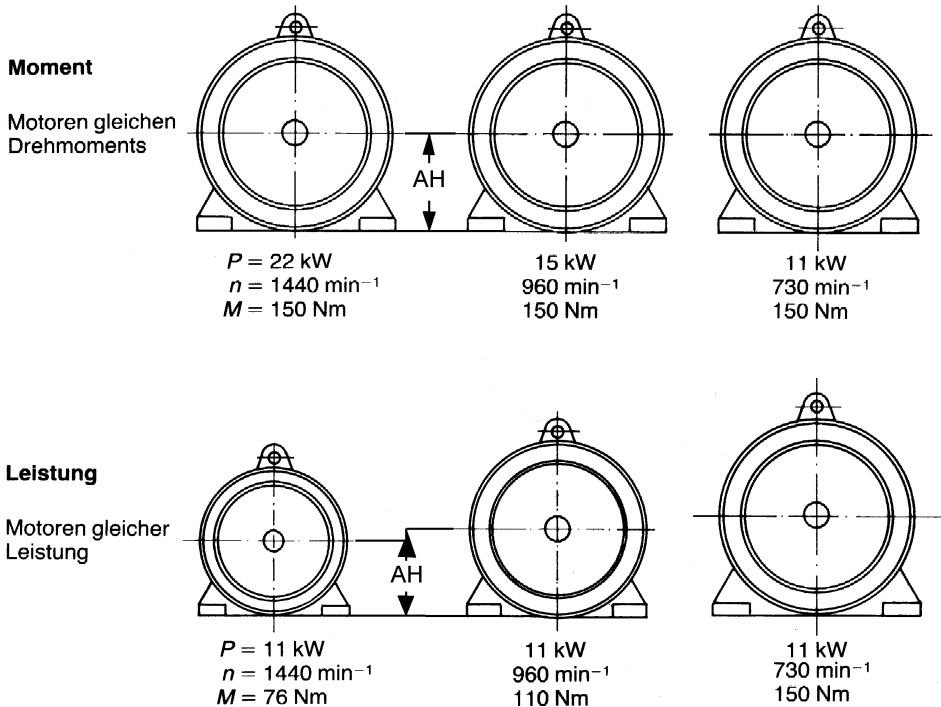


Bild 2.12 Systemvergleich

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

# 3 Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik

## 3.1 Grundsystem des Antriebs

Elektrische Antriebe können grob aufgeteilt werden in solche, die direkt am Netz (Direct on Line, DOL) angeschaltet laufen, und solche, die über mechanische oder elektronische Stellglieder (Frequenzumrichter, Drive Controller) an einem Netz arbeiten. Direkt am Wechselstromnetz laufen z.B. die vielen Kleinantriebe in den Geräten im Haushalt (in der sog. Weißen Ware), in kleinen Werkzeugen, als Antriebe für Pumpen und Lüfter im HKL-Bereich im Leistungsbereich bis ca. 2 kW. Bei größeren Leistungen werden die Antriebe direkt an das Drehstromnetz angeschlossen oder über Starter eingeschaltet oder über Drive-Control-Geräte (Frequenzumrichter) drehzahlvariabel betrieben. Alle diese Antriebe unterliegen jedoch denselben physikalischen Gesetzen, die das folgende Kapitel vorstellt.

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 Schalter oder die elektrische Maschine, hauptsächlich antreibend im Motorbetrieb, daher vom Praktiker 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. Leider 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  $\omega$  benutzt, während bei den Antrieben dann später praxisnah von der Drehzahl  $n$  gesprochen wird.

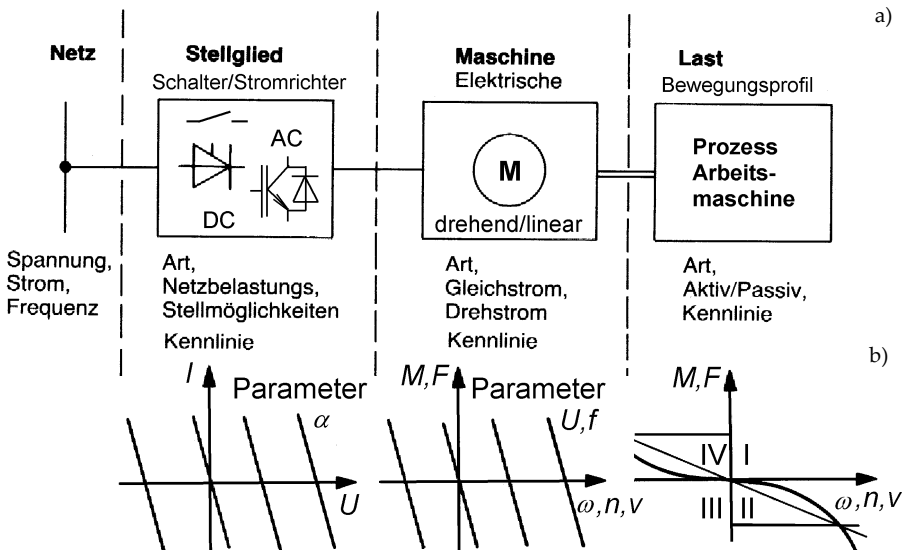


Bild 3.1 Grundsystem des Antriebs (a) mit den Kennlinien der Komponenten (b)

Tabelle 3.1 SI-Einheiten (Internationales Einheitensystem)

| SI-Basiseinheiten           |         |                 |         |
|-----------------------------|---------|-----------------|---------|
| SI-Basisgröße               |         | SI-Basiseinheit |         |
| Name                        | Zeichen | Name            | Zeichen |
| Länge                       | $l$     | Meter           | m       |
| Masse                       | $m$     | Kilogramm       | kg      |
| Zeit                        | $t$     | Sekunde         | s       |
| elektrische Stromstärke     | $I$     | Ampere          | A       |
| thermodynamische Temperatur | $T$     | Kelvin          | K       |
| Stoffmenge                  | $n$     | Mol             | mol     |
| Lichtstärke                 | $I_v$   | Candela         | cd      |

| Abgeleitete SI-Einheiten mit besonderen Namen (Auszug) |              |          |                                |
|--|--------------|----------|--------------------------------|
| Größe  | SI-Einheit   |          | Beziehung                      |
|  | Name         | Zeichen  |                                |
| ebener Winkel  | Radian       | rad      | 1 rad = 1 m/ m                 |
| Winkelgeschwindigkeit                                  | Radian/s     | $\omega$ | 1 rad/s = 1/s                  |
| Frequenz eines periodischen Vorganges                  | Hertz        | Hz       | 1 Hz = 1 s <sup>-1</sup>       |
| Kraft  | Newton       | N        | 1 N = 1 kgm/s <sup>2</sup>     |
| Druck  | Pascal       | Pa       | 1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>      |
| Energie, Arbeit, Wärmemenge                            | Joule        | J        | 1 J = 1 Nm = 1 Ws              |
| Leistung, Wärmestrom                                   | Watt         | W        | 1 W = 1 J/s                    |
| elektrische Ladung, Elektrizitätsmenge                 | Coulomb      | C        | 1 C = 1 A · s                  |
| elektrisches Potential, elektrische Spannung           | Volt         | V        | 1 V = 1 J/C                    |
| elektrische Kapazität                                  | Farad        | F        | 1 F = 1 C/V                    |
| elektrischer Widerstand                                | Ohm          | $\Omega$ | 1 $\Omega$ = 1 V/A             |
| elektrischer Leitwert                                  | Siemens      | S        | 1 S = 1 $\Omega$ <sup>-1</sup> |
| magnetischer Fluss                                     | Weber        | Wb       | 1 Wb = 1 V · s                 |
| magnetische Flussdichte, magnetische Induktion         | Tesla        | T        | 1 T = 1 Wb/m <sup>2</sup>      |
| Induktivität   | Henry        | L        | 1 H = 1 Wb/A                   |
| Celsius-Temperatur                                     | Grad Celsius | °C       | 1 °C = 1 K                     |

### Praxistipp

$\omega$  ist überschlägig  $n/10$ , wenn man  $n$  in  $\text{min}^{-1}$  einsetzt. Bei  $1500 \text{ min}^{-1}$  ist  $\omega$  etwa  $150 \text{ s}^{-1}$ .

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

In Bild 3.2a sind die Kenngrößen für die Beschreibung des Antriebsgrundsystems abgebildet. Die angetragene positive Zählrichtung<sup>1</sup> ist frei, aber zweckmäßig gewählt. Sie gibt die positiven Zählrichtungen für alle eingetragenen elektrischen und mechanischen Größen an.

Damit sind auch die für jeden Antrieb charakteristischen vier möglichen Betriebsquadranten festgelegt (Bild 3.2b). Zwei Betriebsarten der elektrischen Maschine lassen sich unterscheiden:

- Motorbetrieb (treiben) = Abgabe mechanischer Energie an der «Motor»-Welle im I. und III. Quadranten und
- Generatorbetrieb (bremsen) = Aufnahme mechanischer Energie an der «Generator»-Welle im II. und IV. Quadranten (Bremsbetrieb), u.U. mit Rückspeisung ins Netz (Nutzbremsung) [3.1].

<sup>1</sup> 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.

## 3.2 Physikalische Gesetze

Für die mechanische Behandlung eines Antriebsproblems reichen drei Gesetze aus: