

The background of the cover is a blurred, long-exposure photograph of industrial machinery, likely a manufacturing or assembly line. The image shows various mechanical components, metal frames, and what appears to be a conveyor system. The motion blur creates a sense of rapid movement and activity. The colors are predominantly blue, grey, and yellow, with some bright highlights from the machinery's lights.

SIEMENS

Jens Weidauer

Elektrische Antriebstechnik

Grundlagen, Auslegung,
Anwendungen, Lösungen

4. Auflage

Weidauer Elektrische Antriebstechnik

Elektrische Antriebstechnik

Grundlagen · Auslegung · Anwendungen · Lösungen

von Jens Weidauer

4., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2019

Publicis Publishing

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Fachbuch entstand unter Mitwirkung von sfb Bildungszentrum.
www.sfb.ch

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 in diesem Buch wiedergegebenen Bezeichnungen können Warenzeichen sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der Inhaber verletzen kann.

www.publicis-books.de

Print ISBN: 978-3-89578-483-5

ePDF ISBN: 978-3-89578-969-4

4. Auflage, 2019

Herausgeber: Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München
Verlag: Publicis Pixelpark, Erlangen

© 2019 by by Publicis Pixelpark Erlangen – eine Zweigniederlassung der Publicis Pixelpark GmbH

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Bearbeitungen sonstiger Art sowie für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Dies gilt auch für die Entnahme von einzelnen Abbildungen und bei auszugsweiser Verwendung von Texten.

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

1 Elektrische Antriebe im Überblick	12
1.1 Historischer Abriss der Antriebstechnik	12
1.2 Aufbau moderner elektrischer Antriebe	16
1.3 Systematik elektrischer Antriebe	18
1.3.1 Drehzahlverstellbarkeit	19
1.3.2 Motortyp und Art des Stellgeräts	21
1.3.3 Technische Daten	23
2 Mechanische Grundlagen	26
3 Elektrotechnische Grundlagen	28
3.1 Felder in der Elektrotechnik	28
3.2 Entstehung des Drehmoments	30
3.2.1 Lorentzkraft	30
3.2.2 Leiterschleife im Magnetfeld	32
3.2.3 Spannungsinduktion	33
3.2.4 Größen und Gleichungen der Elektrotechnik	33
3.2.5 Bauelemente der Elektrotechnik	34
4 Konstantantriebe und drehzahlveränderliche Antriebe mit Gleichstrommotor	36
4.1 Gleichstromantriebe	36
4.2 Der Gleichstrommotor	37
4.2.1 Funktionsprinzip	37
4.2.2 Konstruktiver Aufbau und elektrische Anschlüsse	42
4.2.3 Wartung des Gleichstrommotors	44
4.2.4 Mathematische Beschreibung	45
4.2.5 Regelbarkeit	46
4.3 Konstantantriebe mit Gleichstrommotor	48
4.3.1 Aufbau und Anwendungsbereich	48
4.3.2 Nebenschlussverhalten	48
4.3.3 Reihenschlussverhalten	51
4.4 Drehzahlveränderliche Antriebe mit Gleichstrommotor	52
4.4.1 Aufbau und Anwendungsbereich	52
4.4.2 Stromrichter	53
4.4.3 Drehzahlgeber für Gleichstromantriebe	60
4.4.4 Regelungsstruktur	62

5 Konstantantriebe und drehzahlveränderliche Antriebe mit Asynchronmotor	65
5.1 Antriebe mit Asynchronmotor	65
5.2 Der Asynchronmotor	66
5.2.1 Funktionsprinzip	66
5.2.2 Konstruktiver Aufbau und elektrische Anschlüsse	69
5.2.3 Mathematische Beschreibung	72
5.2.4 Regelbarkeit	77
5.3 Konstantantriebe mit Asynchronmotor	79
5.3.1 Aufbau und Anwendungsbereich	79
5.3.2 Anlauf des Asynchronmotors	81
5.3.3 Bremsen des Asynchronmotors	86
5.4 Drehzahlveränderliche Antriebe mit Asynchronmotor	87
5.4.1 Aufbau und Anwendungsbereich	87
5.4.2 Drehzahländerung mit Schützen	88
5.4.3 Drehzahländerung mit Frequenzumrichtern	91
5.4.4 Betrieb mit U/f-Steuerung	98
5.4.5 Betrieb mit Vektorregelung	101
5.4.6 Drehzahlgeber	105
5.5 Funktionen moderner Frequenzumrichter	109
5.5.1 Allgemeines	109
5.5.2 Leistungsoptionen	109
5.5.3 Elektronikoptionen	111
5.5.4 Prozessschnittstelle	113
5.5.5 Anwenderschnittstelle	115
5.5.6 Regelungs- und Steuerungsfunktionen	116
6 Servoantriebe	126
6.1 Aufbau und Anwendungsbereich	126
6.2 Systematik der Servoantriebe	128
6.2.1 Regelfunktionen	128
6.2.2 Motortyp, Art des Stellgeräts	129
6.2.3 Technische Daten	131
6.3 Drehzahl- und Lagegeber für Servoantriebe	132
6.3.1 Systematik und Kenndaten	132
6.3.2 Kommutierungsgeber	136
6.3.3 Resolver	137
6.3.4 Sin-Cos-Geber	140
6.3.5 Absolutwertgeber	142
6.4 Servoantriebe mit Gleichstrommotor	144
6.4.1 Aufbau und Anwendungsbereich	144
6.4.2 Gleichstrommotoren für Servoantriebe	144
6.4.3 Pulssteller für Servoantriebe mit Gleichstrommotor	145
6.4.4 Regelungsstruktur	148
6.5 Servoantriebe mit bürstenlosem Gleichstrommotor (Blockkommutierung)	149
6.5.1 Aufbau und Anwendungsbereich	149
6.5.2 Der bürstenlose Gleichstrommotor	150

6.5.3 Frequenzumrichter für Servoantriebe mit bürstenlosem Gleichstrom- motor	153
6.5.4 Regelungsstruktur	155
6.6 Servoantriebe mit Synchronmotor (Sinuskommutierung)	156
6.6.1 Aufbau und Anwendungsbereich	156
6.6.2 Der Synchronmotor	157
6.6.3 Frequenzumrichter für Servoantriebe mit Synchronmotor	159
6.6.4 Regelungsstruktur	159
6.7 Servoantriebe mit Asynchronmotor	161
6.8 Direktantriebe	162
6.8.1 Aufbau und Anwendungsbereich	162
6.8.2 Linearmotor	164
6.8.3 Torquemotor	166
6.9 Regelung und Optimierung von Servoantrieben	167
6.9.1 Allgemeine Gütekriterien zur Beurteilung von Regelkreisen	167
6.9.2 Regelkreise bei Servoantrieben	172
6.9.3 Optimierung des Stromregelkreises	173
6.9.4 Optimierung des Drehzahlregelkreises	176
6.9.5 Optimierung des Lageregelkreises	180
6.10 Funktionen moderner Servosteller	182
6.10.1 Allgemeines	182
6.10.2 Leistungsoptionen	182
6.10.3 Elektronikoptionen	183
6.10.4 Prozessschnittstelle	183
6.10.5 Anwenderschnittstelle	183
6.10.6 Regelungs- und Steuerungsfunktionen	184
7 Schrittantriebe	187
7.1 Aufbau und Anwendungsbereich	187
7.2 Systematik der Schrittantriebe nach Motortyp	188
7.3 Technische Daten	189
7.4 Der Schrittmotor	190
7.4.1 Allgemeines	190
7.4.2 Permanentmagnetschrittmotor	191
7.4.3 Hybridschrittmotor	192
7.5 Ansteuergeräte	194
7.6 Regelverhalten	197
8 Elektrische Antriebssysteme im Überblick	200
8.1 Vom Antrieb zum Antriebssystem	200
8.2 Systematik elektrischer Antriebssysteme	202
8.2.1 Komponenten in Antriebssystemen	202
8.2.2 Funktionalität von Antriebssystemen	206
8.2.3 Informationsfluss in Antriebssystemen	208
8.2.4 Energiefluss zwischen Antrieben	210
8.2.5 Elektromagnetische Beeinflussungen	211
8.3 Auslegung von elektrischen Antrieben als Systemaufgabe	211

9 Feldbusse für elektrische Antriebe	212
9.1 Veranlassung und Funktionsprinzip	212
9.2 Übersicht gebräuchlicher Feldbusse	217
9.3 AS-Interface	217
9.3.1 Übersicht	217
9.3.2 Topologie, Verkabelung, Physik	218
9.3.3 Zugriffsverfahren	221
9.4 CAN	222
9.4.1 Übersicht	222
9.4.2 Topologie, Verkabelung, Physik	223
9.4.3 Zugriffsverfahren	225
9.4.4 Projektierung	226
9.5 PROFIBUS DP	227
9.5.1 Übersicht	227
9.5.2 Topologie, Verkabelung, Physik	228
9.5.3 Zugriffsverfahren	230
9.5.4 PROFIBUS DP-V2	232
9.5.5 Projektierung	234
9.6 PROFINET I/O	237
9.6.1 Übersicht	237
9.6.2 Topologie, Verkabelung, Physik	239
9.6.3 Zugriffsverfahren	241
9.6.4 Gerätebeschreibungen zur Projektierung	246
10 Prozessregelung mit elektrischen Antrieben	247
10.1 Begriffsdefinition	247
10.2 Prozessregelung mit Einzelantriebssystemen	247
10.2.1 Komponenten	247
10.2.2 Beispiel: Füllstandsregelung mit Konstantantrieb	249
10.2.3 Beispiel: Druckregelung	250
10.2.4 Beispiel: Aufzugantrieb	252
10.3 Prozessregelung mit Mehrantriebssystemen	254
10.3.1 Komponenten	254
10.3.2 Beispiel: Fahrwerksantrieb mit mechanisch gekoppelten Antrieben	257
10.3.3 Beispiel: Beschichtungsanlage mit Zug- und Wickelantrieben	261
10.4 Antriebe mit integrierten Technologiefunktionen	271
11 Motion Control mit elektrischen Antrieben	274
11.1 Begriffsdefinition und Funktionen	274
11.2 Darstellung und Verarbeitung von Lageinformationen	277
11.3 Positionieren	280
11.3.1 Anwendungen und Grundlagen	280
11.3.2 Positioniersteuerung	281
11.3.3 Maschinendaten	286
11.3.4 Lageerfassung, Lageaufbereitung und Referenzieren	287

11.4 Gleichlauf (Synchronisieren)	291
11.4.1 Anwendungen und Grundlagen	291
11.4.2 Gleichlaufsteuerung	292
11.4.3 Maschinendaten	305
11.5 Motion Control mit PLCopen	305
11.6 Sicherheitsfunktionen in elektrischen Antrieben	308
11.6.1 Anwendungen und Grundlagen	308
11.6.2 Sichere Stoppfunktionen	311
11.6.3 Sichere Bewegungsfunktionen	313
11.6.4 Sichere Feldbusse	315
12 EMV in der elektrischen Antriebstechnik	316
12.1 Grundlagen	316
12.1.1 Veranlassung und Begriffsdefinition	316
12.1.2 EMV-Beeinflussungsmodell	317
12.1.3 Koppelmechanismen	318
12.1.4 Mathematische Beschreibung	324
12.2 Elektrische Antriebe als Störquelle	328
12.2.1 Galvanische Störungen bei Gleichstromantrieben mit Stromrichter, Gegenmaßnahmen	328
12.2.2 Galvanische Störungen bei Stellgeräten mit Gleichspannungs- zwischenkreis, Gegenmaßnahmen	330
12.2.3 Galvanische Störungen durch Wechselrichter, Gegenmaßnahmen	333
12.2.4 Feldgebundene Störungen durch den Wechselrichter	339
12.2.5 Feldgebundene Störungen durch digitale Antriebe, Gegenmaßnahmen	341
12.3 Elektrische Antriebe als Störsenke	342
12.3.1 Allgemeines	342
12.3.2 Galvanische Störungen, Gegenmaßnahmen	343
12.3.3 Kapazitive Störungen, Gegenmaßnahmen	344
12.3.4 Induktive Störungen, Gegenmaßnahmen	345
12.4 EMV-Regeln	347
13 Auslegung elektrischer Antriebe	349
13.1 Vorgehensweise	349
13.2 Auswahl der Antriebsart	350
13.2.1 Eliminieren der ungeeigneten Antriebsarten	350
13.2.2 Auswahl der optimalen Antriebsart	352
13.3 Motorauslegung	356
13.3.1 Vorgehensweise	356
13.3.2 Berücksichtigung des Getriebes	356
13.3.3 Auslegung des Motors nach mechanischen Kenngrößen	363
13.3.4 Thermische Auslegung des Motors	369
13.3.5 Konstruktive Auslegung des Motors	375
13.3.6 Auswahl des Gebers	379

- 13.4 Auslegung des Stellgeräts bei drehzahlveränderlichen Antrieben
und Servoantrieben 382
 - 13.4.1 Elektrische Auslegung des Stellgeräts 382
 - 13.4.2 Thermische Auslegung des Stellgeräts 382
 - 13.4.3 Thermische Auslegung der Netzeinspeisung 388
 - 13.4.4 Auslegung der Netzeinspeisung bezüglich der Zwischenkreiskapazität . 392
 - 13.4.5 Auslegung des Bremschoppers und des Bremswiderstandes 393
 - 13.4.6 Auswahl der Leistungsoptionen 396
 - 13.4.7 Elektronikoptionen, Zubehör, Verbindungstechnik 396
- 13.5 Auslegungsbeispiel 397
 - 13.5.1 Anwendungsdaten 397
 - 13.5.2 Auslegung 398

- 14 Fehlerbehebung bei elektrischen Antrieben 402**
 - 14.1 Fehlervermeidung und Fehlerbehebung 402
 - 14.2 Fehlermöglichkeiten bei elektrischen Antrieben 403
 - 14.2.1 Motorfehler 404
 - 14.2.2 Geberfehler 405
 - 14.2.3 Fehler im Stellgerät 406
 - 14.2.4 Netzfehler 407
 - 14.2.5 Kommunikationsfehler 408
 - 14.2.6 EMV-Probleme 409
 - 14.2.7 Projektierungsfehler 410
 - 14.2.8 Parametrierfehler 411
 - 14.3 Fehlermeldungen elektrischer Antriebe 412

- Sachwortverzeichnis 415**

1 Elektrische Antriebe im Überblick

1.1 Historischer Abriss der Antriebstechnik

Elektrische Antriebe wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um und dienen als Mittler zwischen dem elektrischen Netz als Energiequelle und der Arbeitsmaschine als Energieverbraucher.

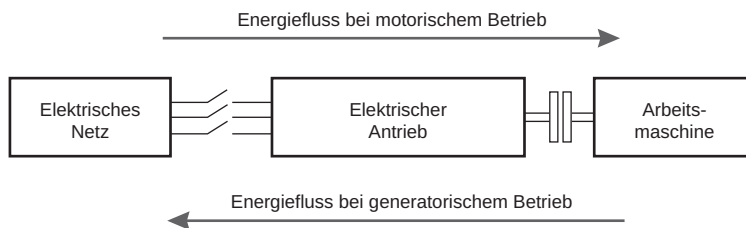


Bild 1.1 Elektrische Antriebe als Mittler zwischen Energieversorgungsnetz und Arbeitsmaschine

Aufgrund dieser zentralen Stellung im Energiefluss sind elektrische Antriebe zu Schlüsselkomponenten in industriellen Anwendungen, aber auch im Transportwesen und in Konsumgütern geworden. Sie haben die technische Entwicklung auf vielen Gebieten vorangetrieben, waren aber auch selbst Gegenstand zahlreicher Entwicklungsschritte.

Die Kernkomponente eines jeden elektrischen Antriebs ist der Elektromotor. Die ihm zugrunde liegenden Naturgesetze wurden zu Beginn des 19. Jh. erkannt.

Entdeckung der
Grundlagen
1820 bis 1875

1820 entdeckte Hans Christian Oerstedt, dass eine Magnethadel in der Nähe eines stromführenden Leiters abgelenkt wird. Im gleichen Jahr machte André Marie Ampère seine grundlegenden Entdeckungen über die Wechselwirkungen zwischen elektrischen Strömen und Magnetfeldern. Diese Entdeckungen führten zur Entwicklung einer großen Zahl von „elektromagnetischen Maschinen“, die allerdings nur geringe praktische Bedeutung erlangten, da keine leistungsfähigen elektrischen Energiequellen zur Verfügung standen. Strom wurde aus galvanischen Zellen gewonnen, was einen breiten Einsatz dieser „Maschinen“ verhinderte. Sie konnten sich gegen die Dampfmaschine und die verschiedenen Arten von Gas- und Benzinmotoren nicht durchsetzen.

Ein wichtiger Schritt wurde 1831 getan. Damals entdeckte Michael Faraday die elektromagnetische Induktion. Dieser Effekt wurde alsbald in Generatoren angewendet. 1866 erfand Werner von Siemens die Dynamomaschine. Dieser Gleichstromgenerator nutzt den in den Magnetpolen befindlichen Remanenzfluss, um zunächst einen kleinen Induktionsstrom zu erzeugen. Dieser Induktionsstrom wird zum weiteren Aufbau des Erregerfeldes verwendet, so dass sich der Generator zur vollen Leistung „aufschauelt“. Aus diesen Generatoren heraus entwickelten sich später die modernen Elektromotoren.

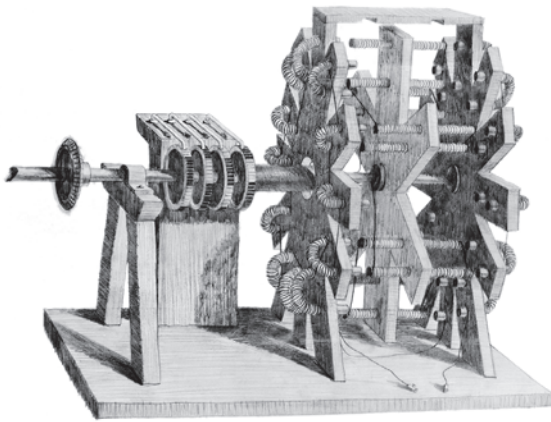


Bild 1.2 Elektromotor von Moritz Hermann Jacobi, 1818
Foto: Deutsches Museum München

Ein zentrales technisches Problem am Ende des 19. Jh. war die Bereitstellung kleinerer Energiemengen für Arbeitsmaschinen in Gewerbebetrieben. Der Einsatz von Dampfmaschinen erforderte einen hohen Aufwand und war aus Sicherheitsgründen auch nicht überall möglich. Verbreitet waren deshalb Gasmotoren. Diese bekamen durch weiterentwickelte und stetig verbesserte Dynamomaschinen Konkurrenz. Dabei wurden 2 Dynamomaschinen elektrisch verbunden. Eine Maschine arbeitete als Generator, die andere Maschine als Motor. Auf diese Weise konnte die elektrische Energie an einer Stelle erzeugt, über eine längere Entfernung transportiert und an dem Ort, wo sie benötigt wurde, in mechanische Energie zurück verwandelt werden. Man benutzte die Elektroenergie als Ersatz für mechanische Energieübertragungen. Schwerpunkt der Anwendungen waren elektrische Lokomotiven und Straßenbahnen, aber auch erste Maschinenantriebe (z. B. für einen Webstuhl) wurden realisiert.

**Elektrische Kraft-
übertragungen
1875 bis 1891**

1887 tauchte erstmals der Begriff „Elektromotor“ in einem Verkaufskatalog auf. 1891 beschrieb man die Vorteile des Elektromotors im Vergleich zu Dampfmaschinen und Gasmotoren wie folgt:

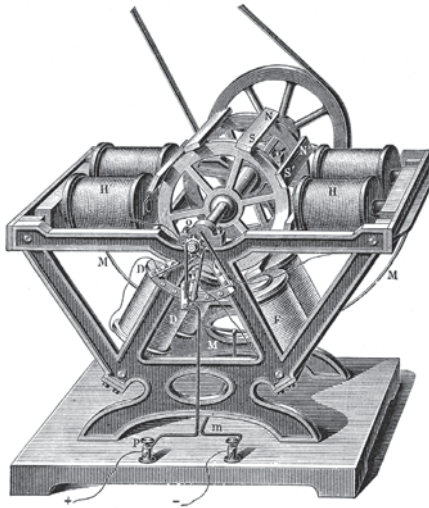


Bild 1.3 Froments elektromagnetischer Radmotor
(nach Meyers Konversations-Lexikon 1886)
Foto: Deutsches Museum München

- Sie benötigen keine festen Fundamente, sind in beliebigen Lagen montierbar, benötigen wenig Platz und können in bewohnten Räumen verwendet werden.
- Sie liefern vergleichsweise hohe Drehzahlen, sind in der Drehzahl und Drehrichtung verstellbar, besitzen einen günstigen Wirkungsgrad und sind einfach zu bedienen.

1889 hatte Michael von Dolivo-Dobrowolski den Drehstrom-Käfigläufermotor erfunden. Von ihm wurde auch der Name Drehstrom geprägt.

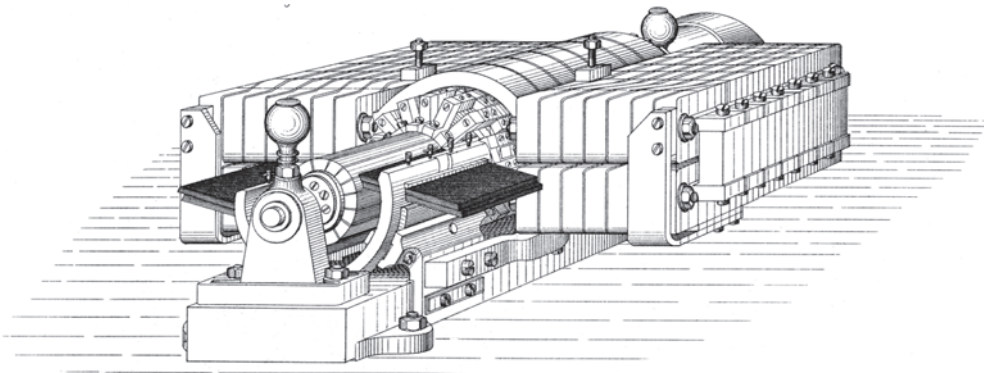


Bild 1.4 Dynamomaschine Siemens & Halske,
1877 geliefert für das Hüttenwerk Oker.
Foto: Deutsches Museum München

Außerdem wurde 1891 von Lauffen am Neckar nach Frankfurt a. M. über 175 km die erste Drehstromübertragung realisiert. Damit war das Zeitalter der Wechselstromtechnik eingeläutet.

Auf der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt 1891 wurde erstmalig ein vollständiges System aus Generatoren, Transformatoren, Übertragungsleitungen und Motoren gezeigt. Damit waren die Grundlagen für die flächendeckende Einführung von Energieversorgungsnetzen und Elektroantrieben in Produktion und Gewerbe gegeben. In ihren technischen Parametern und in ihrem Anlaufverhalten wurden die Elektromotoren kontinuierlich verbessert. Über Widerstandsschaltungen und den Leonard-Satz (Umformer zur Spannungs- und Frequenzwandlung) standen regelbare Elektroantriebe zur Verfügung. Schritt für Schritt führte das zur Ablösung der Dampfmaschinen und Transmissionssysteme in den Produktionsstätten. Die Maschinenanordnung konnte jetzt auf den Produktionsprozess optimiert werden und musste sich nicht mehr den Zwängen der Energiezuführung über Transmissionswellen unterordnen.

**Elektrische
Antriebe in
Gewerbe und
Industrie
1891 bis 1920**

Ca. ab 1920 verbreiteten sich elektrische Antriebe in allen Bereichen der Industrie, der Landwirtschaft, des Handwerks, des Transportwesens und in den Haushalten. Typische Antriebslösungen bestanden aus Gleichstrom- oder Drehstrommotoren, die je nach Bedarf mit Regelsätzen zur Drehzahlverstellung ergänzt wurden. Die Anzahl der Elektroantriebe nahm stark zu. Die Elektromotoren entwickelten sich in zwei Richtungen: zu integrierten Lösungen innerhalb der Arbeitsmaschine und zu standardisierten Massenprodukten. Der Asynchronmotor wurde in der industriellen Anwendung zum am weitesten verbreiteten Motortyp. Zur Drehzahlveränderung wurden neben Schützsteuerungen auch erste Stellgeräte auf der Basis von Quecksilberdampfströmen verwendet. Damit hielt die Leistungselektronik Einzug in die elektrische Antriebstechnik.

**Elektrische
Antriebe verbreiten
sich überall
1920 bis 1950**

Mit der Entwicklung der Leistungshalbleiter begann die Ablösung der Quecksilberdampfströmen. Parallel entwickelte sich die Regelungstechnik auf der Basis analoger elektronischer Bauelemente, was wiederum die Verbreitung drehzahlveränderbarer Antriebe förderte. Die einfache Regelbarkeit von Gleichstrommotoren führte zu ihrem Wiedererstarken.

**Stromrichter-
antriebe
1950 bis 1970**

Die Einführung von Mikroprozessoren bewirkte einen Entwicklungsschub in der elektrischen Antriebstechnik. Die vormals analogen Regler wurden durch digitale Regler abgelöst. Deren Leistungsfähigkeit steigt kontinuierlich, so dass immer komplexere Regelfunktionen realisiert werden. Die Entwicklung der „feldorientierten Regelung“ durch Blaschke 1971 und ihre Umsetzung in prozessorgesteuerten digitalen Antrieben ermöglichte für Drehstrommotoren eine den Gleichstrommotoren vergleichbare Regeltüte.

**Antriebe mit
Mikroprozessor
seit 1970**

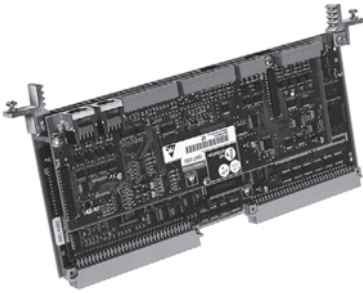


Bild 1.5 Digitale Regelungsbaugruppe für einen Gleichstromantrieb

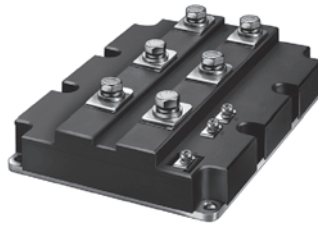


Bild 1.6 Hochleistungs-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) für Frequenzumrichter

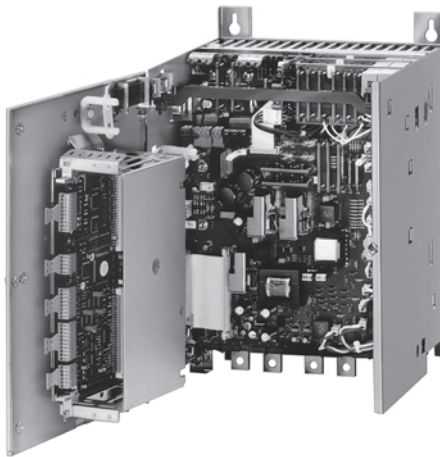


Bild 1.7 Moderner digitaler Stromrichter für Gleichstromantriebe

Die Verfügbarkeit von immer leistungsfähigeren Mikroprozessoren ermöglicht die Integration von ursprünglich antriebsfremden Funktionen in die Stellgeräte. Die Grenzen zwischen elektrischen Antrieben und Automatisierungsgeräten sind fließend geworden. Antriebssysteme, die aus elektronisch koordinierten Servoantrieben kleiner Leistung bestehen, lösen immer mehr die bisherigen Zentralantriebe mit mechanischen Getrieben und Königswellen ab.

1.2 Aufbau moderner elektrischer Antriebe

Die von elektrischen Antrieben bereitgestellte mechanische Energie dient zur Beeinflussung von Prozessgrößen in Arbeitsmaschinen. Die mechanische Energie muss entsprechend den Anforderungen des Prozesses dosiert bzw. zu- und abgeschaltet werden. Aus diesem Grund bestehen heutige elektrische Antriebe nicht nur aus einem Elektromo-

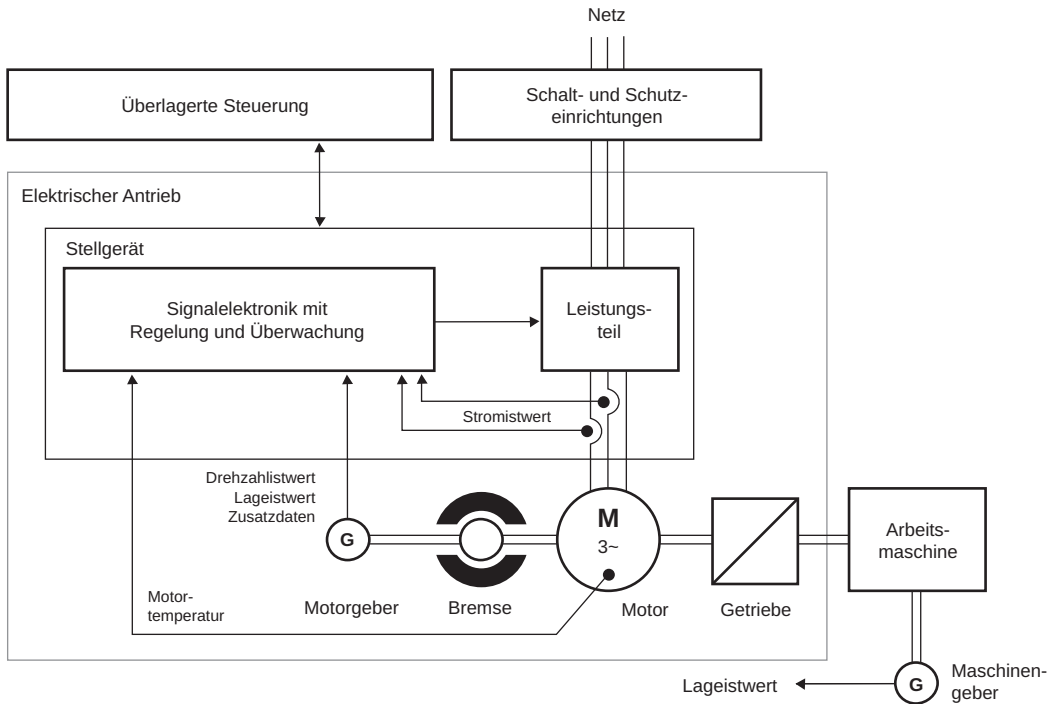


Bild 1.8 Aufbau moderner elektrischer Antriebe

tor, sondern weisen eine ganze Reihe weiterer Komponenten auf (siehe Bild 1.8).

Das Herzstück eines jeden elektrischen Antriebs ist sein Elektromotor. Er dient als Energiewandler, der die zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie umsetzt. Im generatorischen Betrieb (z. B. bei Bremsvorgängen) erfolgt der Energiefluss in entgegengesetzter Richtung; dann wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Elektromotor

Der am Motor angebaute Geber (Motorgeber) ermittelt aktuelle Bewegungsgrößen wie Drehzahl, Geschwindigkeit und Lage und stellt sie der Signalelektronik zur Verfügung.

Motorgeber

Die Bremse unterstützt das Stellgerät beim Abbremsen des Motors und verhindert Bewegungen des Motors bei abgeschaltetem Stellgerät. Besonders bei „hängenden“ Lasten (z. B. Roboterarmen, Aufzügen, Hubwerken) sorgt die Bremse für die Fixierung des mechanischen Systems auch im inaktiven Zustand des Antriebs.

Bremse

Das Getriebe ist ein mechanischer Wandler. Es passt die vom Motor abgegebenen mechanischen Größen wie Drehzahl und Drehmoment an die Erfordernisse der Arbeitsmaschine an.

Getriebe

	Eine weitere Aufgabe von Getrieben besteht darin, bei Bedarf die rotatorische Bewegung des Motors in eine lineare Bewegung zu wandeln.
Schalt- und Schutzeinrichtungen	Schalt- und Schutzeinrichtungen trennen den elektrischen Antrieb bei Bedarf vom Netz und schützen den Antrieb sowie die Versorgungsleitungen vor Überlastung. Überlastungen können zum einen durch die Arbeitsmaschine, aber auch durch Fehler im Antrieb hervorgerufen werden.
Stellgerät	Das Stellgerät besteht aus dem Leistungsteil und der Signalelektronik: • Das <i>Leistungsteil</i> „portioniert“ die dem Motor zugeführte elektrische Energie und beeinflusst damit die vom Motor abgegebene mechanische Energie. Leistungsteile elektrischer Antriebe sind heute aus Leistungshalbleitern aufgebaut. Diese arbeiten als elektronische Schalter, über die die elektrische Energiezufuhr zum Motor an- und abgeschaltet wird. Integrierte Messsysteme erfassen die elektrischen Ströme und Spannungen und stellen sie der Signalelektronik zur Verfügung. • Die <i>Signalelektronik</i> ist das „Gehirn“ des elektrischen Antriebs. Sie bestimmt die Steuersignale für das Leistungsteil so, dass sich an der Motorwelle die gewünschten Kräfte bzw. Bewegungen einstellen. Dazu verfügt die Signalelektronik über verschiedene Steuer- und Regelfunktionen. Die erforderlichen Istwerte der elektrischen Größen erhält die Signalelektronik vom Leistungsteil, mechanische Größen wie Drehzahl und Lage werden vom Motorgeber bereitgestellt. Ihre Sollwerte erhält die Signalelektronik von einer überlagerten Steuerung. An diese gibt sie auch aktuelle Istwerte zurück. Neben den erforderlichen Steuer- und Regelfunktionen übernimmt die Signalelektronik auch Schutzfunktionen und verhindert unzulässige Überlastungen für das Leistungsteil und den Motor.

1.3 Systematik elektrischer Antriebe

Elektrische Antriebe sind äußerst vielgestaltig und in unterschiedlichsten Ausführungen verfügbar. Ihre Systematik ist deshalb relativ schwierig und kann nur unter Betrachtung ausgewählter Kriterien, also aus einem ganz bestimmten Blickwinkel heraus erfolgen. Die Kombinationen und konkreten Ausführungen dieser Kriterien ergeben dann die Vielzahl möglicher Antriebslösungen.

Nachfolgend werden elektrische Antriebe unter folgenden Kriterien systematisiert:

- Verstellbarkeit der Drehzahl
- Motortyp und Stellgerät
- Technische Daten

1.3.1 Drehzahlverstellbarkeit

Die Anforderungen einer Anwendung an die Drehzahlverstellbarkeit sind oft entscheidend für die Wahl einer Antriebslösung. Entsprechend der Fähigkeiten zur Drehzahlverstellung lassen sich grob 3 Kategorien von Antrieben bilden:

- Konstantantriebe
- Drehzahlveränderliche Antriebe
- Servoantriebe

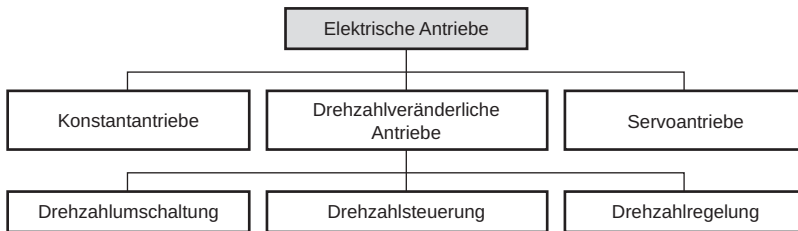


Bild 1.9

Klassifizierung elektrischer Antriebe bezüglich der Drehzahlverstellbarkeit

Konstantantriebe werden mit einer festen Drehzahl betrieben. Sie verfügen lediglich über Einrichtungen zum Zu- und Abschalten sowie zum Schutz vor Überlastung. Eine Einrichtung zur Drehzahlverstellung ist nicht vorhanden, so dass sich belastungsabhängig durchaus Drehzahl-schwankungen ergeben können. Typische Anwendungen für Konstantantriebe sind Lüfter und Pumpen, die mit einem Asynchronmotor direkt am Netz betrieben werden.

Konstantantriebe

Drehzahlveränderliche Antriebe sind in ihrer Drehzahl verstellbar und mit mindestens zwei verschiedenen Drehzahlen betreibbar. Diese Antriebe verfügen neben dem Elektromotor über ein Stellgerät, das für die Drehzahlverstellung verantwortlich ist. Je nach Anforderung ist das Stellgerät entsprechend komplex und gestattet unterschiedliche Stellbereiche und Genauigkeiten für die Drehzahl.

Drehzahlveränderliche Antriebe

- *Drehzahlumschaltbare Antriebe* ermöglichen den Betrieb mit mindestens zwei verschiedenen Drehzahlen. Beispielanwendungen sind drehzahlumschaltbare Lüfter und Pumpen oder Fahrwerke mit Vor- und Rückbewegung. Zum Einsatz kommen hier typischerweise Asynchronmotoren mit Schützsteuerungen.
- *Drehzahlsteuerbare Antriebe* sind in ihrer Drehzahl stufenlos verstellbar. Allerdings erfolgt auch hier keine Rückführung des Drehzahlwertes, so dass sich je nach Ausführung des Antriebs lastabhängig Abweichungen von der Solldrehzahl ergeben können. Für die Drehzahlsteuerung sind Stellgeräte mit elektronischen Leistungsteilen

erforderlich. Beispiele für derartige Antriebe sind Asynchronmotoren mit Frequenzumrichtern und U/f-Steuerung.

- *Drehzahlregelbare Antriebe* sind in ihrer Drehzahl ebenfalls stufenlos verstellbar und erfassen die aktuelle Drehzahl des Motors. Damit können Abweichungen der Drehzahl vom gewünschten Sollwert erkannt und korrigiert werden. Für drehzahlgeregelte Antriebe werden leistungsfähige Stellgeräte mit entsprechenden Regelalgorithmen benötigt. Eine sehr weit verbreitete Ausführung des drehzahlgeordneten Antriebs ist der Asynchronmotor mit Frequenzumrichter und vektorieller Regelung.



Bild 1.10

Frequenzumrichter und Asynchronmotoren
für drehzahlveränderliche Antriebe

Servoantriebe

Servoantriebe sind so optimiert, dass sie Drehzahländerungen sehr schnell und präzise ausführen können. Sie sind damit für komplexe Bewegungsvorgänge, die durch sich laufend ändernde Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind, besonders gut geeignet. Servoantriebe kommen in allen Bereichen des Maschinenbaus zum Einsatz und werden häufig durch Synchronmotoren mit Servostellern realisiert.

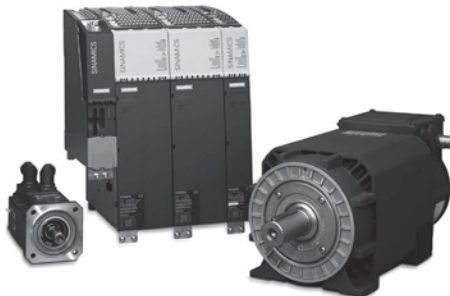


Bild 1.11 Stellgeräte und Motoren für Servoantriebe

Eng verbunden mit der Drehzahlverstellbarkeit ist die Fähigkeit der Antriebe zur Drehrichtungsumkehr und zur Energierückspeisung. Diese Eigenschaften eines elektrischen Antriebs werden in einem Drehzahl-Drehmoment-Diagramm dargestellt. Je nach Vorzeichen der Drehzahl und des Drehmoments ergeben sich 4 Betriebsquadranten (siehe Bild 1.12). In den beiden motorischen Quadranten haben Drehzahl und Drehmoment des Antriebs das gleiche Vorzeichen. In den generatorischen Quadranten sind Drehzahl und Drehmoment gegensinnig gerichtet.

**Betriebs-
quadranten**

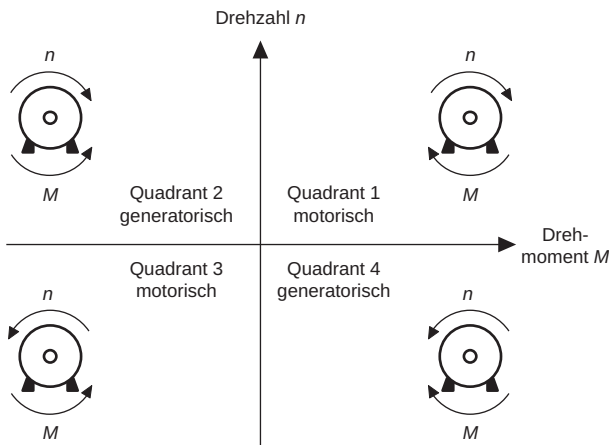


Bild 1.12 Klassifizierung elektrischer Antriebe nach Betriebsquadranten

Je nach Ausführung des Stellgeräts arbeiten elektrische Antriebe nur im 1. Quadranten (z. B. bei Pumpen) oder in allen 4 Quadranten (z. B. bei Hubwerken).

1.3.2 Motortyp und Art des Stellgeräts

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedenen Typen von Elektromotoren herausgebildet, die jeweils spezifische Stärken und Schwächen sowie bevorzugte Leistungsbereiche aufweisen. Aus diesem Grund und in Verbindung mit der sehr langen Lebensdauer von Motoren sind fast alle Motortypen auch heute noch anzutreffen. Berücksichtigt man zusätzlich die verschiedenen Ausprägungen an Stellgeräten, ergibt sich eine Vielzahl von Antriebsvarianten. Bild 1.13 zeigt eine Klassifizierung der Grundvarianten heute gebräuchlicher Motoren und ihrer möglichen Stellgeräte.

Entsprechend der Form des Motorstroms unterscheidet man Gleichstromantriebe und Wechsel- bzw. Drehstromantriebe.

- *Gleichstromantriebe* verwenden einen Gleichstrommotor. Bei kleineren Leistungen wird das erforderliche Magnetfeld mit Permanentmagneten, bei größeren Leistungen mit einer separaten Erregerwicklung erzeugt. Für Servoanwendungen kommen als Stellgeräte hochdynamische Pulssteller, für drehzahlveränderbare Antriebe Stromrichter zum Einsatz.
- *Wechselstromantriebe* verwenden Motoren, die mit ein- oder mehrphasigem Wechselstrom betrieben werden. Dabei hat die Frequenz des Motorstroms einen entscheidenden Einfluss auf die Motordrehzahl. Synchronmotoren folgen in ihrer Drehbewegung exakt der Frequenz des speisenden Stroms, während bei Asynchronmotoren eine Differenz zwischen der Frequenz des Motorstroms und der Drehfrequenz auftritt.

Antriebe mit Synchronmotoren verfügen im Allgemeinen über ein Stellgerät. Asynchronmotoren können sowohl direkt am Netz als auch mit Stellgeräten betrieben werden. Die Wahl des Stellgeräts hängt von den Anforderungen an die Drehzahlverstellbarkeit und die gewünschte Genauigkeit ab.

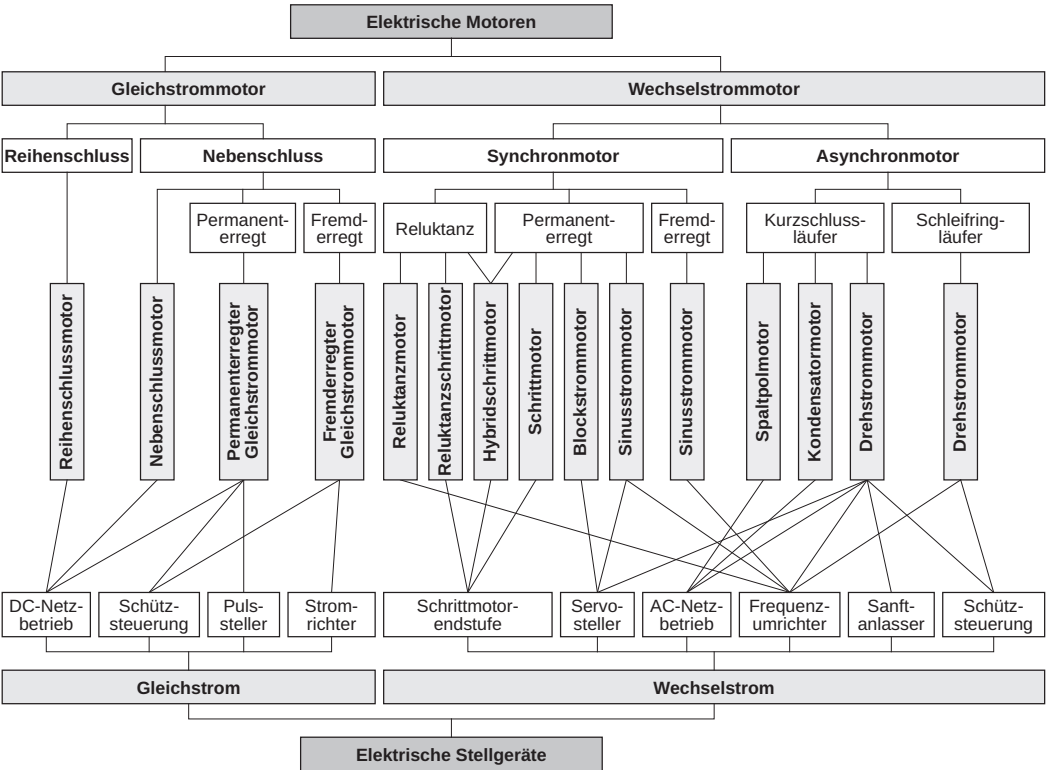


Bild 1.13 Klassifizierung elektrischer Antriebe nach Motor und Stellgerät

1.3.3 Technische Daten

Die technischen Daten sind das wesentliche Auswahlkriterium für elektrische Antriebe. Von zentraler Bedeutung sind dabei die mechanischen und elektrischen Kennwerte des Motors. Seine wichtigsten technischen Daten sind auf seinem Typenschild festgehalten (Bild 1.14).

Motordaten

	Hersteller	Gewicht	Fabriknummer	Baugröße	Bestellnummer	Wärmeklasse	Schutzart
Nennspannung	SIEMENS		3-Mot.		1LA7166-2AA60		
Nennfrequenz	D-91056 Erlangen		E0107/471101	01,001	IEC/EN 60034		
Nennleistung		93 kg	IM B3	160L	IP55	Th.Cl. F	
Nennstrom							
Leistungsfaktor							
Nennndrehzahl							

50 Hz 400/690 V Δ/Y	60 Hz 460 V Δ
18,5 kW 32,5/18,8 A	21,3 kW 32,0 A
$\cos\phi$ 0,91 2940 /min	$\cos\phi$ 0,92 3540 /min
380-420/660-725 V Δ/Y	440-480 V Δ
34,0-32,0/19,6-18,5 A	33,5-31,0 A

50 Hz-Daten 60 Hz-Daten

Bild 1.14 Beispiel für das Typenschild eines Asynchronmotors

Besondere Bedeutung haben dabei die Nenndaten. Sie dienen zur Spezifikation des Motors an seinem Nennarbeitspunkt; über sie sind Motoren miteinander vergleichbar. Nenndaten werden auch als Bemessungsdaten bezeichnet.

**Nenndaten
Motor**

- **Motortyp:** Gibt an, ob es sich um einen Gleichstrom-, Wechselstrom- (1-phasig) oder einen Drehstrommotor (3-phasig) handelt.
- **Nennspannung:** Spannung oder Spannungsbereich, mit der bzw. in dem der Motor dauerhaft betrieben werden kann. Kurzzeitig sind Spannungsüberhöhungen in einem bestimmten Bereich zulässig.
- **Nennstrom:** Strom, mit dem der Motor ohne thermische Überlastung dauerhaft betrieben werden kann. Kurzzeitig sind Stromüberhöhungen in einem bestimmten Bereich zulässig.
- **Nennleistung:** Mechanische Leistung, die der Motor an seinem Nennarbeitspunkt abgibt. Die aufgenommene elektrische Leistung lässt sich aus den elektrischen Daten ermitteln. Sind elektrische und mechanische Leistung bekannt, kann der Wirkungsgrad des Motors bestimmt werden.
- **Leistungsfaktor:** Der Leistungsfaktor gestattet bei Wechsel- und Drehstrommotoren die Berechnung der aufgenommenen elektrischen Wirkleistung am Nennarbeitspunkt.
- **Nennfrequenz:** Frequenz der speisenden Spannung bei Wechsel- und Drehstrommotoren. Bei Asynchronmotoren entspricht die Nennfrequenz im Allgemeinen der Netzfrequenz, die bei Industriernetzen in Europa bei 50 Hz liegt.

Nenndaten
Stellgerät

- *Nenndrehzahl*: Drehzahl des Motors am Nennarbeitspunkt.
- *Nenndrehmoment*: Drehmoment, das der Motor bei Betrieb mit Nennstrom abgibt. Dieser Wert ist für die Auswahl von Servomotoren von Bedeutung.

Ist der Motor bezüglich seiner Nenndaten ausgelegt, ergibt sich daraus das passende Stellgerät. Das Stellgerät ist durch seine elektrischen Daten spezifiziert:

- *Nennspannung*: Spannung oder Spannungsbereich, an der bzw. in dem das Stellgerät betrieben werden kann. Neben der Spannung selbst ist auch die Netzform (1-phasig, 3-phasig, Erdungskonzept) für die Auswahl des Stellgerätes von Bedeutung.
- *Nennstrom*: Ausgangsstrom, den das Stellgerät dauerhaft bereitstellen kann. Kurzfristig lassen viele Stellgeräte höhere Ströme zu, z. B. für Beschleunigungsvorgänge.
- *Pulsfrequenz*: Frequenz, mit der Frequenzumrichter und Servosteller die Motorspannung schalten. Je höher die Pulsfrequenz ist, desto dynamischer und leiser ist der Antrieb.

Konstruktive
Motordaten

Neben den Nenndaten des Motors werden zusätzlich eine Reihe konstruktiver Daten benötigt. Sie dienen zur Anpassung des Motors an die Arbeitsmaschine und die Umgebungsbedingungen.

- *Bauform*: Beschreibt die zulässige Einbaulage und mechanische Befestigung des Motors. Die Bauformen sind in internationalen Normen festgeschrieben und werden wie folgt gekennzeichnet:
IM yzz (International Mounting) mit

IM	y: Wellenabgang	zz: Befestigungsart
	B: horizontal V: vertikal	durch eine oder 2 Ziffern
z. B. IM B3	Wellenabgang horizontal	Fußmontage
z. B. IM B5	Wellenabgang horizontal	Flanschmontage

Tabelle 1.1 Beispiele zur Kennzeichnung der Motorbauformen

- *Baugröße (Achshöhe)*: Gibt den Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Motorwelle und der Außenseite des Motors in mm an.
- *Wärmeklasse*: Definiert die maximal zulässige Motortemperatur. Eine Überschreitung dieser Temperatur führt zu einer vorzeitigen Alterung der Wicklungsisolation des Motors und damit zu Frühausfällen. Die Wärmeklassen sind in internationalen Normen festgeschrieben und werden mit einem Großbuchstaben gekennzeichnet.

Beispiel: Wärmeklasse F hat eine mittlere zulässige Motortemperatur von 145 °C.

- **Schutzart:** Beschreibt den Schutz des Motors gegen das Eindringen von Fremdkörpern. Die Schutzarten sind in internationalen Normen festgeschrieben und werden wie folgt gekennzeichnet:
IP xy (International Protection) mit

IP	x: Schutzgrad gegen Berührung und Eindringen von Fremdkörpern	y: Schutzgrad gegen Eindringen von Wasser
z. B. IP54	5: Schutz gegen schädliche Staubablagerungen (staubgeschützt), vollständiger Schutz gegen Berühren mit Werkzeugen oder ähnlichen Gegenständen	4: Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen

Tabelle 1.2 Beispiele zur Kennzeichnung der Motorschutzgrade

Neben den genannten Daten gibt es eine große Anzahl weitere Kennwerte zur Spezifikation des Motors. Diese sind in Herstellerkatalogen ausführlich beschrieben.

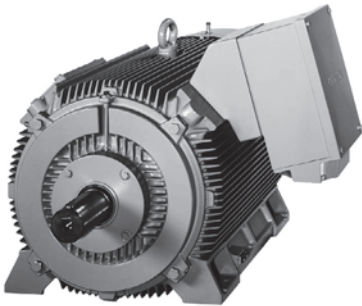


Bild 1.15 Asynchronmotor der Bauform IM B3 mit Schutzklasse IP55

Die Systemdaten beschreiben Kennwerte von gesteuerten und geregelten Antrieben, die sich aus dem Zusammenwirken von Motor, Geber und Stellgerät ergeben. Sie werden üblicherweise nicht veröffentlicht und müssen beim Hersteller angefragt werden.

Systemdaten

- **Drehzahlstellbereich:** Bereich bezogen auf die Nenndrehzahl, innerhalb dessen die Drehzahl mit einer bestimmten Genauigkeit verstellt werden kann.
- **Drehzahl- und Drehmomentgenauigkeit:** Abweichung zwischen Soll- und Istwert bezogen auf den Nennwert.

Servoantriebe verfügen über weitere relevante Systemdaten, die in späteren Abschnitten erläutert werden.

2 Mechanische Grundlagen

Elektrische Antriebe stellen der Arbeitsmaschine mechanische Energie zur Verfügung. Zur Beschreibung des mechanischen Energieflusses und der mit ihm verbundenen Bewegungen werden die physikalischen Größen und Gesetzmäßigkeiten der Translation und Rotation verwendet. Sie sind als Überblick in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Größen und Gleichungen der Translation

Größe	Formelzeichen	Beziehung	Einheit	Erläuterung
Weg	s		m	
Geschwindigkeit	v	$v = \frac{ds}{dt}$	m/s	Die Geschwindigkeit v ergibt sich aus der Änderung des Weges ds je Zeiteinheit dt .
Beschleunigung	a	$a = \frac{dv}{dt}$	m/s ²	Die Beschleunigung a ergibt sich aus der Änderung der Geschwindigkeit dv je Zeiteinheit dt .
Masse	m		kg	
Kraft	F	$F = m \cdot a$	$\frac{N}{(kg \cdot m/s^2, \text{Newton})}$	
Mechanische Leistung	P	$P = F \cdot v$	W (Watt)	Die Augenblicksleistung P ergibt sich aus dem Produkt der aktuellen Kraft F und der aktuellen Geschwindigkeit v .
Wirkungsgrad	η	$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$		Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus dem Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung.

Tabelle 2.2 Größen und Gleichungen der Rotation

Größe	Formelzeichen	Beziehung	Einheit	Erläuterung
Winkel	ϕ			Die Angabe erfolgt im Bogenmaß. Ein Winkel von 2π entspricht 360°.
Winkelgeschwindigkeit	ω	$\omega = \frac{d\phi}{dt}$	1/s	Die Winkelgeschwindigkeit ω ergibt sich aus der Änderung des Winkels $d\phi$ je Zeiteinheit dt .
Winkelbeschleunigung	α	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$	1/s ²	Die Winkelbeschleunigung α ergibt sich aus der Änderung der Winkelgeschwindigkeit $d\omega$ je Zeiteinheit dt .
Drehmoment	M	$M = F \cdot r$	Nm	Das Drehmoment M beschreibt die Wirkung einer Kraft, die an einem Hebel der Länge r angreift.

Tabelle 2.2 Größen und Gleichungen der Rotation (Forts.)

Größe	Formelzeichen	Beziehung	Einheit	Erläuterung
Trägheitsmoment	J	$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$	kg m ²	Das zur Beschleunigung erforderliche Drehmoment M ergibt sich aus dem Produkt des Trägheitsmoments J und der Winkelbeschleunigung $d\omega/dt$.
Mechanische Leistung	P	$P = M \cdot \omega$	W (Watt)	Die Augenblicksleistung P ergibt sich aus dem Produkt des aktuellen Drehmoments M und der aktuellen Winkelgeschwindigkeit ω .
Wirkungsgrad	η	$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$		Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus dem Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung.
Frequenz	f	$f = \frac{\omega}{2\pi}$	Hz (Hertz)	Die Frequenz f beschreibt die Anzahl der Schwingungen je Zeiteinheit.
Periodendauer	T	$T = \frac{1}{f}$	s	Die Periodendauer T entspricht dem Kehrwert der Frequenz f .
Drehzahl	n	$n = f \cdot 60$ (in Hz)	1/min	Die Drehzahl n entspricht der Frequenz f , wenn diese in 1/min ausgedrückt wird.
Übersetzungsverhältnis, Getriebefaktor	i	$i = \frac{n_{Antrieb}}{n_{Abtrieb}}$		

3 Elektrotechnische Grundlagen

3.1 Felder in der Elektrotechnik

In elektrischen Antrieben werden die Eigenschaften von Feldern ausgenutzt. Ein Feld ist ein Raum, der dadurch gekennzeichnet ist, dass in ihm Kräfte auf Körper oder Teilchen wirken. Zur qualitativen Darstellung der Kraftwirkung verwendet man Feldbilder. Die Kraftwirkung erfolgt tangential zu den Feldlinien. Die Kraftwirkung ist umso größer, je enger die Feldlinien verlaufen.

In der Elektrotechnik sind das elektrische und das magnetische Feld von Bedeutung (andere Felder sind z. B. Gravitationsfelder oder Schallfelder). Beide Felder werden in elektrischen Antrieben ausgenutzt.

Elektrisches Feld

Das elektrische Feld beschreibt einen Raum, in dem Kräfte auf elektrische Ladungsträger wirken (Bild 3.1). Hervorgerufen werden diese Kräfte durch die Ladungsträger selbst. Ladungsträger können positiv oder negativ geladen sein. Es gilt:

- Gleichartig geladene Ladungsträger stoßen sich ab.
- Ungleich geladene Ladungsträger ziehen sich an.

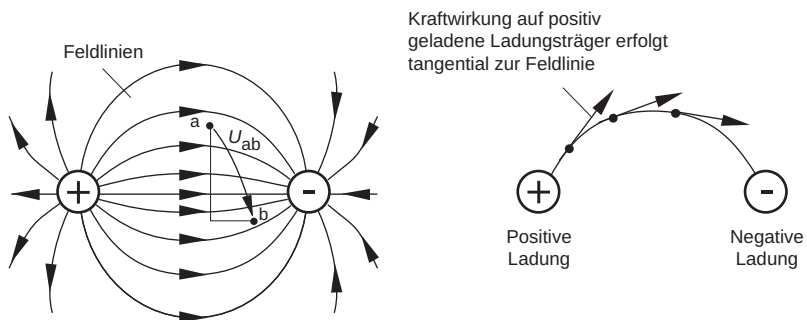


Bild 3.1 Das elektrische Feld

Bringt man Ladungsträger in ein elektrisches Feld, führen sie Bewegungen aus und rufen einen elektrischen Strom hervor. Der *elektrische Strom* beschreibt die Anzahl der Ladungsträger, die sich in einer bestimmten Zeiteinheit vom Punkt a zum Punkt b bewegen. Bei der Bewegung der Ladungsträger wird je nach Bewegungsrichtung Energie abgegeben oder aufgenommen.

Die *elektrische Spannung* beschreibt ein elektrisches Feld in Summe und kann als Maß für den Energieunterschied eines Ladungsträgers an verschiedenen Stellen des elektrischen Feldes bezogen auf seine Ladungsmenge interpretiert werden.

Das magnetische Feld beschreibt einen Raum, in dem Kräfte auf magnetische Körper wirken (Bild 3.2). So richtet sich zum Beispiel eine Magnetnadel in einem Magnetfeld aus.

Magnetisches Feld

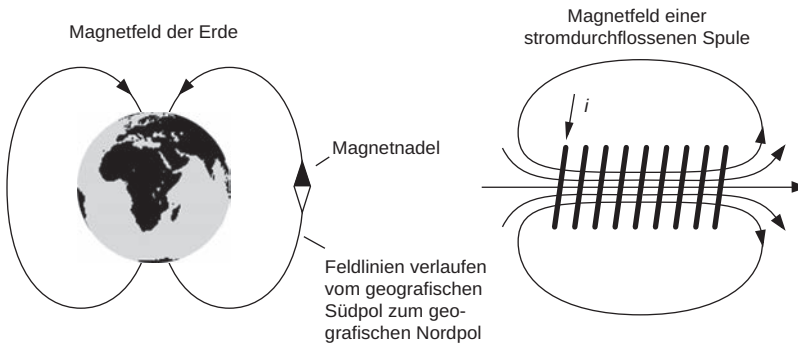


Bild 3.2 Das magnetische Feld

Das magnetische Feld kann auf zwei verschiedenen Wegen hervorgerufen werden:

- Beim *natürlichen Magnetismus* ist das Magnetfeld eine Stoffeigenschaft. Bestimmte Materialien wie z. B. hartmagnetisches Eisen sind von einem Magnetfeld umgeben.
- Ein *künstliches Magnetfeld* entsteht durch die Bewegung von elektrischen Ladungsträgern (Stromfluss) z. B. in einem elektrischen Leiter. Alle stromdurchflossenen Leiter sind von einem derartigen Magnetfeld umgeben.

Beide Varianten zur Erzeugung eines Magnetfeldes werden bei Elektromotoren ausgenutzt.

Magnetische Felder werden in Motoren in magnetischen Kreisen, bestehend aus Eisen, geführt. Luftstrecken und Luftspalte werden so klein wie möglich gehalten, da sie das Magnetfeld schwächen. Eisen verstärkt das Magnetfeld. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen weichmagnetischem und hartmagnetischem Eisen (Bild 3.3):

- *Weichmagnetisches Eisen* ist nur so lange magnetisch, wie es sich selbst in einem externen Magnetfeld befindet. Verschwindet das externe Magnetfeld (z. B. durch Abschalten des Stroms, der das Magnetfeld hervorgerufen hat), ist auch das Eisen nicht mehr magnetisch. Motorenteile, die von veränderlichen Magnetfeldern durch-