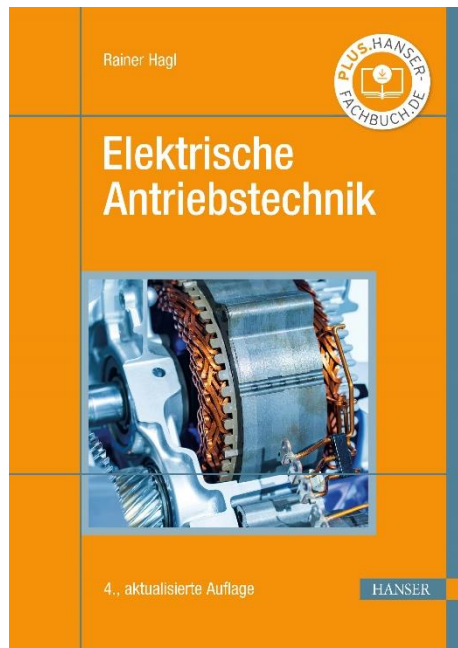


HANSER



Leseprobe

zu

Elektrische Antriebstechnik

von Rainer Hagl

Print-ISBN: 978-3-446-47911-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-48037-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446479111>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Dieses Fachbuch stellt eine Einführung in ein umfangreiches Spezialgebiet dar. Produktionsmaschinen und viele Konsumgüter können ihre Aufgaben nur mittels elektrischer Antriebe erfüllen. Daher sind zumindest Grundkenntnisse in diesem Gebiet unumgänglich, um Maschinen, aber auch eine Vielzahl an Produkten des täglichen Lebens zu dimensionieren bzw. zu optimieren.

Das Fachbuch ist insbesondere für die Bachelorausbildung von Studierenden der Ingenieurwissenschaften in den Studienschwerpunkten

- Automatisierungstechnik,
- Elektro- und Informationstechnik,
- Gebäudetechnik,
- Produktionstechnik,
- Maschinenbau,
- Mechatronik,
- Medizintechnik

konzipiert. Es eignet sich ebenso für technisch Interessierte, die sich in das Gebiet der elektrischen Antriebstechnik einarbeiten wollen. Leistungselektronische Themen werden nur am Rande behandelt. Die Auslegung elektrischer Maschinen stellt ebenso keinen Schwerpunkt des Buches dar.

Zunächst werden in der Einführung die wichtigsten Anforderungen an elektrische Antriebe und Hauptunterscheidungsmerkmale vorgestellt. Die Aufgaben der einzelnen Komponenten werden beschrieben, wichtige Grundbeziehungen abgeleitet und gängige Begriffe erläutert.

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit dem Aufbau und der Wirkungsweise einzelner Komponenten eines elektrischen Antriebes. Hauptschwerpunkt ist das Kennenlernen von in Produktionsmaschinen gängigen Motoren und deren Steuerung. Für die einzelnen Motoren werden die Grundlagen erarbeitet, um einen für eine vorgegebene Antriebsaufgabe passenden Motor auswählen zu können. Übergreifende Themen werden in separaten Kapiteln zusammengefasst. Für das Teilgebiet Servoantriebstechnik werden grundlegende Zusammenhänge dargestellt.

Neben der mathematischen Herleitung wird jeweils auch versucht, die Wirkprinzipien und Zusammenhänge beschreibend darzustellen. Das Buchprojekt wurde von vielen Unternehmen, die Produkte für den Bereich der elektrischen Antriebstechnik anbieten, vor allem durch Bildmaterial, unterstützt. Dadurch war es möglich, neben theoretischen Zusammenhängen exemplarisch auch gängige Industriekomponenten vorzustellen. Den Kapiteln zugeordnete Übungen auf plus.hanser-fachbuch.de ermöglichen eine Überprüfung des Lernfortschrittes.

Notwendige Voraussetzung, um dem Lehrinhalt folgen zu können, sind grundlegende Kenntnisse der Elektrotechnik und der technischen Mechanik.

Eine Vielzahl engagierter und konstruktiver Rezensionen hat zur Beseitigung von Fehlern in der vierten Auflage geführt. Hierfür möchten sich der Autor und der Verlag herzlich bedanken. Allerdings konnten nicht alle Anregungen berücksichtigt werden, da diese zum Teil konträr waren. Bitte haben Sie dafür Verständnis.

Im Buch haben sich sicherlich auch in dieser überarbeiteten Auflage Fehler eingeschlichen. Vielleicht ist das eine oder andere auch nicht ganz verständlich. Über Rückmeldungen zu Fehlern oder Verbesserungsvorschläge würde ich mich freuen, da diese zu einer kontinuierlichen Verbesserung führen. Sie können mir diesbezüglich gerne eine E-Mail an

rainer.hagl@th-rosenheim.de

senden. Für Ihre Unterstützung möchte ich mich bereits im Voraus bei Ihnen bedanken.

Danksagung

In den vergangenen Jahren habe ich viele positive Rückmeldungen zum Lehrbuch erhalten. Hierfür möchte ich mich sehr herzlich bedanken. Die Rückmeldungen zu Verbesserungen und Erweiterungen von Dozenten an anderen Hochschulen, Kollegen und Studierenden an der Technischen Hochschule Rosenheim waren äußerst konstruktiv. Die meisten Wünsche und Korrekturen sollten nun in der vierten Auflage eingearbeitet sein.

Für die kritische Durchsicht der gesamten zweiten Auflage, die sehr vielen Anregungen und fachlichen Diskussionen möchte ich mich insbesondere bei Dr. Michael Roth bedanken. Bei Herrn Dr. Eduard Dechant, Herrn Dr. Johannes Hilverkus, Frau Dr. Julia Holzleitner, Herrn Martin Krettek, Herrn Markus Märkl und Herrn Christian Brunner aus dem Team „Mechatronische Systeme“ an der Technischen Hochschule Rosenheim möchte ich mich für die Durchsicht von Kapiteln des Manuskriptes herzlich bedanken. Viele Firmen haben mich mit Bildern von aktuellen Produkten oder Darstellungen, die ich so vom Zeitaufwand nicht in der Lage gewesen wäre zu erstellen, unbürokratisch und meist sehr schnell unterstützt. Für diese Unterstützung möchte ich mich ebenfalls bedanken. In den letzten Auflagen kamen die praxisnahen Bilder von im Bereich der elektrischen Antriebstechnik tätigen Unternehmen bei den Lesern sehr gut an und haben die Verständlichkeit der Inhalte des Lehrbuches unterstützt.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Hagl

Januar 2024

Formelsymbole und Einheiten

Im gesamten Manuskript wurde versucht, durchgängige und eindeutige Formelsymbole zu verwenden. Bei der ersten Verwendung eines Formelsymbols werden dessen Bezeichnung auf Deutsch und Englisch, sowie die dazugehörige SI-Einheit und gegebenenfalls wichtige daraus abgeleitete Einheiten, angegeben.

M_{Mo}	Motor Drehmoment	<i>Motor torque</i>	Nm
M_L	Last Drehmoment	<i>Load torque</i>	Nm
M_{Ac}	Beschleunigungsdrehmoment	<i>Acceleration torque</i>	Nm

Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit werden an manchen Stellen diese Angaben wiederholt. Eine Übersicht mit den für die hier behandelten Themen relevanten SI-Einheiten findet sich im Anhang A.1 unter „Weiterführende Informationen“.

Inhalt

1	Einführung	13
1.1	Einsatzgebiete	14
1.2	Aufgaben und Betriebszustände elektrischer Maschinen	16
1.3	Bewegungsarten und Bewegungsgleichungen	18
1.4	Antriebe mit fester oder variabler Drehzahl	21
1.5	Antriebsprinzipien.....	26
2	Mechanische Übertragungselemente	30
2.1	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad	33
2.2	Drehzahlanpassung und Antriebsoptimierung	33
2.3	Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung	36
2.3.1	Gewindetrieb	36
2.3.2	Zahnriemen	37
2.3.3	Zahnstange-Ritzel.....	37
2.4	Wirkungsgrade	38
2.5	Umrechnung auf einen Bezugspunkt	38
2.5.1	Elektromechanische Linearachse mit starrer Kopplung	39
2.5.2	Elektromechanische Drehachse mit starrer Kopplung	40
2.6	Beschleunigungsvermögen und Gleichlaufverhalten	41
2.7	Dynamisches Verhalten	44
2.7.1	Grundlagen.....	44
2.7.2	Linearachse mit elastischer Kopplung	46
3	Grundlagen elektrischer Maschinen	56
3.1	Analogien	56
3.2	Physikalische Effekte bei elektromagnetischen Maschinen	57
3.2.1	Lorentzkraft	57
3.2.2	Induktion und Lenz'sche Regel	58
3.2.3	Reluktanzprinzip	60
3.2.4	Selbstinduktion	62
3.2.5	Dynamisches Verhalten	62
3.3	Magnetfelderzeugung und magnetische Werkstoffe.....	63
3.4	Leistungsverluste	66

3.5	Belastungsprofile, Einschaltdauer und Betriebsarten	68
3.6	Wärmeklassen	73
3.7	Schutzarten	73
3.8	Energieeffizienz	74
3.9	Bauformen und Befestigung.....	79
3.10	Bemessungsgrößen	82
4	Gleichstrommotoren	84
4.1	Drehmomenterzeugung und Drehmomentgleichung	84
4.2	Spannungsinduktion und Spannungsgleichung	88
4.3	Komponenten	89
4.4	Fremderregter Gleichstrommotor	92
4.4.1	Elektrisches Ersatzschaltbild und beschreibende Gleichungen	92
4.4.2	Statisches Verhalten	94
4.4.3	Feldschwächung	97
4.4.4	Leistungssteuerung.....	98
4.5	Selbsterregter Gleichstrommotor	107
4.6	Permanenterregter Gleichstrommotor	110
4.7	Bürstenloser Gleichstrommotor und EC-Motor	112
5	Schrittmotoren	117
5.1	Aufbau und Eigenschaften	117
5.2	Wechselpol-schrittmotor	118
5.3	Vollschrittbetrieb.....	120
5.4	Schrittwinkel und Schrittzahl	121
5.5	Halbschrittbetrieb	121
5.6	Mikroschrittbetrieb	122
5.7	Haltedrehmoment und Selbsthaltungsdrehmoment.....	123
5.8	Dynamisches Verhalten	124
5.9	Reluktanzschrittmotor	125
5.10	Hybridschrittmotor	126
5.11	Betriebsdiagramm	127
5.12	Schrittmotoren im geregelten Betrieb.....	129
6	Grundlagen Drehstromantriebe	130
6.1	Drehspannung und Drehstrom	130
6.2	Anschluss von Drehstrommotoren	133
6.3	Sternschaltung	135
6.4	Dreieckschaltung	138

6.5	Vergleich Stern- und Dreieckschaltung	138
6.6	Magnetisches Drehfeld	139
6.7	Wicklungsaufbau.....	145
6.8	Umrichter	147
6.9	Energiemanagement bei umrichterbetriebenen Antrieben	153
7	Synchronmotoren.....	157
7.1	Aufbau und Wirkungsweise	157
7.2	Elektrisches Ersatzschaltbild	161
7.3	Spannungsinduktion und Drehmomenterzeugung	162
7.4	Drehmoment-Drehzahl-Diagramm	165
7.5	Leistungsschild	168
7.6	Komponenten eines Servoantriebes.....	169
7.7	2-phasige Motoren.....	170
8	Asynchronmotoren.....	172
8.1	Aufbau und Wirkungsweise	172
8.2	Spannungsinduktion und Drehmomenterzeugung	175
8.3	Elektrisches Ersatzschaltbild	176
8.3.1	Einphasiger Transformator	176
8.3.2	Einphasiges Ersatzschaltbild	180
8.3.3	Stromortskurve	182
8.4	Motorkennlinie und Motorkenngrößen	186
8.5	Normmotoren	190
8.6	Anlaufstrombegrenzung	191
8.7	Drehzahlvariable Antriebe	193
8.8	Frequenzumrichter	194
8.9	Zentrale und dezentrale Antriebstechnik	196
8.10	Feldorientierte Regelung	198
8.11	Betrieb am Wechselspannungsnetz	198
9	Elektromagnetische Direktantriebe	203
9.1	Bauformen.....	207
9.2	Krafterzeugung und Anziehungskräfte	207
9.3	Flachmotoren und U-förmige Motoren.....	209
9.4	Tubulare Linearmotoren	213
9.4.1	Aufbau und Funktionsweise	213
9.4.2	Eigenschaften und Anwendungsgebiete.....	214
9.4.3	Vergleich zwischen pneumatischem und elektrischem Antrieb	215
9.4.4	Antriebssysteme.....	216

9.5 Tauchspulenantriebe	217
9.5.1 Wirkprinzip und Funktionsweise	217
9.5.2 Bauformen	220
9.5.3 Eigenschaften	221
9.5.4 Einsatzgebiete und Antriebssysteme	221
10 Positionsmessgeräte	224
10.1 Messsignale und Signalauswertung	226
10.2 Messgenauigkeit	231
10.3 Unterscheidungsmerkmale	236
10.4 Übertragung der Positionsinformation	241
10.5 Photoelektrische Messgeräte	245
10.6 Magnetische Messgeräte	246
10.7 Induktive Messgeräte	248
10.8 Thermische Effekte	250
11 Servoantriebe	254
11.1 Anforderungen und Kenngrößen	255
11.2 Kaskadierte Regelung	260
11.3 Stromregelung	264
11.4 Bewegungsprofile	270
11.5 Modellierung mechanischer Übertragungselemente	273
11.6 Mechanisch steife Antriebe	275
11.7 Mechanisch elastische Antriebe	284
11.8 Feldorientierte Regelung	291
11.8.1 Raumzeiger und Koordinatensysteme	292
11.8.2 Permanentenerregter Drehstrom-Synchronmotor	299
A Anhang	306
A.1 Weiterführende Informationen	306
A.1.1 Einführung	306
A.1.2 Grundlagen elektrischer Maschinen	307
A.1.3 Gleichstrommotoren	312
A.1.4 Grundlagen Drehstromantriebe	314
A.1.5 Synchronmotoren	318
A.1.6 Asynchronmotoren	320

A.1.7 Positionsmessgeräte	320
A.1.8 Servoantriebe	321
A.2 Formelzeichen und Einheiten	322
A.3 Griechisches Alphabet	335
A.4 Verwendete Konvertierung und Reihenfolge	336
A.5 Übersicht Symbole und Abkürzungen	337
Literatur	338
Index	339

Inhalte auf plus.hanser-fachbuch.de:

- Übungsaufgaben für jedes Kapitel
- Lösungen

Den Zugangscode finden Sie auf der ersten Seite des Buches.

1

Einführung

Die Aufgabe von Antrieben besteht darin, Bewegungen zu erzeugen. Der Motor ist die wichtigste Komponente eines Antriebes. Er liefert die für eine lineare Bewegung erforderliche Kraft oder das für eine drehende Bewegung erforderliche Drehmoment. Hierzu wird dem Motor Energie zugeführt und in diesem in mechanische Energie umgewandelt. Bei der Energiewandlung werden unterschiedliche physikalische Effekte genutzt.

Antriebe werden nach Wirkprinzipien der eingesetzten Motoren (Bild 1.1) unterteilt in:

- Elektrische Antriebe
- Fluidische Antriebe
- Thermodynamische Antriebe

Motoren in elektrischen Antrieben nutzen meist elektromagnetische Effekte aus. Für spezielle Antriebsaufgaben gibt es Motoren, die auf anderen Effekten basieren. Fluidische Antriebe arbeiten mit komprimierbaren Flüssigkeiten (z. B. Hydrauliköl) oder Gasen. Werden komprimierbare Flüssigkeiten verwendet, spricht man von hydraulischen Antrieben. Pneumatische Antriebe verwenden üblicherweise Luft. Der bekannteste Vertreter aus dem Bereich der thermodynamischen Antriebe ist der Verbrennungsmotor, speziell der Otto- und der Dieselmotor. Je nach zu lösender Antriebsaufgabe ist das eine oder andere Wirkprinzip besser geeignet.

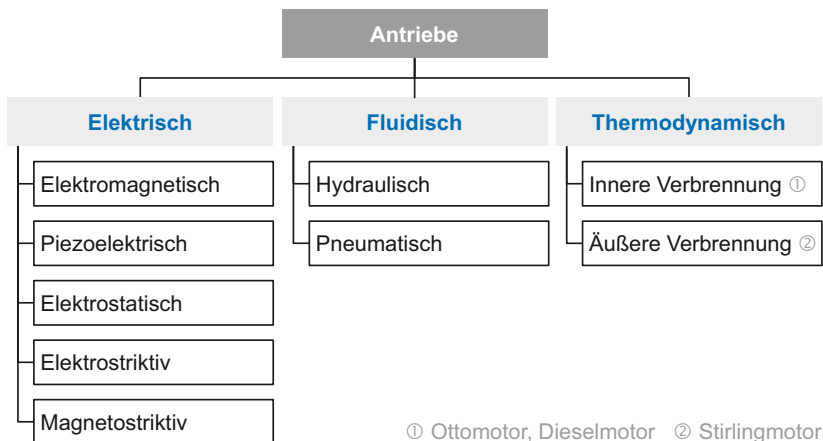


Bild 1.1 Klassifizierung von Antrieben

Manchmal steht die für den Motor erforderliche Energie nicht direkt zur Verfügung. Typische Beispiele sind Geräte oder Maschinen im mobilen Bereich. So wird bei einem Bagger die für die Antriebe notwendige Energie mit einem Verbrennungsmotor erzeugt. Zunächst findet eine Wandlung der im Kraftstoff gespeicherten Energie in mechanische Energie statt, aus der dann die Energie für die fluidischen Antriebe erzeugt wird. Es gibt auch Mischformen, welche zwei Wirkprinzipien zur Erzeugung der mechanischen Bewegung nutzen. Hierzu zählen Hybridan-

triebe in Kraftfahrzeugen, bei denen je nach Betriebszustand ein Verbrennungsmotor und ein Elektromotor unabhängig voneinander oder gemeinsam die Bewegung erzeugen.

Häufig müssen Kräfte bzw. Drehmomente in einem Antriebsstrang übertragen und/oder umgeformt werden, wozu mechanische Antriebselemente erforderlich sind. Motor und mechanische Antriebselemente, die im Antriebsstrang dem Motor nachgeschaltet sind, beeinflussen sich gegenseitig. Zur gesamtheitlichen Optimierung dieses Systems sind daher Kenntnisse sowohl aus dem Bereich der Mechanik als auch der Elektrotechnik erforderlich.

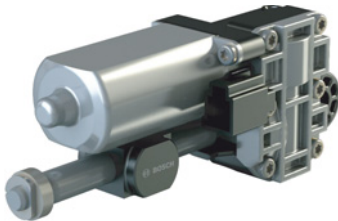
Die meisten Antriebsaufgaben werden heute mit elektrischen Antrieben gelöst. Hauptgründe hierfür sind:

- Elektrische Energie steht beinahe überall zur Verfügung.
- Elektrische Antriebe erzeugen im Vergleich zu vielen anderen Antriebsprinzipien praktisch keine Verschmutzung.
- Elektrische Antriebe sind einfach zu regeln.
- Elektrische Antriebe sind energieeffizient.
- Es stehen wartungsfreie Lösungen zur Verfügung (wartungsfrei in diesem Zusammenhang bedeutet, dass keine Wartung innerhalb der festgelegten Lebensdauer erforderlich ist).
- Elektrische Antriebe haben vergleichsweise niedrige Geräuschemissionen.

■ 1.1 Einsatzgebiete

Elektrische Antriebe werden in einer Vielzahl von Produkten des täglichen Lebens (Konsumgüter), aber auch in Maschinen und Anlagen (Investitionsgüter), eingebaut. Exemplarisch zeigen die **Bilder 1.2 bis 1.7** einige Beispiele aus den Bereichen Kraftfahrzeugbau und Produktionsmaschinen.

Lenksäulenverstellantrieb



Schiebedachantrieb



Fensterheberantrieb



Sitzverstellantrieb



Bild 1.2 Stellantriebe in Kraftfahrzeugen (© Robert Bosch GmbH)

In Produktionsmaschinen, wie Werkzeugmaschinen, Maschinen zur Herstellung von Halbleitern, Maschinen zur Kunststoffverarbeitung, Holzbearbeitungsmaschinen oder Druckmaschinen, haben elektrische Antriebe maßgeblichen Einfluss auf die statischen und dynamischen Maschineneigenschaften. Sie beeinflussen insbesondere:

- die Präzision des Produkts, wie z. B. die Maßhaltigkeit von Werkstücken oder Druckqualität von Prospekten und Zeitschriften
- die Mengenleistung der Maschine in Erzeugnissen pro Zeiteinheit

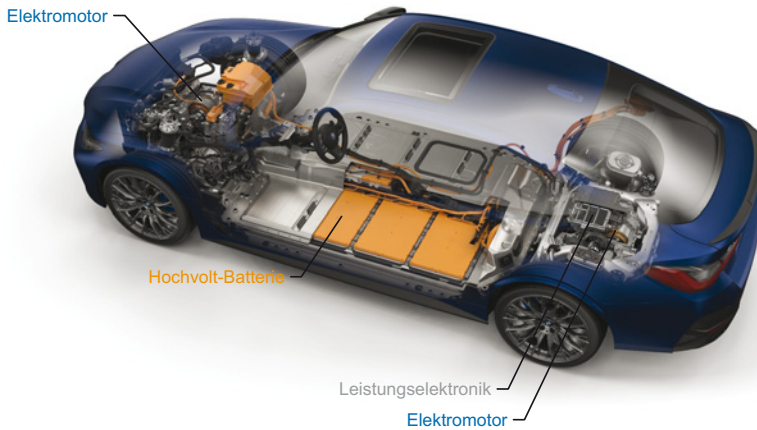


Bild 1.3 Fahrtrieb in Kraftfahrzeugen (© BMW AG, Press Club, Hi4 M50)

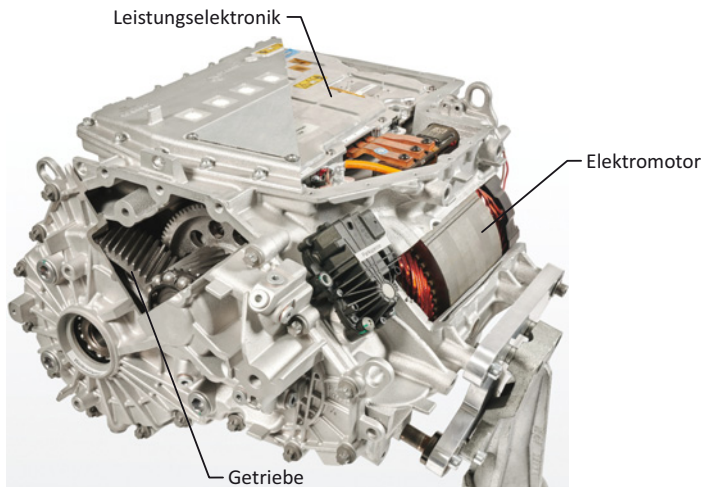


Bild 1.4 Elektromechanische Antriebseinheit eines Elektrofahrzeuges (© BMW AG, Press Club)



Bild 1.5 Elektrische Antriebe in einem Motion Control System für Fertigungsmaschinen der Halbleiterindustrie (© ETEL S.A.)

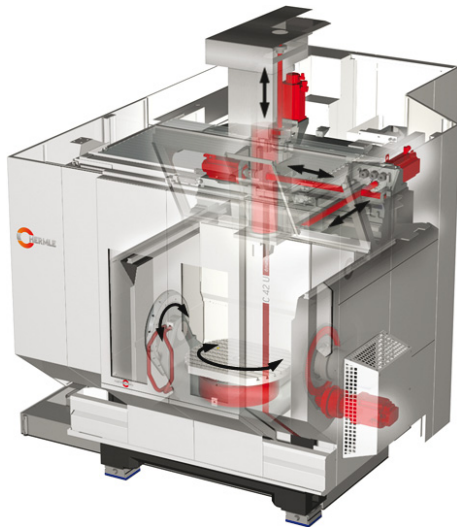


Bild 1.6 Elektrische Vorschubantriebe und Hauptantrieb in Werkzeugmaschinen (© Hermle AG, 5-Achsen Bearbeitungszentrum)

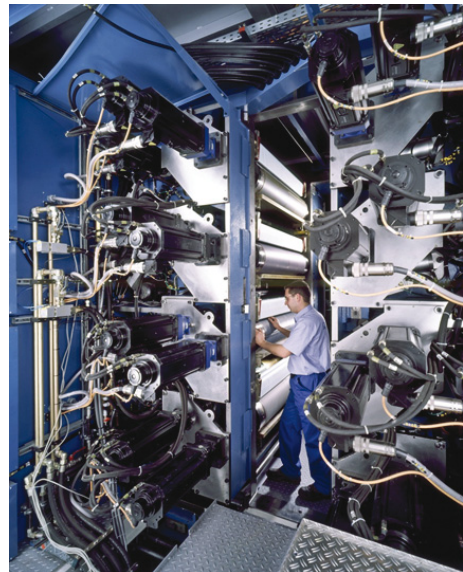


Bild 1.7 Druckmaschinen (© Koenig & Bauer AG)

■ 1.2 Aufgaben und Betriebszustände elektrischer Maschinen

Bei elektrischen Maschinen unterscheidet man Motoren und Generatoren (Bild 1.8). Motoren wandeln elektrische in mechanische Energie um. Sie liefern die Kraft oder das Drehmoment zur Steuerung der Bewegung einer Masse.

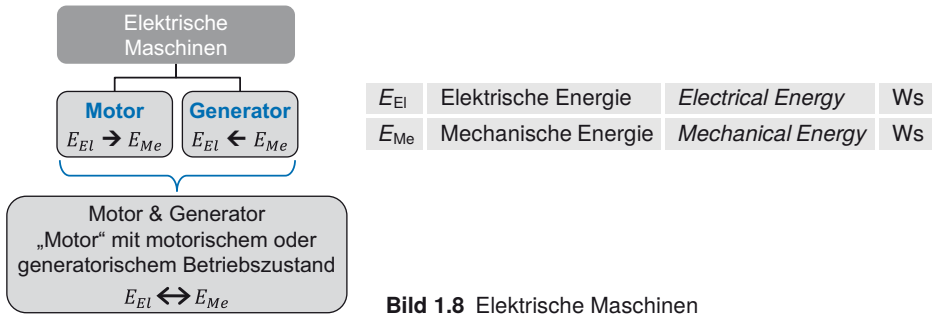


Bild 1.8 Elektrische Maschinen

Ein Generator wandelt im Gegensatz zum Motor mechanische Energie in elektrische Energie um. Die wichtigste Anwendung von Generatoren sind Kraftwerke zur Stromerzeugung. Bei den meisten Kraftwerkstypen wird in Wasser- oder Dampfturbinen zunächst mechanische Energie erzeugt und anschließend in elektrische Energie gewandelt.

In einigen Fällen wird eine elektrische Maschine zur Energiewandlung in beide Richtungen genutzt, d. h. sie wird als Motor oder Generator betrieben. Bei einem Bremsvorgang wird in der elektrischen Maschine die in den mechanischen Antriebselementen gespeicherte potentielle oder kinetische Energie in elektrische Energie gewandelt. Die zurückgewandelte Energie kann für anschließende Beschleunigungsvorgänge gespeichert oder anderen Verbrauchern zur Verfügung gestellt werden. Daraus resultiert eine Reduzierung des Energieverbrauches bzw. eine Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades. Elektrische Maschinen, welche primär der Bewegungserzeugung dienen, bezeichnet man umgangssprachlich als Motor, der wechselweise einen motorischen oder generatorischen Betriebszustand zulässt. Wird eine elektrische Maschine primär zur Stromerzeugung eingesetzt, spricht man von einem Generator. Die Maschine kann zeitweise im motorisierten Betriebszustand betrieben werden. Dabei kann überschüssige elektrische Energie (z. B. aus Windkraftanlagen oder Photovoltaikanlagen) in mechanische Energie gewandelt werden, wie dies in Pumpenspeicherkraftwerken geschieht. Die Betriebszustände Motorbetrieb bzw. Generatorbetrieb sind in Bild 1.9 (links) abhängig vom Vorzeichen der Motordrehzahl und des Motordrehmomentes gezeigt.

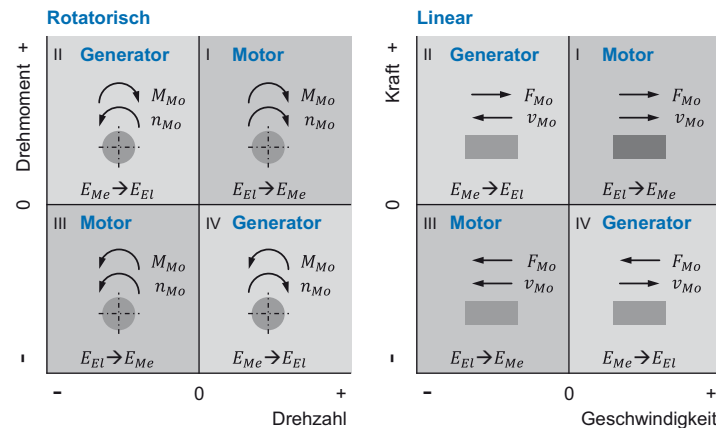


Bild 1.9 Motorischer und generatorischer Betriebszustand für rotatorische oder lineare Bewegung

Sind Motordrehmoment und Motordrehzahl gleichsinnig gerichtet, so wird die Maschine motorisch betrieben, im umgekehrten Fall generatorisch. Im Quadranten I ist der Motor rechtsdrehend (im Uhrzeigersinn), während er sich im Quadranten III links dreht (gegen den Uhrzeigersinn). Die Blickrichtung ist dabei von vorn auf die Motorwelle. Bei einem Motor, der unmittelbar eine Linearbewegung erzeugt, gilt entsprechendes für die Motorkraft und die Motorgeschwindigkeit (Bild 1.9, rechts).

■ 1.3 Bewegungsarten und Bewegungsgleichungen

Ein Unterscheidungsmerkmal bei Antrieben ist die zur Lösung der Antriebsaufgabe erforderliche Bewegungsart (Bild 1.10):

- linear bzw. translatorisch
- drehend bzw. rotatorisch

Die Bewegung einer Masse wird durch deren Bewegungsgrößen beschrieben (Tabelle 1.1). Eine lineare Bewegung hat die Bewegungsgrößen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Eine rotatorische Bewegung wird durch Winkelposition, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung beschrieben. Weitere Analogien zwischen linearen und rotatorischen Bewegungen sind im Anhang unter „Weiterführende Informationen“ (A.1) aufgeführt.

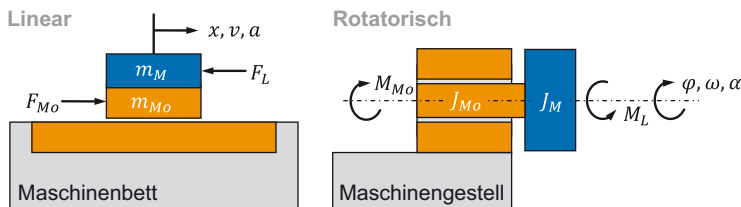


Bild 1.10 Formelzeichen

x	Position	<i>Position</i>	m
v	Geschwindigkeit	<i>Velocity</i>	m/s
a	Beschleunigung	<i>Acceleration</i>	m/s ²
φ	Winkelposition	<i>Angular position</i>	rad
ω	Winkelgeschwindigkeit	<i>Angular speed</i>	rad/s
α	Winkelbeschleunigung	<i>Angular acceleration</i>	rad/s ²

Tabelle 1.1 Bewegungsgrößen

Aufgabe eines Antriebes ist es, die anzutreibende Masse bzw. das anzutreibende Massenträgheitsmoment innerhalb vorgegebener Bewegungsgrößen zu führen. Auch der bewegte Teil des Motors hat eine Masse bzw. ein Massenträgheitsmoment. Zunächst soll der Idealfall, dass die Elastizität zwischen der anzutreibenden Masse und dem Motor vernachlässigt werden kann, betrachtet werden. Da die mechanische Verbindung zwischen den beiden Massen dabei als

starr betrachtet wird, spricht man von einer „starrten Kopplung“. Der Fall einer „elastischen Kopplung“ von Massen wird später betrachtet (Kapitel 2).

Die bewegte Masse setzt sich aus der Summe aller Einzelmassen, die zu bewegen sind, zusammen. Sie wird daher als gesamte zu bewegendende Masse bezeichnet. In dem in Bild 1.10 dargestellten Beispielfall ist die Gesamtmasse:

$$m_T = m_M + m_{M_0} \tag{1.1}$$

m_T	Gesamte zu bewegendende Masse	<i>Total mass to be moved</i>	kg
m_M	Anzutreibende Masse	<i>Mass to be moved</i>	kg
m_{M_0}	Masse des bewegten Motorteils	<i>Mass of moved motor part</i>	kg

Entsprechendes gilt für eine rotatorische Bewegung. Im Folgenden werden Massenträgheitsmomente immer als Trägheitsmomente bezeichnet. Im in Bild 1.10 dargestellten Beispielfall ist das gesamte zu bewegendende Trägheitsmoment:

$$J_T = J_M + J_{M_0} \tag{1.2}$$

J_T	Gesamtes zu bewegendes Trägheitsmoment	<i>Total inertia to be moved</i>	kg m ²
J_M	Trägheitsmoment der anzutreibenden Masse	<i>Inertia of mass to be moved</i>	kg m ²
J_{M_0}	Trägheitsmoment des bewegten Motorteils	<i>Inertia of moved motor part</i>	kg m ²

Für eine punktförmige Masse mit Abstand r zum Drehpunkt berechnet sich das Trägheitsmoment zu:

$$J = mr^2 \tag{1.3}$$

Das wichtigste Trägheitsmoment bei Antrieben ist das eines Zylinders bzw. Hohlzylinders. Das Trägheitsmoment des Hohlzylinders (Bild 1.11) berechnet sich abhängig von der Materialdichte (Tabelle 1.2) zu:

$$J = \frac{\pi l \rho}{32} (d_1^4 - d_2^4) \tag{1.4}$$

ρ	Dichte	<i>Density</i>	kg/m ³
--------	--------	----------------	-------------------

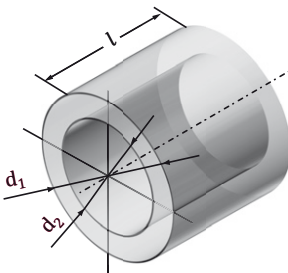


Bild 1.11 Hohlzylinder

Aluminium	2710	kg/m ³
Stahl	7850	kg/m ³
Kupfer	8940	kg/m ³

Tabelle 1.2 Dichte von Materialien

Die Summe der Kräfte, die der Motorkraft entgegenwirken, wird als Lastkraft bezeichnet. Entsprechendes gilt für die Drehmomente (Tabelle 1.3).

F_L	Lastkraft	<i>Load force</i>	N
F_{M_0}	Motorkraft	<i>Motor force</i>	N
M_L	Lastdrehmoment	<i>Load torque</i>	Nm
M_{M_0}	Motordrehmoment	<i>Motor torque</i>	Nm

Tabelle 1.3 Kräfte und Drehmomente

Beispiele für Lastkräfte bzw. Lastdrehmomente sind (Tabelle 1.4):

F_P	Prozesskraft	<i>Process force</i>	N
F_W	Gewichtskraft	<i>Weight force</i>	N
F_F	Reibungskraft	<i>Friction force</i>	N
M_P	Prozessdrehmoment	<i>Process torque</i>	Nm
M_W	Gewichtsdrehmoment	<i>Weight torque</i>	Nm
M_F	Reibungsdrehmoment	<i>Friction torque</i>	Nm

Tabelle 1.4 Lastkräfte und Lastdrehmomente

Die Bewegungsgleichung für die in Bild 1.10 gezeigte lineare Bewegung lautet:

$$m_T \ddot{x} = m_T a = F_{Ac} = F_{M_0} - F_L \quad (1.5)$$

Die Kraft, die zum Beschleunigen zur Verfügung steht, wird auch als Beschleunigungskraft F_{Ac} bezeichnet. Das Kräftegleichgewicht an der zu bewegenden Masse in Bewegungsrichtung lautet:

$$F_{M_0} - F_L - F_{Ac} = 0 \quad (1.6)$$

F_{M_0}	Motorkraft	<i>Motor force</i>	N
F_L	Lastkraft	<i>Load force</i>	N
F_{Ac}	Beschleunigungskraft	<i>Acceleration force</i>	N

Ist die Motorkraft betragsmäßig größer als die Lastkraft, so wird die anzutreibende Masse beschleunigt. Im umgekehrten Fall wird die anzutreibende Masse verzögert. Bei Gleichheit der beiden Kräfte bleibt die Geschwindigkeit konstant. Der Motor eignet sich dadurch zur Steuerung von Bewegungen. Es lässt sich eine Unterscheidung in folgende zwei Betriebszustände durchführen:

- Stationärer Betriebszustand (Stationärer Fall)
 $F_{M_0} = F_L$, $F_{Ac} = 0$ und $v = \text{konstant}$
- Instationärer Betriebszustand (Instationärer oder transients Fall)
 $F_{M_0} \neq F_L$, $F_{Ac} \neq 0$ und $v \neq \text{konstant}$

Die Bewegungsgleichung für die in Bild 1.10 gezeigte rotatorische Bewegung lautet:

$$J_T \ddot{\varphi} = J_T \alpha = M_{Ac} = M_{M_0} - M_L \quad (1.7)$$

Das Drehmoment, das zum Beschleunigen zur Verfügung steht, wird auch als Beschleunigungsdrehmoment M_{Ac} bezeichnet. Das Drehmomentgleichgewicht lautet:

$$M_{M_0} - M_L - M_{Ac} = 0 \quad (1.8)$$

M_{Mo}	Motordrehmoment	<i>Motor torque</i>	Nm
M_L	Lastdrehmoment	<i>Load torque</i>	Nm
M_{Ac}	Beschleunigungsdrehmoment	<i>Acceleration torque</i>	Nm

Anstatt Winkelgeschwindigkeiten werden bei elektrischen Antrieben fast ausschließlich Drehzahlen angegeben. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen lautet:

$$\omega = 2\pi n \quad (1.9)$$

n	Drehzahl	<i>Speed</i>	1/s
-----	----------	--------------	-----

Die Drehzahl wird üblicherweise in Umdrehungen pro Minute [1/min] oder als „revolutions per minute“ [rpm] angegeben.

Für die beiden von der linearen Bewegung bekannten Betriebszustände gilt:

- Stationärer Betriebszustand (Stationärer Fall)
 $M_{Mo} = M_L$, $M_{Ac} = 0$ und $n = \text{konstant}$
- Instationärer Betriebszustand
 $M_{Mo} \neq M_L$, $M_{Ac} \neq 0$ und $n \neq \text{konstant}$



Erfolgt zwischen dem Motor und der anzutreibenden Masse mittels mechanischer Antriebs Elemente eine Anpassung der Drehzahl oder eine Bewegungswandlung von einer drehenden in eine lineare Bewegung, so müssen alle die Bewegung beschreibenden Größen auf einen gemeinsamen Punkt im Antriebsstrang (Bezugspunkt) bezogen werden. Dies wird in [Kapitel 2](#) behandelt.

■ 1.4 Antriebe mit fester oder variabler Drehzahl

Im einfachsten Fall wird zur Lösung einer Antriebsaufgabe der Elektromotor an das zur Verfügung stehende Spannungsnetz angeschlossen. Falls für den Prozess andere Drehmomente oder Drehzahlen benötigt werden als der Elektromotor bereitstellt, so werden dem Motor mechanische Antriebs Elemente, wie z. B. Getriebe, nachgeschaltet. Die einzige Steuerungsmöglichkeit ist das Ein- bzw. Ausschalten des Motors. Abhängig von der Drehmoment- bzw. Kraftbelastung des Motors stellt sich eine Drehzahl bzw. Geschwindigkeit ein. Da die Motordrehzahl während der Projektierung festgelegt wird, bezeichnet man diese als Antriebe mit fester Drehzahl.

Bei Antrieben mit variabler Drehzahl, welche auch drehzahlveränderliche Antriebe genannt werden, ist die Drehzahl während des Betriebes veränderbar. Die gewünschte Drehzahl (Soll-drehzahl: n_{Soll}) wird z. B. in einem Programm, in einer graphischen Bedienoberfläche oder mittels eines Potentiometers festgelegt. Drehzahlveränderliche Antriebe gibt es in zwei Ausführungen ([Bild 1.12](#)). Bei geregelten Antrieben wird die tatsächliche Drehzahl (Istdrehzahl: n_{Ist}) gemessen, mit der gewünschten Drehzahl verglichen und die Abweichung zwischen beiden Werten mittels eines Reglers minimiert. Dieser Vergleich ist bei gesteuerten Antrieben

nicht vorhanden, weshalb Abweichungen zwischen gewünschter Drehzahl und tatsächlicher Drehzahl nicht erkannt werden. Die Aufgaben der im Bild dargestellten Komponenten werden im weiteren Verlauf dieses Abschnitts erläutert.

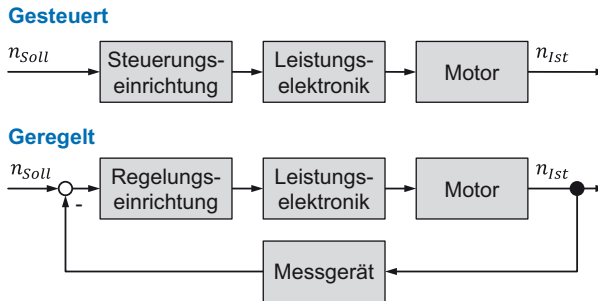


Bild 1.12 Drehzahlvariable Antriebe – gesteuert oder geregelt

Es gibt eine Vielzahl von Prozessen, bei denen eine sich zeitlich schnell ändernde Größe sehr präzise eingehalten werden muss. Am häufigsten muss die Position eines Maschinenelementes möglichst schnell und genau einem vorgegebenen (programmierten) Weg-Zeit-Verlauf folgen. Drehzahlgeregelte Antriebe, welche diese Anforderungen erfüllen, werden Servoantriebe genannt. Sie lassen sich im Vergleich zu anderen drehzahlvariablen Antrieben im Wesentlichen wie folgt charakterisieren:

- Regelung der für die Antriebsaufgabe relevanten Größe
- geringe statische und dynamische Abweichung zwischen gewünschter und tatsächlicher Größe

Beispiele für Einsatzgebiete von Servoantrieben mit hohen Anforderungen an die Antriebseigenschaften sind Werkzeugmaschinen oder Maschinen zur Halbleiter- und Elektronikproduktion. In beiden Fällen wird meist die Position geregelt. Zur Lösung derartiger Anforderungen sind neben dem Motor noch weitere Komponenten, welche meist speziell auf die im Vergleich zu anderen Antriebsaufgaben hohen Anforderungen ausgelegt sind, erforderlich.

Ein Servoantrieb setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen (Bild 1.13):

Motor zur Wandlung von elektrischer in mechanische Energie (Energiewandler). Erzeugung des für die Antriebsaufgabe erforderlichen Drehmoments bzw. der erforderlichen Kraft.

Leistungselektronik, die den Leistungsfluss in den Motor so steuert, dass die vorgegebene Kraft bzw. das vorgegebene Drehmoment bereitgestellt wird. Neben der Aufgabe der Leistungssteuerung hat die Leistungselektronik in einigen Fällen zusätzlich die Aufgabe der Energieumformung. Dies ist notwendig, wenn die dem Antrieb zur Verfügung stehende Spannung in zur Steuerung des Motors geeignete Spannung umzuformen ist (z. B. 230 V in 24 V oder Wechsel- in Gleichspannung).

Regelungs- und Steuerungseinrichtung (Motion Controller) zur Signalverarbeitung und Ermittlung der Stellensignale für die Leistungselektronik aus vorgegebenen Prozessdaten. Die Signalverarbeitung erfolgt meist digital auf leistungsfähigen Prozessoren mittels Software. Gleiches gilt für die gesamte Prozessführung und Prozessüberwachung. Anstatt der Bezeichnung Regelungs- und Steuerungseinrichtung ist die englische Bezeichnung Motion Controller für diese Komponente sehr verbreitet.

Mechanische Übertragungselemente wie z. B. Getriebe sind häufig erforderlich, um eine optimale Anpassung des Arbeitspunktes des Motors an den Arbeitspunkt der Antriebsaufgabe

Index

α, β -Koordinatensystem 296
1Vss-Schnittstelle 242

A

abbildendes Verfahren 245
Abklingkonstante 49
Ablöseregung 254
absolutes Messgerät 230
Abtastfrequenz 25
Abtastung 231
Abtastzeit 25, 266
Amplitudengang 53
Amplitudenverhältnis 235, 257
Anker 85
Anlaufverfahren 160
Anstiegszeit 259
Antriebsprinzip 26
Anziehungskraft 209
Anzugsdrehmoment 186
Anzugsstrom 186
anzutreibende Masse 18
anzutreibendes Massenträgheitsmoment 18
aperiodische Bewegung 49
aperiodischer Grenzfall 49
Außenleiterspannung 135
Außenleiterstrom 135
Auswerteelektronik 229

B

batteriegestützter Umdrehungszähler 241
Bemessungsgrößen 82
Bemessungspunkt 96
beschleunigungsbegrenztes
 Bewegungsprofil 271
Beschleunigungsdrehmoment 20
Betriebsmodi 254

Betriebszustände 17
Bewegungsgleichung 20
Bewegungsgrößen 18
Bewegungsprofil 42, 270
Bezugspunkt 38
BLDC-Motor 113
Bleche 89
Blechpaket 173
Blindleistung 316
blockförmige Kommutierung 113
Bode-Diagramm 55, 258
bürstenbehalteter Motor 91
bürstenloser Gleichstrommotor 113

C

charakteristische Gleichung 48
Clarke-Transformation 298
closed loop 225

D

d, q -Koordinatensystem 298
Dauerbetrieb 71
Dauermagnete 65
dezentrale Antriebstechnik 196
digitale Regler 25
direkt gekoppelter Antrieb 28
Direktantrieb 203
direkte Messung 225
Doppelkamm-Motor 207
Drehfeld 139
drehmomentgeregelter Betrieb 254
Drehmomentkonstante 88, 165
Drehmomentwelligkeit 174, 203
Drehspannung 130
Drehspannungssystem 172
Drehstrombrücke 148
Drehstromsystem 130
Drehstromwicklung 158

Drehzahlauflösung 242
drehzahleregelter Antrieb 22
drehzahleregelter Betrieb 254
Drehzahlregelkreis 286
Drehzahlregler 261
Drehzahlschwankung 44, 260
drehzahlvariabler Antrieb 22, 193
Dreieckschaltung 133

E

Eckfrequenz 194, 277
EC-Motor 113
Effizienzklasse 76
Eigenfrequenz 274
Eigenwert 49
Einbaumotor 80
Ein-Masse-Schwinger 274
Einschaltdauer 70, 100
Einschwingzeit 259
Einzelkamm-Motor 207
eisenbehalteter Anker 89
eisenbehalteter Motor 211
eisenloser Anker 90
eisenloser Motor 211
Eisenverluste 66
elastische Kopplung 45, 274, 290
Elastizität 44
elektrisch erregte Maschine 84
elektrische Zeitkonstante 62
elektrischer Direktantrieb 26
elektrischer Kreis 56
elektromechanischer Antrieb 26
Elementarmagnet 63
Energieeffizienz 215
Energiespeicher 155, 156
Erregerfeld 63, 160
Erregerwicklung 84

F

Federsteifigkeit 45
feldorientierte Regelung 198, 291
Feldschwächung 97, 196
ferromagnetische Werkstoffe 63
Flächenkraft 209
Flachmotor 207

flussorientiertes Koordinatensystem 298
fremderregte Maschine 84
Frequenzumrichter 194
Führungsverhalten 255

G

Gehäusemotor 80
Gesamtmasse 19
geschwindigkeitsgeregelter Betrieb 254
Geschwindigkeitskonstanz 255
Geschwindigkeitsregelkreis 282
Geschwindigkeitsregler 261, 282
Geschwindigkeitschwankung 260
Getriebeübersetzung 34
Gewindetrieb 36
Gleichlaufschwankung 107
Grundabweichung 232

H

Halbbrücke 148
Halbschrittbetrieb 121
Halleffekt-basiertes Messgerät 246
Haltedrehmoment 94
harmonische Schwingung 49
Hauptinduktivität 177
Hauptpol 201
Heyland-Kreis 184
High-Inertia-Motor 31
Hybridschrittmotor 126
Hystereseverluste 66

I

indirekte Messung 226
induktives Messgerät 237
induzierte Spannung 59, 162
inkrementelles Messgerät 230
instationärer Betriebszustand 20
interferentielles Verfahren 245
International Mounting 82
International Protection 74

K

K_V -Wert 258
Käfigläufer 173

kaskadierte Regelung 260
 kinematische Konstante 284
 Kippdrehmoment 186
 Kippdrehzahl 186
 Kippschlupf 186
 Klauenpolschrittmotor 119
 Klemmenspannung 104
 Kloß'sche Gleichung 187
 Koerzitivfeldstärke 64
 Kommutator 91
 Kommutierung 115, 160, 224
 komplexer Operator 293
 Kondensatormotor 198
 kraft geregelter Betrieb 254
 Kupferverluste 66
 Kurzschlussläufer 173
 Kurzschlussringe 174
 Kurzstatormotor 209

L

langperiodischer Messfehler 231
 langperiodischer Positionsmessfehler 231
 Längsinduktivität 301
 Längsstrom 299
 Langstatormotor 209
 Lastdrehmoment 20
 Lasteingang 286
 Lastkraft 20
 Laststörung 255
 Lastverhalten 255
 Läufer 85
 Leerlaufdrehzahl 94
 Leistungselektronik 22, 224
 Leistungsfluss 23
 Leistungshalbleiter 100
 Leistungsschalter 100
 Leistungssteuerung 98
 Leiterspannung 135
 Leiterstrom 135
 Lenz'sche Regel 60
 Linearmotor 204
 Lissajous-Figur 232
 logarithmisches Dekrement 51
 Lorentzkraft 57, 176
 Low-Inertia-Motor 31
 Luftspaltleistung 184

M

magnetische Sättigung 63
 magnetischer Kreis 56
 magnetischer Widerstand 60
 magnetisches Messgerät 246
 Magnetisierungskennlinie 63
 Magnetisierungsstrom 179
 magnetoresistives Messgerät 246
 Magnitude 53, 257
 Maschinenschwingung 272
 mechanisch elastisch 274
 mechanisch steif 274
 mechanische Übertragungselemente 22
 Mehr-Massen-Schwinger 274
 Messfehler 226
 Messfehler in einer Signalperiode 231
 Messgenauigkeit 231
 Messgeräte 23
 Messort 251
 Messprinzip 236
 Messprotokoll 231
 Messsignal 226, 232
 Messverfahren 236
 Mikroschrittbetrieb 122
 Modulationsgrad 103, 104
 Momentenwelligkeit 90
 Motion Controller 22, 160
 Motorklemme 292
 Motorstarter 191
 Motorsystem 80
 Multiturn 240

N

Nebenschlusserregung 107
 Nebenschlussmotor 107
 Nennwerte 83
 Netzbetrieb 172
 Netzfrequenz 172
 Neutralleiter 133
 Nominalwert 227
 Nullphasenwinkel 293
 Nullpunktabweichung 232

O

Oberwellen 104, 293
Ohmsche Verluste 66
Ossana-Kreis 184

P

Park-Transformation 299
periodischer Aussetzbetrieb 71
permanenterregte Maschine 84
permanenterregter Gleichstrommotor 110
Phase 53
Phasengang 54
Phasenströme 292
Phasenverschiebung 257
Phasenverschiebungsfehler 232
photoelektrisches Messgerät 237
Polpaarzahl 158, 172, 193
Polrad 126
Polradspannung 163
Polteilung 87
Polysolenoid-Motor 207
Positionierverhalten 255
Positionsauflösung 229
Positionsfehler 254, 289
positionsgeregelter Betrieb 254
Positionsistwert 226
Positionsmessfehler in einer
 Signalperiode 231
Positionsmessgerät 224
Positionsmesswert 224
Positionsregelkreis 260
Positionsregler 224, 261
Positionsstabilität 255
Positionswertübertragung 242
Pulsweitenmodulation 101, 292
Punkt-zu-Punkt Bewegung 282
PWM-Frequenz 101

Q

Quellenspannung 179
Querinduktivität 301
Querstrom 299

R

Rastkraft 211
Rastmoment 90
Raumzeiger 292
Rechtecksignal 241
Referenzmarke 230
Regelfenster 259
Regelgesetz 262
Reihenschlusserregung 107
Reihenschlussmotor 107
relativer Positionsmessfehler 235
Reluktanz 60
Reluktanzkraft 60
Reluktanzschrittmotor 125
Remanenzflussdichte 64
Resolver 248
Richtungserkennung 226
Röhrenmotor 207
rotorfestes Koordinatensystem 298
Rotormagnetfeld 160
Rückführgröße 224

S

Sanftanlaufgerät 191
Sanftstarter 191
Satteldrehmoment 186
Sattelpunkt 186
Schaltzeitpunkt 103
Schleifringläufer 173
Schleppabstand 255
Schleppfehler 255
Schlupf 175
Schrittfolge 125
Schrittfrequenz 118, 124
Schrittverlust 118
Schrittwinkel 121
Schrittzahl 121
selbsterregte Maschine 84
Selbsthaltedrehmoment 123
Selbstinduktion 62
semi-closed loop 226
Sensitivität 255
sensorless control 161
sensorlose Regelung 161
serielle Schnittstelle 241

Servoantrieb 224
 Servomotor 225
 Signalabweichung 232
 Signalamplitude 232
 Signaloberwellen 232
 Signalperiode 226
 Signalperioden pro Umdrehung 227
 Signalperiodenwinkel 227, 234
 Signalrauschen 232
 Singleturn 240
 sinusförmige Anregung 256
 sinusförmige Kommutierung 113
 Softstarter 191
 Sollwerteingang 286
 Sollwertgewichtung 266
 Spaltpol 198
 Spaltpol 201
 Spannungsgrenze 96, 162, 167
 Spannungskompensation 266
 Spannungskonstante 89, 164
 Spannungs-Zeitfläche 103
 Spindelsteigung 36
 Sprunganregung 256
 starre Kopplung 44
 stationäre Regelabweichung 259
 stationärer Betriebszustand 20
 statorfestes Koordinatensystem 298
 steife Kopplung 274
 Steifigkeit 45
 Steinmetzschtaltung 198
 Sternschaltung 133
 Stillstands Drehmoment 94, 166
 Stillstandsstrom 95, 166
 Störgröße 255
 Strangspannung 135
 Strangstrom 135
 Streuinduktivität 177
 Streuverluste 66
 Stromanpassung 121
 Strombelag 208
 Stromgrenze 96, 167
 Stromortskurve 182
 Stromregelkreis 224, 260
 Stromregler 261
 Stromschwankung 106
 Synchron Drehzahl 172

T

Tastgrad 104
 Tastverhältnis 104
 Tauchspulenantrieb 217
 thermische Längenänderung 252
 thermische Zeitkonstante 68
 Torquemotor 204
 Torsionssteifigkeit 46, 284
 Trägersignal 103
 Trägheitsmoment 19
 Transformation 295
 Transformator 176
 tubularer Linearmotor 213
 tubularer Motor 207

U

U/f-Steuerung 193
 Überschwingen 259
 Übertemperatur 67
 Übertrager 248
 U-förmiger Motor 207
 Ummagnetisierungsverluste 66
 Umrichter 147
 unterscheidbare Umdrehung 236
 Unterschwingen 259
 Unterschwingverfahren 150
 Unterteilung 228
 Unterteilungsfaktor 229
 Unterteilungswinkel 228
 ununterbrochener periodischer Betrieb 71

V

Verarbeitungszeit 266
 Vergleichsspannung 103
 verketteter Fluss 300
 Vier-Quadranten-Steller 109
 voice coil motor 217
 Vollbrücke 109
 Vollschrittbetrieb 120
 Vollschrittwinkel → Schrittwinkel
 Vorwiderstand 99
 Vorzugsposition 117

W

Wanderfeld [204](#)
Wechselpolschrittmotor [118](#)
Wechselrichter [148](#)
Wicklung [63](#)
Wirbelstromverluste [66](#)

Z

Zahnradgetriebe [34](#)
Zahnriemen [36](#)
Zahnstange-Ritzel [36](#)
Zeigerdiagramm [162](#), [164](#)
zentrale Antriebstechnik [196](#)
Zugmittelgetriebe [34](#)
Zustandsgröße [284](#)
Zwischenkreis [148](#)
Zwischenkreisspannung [149](#)