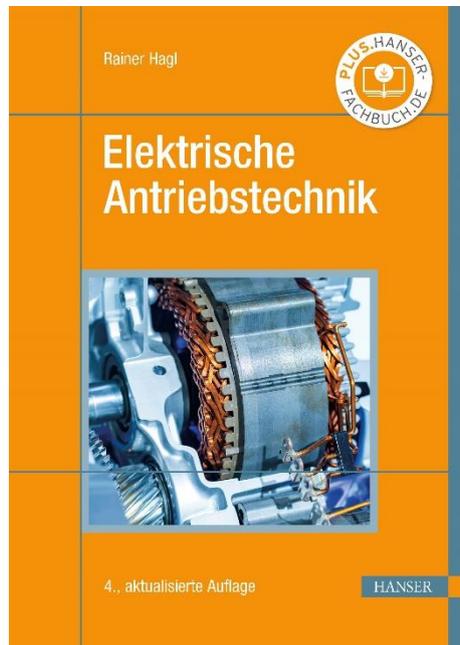


# HANSER



## **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](http://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

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>13</b>
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
<b>2</b>	<b>Mechanische Übertragungselemente</b> .....	<b>30</b>
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
<b>3</b>	<b>Grundlagen elektrischer Maschinen</b> .....	<b>56</b>
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
<b>4</b>	<b>Gleichstrommotoren .....</b>	<b>84</b>
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
<b>5</b>	<b>Schrittmotoren .....</b>	<b>117</b>
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
<b>6</b>	<b>Grundlagen Drehstromantriebe .....</b>	<b>130</b>
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
<b>7</b>	<b>Synchronmotoren.....</b>	<b>157</b>
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
<b>8</b>	<b>Asynchronmotoren.....</b>	<b>172</b>
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
<b>9</b>	<b>Elektromagnetische Direktantriebe .....</b>	<b>203</b>
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
<b>10</b>	<b>Positionsmessgeräte .....</b>	<b>224</b>
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
<b>11</b>	<b>Servoantriebe .....</b>	<b>254</b>
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
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>306</b>
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
<b>Literatur</b> .....	<b>338</b>
<b>Index</b> .....	<b>339</b>

Inhalte auf [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de):

- Übungsaufgaben für jedes Kapitel
- Lösungen

Den Zugangscode finden Sie auf der ersten Seite des Buches.



# 1

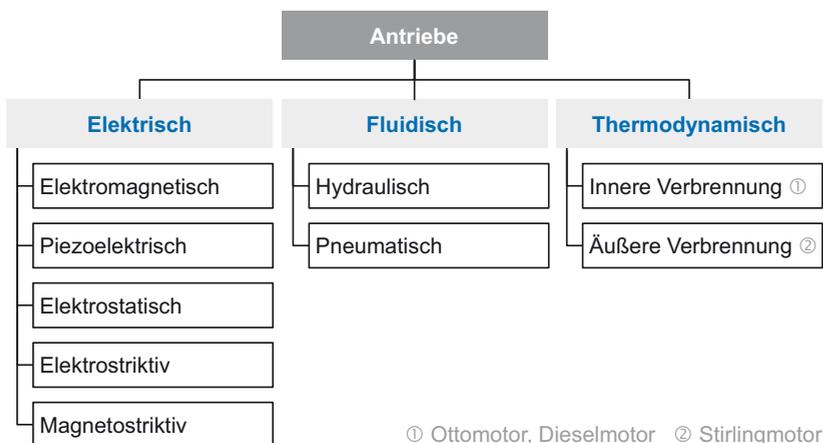
## Einführung

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



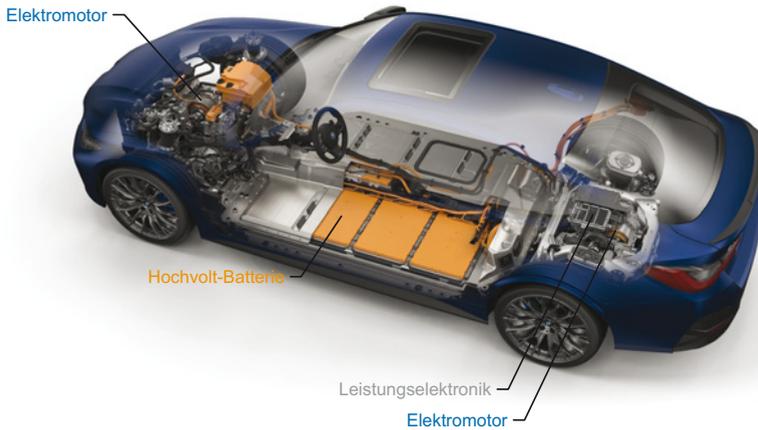
Sitzverstellantrieb



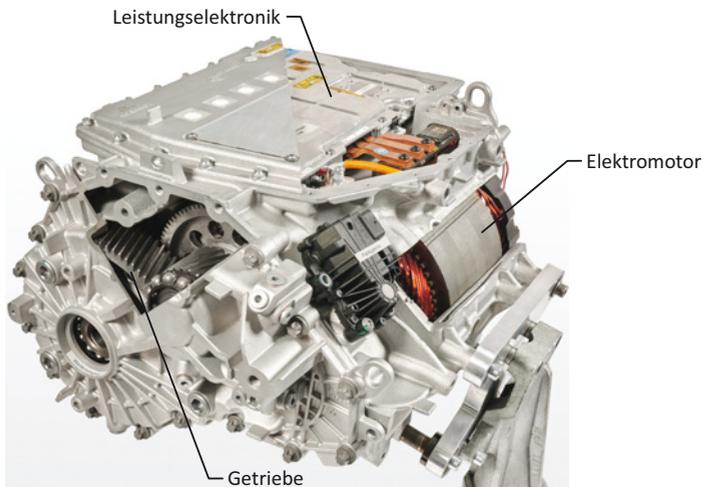
**Bild 1.2** Stellantriebe in Kraftfahrzeugen (© Robert Bosch GmbH)

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



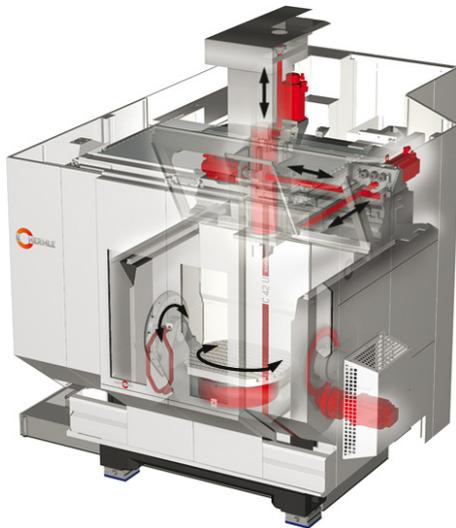
**Bild 1.3** Fahrtrieb in Kraftfahrzeugen (© BMW AG, Press Club, Hi4 M50)



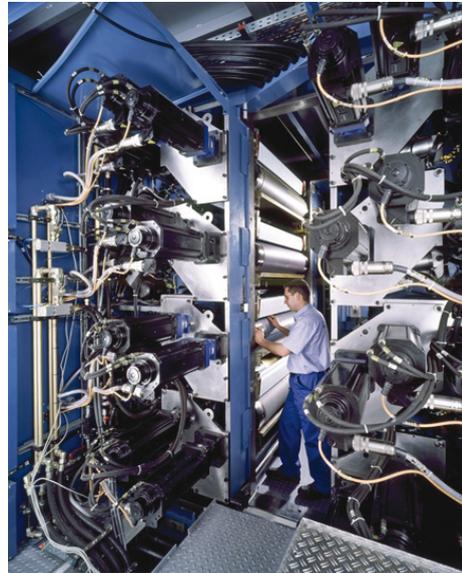
**Bild 1.4** Elektromechanische Antriebseinheit eines Elektrofahrzeuges (© BMW AG, Press Club)



**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.

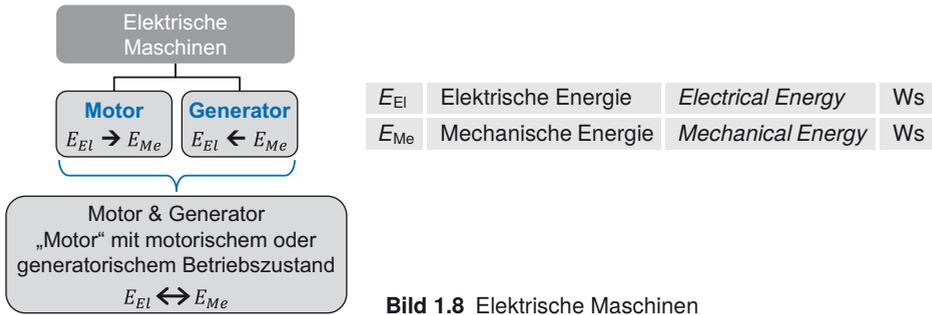


Bild 1.8 Elektrische Maschinen

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.

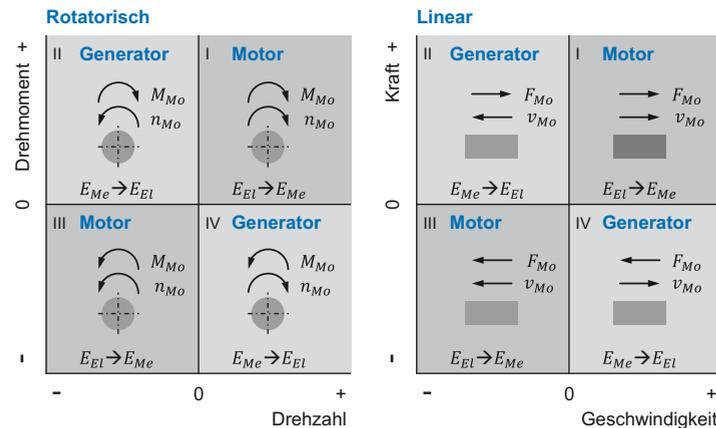


Bild 1.9 Motorischer und generatorischer Betriebszustand für rotatorische oder lineare Bewegung

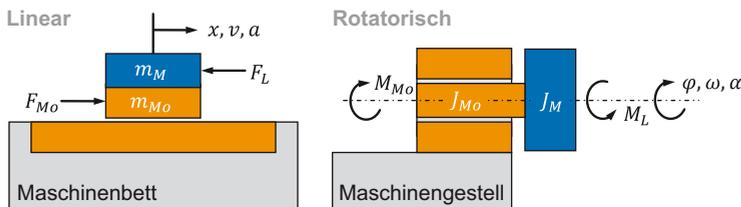
Sind Motordrehmoment und Motordrehzahl gleichsinnig gerichtet, so wird die Maschine motorisch betrieben, im umgekehrten Fall generatorisch. Im Quadranten I ist der Motor rechtsdrehend (im Uhrzeigersinn), während er sich im Quadranten III links dreht (gegen den Uhrzeigersinn). Die Blickrichtung ist dabei 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 <sup>2</sup>
$\varphi$	Winkelposition	<i>Angular position</i>	rad
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	<i>Angular speed</i>	rad/s
$\alpha$	Winkelbeschleunigung	<i>Angular acceleration</i>	rad/s <sup>2</sup>

**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 bewegendendes Trägheitsmoment	<i>Total inertia to be moved</i>	kg m <sup>2</sup>
$J_M$	Trägheitsmoment der anzutreibenden Masse	<i>Inertia of mass to be moved</i>	kg m <sup>2</sup>
$J_{M_0}$	Trägheitsmoment des bewegten Motorteils	<i>Inertia of moved motor part</i>	kg m <sup>2</sup>

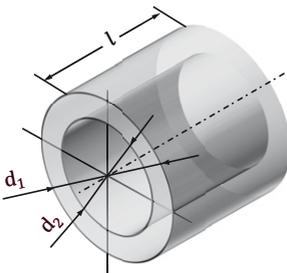
Für eine punktförmige Masse mit Abstand  $r$  zum Drehpunkt berechnet sich das Trägheitsmoment zu:

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

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:

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

$\rho$	Dichte	<i>Density</i>	kg/m <sup>3</sup>
--------	--------	----------------	-------------------



**Bild 1.11** Hohlzylinder

Aluminium	2710	kg/m <sup>3</sup>
Stahl	7850	kg/m <sup>3</sup>
Kupfer	8940	kg/m <sup>3</sup>

**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 transienter 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  $n \neq \text{konstant}$



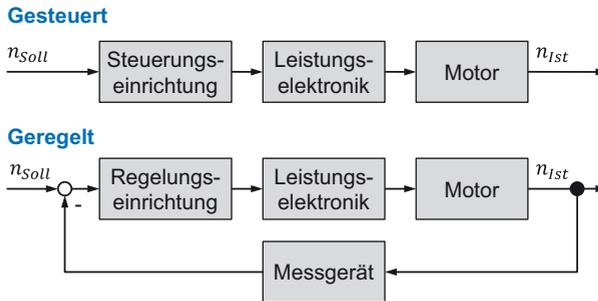
Erfolgt zwischen dem Motor und der anzutreibenden Masse mittels mechanischer Antriebs Elemente eine Anpassung der Drehzahl oder eine Bewegungswandlung von einer drehenden in eine lineare Bewegung, so müssen alle die Bewegung beschreibenden Größen auf einen gemeinsamen Punkt im Antriebsstrang (Bezugspunkt) 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 Stellsignale 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

$\alpha, \beta$ -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  
eisenbehafteter Anker 89  
eisenbehafteter 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  
Positionswert 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