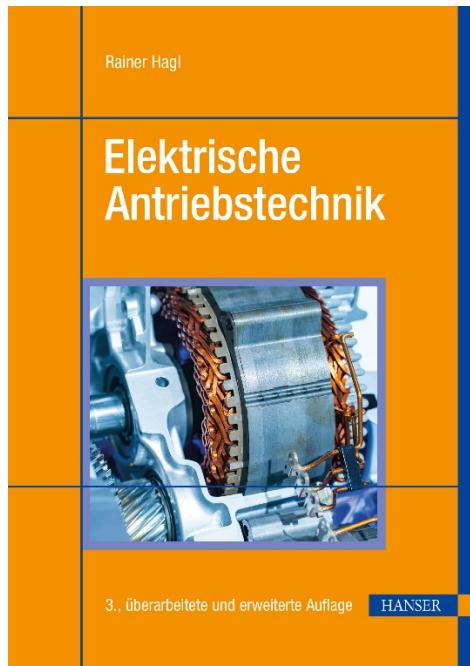


# HANSER



## Leseprobe

zu

# Elektrische Antriebstechnik

von Rainer Hagl

Print-ISBN: 978-3-446-46572-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46821-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/978-3-446-46572-5>

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

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 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 der 2. Auflage hat zur Beseitigung von Fehlern und inhaltlichen Erweiterungen in der 3. 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@fh-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 zur 2. Auflage des Lehrbuches 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. Insgesamt hat dies dazu geführt, dass ich mit großer Motivation die Arbeiten für die dritte Auflage aufgenommen habe. Wie üblich ist es wieder einmal deutlich zeitaufwendiger geworden als zunächst abgeschätzt und gegen Ende war ich froh, als das Manuskript fertiggestellt war. Die meisten Wünsche und Korrekturen sollten nun in der dritten 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 Eduard Dechant, Herrn Johannes Hilverkus, Frau Julia Höllthaler, Herrn Martin Krettek, Herrn Markus Märkl und Herrn Christian Pfuff aus dem Team „Mechatronische Systeme“ an der Technischen Hochschule Rosenheim möchte ich mich für die Durchsicht von Kapiteln des Manuskriptes der dritten Auflage 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

Dezember 2020

## 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.

$M_{\text{Mo}}$	Motordrehmoment	<i>Motor torque</i>	Nm
$M_{\text{L}}$	Lastdrehmoment	<i>Load torque</i>	Nm
$M_{\text{Ac}}$	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
3.3	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 .....	77
3.10 Bemessungsgrößen .....	80
<b>4 Gleichstrommotoren .....</b>	<b>82</b>
4.1 Drehmomenterzeugung und Drehmomentgleichung .....	82
4.2 Spannungsinduktion und Spannungsgleichung .....	86
4.3 Komponenten .....	87
4.4 Fremderregter Gleichstrommotor .....	90
4.4.1 Elektrisches Ersatzschaltbild und beschreibende Gleichungen .....	90
4.4.2 Statisches Verhalten .....	92
4.4.3 Feldschwächung .....	95
4.4.4 Leistungssteuerung .....	96
4.5 Selbsterregter Gleichstrommotor .....	105
4.6 Permanenterregter Gleichstrommotor .....	108
4.7 Bürstenloser Gleichstrommotor und EC-Motor .....	110
<b>5 Schrittmotoren .....</b>	<b>115</b>
5.1 Aufbau und Eigenschaften .....	115
5.2 Wechselpolschrittmotor .....	116
5.3 Vollschriftbetrieb .....	118
5.4 Schrittwinkel und Schrittzahl .....	119
5.5 Halbschriftbetrieb .....	119
5.6 Mikroschriftbetrieb .....	120
5.7 Haltedrehmoment und Selbsthaltdrehmoment .....	121
5.8 Dynamisches Verhalten .....	121
5.9 Reluktanzschrittmotor .....	122
5.10 Hybridschrittmotor .....	123
5.11 Betriebsdiagramm .....	125
5.12 Schrittmotoren im geregelten Betrieb .....	126
<b>6 Grundlagen Drehstromantriebe .....</b>	<b>128</b>
6.1 Drehspannung und Drehstrom .....	128
6.2 Anschluss von Drehstrommotoren .....	131
6.3 Sternschaltung .....	133
6.4 Dreieckschaltung .....	136

---

6.5	Vergleich Stern- und Dreieckschaltung.....	136
6.6	Magnetisches Drehfeld .....	137
6.7	Wicklungsaufbau .....	143
6.8	Umrichter.....	145
6.9	Energiemanagement bei umrichterbetriebenen Antrieben .....	151
<b>7</b>	<b>Synchronmotoren .....</b>	<b>155</b>
7.1	Aufbau und Wirkungsweise .....	155
7.2	Elektrisches Ersatzschaltbild.....	158
7.3	Spannungsinduktion und Drehmomenterzeugung .....	160
7.4	Drehmoment-Drehzahl-Diagramm .....	163
7.5	Leistungsschild .....	166
7.6	Komponenten eines Servoantriebes .....	167
7.7	2-phasige Motoren .....	168
<b>8</b>	<b>Asynchronmotoren .....</b>	<b>170</b>
8.1	Aufbau und Wirkungsweise .....	170
8.2	Spannungsinduktion und Drehmomenterzeugung .....	173
8.3	Elektrisches Ersatzschaltbild.....	174
8.3.1	Einphasiger Transformator .....	174
8.3.2	Einphasiges Ersatzschaltbild .....	178
8.3.3	Stromortskurve .....	180
8.4	Motorkennlinie und Motorkenngrößen .....	184
8.5	Normmotoren.....	188
8.6	Anlaufstrombegrenzung.....	189
8.7	Drehzahlvariable Antriebe .....	191
8.8	Frequenzumrichter.....	192
8.9	Zentrale und dezentrale Antriebstechnik .....	194
8.10	Feldorientierte Regelung .....	196
8.11	Betrieb am Wechselspannungsnetz.....	196
<b>9</b>	<b>Elektromagnetische Direktantriebe .....</b>	<b>201</b>
9.1	Bauformen.....	205
9.2	Krafterzeugung und Anziehungskräfte .....	205
9.3	Flachmotoren und U-förmige Motoren .....	207
9.4	Tubulare Linearmotoren .....	211
9.4.1	Aufbau und Funktionsweise .....	211
9.4.2	Eigenschaften und Anwendungsgebiete .....	212
9.4.3	Vergleich pneumatischer mit elektrischem Antrieb .....	213

9.4.4 Antriebssysteme .....	214
9.5 Tauchspulenantriebe .....	215
9.5.1 Wirkprinzip und Funktionsweise .....	215
9.5.2 Bauformen .....	218
9.5.3 Eigenschaften .....	219
9.5.4 Einsatzgebiete und Antriebssysteme .....	219
<b>10 Positionsmessgeräte .....</b>	<b>222</b>
10.1 Messsignale und Signalauswertung .....	224
10.2 Messgenauigkeit .....	229
10.3 Unterscheidungsmerkmale .....	234
10.4 Übertragung der Positionsinformation .....	239
10.5 Photoelektrische Messgeräte .....	243
10.6 Magnetische Messgeräte .....	244
10.7 Induktive Messgeräte .....	246
10.8 Thermische Effekte .....	248
<b>11 Servoantriebe .....</b>	<b>252</b>
11.1 Anforderungen und Kenngrößen .....	253
11.2 Kaskadierte Regelung .....	258
11.3 Stromregelung .....	261
11.4 Bewegungsprofile .....	268
11.5 Modellierung mechanischer Übertragungselemente .....	271
11.6 Mechanisch steife Antriebe .....	273
11.7 Mechanisch elastische Antriebe .....	282
11.8 Feldorientierte Regelung .....	289
11.8.1 Raumzeiger und Koordinatensysteme .....	291
11.8.2 Permanenterregter Drehstrom-Synchronmotor .....	298
<b>A Anhang .....</b>	<b>305</b>
A.1 Weiterführende Informationen .....	305
A.1.1 Einführung .....	305
A.1.2 Grundlagen elektrischer Maschinen .....	306
A.1.3 Gleichstrommotoren .....	310
A.1.4 Grundlagen Drehstromantriebe .....	312
A.1.5 Synchronmotoren .....	316
A.1.6 Asynchronmotoren .....	318

A.1.7 Positions messgeräte .....	318
A.1.8 Servoantriebe .....	319
A.2 Formelzeichen und Einheiten .....	320
A.3 Griechisches Alphabet .....	333
A.4 Verwendete Konvertierung und Reihenfolge .....	334
A.5 Übersicht Symbole und Abkürzungen .....	335
<b>Literatur .....</b>	<b>336</b>
<b>Index .....</b>	<b>337</b>

# 1

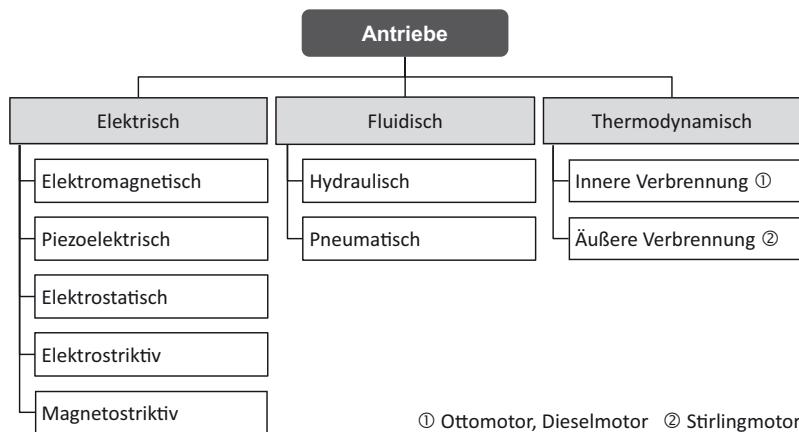
## Einführung

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



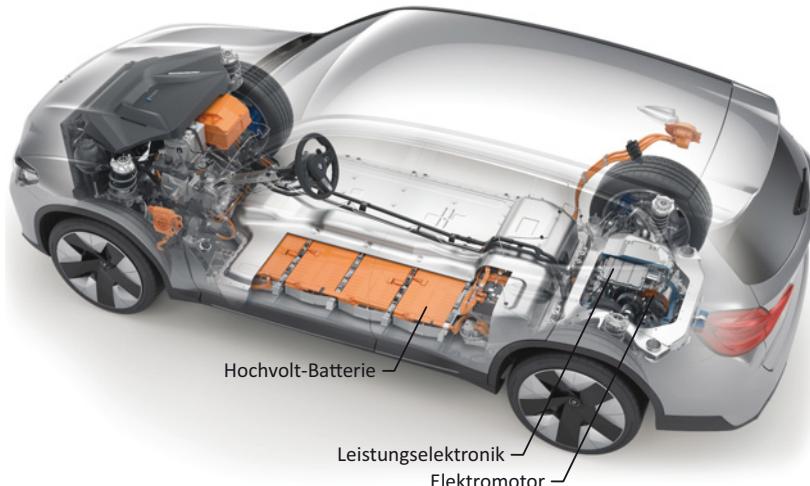
Sitzverstellantrieb



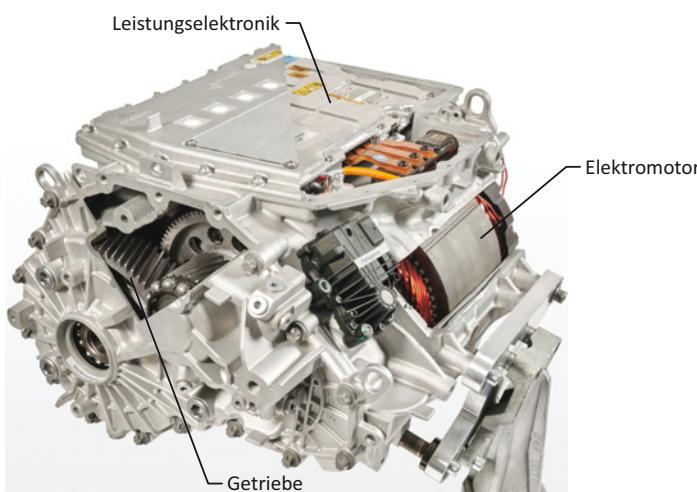
**Bild 1.2** Stellantriebe in Kraftfahrzeugen (© Robert Bosch GmbH)

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



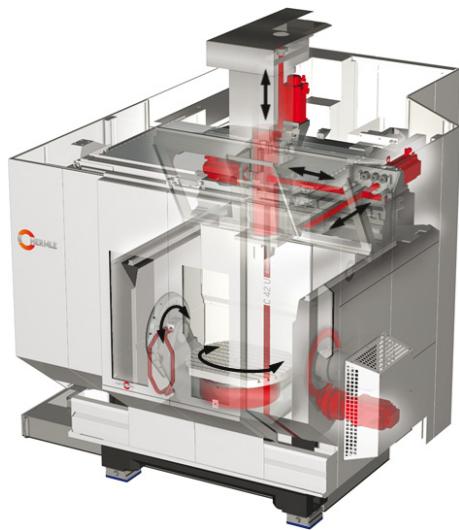
**Bild 1.3** Fahrantrieb in Kraftfahrzeugen (© BMW AG, Press Club, iX3)



**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.

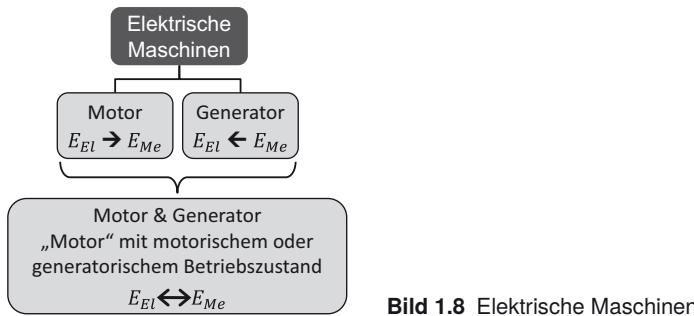


Bild 1.8 Elektrische Maschinen

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 Bewegungs erzeugung 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.

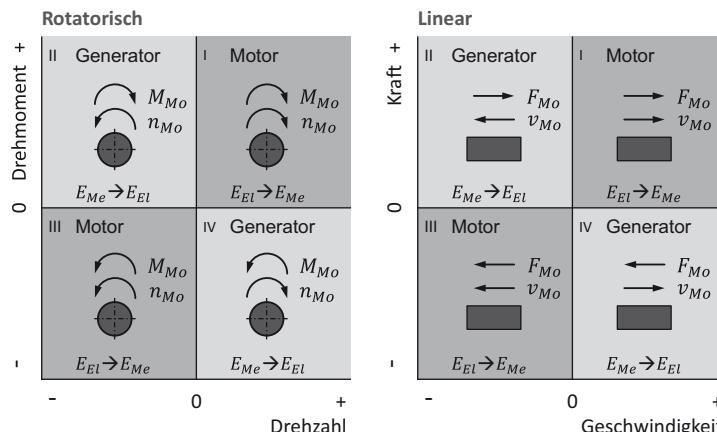


Bild 1.9 Motorischer und generatorischer Betriebszustand für rotatorische oder lineare Bewegung

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.

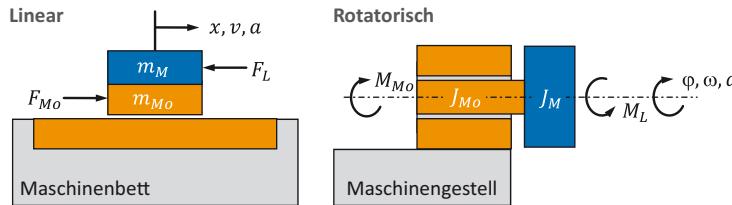


Bild 1.10 Formelzeichen

$x$	Position	Position	$m$
$v$	Geschwindigkeit	Velocity	$m/s$
$a$	Beschleunigung	Acceleration	$m/s^2$
$\varphi$	Winkelposition	Angular position	rad
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	Angular speed	$rad/s$
$\alpha$	Winkelbeschleunigung	Angular acceleration	$rad/s^2$

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 „starren 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 bewegende Masse bezeichnet. In dem in Bild 1.10 dargestellten Beispielfall ist die Gesamtmasse:

$$m_T = m_M + m_{Mo} \quad (1.1)$$

$m_T$	Gesamte zu bewegende Masse	<i>Total mass to be moved</i>	kg
$m_M$	Anzutreibende Masse	<i>Mass to be moved</i>	kg
$m_{Mo}$	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 bewegende Trägheitsmoment:

$$J_T = J_M + J_{Mo} \quad (1.2)$$

$J_T$	Gesamtes zu bewegendes 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>
$J_{Mo}$	Trägheitsmoment des bewegten Motorteils	<i>Inertia of moved motor part</i>	kg m <sup>2</sup>

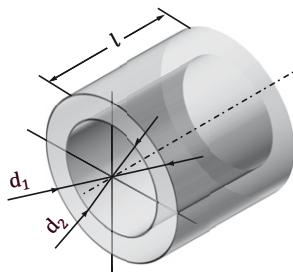
Für eine punktförmige Masse mit Abstand  $r$  zum Drehpunkt berechnet sich das Trägheitsmoment zu:

$$J = mr^2 \quad (1.3)$$

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:

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

$\rho$	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
$F_{Mo}$	Motorkraft	<i>Motor force</i>	N
$M_L$	Lastdrehmoment	<i>Load torque</i>	Nm
$M_{Mo}$	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:

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

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:

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

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

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

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

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

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

$M_{Mo}$	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 Speed 1/s

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

Für die von der linearen Bewegung bekannten beiden 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 Antriebselemente 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 Antriebselemente, 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 solche Antriebe als Antriebe mit fester Drehzahl.

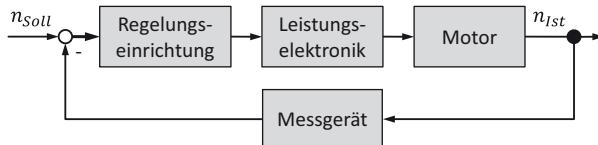
Bei Antrieben mit variabler Drehzahl, welche auch drehzahlveränderliche Antriebe genannt werden, ist die Drehzahl während des Betriebes veränderbar. Die gewünschte Drehzahl (Soll-drehzahl:  $n_{\text{Soll}}$ ) wird z. B. in einem Programm, in einer graphischen Bedienoberfläche oder mittels eines Potentiometers festgelegt. Drehzahlveränderliche Antriebe gibt es in zwei Ausführungen (Bild 1.12). Bei geregelten Antrieben wird die tatsächliche Drehzahl (Istdrehzahl:  $n_{\text{Ist}}$ ) 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.

#### Gesteuert



#### Geregt



**Bild 1.12** Drehzahlvariable Antriebe – gesteuert oder geregt

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).

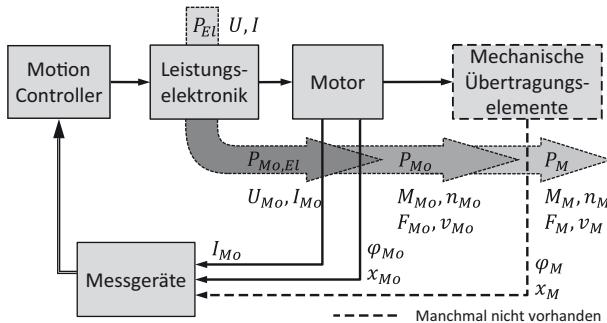
**Regelungs- und Steuerungseinrichtung (Motion Controller)** zur Signalverarbeitung und Ermittlung der Stellsignale für die Leistungselektronik aus vorgegebenen Prozessdaten. Die Signalverarbeitung erfolgt meist digital auf leistungsfähigen Prozessoren mittels Software. Gleicher gilt für die gesamte 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

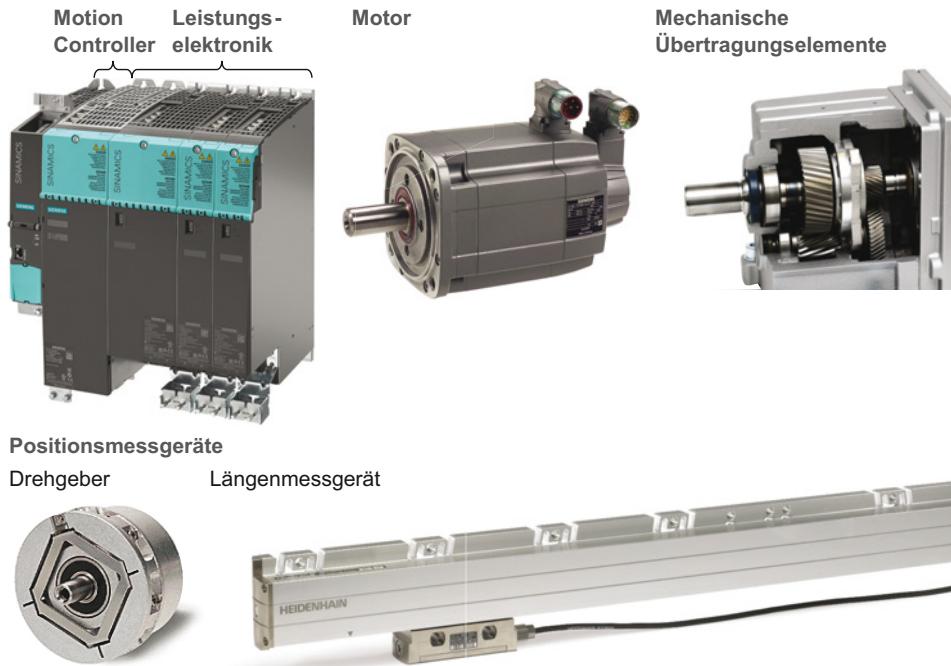
zu gewährleisten. Ein Arbeitspunkt für ein drehendes Maschinenelement ist definiert durch Drehmoment und Drehzahl ( $M, n$ ). Im linearen Fall ist er durch Kraft und Geschwindigkeit ( $F, v$ ) festgelegt.

**Messgeräte** zur Erfassung der Istwerte für Größen, die geregelt oder überwacht werden, wie z. B. Position, Strom, Temperatur. In den meisten Fällen sind die Messgeräte in den Motor oder die Antriebseinheit eingebaut.

Zusätzlich sind in Bild 1.13 der Leistungsfluss und der Signalfluss dargestellt. Komponenten für Servoantriebe in Produktionsmaschinen zeigt Bild 1.14.



**Bild 1.13** Leistungsfluss und Signalfluss eines Servoantriebs



**Bild 1.14** Komponenten für Servoantriebe in Produktionsmaschinen (© Siemens AG (Motion Controller, Leistungselektronik und Motor); © Lenze SE (Mechanische Übertragungselemente); © Dr. Johannes Heidenhain GmbH (Positionsmessgeräte))

Bei Servoantrieben wird eine der folgenden drei Größen vorgegeben:

- Position bzw. Winkelposition
- Geschwindigkeit bzw. Drehzahl
- Kraft bzw. Drehmoment

Gesteuerte Antriebe sind für eine genaue Einhaltung der vorgegebenen Größe aus folgenden Gründen ungeeignet:

- Ihre Dynamik reicht nicht aus, um schnellen Änderungen der vorgegebenen Größe, z. B. der Drehzahl, zu folgen.
- Auftretende Lastkräfte bzw. Lastdrehmomente bewirken unzulässig hohe Abweichungen von der vorgegebenen Größe. Bei Industrierobotern sind dies z. B. Gewichtskräfte, die durch die kinematische Anordnung als variable Drehmomente auf die Motoren wirken.

Bei geregelten Antrieben ist die zu regelnde Größe die Regelgröße, z. B. die Position. Für die Regelgröße wird ein Sollwert vorgegeben (Bild 1.15). Der Istwert der Regelgröße wird mit einem Messgerät gemessen. Das Messgerät stellt die Messgröße zur Verfügung. Die Messgröße sollte möglichst genau mit dem Istwert übereinstimmen. Idealerweise sind beide Größen identisch ( $y = x$ ). Das zu regelnde System ist die Regelstrecke. In der Regeleinrichtung wird die Messgröße mit dem Sollwert verglichen, woraus sich die Regelabweichung ( $e = w - y$ ) ergibt. Der Regler berechnet daraus ein Stellsignal, das eine Minimierung der Abweichung bewirkt. Neben der Änderung des Sollwertes können auch andere Größen zu einer Abweichung der Regelgröße vom Sollwert führen. Diese Größen werden Störgrößen genannt. Eine Störgröße bei einem Antrieb in einer Werkzeugmaschine ist z. B. die Bearbeitungskraft bei der Zerspanung. Der Antrieb eines Aufzugs hat z. B. das Gewicht zusteigender Personen als Störgröße. Die im Weiteren verwendeten Größen und deren Formelzeichen zeigt Tabelle 1.5 im Überblick.

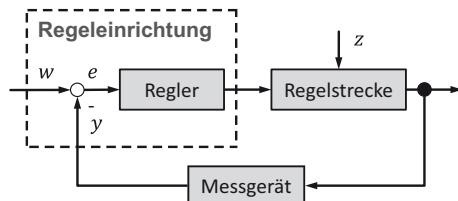


Bild 1.15 Regelkreis

Größe	Formelzeichen
Istwert	$x$
Sollwert	$w$
Messgröße	$y$
Regelabweichung	$e$
Stellgröße	$u$
Störgröße	$z$

Tabelle 1.5 Größen im Regelkreis und ihre Formelzeichen

Es gibt auch Prozesse, bei denen ein Antrieb abhängig von Prozesszuständen unterschiedliche Größen regeln muss. Ein Beispiel hierfür ist der Prozess des Kunststoffspritzgießens, bei dem zwischen Geschwindigkeitsregelung während des Einspritzvorgangs und Kraftregelung im Nachrückvorgang umgeschaltet wird.

# Index

**A**  
 $\alpha, \beta$ -Koordinatensystem 294  
1Vss-Schnittstelle 240

abbildendes Verfahren 243  
Abklingkonstante 49  
Ablöseregelung 252  
absolutes Messgerät 228  
Abtastfrequenz 25  
Abtastung 229  
Abtastzeit 25, 264  
Amplitudengang 53  
Amplitudenverhältnis 233, 255  
Anker 83  
Anlaufverfahren 158  
Anstiegszeit 257  
Antriebsprinzip 26  
Anziehungskraft 207  
Anzugsdrehmoment 184  
Anzugsstrom 184  
anzutreibende Masse 18  
anzutreibendes Massenträgheitsmoment 18  
aperiodische Bewegung 49  
aperiodischer Grenzfall 49  
Außenleiterspannung 133  
Außenleiterstrom 133  
Auswertelektronik 227

**B**  
batteriegestützter Umdrehungszähler 239  
Bemessungsgrößen 80  
Bemessungspunkt 94  
beschleunigungsbegrenztes Bewegungsprofil 269  
Beschleunigungsrehmoment 20  
Betriebsmodi 252

Betriebszustände 17  
Bewegungsgleichung 20  
Bewegungsgrößen 18  
Bewegungsprofil 42, 268  
Bezugspunkt 38  
BLDC-Motor 111  
Bleche 87  
Blechpaket 171  
blockförmige Kommutierung 111  
Bode-Diagramm 54, 255  
bürstenbehafteter Motor 89  
bürstenloser Gleichstrommotor 111

**C**  
charakteristische Gleichung 48  
Clarke-Transformation 296  
closed loop 223

**D**  
 $d, q$ -Koordinatensystem 296  
Dämpfungsgrad 279  
Dauerbetrieb 71  
Dauermagnete 65  
dezentrale Antriebstechnik 194  
digitale Regler 25  
direkt gekoppelter Antrieb 28  
Direktantrieb 201  
direkte Messung 223  
Doppelkamm-Motor 205  
Drehfeld 137  
drehmomentgeregelter Betrieb 252  
Drehmomentkonstante 86, 163  
Drehmomentwelligkeit 172, 201  
Drehspannung 128  
Drehspannungssystem 170  
Drehstrombrücke 146  
Drehstromsystem 128  
Drehstromwicklung 156

Drehzahlauflösung 241  
 drehzahlgeregelter Antrieb 22  
 drehzahlgeregelter Betrieb 252  
 Drehzahlregelkreis 284  
 Drehzahlregler 258  
 Drehzahlschwankung 44, 258  
 drehzahlvariabler Antrieb 22, 191  
 Dreieckschaltung 131

**E**

Eckfrequenz 192, 275  
 EC-Motor 111  
 Effizienzklasse 75  
 Eigenfrequenz 272  
 Eigenwert 49  
 Einbaumotor 77  
 Ein-Masse-Schwinger 271  
 Einschaltdauer 70, 98  
 Einschwingzeit 257  
 Einzelkamm-Motor 205  
 eisenbehafteter Anker 87  
 eisenbehafteter Motor 209  
 eisenloser Anker 88  
 eisenloser Motor 209  
 Eisenverluste 66  
 elastische Kopplung 45, 271, 288  
 Elastizität 44  
 elektrisch erregte Maschine 82  
 elektrische Zeitkonstante 62  
 elektrischer Direktantrieb 26  
 elektrischer Kreis 56  
 elektromechanischer Antrieb 26  
 Elementarmagnet 63  
 Energieeffizienz 213  
 Energiespeicher 153, 154  
 Erregerfeld 63, 157  
 Erregerwicklung 82

**F**

Federsteifigkeit 45  
 feldorientierte Regelung 196, 290  
 Feldschwächung 95, 194  
 ferromagnetische Werkstoffe 63  
 Flächenkraft 207  
 Flachmotor 205

flussorientiertes Koordinatensystem 296  
 fremderregte Maschine 82  
 Frequenzumrichter 192  
 Führungsverhalten 253

**G**

Gehäusemotor 77  
 Gesamtmasse 19  
 geschwindigkeitsgeregelter Betrieb 252  
 Geschwindigkeitskonstanz 253  
 Geschwindigkeitsregelkreis 280  
 Geschwindigkeitsregler 258, 280  
 Geschwindigkeitsschwankung 257  
 Getriebeübersetzung 34  
 Gewindetrieb 36  
 Gleichlaufschwankung 105  
 Grundabweichung 230

**H**

Halbbrücke 146  
 Halbschrittbetrieb 119  
 Halleffekt-basiertes Messgerät 244  
 Haltedrehmoment 92  
 harmonische Schwingung 49  
 Hauptinduktivität 175  
 Hauptpol 199  
 Heyland-Kreis 182  
 High-Inertia-Motor 31  
 Hybridschrittmotor 123  
 Hystereseverluste 66

**I**

indirekte Messung 224  
 induktives Messgerät 235  
 induzierte Spannung 59, 160  
 inkrementelles Messgerät 228  
 instationärer Betriebszustand 20  
 interferentielles Verfahren 243  
 International Mounting 80  
 International Protection 74

**K**

$K_V$ -Wert 256  
 Käfigläufer 171

kaskadierte Regelung 258  
 Kennkreisfrequenz 279  
 kinematische Konstante 282  
 Kippdrehmoment 184  
 Kippdrehzahl 184  
 Kippschlupf 184  
 Klauenpolschrittmotor 117  
 Klemmenspannung 102  
 Kloß'sche Gleichung 185  
 Koerzitivfeldstärke 64  
 Kommutator 89  
 Kommutierung 113, 158, 222  
 komplexer Operator 291  
 Kondensatormotor 196  
 kraftgeregelter Betrieb 252  
 Kupferverluste 66  
 Kurzschlussläufer 171  
 Kurzschlussringe 172  
 Kurzstatormotor 207

## L

langperiodischer Messfehler 229  
 langperiodischer Positionsmessfehler 229  
 Längsinduktivität 299  
 Längstrom 297  
 Langstatormotor 207  
 Lastdrehmoment 20  
 Lasteingang 283  
 Lastkraft 20  
 Laststörung 253  
 Lastverhalten 253  
 Läufer 83  
 Leerlaufdrehzahl 92  
 Leistungselektronik 22, 222  
 Leistungsfluss 23  
 Leistungshalbleiter 98  
 Leistungsschalter 98  
 Leistungssteuerung 97  
 Leiterspannung 133  
 Leiterstrom 133  
 Lenz'sche Regel 60  
 Linearmotor 202  
 Lissajous-Figur 230  
 logarithmisches Dekrement 51  
 Lorentzkraft 57, 174

Low-Inertia-Motor 31  
 Luftspalteistung 182

## M

magnetische Sättigung 64  
 magnetischer Kreis 56  
 magnetischer Widerstand 60  
 magnetisches Messgerät 244  
 Magnetisierungskennlinie 63  
 Magnetisierungsstrom 177  
 magnetoresistives Messgerät 244  
 Magnitude 53, 255  
 Maschinenschwingung 270  
 mechanisch elastisch 272  
 mechanisch steif 272  
 mechanische Übertragungselemente 22  
 Mehr-Massen-Schwingen 271  
 Messfehler 224  
 Messfehler in einer Signalperiode 229  
 Messgenauigkeit 229  
 Messgeräte 23  
 Messort 249  
 Messprinzip 234  
 Messprotokoll 229  
 Messsignal 224, 230  
 Messsignalvektor 226  
 Messverfahren 234  
 Mikroschrittbetrieb 120  
 Modulationsgrad 101, 102  
 Momentenwelligkeit 88  
 Motion Controller 22, 158  
 Motorklemme 290  
 Motorstarter 189  
 Motorsystem 77  
 Multiturn 238

## N

Nebenschlussserregung 105  
 Nebenschlussmotor 105  
 Nennwerte 81  
 Netzbetrieb 170  
 Netzfrequenz 170  
 Neutralleiter 131  
 Nominalwert 225

Nullphasenwinkel 291  
Nullpunktabweichung 230

## O

Oberwellen 102, 291  
Ohmsche Verluste 66  
Ökodesign-Anforderungen 76  
Ossana-Kreis 182

## P

Park-Transformation 298  
periodischer Aussetzbetrieb 71  
permanenterregte Maschine 82  
permanenterregter Gleichstrommotor 108  
permanenterregter Synchronmotor 155  
Phase 53  
Phasengang 54  
Phasenströme 290  
Phasenverschiebung 255  
Phasenverschiebungsfehler 230  
photoelektrisches Messgerät 235  
Polpaarzahl 156, 170, 191  
Polrad 123  
Polradspannung 160  
Polteilung 85  
Polysolenoid-Motor 205  
Positionierverhalten 253  
Positionsauflösung 227  
Positionsfehler 252, 288  
positionsgegelter Betrieb 252  
Positionsistwert 224  
Positionsmessfehler in einer Signalperiode 229  
Positionsmessgerät 222  
Positionsmesswert 222  
Positionsregelkreis 258  
Positionsregler 222, 258  
Positionsstabilität 253  
Positionswertübertragung 240  
Pulsweitenmodulation 99, 290  
Punkt-zu-Punkt Bewegung 280  
PWM-Frequenz 99

## Q

Quellenspannung 177  
Querinduktivität 299  
Querstrom 297

## R

Rastkraft 209  
Rastmoment 88  
Raumzeiger 291  
Rechtecksignal 239  
Referenzmarke 228  
Regelfenster 257  
Regelgesetz 260  
Reihenschlussregung 105  
Reihenschlussmotor 105  
relativer Positionsmessfehler 233  
Reluktanz 60  
Reluktanzkraft 60  
Reluktanzschrittmotor 122  
Remanenzflussdichte 64  
Resolver 246  
Richtungserkennung 224  
Röhrenmotor 205  
rotorfestes Koordinatensystem 296  
Rotormagnetfeld 158  
Rückführgröße 222

## S

Sanftanlaufgerät 189  
Sanftstarter 189  
Satteldrehmoment 184  
Sattelpunkt 184  
Schaltzeitpunkt 101  
Schleifringläufer 171  
Schleppabstand 253  
Schleppfehler 253  
Schlupf 173  
Schrittfolge 122  
Schrittfrequenz 116, 122  
Schrittverlust 116  
Schrittwinkel 119  
Schrittzahl 119  
selbsterregte Maschine 82  
Selbsthaltdrehmoment 121

Selbstinduktion 62  
 semi-closed loop 224  
 Sensitivität 253  
 sensorless control 158  
 sensorlose Regelung 158  
 serielle Schnittstelle 239  
 Servoantrieb 222  
 Servomotor 223  
 Signalabweichung 230  
 Signalamplitude 230  
 Signaloberwellen 230  
 Signalperiode 224  
 Signalperioden pro Umdrehung 225  
 Signalperiodenwinkel 225, 232  
 Signalrauschen 230  
 Singleturm 238  
 sinusförmige Anregung 254  
 sinusförmige Kommutierung 111  
 Softstarter 189  
 Sollwerteingang 283  
 Sollwertgewichtung 264  
 Spaltmotor 196  
 Spaltpol 199  
 Spannungsgrenze 94, 159, 165  
 Spannungskompensation 263  
 Spannungskonstante 87, 162  
 Spannungs-Zeitfläche 101  
 Spindelsteigung 36  
 Sprunganregung 254  
 starre Kopplung 44  
 stationäre Regelabweichung 257  
 stationärer Betriebszustand 20  
 statorfestes Koordinatensystem 296  
 steife Kopplung 271  
 Steifigkeit 45  
 Steinmetzschaltung 196  
 Sternschaltung 131  
 Stillstandsrehmoment 92, 163  
 Stillstandsstrom 93, 163  
 Störgröße 253  
 Strangspannung 133  
 Strangstrom 133  
 Streuinduktivität 175  
 Streuverluste 66  
 Stromanpassung 119  
 Strombelag 206  
 Stromgrenze 94, 164

Stromortskurve 180  
 Stromregelkreis 222, 258  
 Stromregler 258  
 Stromschwankung 104  
 Synchrongrundzahl 170

**T**

Tastgrad 102  
 Tastverhältnis 102  
 Tauchspulenantrieb 215  
 thermische Längenänderung 250  
 thermische Zeitkonstante 68  
 Torquemotor 202  
 Torsionssteifigkeit 46, 282  
 Trägersignal 100, 101  
 Trägheitsmoment 19  
 Transformation 293  
 Transformator 174  
 tubularer Linearmotor 211  
 tubularer Motor 205

**U**

U/f-Steuerung 191  
 Überschwingen 257  
 Übertemperatur 67  
 Übertrager 246  
 U-förmiger Motor 205  
 Ummagnetisierungsverluste 66  
 Umrichter 145  
 unterscheidbare Umdrehung 234  
 Unterschwingen 257  
 Unterschwingverfahren 148  
 Unterteilung 226  
 Unterteilungsfaktor 227  
 Unterteilungswinkel 226  
 ununterbrochener periodischer Betrieb 71

**V**

Verarbeitungstotzeit 264  
 Vergleichsspannung 100  
 verketteter Fluss 298  
 Verstärkung 279  
 Vier-Quadranten-Steller 107  
 voice coil motor 215

Vollbrücke 107  
Vollschriftbetrieb 118  
Vollschriftwinkel → Schriftwinkel  
Vorwiderstand 97  
Vorzugsposition 115

**W**

Wanderfeld 202  
Wechselpolschrittmotor 116  
Wechselrichter 146  
Wicklung 63  
Wirbelstromverluste 66

**Z**

Zahnradgetriebe 34  
Zahnriemen 36  
Zahnstange-Ritzel 36  
Zeigerdiagramm 159, 162  
zentrale Antriebstechnik 194  
Zugmittelgetriebe 34  
Zustandsgröße 282  
Zwischenkreis 146  
Zwischenkreisspannung 147