

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_{Mo}	Motordrehmoment	<i>Motor torque</i>	Nm
M_L	Lastdrehmoment	<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
3.3	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

4 Gleichstrommotoren **82**

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

5 Schrittmotoren **115**

5.1 Aufbau und Eigenschaften	115
5.2 Wechselpol-schrittmotor	116
5.3 Vollschrittbetrieb	118
5.4 Schrittwinkel und Schrittzahl	119
5.5 Halbschrittbetrieb	119
5.6 Mikroschrittbetrieb	120
5.7 Haltedrehmoment und Selbsthaltedrehmoment	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

6 Grundlagen Drehstromantriebe **128**

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
7	Synchronmotoren	155
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
8	Asynchronmotoren	170
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
9	Elektromagnetische Direktantriebe	201
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
10	Positionsmessgeräte	222
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
11	Servoantriebe	252
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
A	Anhang	305
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	Positionsmessgeräte	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
Literatur	336
Index	337

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.

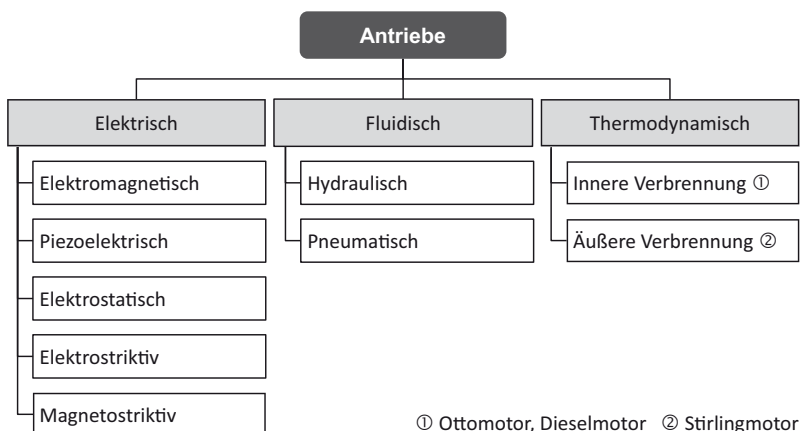


Bild 1.1 Klassifizierung von Antrieben

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.

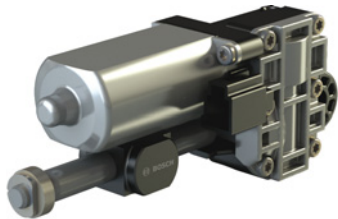
Die meisten Antriebsaufgaben werden heute mit elektrischen Antrieben gelöst. Hauptgründe hierfür sind:

- 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

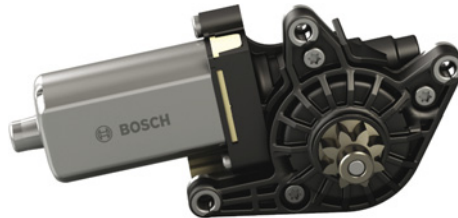


Bild 1.2 Stellantriebe in Kraftfahrzeugen (© Robert Bosch GmbH)

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

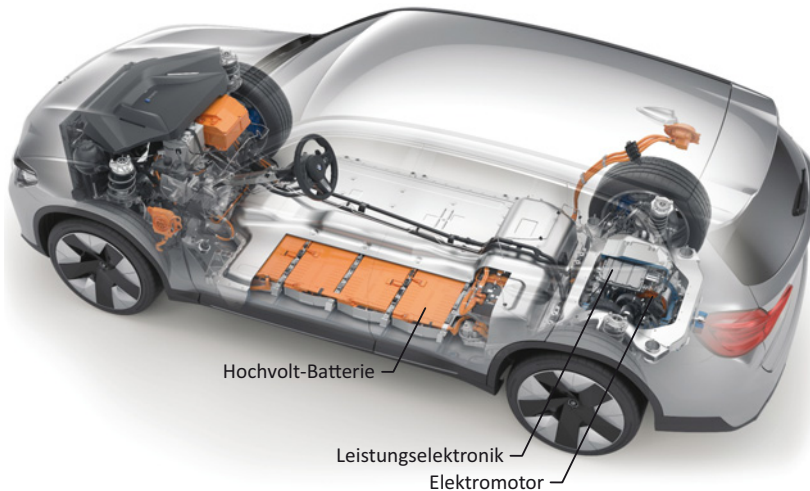


Bild 1.3 Fahrtrieb in Kraftfahrzeugen (© BMW AG, Press Club, iX3)

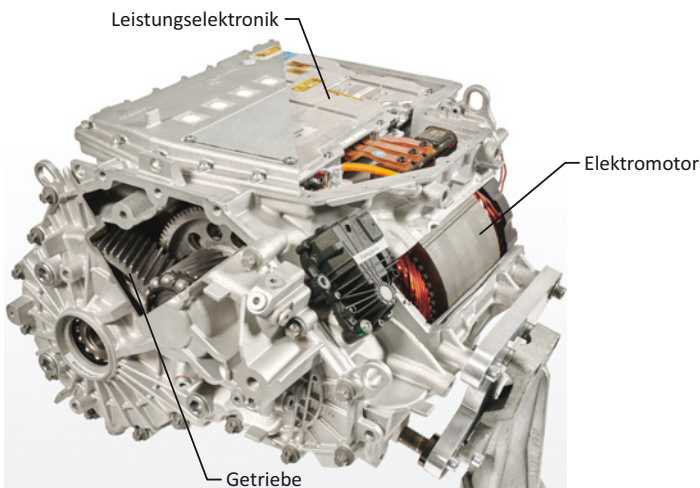


Bild 1.4 Elektromechanische Antriebseinheit eines Elektrofahrzeuges (© BMW AG, Press Club)



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

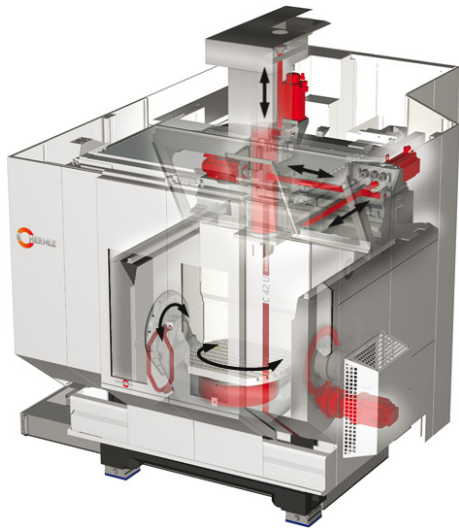


Bild 1.6 Elektrische Vorschubantriebe und Hauptantrieb in Werkzeugmaschinen (© Hermle AG, 5-Achsen Bearbeitungszentrum)

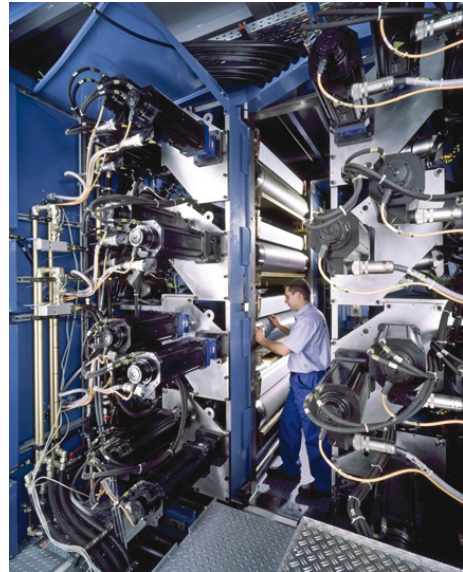


Bild 1.7 Druckmaschinen (© Koenig & Bauer AG)

■ 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.

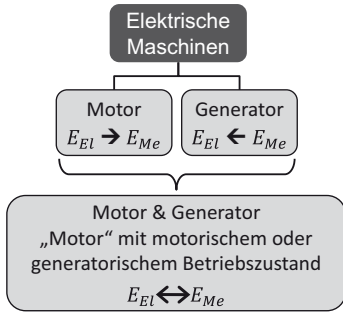


Bild 1.8 Elektrische Maschinen

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 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.

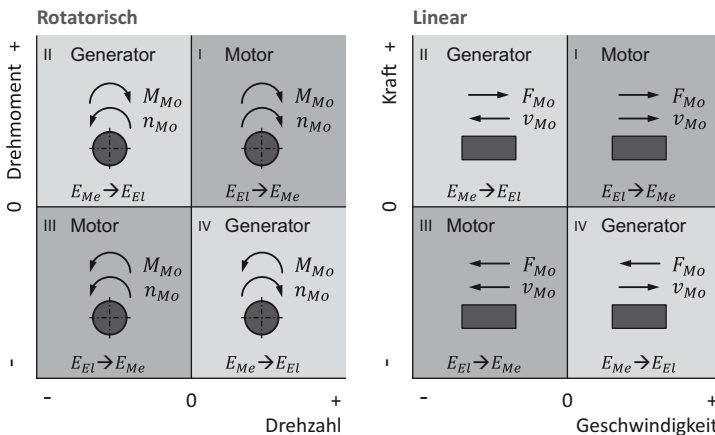


Bild 1.9 Motorischer und generatorischer Betriebszustand für rotatorische oder lineare Bewegung

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.

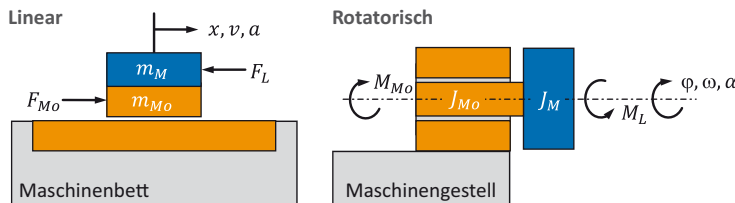


Bild 1.10 Formelzeichen

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 „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 ²
J_M	Trägheitsmoment der anzutreibenden Masse	<i>Inertia of mass to be moved</i>	kg m ²
J_{Mo}	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:

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

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:

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

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

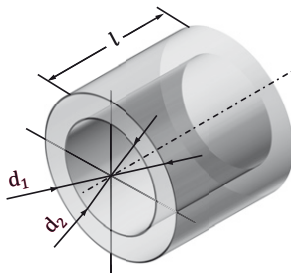


Bild 1.11 Hohlzylinder

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_{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	<i>Speed</i>	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 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 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_{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.

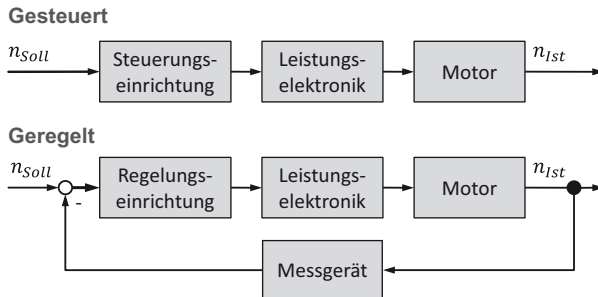


Bild 1.12 Drehzahlvariable Antriebe – gesteuert oder geregelt

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

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.

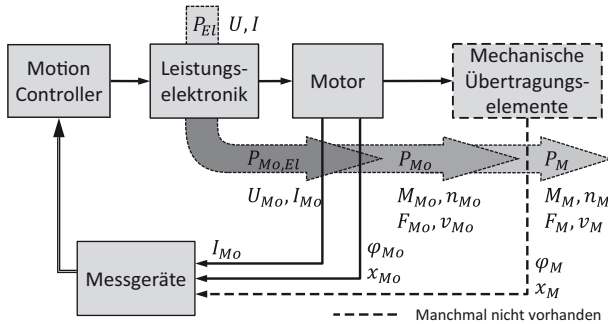


Bild 1.13 Leistungsfluss und Signalfluss eines Servoantriebs

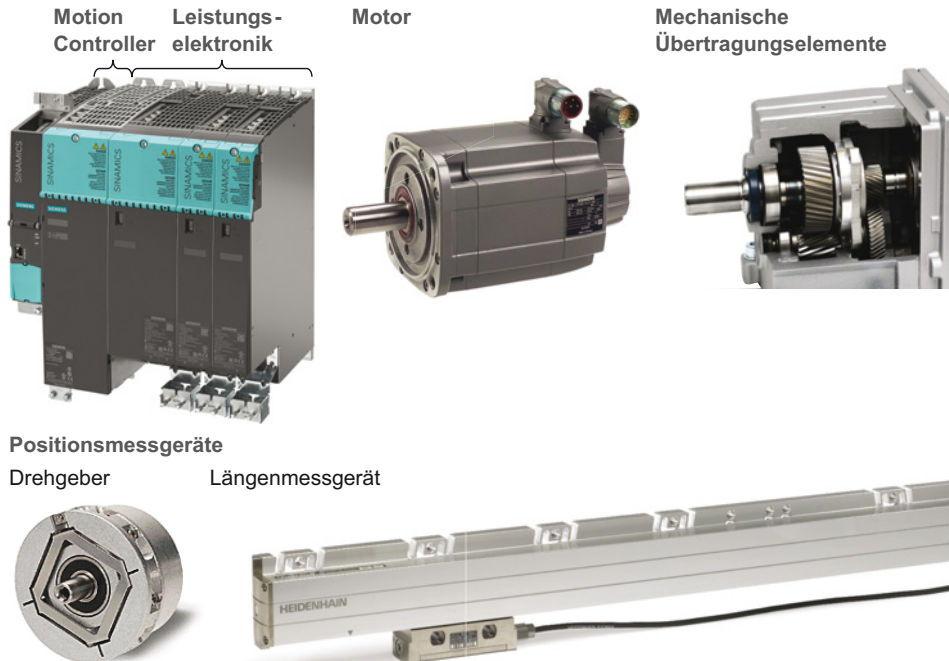


Bild 1.14 Komponenten für Servoantriebe in Produktionsmaschinen (© Siemens AG (Motion Controller, Leistungselektronik und Motor); © Lenze SE (Mechanische Übertragungselemente); © Dr. Johannes Heidenhain GmbH (Positionsmessgeräte))

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.

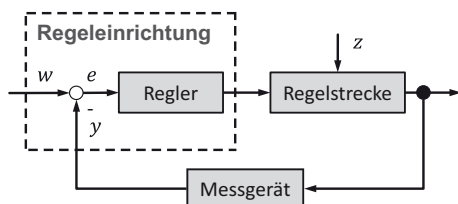


Bild 1.15 Regelkreis

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

α, β -Koordinatensystem 294
1Vss-Schnittstelle 240

A

abbildendes Verfahren 243
Abklingkonstante 49
Ablöseregulierung 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
Auswerteelektronik 227

B

batteriegestützter Umdrehungszähler 239
Bemessungsgrößen 80
Bemessungspunkt 94
beschleunigungsbegrenztes Bewegungsprofil 269
Beschleunigungsdrehmoment 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

Drehzahlaufösung 241
drehzahleregelter Antrieb 22
drehzahleregelter 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
 Längsstrom 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
 Luftspaltleistung 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-Schwinger 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

Nebenschlusserregung 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](#)

positionsgeregelter 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](#)

Reihenschlusserregung [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](#)

Selbsthaltedrehmoment [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
 Singleturn 238
 sinusförmige Anregung 254
 sinusförmige Kommutierung 111
 Softstarter 189
 Sollwerteingang 283
 Sollwertgewichtung 264
 Spaltnotor 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
 Stillstands Drehmoment 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
 Synchron Drehzahl 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
 Überspringen 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](#)
Vollschrittbetrieb [118](#)
Vollschrittwinkel → Schrittwinkel
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](#)