



Leseprobe

Rainer Hagl

Elektrische Antriebstechnik

ISBN (Buch): 978-3-446-44270-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-44409-6

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44270-2>

sowie im Buchhandel.

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. Für diese Unterstützung sei sehr herzlich gedankt. 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 hat zur Beseitigung von Fehlern und inhaltlichen Erweiterungen in der 2. 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.

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 A1 unter „Weiterführende Informationen“.

Inhalt

1	Einführung	11
1.1	Einsatzgebiete	12
1.2	Aufgaben und Betriebszustände elektrischer Maschinen	14
1.3	Bewegungsarten und Bewegungsgleichungen	16
1.4	Antriebe mit fester oder variabler Drehzahl	19
1.5	Antriebsprinzipien	24
2	Mechanische Übertragungselemente	27
2.1	Einführung	27
2.2	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad	30
2.3	Drehzahlanpassung und Antriebsoptimierung	30
2.4	Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung	33
2.4.1	Gewindetrieb	33
2.4.2	Zahnriemen	34
2.4.3	Zahnstange-Ritzel	35
2.5	Wirkungsgrade	35
2.6	Umrechnung auf einen Bezugspunkt	36
2.6.1	Elektromechanische Linearachse mit starrer Kopplung	36
2.6.2	Elektromechanische Drehachse mit starrer Kopplung	38
2.7	Beschleunigungsvermögen und Gleichlaufverhalten	39
2.8	Dynamisches Verhalten	42
2.8.1	Grundlagen	42
2.8.2	Linearachse mit elastischer Kopplung	44
3	Grundlagen elektrischer Maschinen	54
3.1	Einführung	54
3.2	Analogien	54
3.3	Physikalische Effekte bei elektromagnetischen Maschinen	55
3.3.1	Lorentzkraft	55
3.3.2	Induktion und Lenz'sche Regel	56
3.3.3	Selbstinduktion	58

3.4	Magnetfelderzeugung und magnetische Werkstoffe	59
3.5	Leistungsverluste	62
3.6	Belastungsprofile, Einschaltdauer und Betriebsarten	64
3.7	Wärme Klassen	68
3.8	Schutzarten.....	69
3.9	Energieeffizienz	70
3.10	Bauformen und Befestigung	72
3.11	Bemessungsgrößen	75
4	Gleichstrommotoren	77
4.1	Einführung	77
4.2	Drehmomenterzeugung und Drehmomentgleichung	77
4.3	Spannungsinduktion und Spannungsgleichung	81
4.4	Komponenten.....	83
4.5	Klemmenbezeichnung.....	85
4.6	Fremderregter Gleichstrommotor.....	85
4.6.1	Elektrisches Ersatzschaltbild und beschreibende Gleichungen	86
4.6.2	Statisches Verhalten	87
4.6.3	Feldschwächung	89
4.7	Selbsterregter Gleichstrommotor	91
4.8	Permanenterregter Gleichstrommotor	93
4.9	Bürstenloser Gleichstrommotor und EC-Motor	94
5	Schrittmotoren	100
5.1	Einführung	100
5.2	Aufbau und Eigenschaften	100
5.3	Wechselpol-schrittmotor	102
5.4	Vollschrittbetrieb	103
5.5	Schrittwinkel und Schrittzahl	104
5.6	Halbschrittbetrieb	105
5.7	Mikroschrittbetrieb	105
5.8	Haltedrehmoment und Selbsthaltungsdrehmoment	106
5.9	Dynamisches Verhalten	107
5.10	Reluktanzschrittmotor.....	108
5.11	Hybridschrittmotor	109
5.12	Betriebsdiagramm.....	111
5.13	Schrittmotoren im geregelten Betrieb	112

6	Grundlagen Drehstromantriebe	113
6.1	Einführung	113
6.2	Drehspannung und Drehstrom	113
6.3	Anschluss von Drehstrommotoren	116
6.4	Sternschaltung	118
6.5	Dreieckschaltung	120
6.6	Vergleich Stern- und Dreieckschaltung	121
6.7	Magnetisches Drehfeld	121
6.8	Umrichter	128
6.9	Energiemanagement bei umrichterbetriebenen Antrieben	130
7	Synchronmotoren	134
7.1	Einführung	134
7.2	Aufbau und Wirkungsweise	134
7.3	Elektrisches Ersatzschaltbild	137
7.4	Spannungsinduktion und Drehmomenterzeugung	139
7.5	Drehmoment-Drehzahl-Diagramm	142
7.6	Leistungsschild	145
7.7	Komponenten eines Servoantriebes	146
7.8	2-phasige Motoren	147
8	Asynchronmotoren	149
8.1	Einführung	149
8.2	Aufbau und Wirkungsweise	149
8.3	Spannungsinduktion und Drehmomenterzeugung	152
8.4	Motorkennlinie und Motorkenngrößen	153
8.5	Normmotoren	158
8.6	Anlaufstrombegrenzung	158
8.7	Drehzahlvariable Antriebe	160
8.8	Frequenzumrichter	162
8.9	Zentrale und dezentrale Antriebstechnik	164
8.10	Feldorientierte Regelung	166
8.11	Betrieb am Wechselspannungsnetz	166
9	Positionsmessgeräte	171
9.1	Einführung	171
9.2	Drehzahl- und Geschwindigkeitsberechnung	174
9.3	Messsignale	174

9.4	Unterscheidungsmerkmale	176
9.5	Einheiten bei der Winkelmessung	181
9.6	Photoelektrische Messgeräte	181
9.7	Magnetische Messgeräte	183
9.8	Induktive Messgeräte	185
9.9	Signalauswertung und Übertragung der Positionsinformation.....	187
9.10	Messgenauigkeit	189
10	Servoantriebe	192
10.1	Einführung	192
10.2	Anforderungen und Kenngrößen	193
10.3	Kaskadierte Regelung	198
10.4	Bewegungsprofile	201
10.5	Modellierung mechanischer Übertragungselemente	204
10.6	Mechanisch steife Antriebe	205
10.7	Mechanisch elastische Antriebe	215
10.8	Feldorientierte Regelung	223
10.9	Lineare und rotatorische Direktantriebe	226
A	Anhang	233
A.1	Weiterführende Informationen	233
A.1.1	Einführung	233
A.1.2	Grundlagen elektrischer Maschinen	234
A.1.3	Gleichstrommotoren	237
A.1.4	Grundlagen Drehstromantriebe	239
A.1.5	Synchronmotoren	243
A.1.6	Asynchronmotoren	245
A.1.7	Positionsmessgeräte	245
A.1.8	Servoantriebe	246
A.2	Übungen	247
A.3	Lösungen der Übungen.....	262
A.4	Formelzeichen und Einheiten	271
A.5	Griechisches Alphabet	281
A.6	Verwendete Konvertierung und Reihenfolge	282
A.7	Übersicht Symbole und Abkürzungen.....	283
	Literatur	285
	Index	287

2

Mechanische Übertragungselemente

2.1 Einführung

Das Bauvolumen und die Kosten eines Elektromotors sind, bei ansonsten gleichen Konstruktionsbedingungen, im Wesentlichen vom Drehmoment, das der Motor zur Verfügung stellen muss, abhängig. Die Motordrehzahl beeinflusst die Motorkosten erst ab Drehzahlen von ca. $15\,000\text{ min}^{-1}$ nennenswert. Unter der Annahme gleicher Konstruktionsbedingungen ist das Motordrehmoment oder die Motorkraft proportional zur Fläche, die zur Drehmoment- oder Krafterzeugung beiträgt.

$$\text{Rotatorischer Motor: } M_{Mo} = c_A A_T \quad (2.1a)$$

$$\text{Linearmotor: } F_{Mo} = c_A A_F \quad (2.1b)$$

c_A	Konstante Motordrehmoment zu drehmomenterzeugender Fläche	<i>Constant motor torque to torque generating area</i>	Nm/m^2
	Konstante Motorkraft zu krafterzeugender Fläche	<i>Constant motor force to force generating area</i>	N/m^2
A_T	Drehmomenterzeugende Fläche	<i>Torque generating area</i>	m^2
A_F	Krafterzeugende Fläche	<i>Force generating area</i>	m^2

Bei rotatorischen Motoren ist das die Mantelfläche eines Zylinders (Bild 2.1).

$$A_T = \pi d_T l_T \quad (2.2)$$

d_T	Drehmomenterzeugender Durchmesser	<i>Torque generating diameter</i>	m
l_T	Drehmomenterzeugende Länge	<i>Torque generating length</i>	m

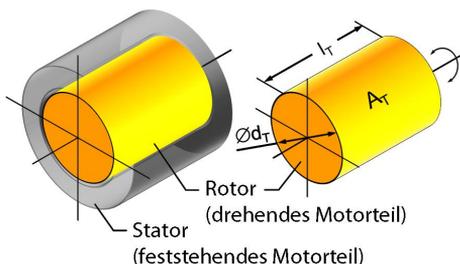


Bild 2.1 Drehmomenterzeugende Fläche

Eine Veränderung des Motordrehmomentes kann entweder durch alleinige Änderung des Durchmessers oder der Länge oder durch gleichzeitige Änderung beider Größen erfolgen.

Durch eine Änderung des Durchmessers und/oder der Länge wird gleichzeitig das Trägheitsmoment beeinflusst, wobei für die weitere Betrachtung davon ausgegangen wird, dass sich das innere Teil dreht (Innenläufermotor). Das Trägheitsmoment soll auf Basis eines Vollzylinders mit konstanter Dichte berechnet werden. Hohlräume oder unterschiedliche Materialien bei realen Maschinen werden dadurch berücksichtigt, dass eine mittlere Dichte angenommen wird. Für das Trägheitsmoment gilt:

$$J_{Mo} = \frac{\pi}{32} \rho_A l_T d_T^4 \tag{2.3}$$

ρ_A Mittlere Dichte *Averaged density* kg/m³

Wird eine Verdoppelung des Motordrehmomentes gewünscht, kann dies z. B. über eine Verdoppelung der Länge oder des Durchmessers erreicht werden. Bei einer Verdoppelung der Länge ergibt sich eine Verdoppelung des Trägheitsmomentes. Das Beschleunigungsvermögen des Motors bleibt damit konstant. Im Gegensatz dazu erhöht sich bei Verdoppelung des Durchmessers das Trägheitsmomentes auf das 16-Fache des ursprünglichen Wertes. Das Beschleunigungsvermögen sinkt auf 1/8 des ursprünglichen Wertes.

Durch die Wahl der Länge und des Durchmesser des Motors ist es möglich, einen Motor auf hohes Beschleunigungsvermögen oder auf hohen Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsgleichlauf auszulegen. Abhängig von der Applikation ist das eine oder das andere erforderlich (Tabelle 2.1). Da ein Motor immer eine zu bewegende Masse antreibt, sind für eine Optimierung des Antriebes alle zu bewegenden Massen des Antriebsstranges zu berücksichtigen. Weitere Betrachtungen hierzu finden sich im Abschnitt „Beschleunigungsvermögen und Gleichlaufverhalten“ in diesem Kapitel.

Tabelle 2.1 Vergleich niedriges und hohes Trägheitsmoment des Motors

	Niedriges Trägheitsmoment Low-Inertia-Motor	Hohes Trägheitsmoment High-Inertia-Motor
Vorteil	Hohes Beschleunigungsvermögen	Hoher Drehzahl- oder Geschwindigkeitsgleichlauf
Applikation (Beispiele)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Handhabungstechnik ■ Holzbearbeitungsmaschinen ■ Maschinen für die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Werkzeugmaschinen ■ Druckmaschinen ■ Messmaschinen

Für die vom Motor bereitgestellte mechanische Leistung gilt:

$$P_{Mo} = M_{Mo} \omega_{Mo} = M_{Mo} 2\pi n_{Mo} \tag{2.4}$$

Bei konstantem Drehmoment des Motors ist dessen Leistung an der Welle umso größer, je höher die Drehzahl ist. Daher sollte die Motordrehzahl möglichst hoch gewählt werden, so dass ohne Kostenerhöhung für den Motor und die zugehörige Leistungselektronik die Motorleistung gesteigert wird. Sind jedoch aufgrund vergleichsweise hoher Drehzahlen und/oder hoher Zentrifugalkräfte kostentreibende mechanische Maßnahmen am Motor erforderlich, ist eine gesonderte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erforderlich.

Die maximale Drehzahl von Elektromotoren ist oft höher als die von der Antriebsaufgabe geforderte maximale Drehzahl. In diesen Fällen ermöglichen mechanische Übertragungsele-

mente zwischen dem Motor und der anzutreibenden Masse eine Anpassung des Arbeitspunktes des Motors an denjenigen der Antriebsaufgabe. Vernachlässigt man zunächst die Verluste im Antriebsstrang, so lautet die Leistungsbilanz:

$$\underbrace{M_{M0} 2\pi n_{M0}}_{\text{Antriebsseite}} = \underbrace{M_M 2\pi n_M}_{\text{Abtriebsseite}} \rightarrow M_{M0} = \frac{n_M}{n_{M0}} M_M \quad (2.5)$$

Das Motordrehmoment ergibt sich, abhängig vom Verhältnis der Drehzahlen von Abtriebsseite zu Antriebsseite, aus dem Drehmoment, das an der anzutreibenden Masse benötigt wird. Kann die Motordrehzahl größer als die Drehzahl der anzutreibenden Masse gewählt werden, ist eine Verringerung des erforderlichen Motordrehmoments möglich. Die Anpassung von Drehmomenten und Drehzahlen ist eine Aufgabe mechanischer Übertragungselemente. In elektrischen Antrieben ermöglichen sie eine technische und wirtschaftliche Optimierung des Motors und der Leistungselektronik (Bauvolumen und Kosten). Eine weitere Aufgabe von mechanischen Übertragungselementen in elektrischen Antrieben kann die Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung sein.

Innerhalb des Antriebsstrangs können mehrere mechanische Übertragungselemente hintereinander, d. h. in Serie, geschaltet sein. Für jedes mechanische Übertragungselement werden die in Tabelle 2.2 gezeigten Größen eingeführt.

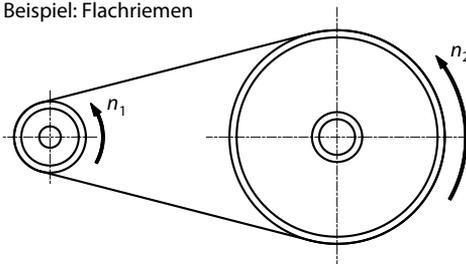
Bewegungsart	Antriebsseite	→	Abtriebsseite
rotatorisch → rotatorisch	Drehmoment	$M_1 \rightarrow M_2$	Drehmoment
	Drehzahl	$n_1 \rightarrow n_2$	Drehzahl
rotatorisch → linear	Drehmoment	$M_1 \rightarrow F_2$	Kraft
	Drehzahl	$n_1 \rightarrow v_2$	Geschwindigkeit

Tabelle 2.2 Formelzeichen

Abhängig von der Art der Kraftübertragung (Bild 2.2) unterscheidet man in:

- Reibschlüssige Übertragungselemente und
- Formschlüssige Übertragungselemente

Reibschlüssig
Beispiel: Flachriemen



Formschlüssig
Beispiel: Zahnriemen

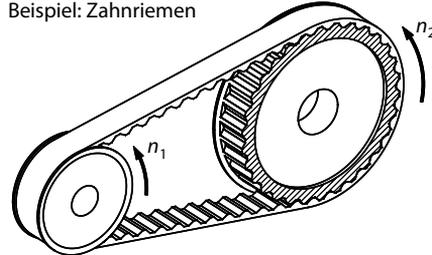


Bild 2.2 Reibschlüssige und formschlüssige Übertragungselemente

Bei reibschlüssigen Übertragungselementen erfolgt die Kraft- bzw. Drehmomentübertragung mittels Reibung. Prinzipbedingt kommt es bei reibschlüssigen Übertragungselementen zu

Schlupf zwischen Antriebs- und Abtriebsseite. Sie eignen sich daher nicht für Positionieraufgaben. Bei Überschreitung des maximalen durch Reibung übertragbaren Drehmoments kommt es zum „Durchrutschen“.

Formschlüssige Übertragungselemente nutzen Formelemente, wie Zähne, Kugeln, Ketten etc., zur Kraft- bzw. Drehmomentübertragung. Durch die ineinander greifenden Formelemente tritt kein Schlupf auf. Formschlüssige Übertragungselemente eignen sich daher für Positionieraufgaben. Im Weiteren werden nur formschlüssige Übertragungselemente behandelt.

■ 2.2 Leistungsbilanz und Wirkungsgrad

In elektrischen Antrieben werden elektrische und mechanische Leistungen gewandelt, umgeformt und übertragen. Bei diesen Vorgängen entstehen mehr oder weniger große Verluste. Die Bezeichnung der Leistung für das jeweilige Antriebselement im Antriebsstrang erfolgt entsprechend zu den Drehmomenten bzw. Drehzahlen:

P_1	Leistung an der Antriebseite	<i>Power at driving side</i>	W
P_2	Leistung an der Abtriebsseite	<i>Power at output side</i>	W
P_L	Verlustleistung	<i>Power loss</i>	W

Die Leistungsbilanz ist die Summe der zugeführten und abgeführten Leistungen. Die Summe ist in einem abgeschlossenen System immer null.

$$\underbrace{P_1}_{\substack{\text{zugeführte} \\ \text{Leistung}}} - \underbrace{P_2 + P_L}_{\substack{\text{abgeführte} \\ \text{Leistung}}} = 0 \quad (2.6)$$

Der Wirkungsgrad ist definiert zu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (2.7)$$

η Wirkungsgrad *Efficiency*

Bei hintereinandergeschalteten Antriebselementen sind zur Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades die einzelnen Wirkungsgrade zu multiplizieren:

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i; \quad i = 1, \dots, n \quad n: \text{Anzahl Antriebselemente Antriebsstrang} \quad (2.8)$$

■ 2.3 Drehzahlenpassung und Antriebsoptimierung

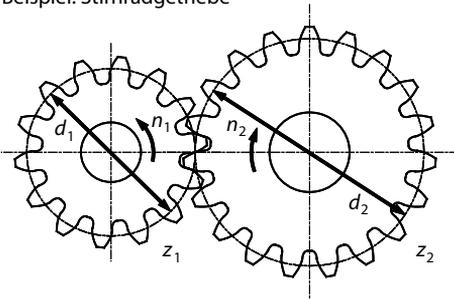
Zur Anpassung des Drehmomentes und der Drehzahl auf der Antriebsseite an das Drehmoment und die Drehzahl auf der Abtriebsseite werden bei elektromechanischen Antrieben

Getriebe eingesetzt. Sie werden genutzt, um Drehmomente bzw. Kräfte umzuformen und zu übertragen (Bild 2.3). Man unterscheidet in:

- Zahnradgetriebe
- Zugmittelgetriebe

Zugmittelgetriebe nutzen Zugmittel wie Riemen oder Ketten zur Übertragung von tangentialen Zugkräften. Das Zugmittel umschlingt zwei Scheiben, um aus dem Drehmoment auf der Antriebsseite die Zugkraft zu erzeugen und sie anschließend auf der Abtriebsseite in ein Drehmoment zu wandeln. Die Kraft- bzw. Leistungsübertragung erfolgt im sogenannten Lasttrum. Bei unbegrenzter Anzahl an Umdrehungen muss das Zugmittel zurückführt werden. Dies erfolgt im kraftfreien Leertrum.

Zahnradgetriebe
Beispiel: Stirnradgetriebe



Zugmittelgetriebe
Beispiel: Zahnriemen

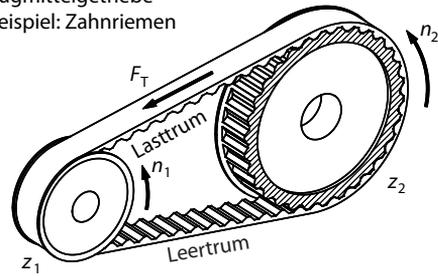


Bild 2.3 Zahnradgetriebe und Zugmittelgetriebe

Das Verhältnis von Antriebsdrehzahl zu Abtriebsdrehzahl des Getriebes ist die Getriebeübersetzung. Sie ist definiert zu:

$$i_G = \frac{n_1}{n_2} \tag{2.9}$$

i_G	Getriebeübersetzung	<i>Gear ratio</i>	
n_1	Drehzahl an der Antriebsseite	<i>Speed at driving side</i>	1/s
n_2	Drehzahl an der Abtriebsseite	<i>Speed at output side</i>	1/s

Der Zusammenhang zwischen dem Arbeitspunkt der Antriebsseite und dem Arbeitspunkt der Abtriebsseite kann immer mit

- dem kinematischen Zusammenhang und
- einer Leistungsbilanz

hergeleitet werden.

Den Zusammenhang zwischen den Motorgrößen und den Größen an der anzutreibenden Masse erhält man damit bei einem Zahnradgetriebe zu:

Kinematischer Zusammenhang

$$n_{M0} = i_G n_M \tag{2.10}$$

Leistungsbilanz ($P_M = \eta_G P_{M_0}$)

$$M_M 2\pi n_M = \eta_G M_{M_0} 2\pi n_{M_0} = \eta_G M_{M_0} 2\pi i_G n_M \tag{2.11}$$

P_M	Leistung der anzutreibenden Masse	<i>Power at mass to be moved</i>	W
P_{M_0}	Motorleistung (mechanisch)	<i>Motor power (mechanical)</i>	W
η_G	Wirkungsgrad des Getriebes	<i>Efficiency of gear</i>	

Damit ergibt sich das erforderliche Motordrehmoment zu:

$$M_{M_0} = \frac{1}{\eta_G i_G} M_M \tag{2.12}$$

Das maximale Drehmoment auf der Abtriebsseite ist durch die Antriebsaufgabe vorgegeben, womit sich das maximal erforderliche Motordrehmoment berechnen lässt. Mit der Wahl der Getriebeübersetzung wird das maximal zur Verfügung zu stellende Drehmoment des Motors beeinflusst (Tabelle 2.3). Das maximale Drehmoment des Motors bestimmt im Wesentlichen dessen Bauvolumen. Ferner ist der Motorstrom in erster Näherung proportional zum Motordrehmoment. Die Größe der Leistungselektronik steigt mit dem Motorstrom. Unter diesen Gesichtspunkten ist es vorteilhaft, die Getriebeübersetzung $i_G > 1$ zu wählen.

Tabelle 2.3 Einfluss der Getriebeübersetzung

Getriebe- übersetzung	Drehzahl & Drehmoment	Bauvolumen & Kosten*	Antriebsprinzip
$i_G > 1$	$n_{M_0} > n_M$ $M_{M_0} < M_M$	↘ ✓	Elektromechanischer Antrieb
$i_G < 1$	$n_{M_0} < n_M$ $M_{M_0} > M_M$	↗ ✗	Elektromechanischer Antrieb
$i_G = 1$	$n_{M_0} = n_M$ $M_{M_0} = M_M$		Direktantrieb oder direkt gekoppelt

* Motor & Leistungselektronik

Tabelle 2.4 zeigt exemplarisch einen Vergleich des erforderlichen Motordrehmomentes zwischen der Lösung einer Antriebsaufgabe für einen Rundtisch mit Direktantrieb und elektromechanischem Antrieb. Für den elektromechanischen Antrieb wird beispielhaft eine Getriebeübersetzung von $i_G = 5$ eingesetzt.

Tabelle 2.4 Vergleich erforderliches Motordrehmoment mit Direktantrieb und elektromechanischem Antrieb

	Direktantrieb	Elektromechanischer Antrieb
Spezifikation Antriebsaufgabe	$M_M = 100 \text{ Nm}$ $n_M = 600 \text{ min}^{-1}$	
Motor	$M_{M_0} = 100 \text{ Nm}$ $n_{M_0} = 600 \text{ min}^{-1}$	Beispiel ($i_G = 5$) $M_{M_0} = 20 \text{ Nm}$ $n_{M_0} = 3000 \text{ min}^{-1}$

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ist bei elektromechanischen Antrieben ein Motor auszuwählen, der Drehzahlen erlaubt, die nicht unter der von der Antriebsaufgabe geforderten maximalen Drehzahl liegen.



Es ist allerdings zu beachten, dass ein Motor mit deutlich höherer Drehzahl als von der Antriebsaufgabe erforderlich eine höhere Stromaufnahme haben kann als ein Motor, dessen Drehzahl nur moderat über der zur Erfüllung der Antriebsaufgabe erforderlichen Drehzahl liegt. Eine zu hohe Wahl der Getriebeübersetzung führt dann nicht zu einem wirtschaftlichen Optimum.

■ 2.4 Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung

Zur Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung werden in elektrischen Antrieben hauptsächlich folgende mechanischen Antriebskomponenten eingesetzt:

- Gewindetrieb
- Zahnriemen
- Zahnstange-Ritzel

2.4.1 Gewindetrieb

Ein Gewindetrieb besteht aus einer Welle mit einem Gewinde (Gewindespindel) und einer Mutter (Gewindemutter). Die Welle wird vom Motor angetrieben. Die anzutreibende Masse ist fest mit der Mutter verbunden. Eine Drehbewegung der Welle führt zu einer Linearbewegung der Mutter. Bild 2.4 zeigt exemplarisch einen Kugelgewindetrieb.

Um Reibungsverluste zu minimieren, werden zur Kraftübertragung von der Gewindespindel auf die Gewindemutter Kugeln eingesetzt, die auf Laufbahnen abrollen. Beim Gewindetrieb bestimmt die Spindelsteigung den kinematischen Zusammenhang zwischen der Drehzahl auf

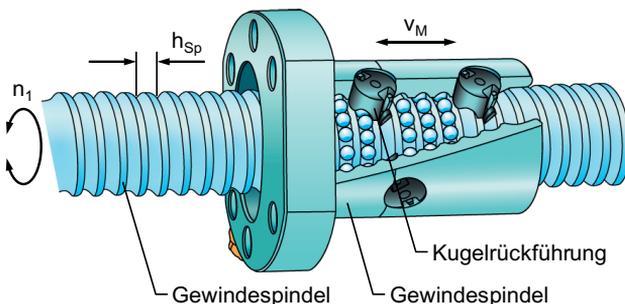


Bild 2.4 Kugelgewindetrieb
(© SKF GmbH, 2012)

der Antriebsseite und der Geschwindigkeit auf der Abtriebsseite.

$$v_M = h_{Sp} n_1 \quad (2.13)$$

v_M	Geschwindigkeit der anzutreibenden Masse	<i>Velocity of mass to be moved</i>	m/s
h_{Sp}	Spindelsteigung des Gewindetriebes	<i>Spindle pitch of screw drive</i>	m

Stellt man die Leistungsbilanz auf, so folgt:

$$F_M v_M = F_M h_{Sp} n_1 = \eta_{Sp} M_1 2\pi n_1 \quad (2.14)$$

Das Drehmoment kann in eine Kraft umgerechnet werden:

$$F_M = \eta_{Sp} \frac{2\pi}{h_{Sp}} M_1 \quad (2.15)$$

η_{Sp}	Wirkungsgrad des Gewindetriebes	<i>Efficiency of screw drive</i>
-------------	---------------------------------	----------------------------------

2.4.2 Zahnriemen

Zahnriemen eignen sich neben dem Einsatz in Zugmittelgetrieben auch zur Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung. Es gibt zwei Ausführungsformen:

- Umlaufender Zahnriemen
- Eingespannter Zahnriemen

Beim umlaufenden Zahnriemen ist die anzutreibende Masse fest mit dem Zahnriemen verbunden. Der Zahnriemen umschlingt jeweils am Ende des Verfahrenweges eine Zahnscheibe. Eine der beiden Zahnscheiben wird vom Motor angetrieben (Bild 2.5). Insbesondere für große Verfahrenwege, bei denen ein umlaufender Riemen wegen der Riemenlänge nicht zweckmäßig ist oder eine Zahnstange-Ritzel-Lösung die unwirtschaftlichere Lösung darstellt, werden eingespannte Zahnriemen eingesetzt. Der Zahnriemen umschlingt dabei nur eine Zahnscheibe, die vom Motor angetrieben wird.

Bei Zahnriemen zur Erzeugung von Linearbewegungen ist die Geschwindigkeit auf der Abtriebsseite abhängig von der Drehzahl auf der Antriebsseite und dem wirksamen Durchmesser der Zahnscheibe. Der kinematische Zusammenhang lautet:

$$v_M = \pi d_{Eff} n_1 \quad (2.16)$$

d_{Eff}	Wirksamer Durchmesser der Zahnscheibe	<i>Effective diameter of toothed lock washer</i>	m
-----------	---------------------------------------	--	---

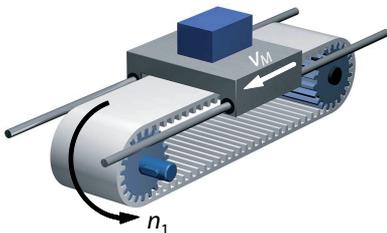


Bild 2.5 Zahnriemen zur Erzeugung einer Linearbewegung (© Lenze SE, 2012)

Index

- Abklingkonstante, 46
- absolute Messgeräte, 180
- Abtastfrequenz, 23, 202
- Abtastzeit, 23, 202, 210, 218
- Amplitudengang, 51
- Anker, 81
- Anlaufverfahren, 139
- Anstiegszeit, 200
- Antriebsprinzip, 24
- Anzugsdrehmoment, 155
- Anzugsstrom, 155
- anzutreibende Masse, 16
- anzutreibendes Massenträgheitsmoment, 16
- aperiodische Bewegung, 47
- aperiodischer Grenzfall, 47
- Außenleiterspannung, 120
- Außenleiterstrom, 120

- Bemessungsgrößen, 77
- Bemessungspunkt, 91
- Beschleunigungsdrehmoment, 18
- Betriebszustände, 15
- Bewegungsgleichung, 18
- Bewegungskordinaten, 16
- Bewegungsprofil, 39
- Bezugspunkt, 36
- BLDC-Motor, 97
- Bleche, 85
- Blechpaket, 152
- blockförmige Kommutierung, 97
- Bode-Diagramm, 52
- bürstenbehalteter Motor, 86
- bürstenloser Gleichstrommotor, 97

- charakteristische Gleichung, 46

- d,q-Koordinatensystem, 225
- Dämpfungsgrad Positionsregelkreis, 215
- Dauerbetrieb, 68
- Dauermagnete, 61

- dezentrale Antriebstechnik, 166
- digitale Regler, 23
- direkt gekoppelter Antrieb, 26
- Direktantrieb, 227, 228, 231
- direkte Messung, 175
- Drehfeld, 123
- drehmomentbildender Strom, 226
- Drehmomentkonstante, 83, 144
- Drehmomentwelligkeit, 153
- Drehspannung, 115
- Drehspannungssystem, 151
- Drehstromsystem, 115
- Drehstromwicklung, 137
- drehzahleregelter Antrieb, 20
- Drehzahlregler, 202
- Drehzahlschwankung, 41, 201
- drehzahlvariabler Antrieb, 20, 162
- Dreieckschaltung, 118

- EC-Motor, 97
- Eckfrequenz, 164
- Effizienzklasse, 72
- Eigenwert, 46
- Einbaumotor, 228
- Einschaltdauer, 67
- Einschwingzeit, 200
- eisenbehalteter Anker, 85
- eisenlose Anker, 86
- Eisenverluste, 63
- elastische Kopplung, 42, 207
- Elastizität, 42
- elektrisch erregte Maschine, 79
- elektrische Zeitkonstante, 59
- elektrischer Direktantrieb, 24, 207
- elektrischer Kreis, 54
- elektromechanischer Antrieb, 24, 208
- Energiespeicher, 133
- Erregerfeld, 59, 138, 225, 226
- Erregerwicklung, 79

- Federsteifigkeit, 43
- feldorientierte Regelung, 168
- Feldschwächung, 92, 166, 225
- ferromagnetische Werkstoffe, 60
- fremderregte Maschine, 79
- Frequenzrichter, 164
- Führungsverhalten, 196

- Gesamtmasse, 16
- Geschwindigkeitsregler, 202
- Geschwindigkeitsschwankung, 200
- Getriebeübersetzung, 31
- Gewindetrieb, 33

- Halbschrittbetrieb, 107
- Haltedrehmoment, 89
- harmonische Schwingung, 47
- Hauptpol, 170
- High-Inertia-Motor, 28
- Hybridschrittmotor, 111
- Hystereseverluste, 63

- indirekte Messung, 175
- induzierte Spannung, 56, 141
- inkrementale Messgeräte, 180
- Inkrementalsignal, 178
- instationärer Betriebszustand, 18
- International Efficiency, 72
- International Mounting, 77
- International Protection, 70

- Käfigläufer, 152
- kaskadierte Regelung, 201
- Kennfrequenz Positionsregelkreis, 215
- Kennkreisfrequenz Positionsregelkreis, 215
- Kippdrehmoment, 155
- Kippdrehzahl, 155
- Kippschlupf, 155
- Klauenpolschrittmotor, 104
- Kloß'sche Gleichung, 156
- Koerzitivfeldstärke, 60
- Kommutator, 86
- Kommutierung, 98, 139
- Kondensatormotor, 168
- Kupferverluste, 63
- Kurzschlussläufer, 152
- Kurzschlussringe, 153

- Kurzstatormotor, 228

- Längsstrom, 226
- Langstatormotor, 228
- Lastdrehmoment, 18
- Lastkraft, 17
- Läufer, 81
- Leerlaufdrehzahl, 89
- Leistungselektronik, 20
- Leistungsfluss, 21
- Leiterspannung, 120
- Leiterstrom, 120
- Lenz'sche Regel, 57
- Linearmotor, 228
- logarithmisches Dekrement, 49
- Lorentzkraft, 55, 155
- Low-Inertia-Motor, 28

- magnetische Sättigung, 60
- magnetischer Kreis, 54
- Magnetisierungskennlinie, 60
- Magnitude, 51
- Maschinenschwingungen, 205
- mechanische Übertragungselemente, 21
- Messgeräte, 21
- Messprotokoll, 192
- Mikroschrittbetrieb, 107
- Momentenwelligkeit, 85
- Motion Controller, 20, 139, 210, 218
- Motorstarter, 161
- Multiturn, 182

- Nebenschlusserregung, 93
- Nebenschlussmotor, 93
- Nennwerte, 78
- Netzbetrieb, 152
- Netzfrequenz, 152
- Neutralleiter, 118

- Ohmsche Verluste, 63

- periodischer Aussetzbetrieb, 68
- permanenterrgte Maschine, 79
- permanenterrgter Gleichstrommotor, 95
- permanenterrgter Synchronmotor, 136
- Phase, 51
- Phasengang, 51

- Polpaarzahl, 137, 151, 163
Polrad, 111
Polradspannung, 141
Polteilung, 82
Positionsauflösung, 190
Positionsregler, 202
- Querstrom, 226
- Rastmoment, 85
Raumzeigerdiagramm, 225
Referenzpunktfahrt, 180
Regelfenster, 200
Reihenschlusserregung, 93
Reihenschlussmotor, 93
Reluktanzschrittmotor, 110
Remanenzflussdichte, 60
Resolver, 188
Rotormagnetfeld, 139
Ruck, 205
- Sanftanlaufgerät, 161
Sanftstarter, 161
Satteldrehmoment, 155
Sattelpunkt, 155
Schleifringläufer, 152
Schlupf, 154
Schrittfolge, 111
Schrittfrequenz, 103, 110
Schrittverlust, 103
Schrittwinkel, 106
Schrittzahl, 106
selbsterregte Maschine, 79
Selbsthaldedrehmoment, 109
Selbstinduktion, 58
sensorless control, 139
sensorlose Regelung, 139
Signalperiode, 178
Singleturn, 182
sinusförmige Kommutierung, 97
Softstarter, 161
Spaltpol, 168
Spaltpol, 170
Spannungsgrenze, 91, 140, 146, 226
Spannungskonstante, 84, 143
Spindelsteigung, 33
starre Kopplung, 42
stationäre Regelabweichung, 200
- stationärer Betriebszustand, 18
steife Kopplung, 207
Steifigkeit, 43
Steinmetzschtaltung, 168
Sternschaltung, 118
Stillstands Drehmoment, 89, 144
Stillstandsstrom, 89, 144
Störverhalten, 196
Strangspannung, 120
Strangstrom, 120
Streuverluste, 63
Stromanpassung, 107
Stromgrenze, 90, 146, 206
Stromregler, 202
Synchron Drehzahl, 152
- thermische Längenänderung, 176
thermische Zeitkonstante, 65
Torquemotor, 228
Torsionssteifigkeit, 43
Trägheitsmoment, 17
tubularer Linearmotor, 228
- U/f-Steuerung, 163
Überschwingen, 200
Übertemperatur, 64
Ummagnetisierungsverluste, 63
Umrichter, 130
Unterschwingen, 200
ununterbrochener periodischer Betrieb, 68
- Vollschrittbetrieb, 105
Vollschrittwinkel, → Schrittwinkel
Vorzugsposition, 102
- Wechstepolschrittmotor, 104
Wechselrichter, 130
Wicklung, 59
Wirbelstromverluste, 63
- Zahnradgetriebe, 31
Zahnriemen, 33
Zahnstange-Ritzel, 33
Zeigerdiagramm, 140, 143
zentrale Antriebstechnik, 166
Zugmittelgetriebe, 31
Zwischenkreis, 130