



Elektrische Maschinen und Aktoren

Eine anwendungsorientierte Einführung

von

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerke

Oldenbourg Verlag München

Dr.-Ing. Wolfgang Gerke ist seit 1997 Professor für elektrische Maschinen, Regelungs- und Automatisierungstechnik am Umwelt-Campus der Fachhochschule Trier und lehrt seit 2001 das Fach Robotik an der Universität Luxemburg. Seine Hauptarbeitsfelder sind die Aktorik und Robotik sowie deren Anwendungen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2012 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München
Telefon: (089) 45051-0
www.oldenbourg-verlag.de

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Lektorat: Dr. Gerhard Pappert
Herstellung: Anna Grosser
Titelbild: Entwurf des Autors
Einbandgestaltung: hauser lacour
Gesamtherstellung: Grafik & Druck GmbH, München

Dieses Papier ist alterungsbeständig nach DIN/ISO 9706.

ISBN 978-3-486-71265-0
eISBN 978-3-486-71984-0

Vorwort

Die Bedeutung der elektrischen Maschinen und Aktoren in der Industrie und im täglichen Leben wächst kontinuierlich. Elektrische Maschinen besitzen die Fähigkeit als Motor oder Generator zu arbeiten und eignen sich daher hervorragend für moderne Antriebs- und Aktorkonzepte, bei denen es auf die effiziente Energiewandlung ankommt.

Elektrische Maschinen und Aktoren zeigen ihre Vielfältigkeit eindrucksvoll im Auto. Sitze, Dächer, Klappen, Schlösser, Getriebe, Bremsen, Kupplungen usw. werden von Aktoren verstellt. Neuartige und konventionelle Antriebskonzepte arbeiten dabei Hand in Hand. Diese Stelleinrichtungen bezeichnet man als Aktoren oder Aktuatoren. Das Auto ist ein gutes Beispiel für die Verschiedenartigkeit der Funktionen, Aufbauten und Anwendungen von Aktoren. Wir steuern die Aktoren, indem wir Schalter betätigen, das Bremspedal oder Gaspedal drücken. Viele Aktoren arbeiten unbemerkt in Assistenzsystemen oder als Sicherheitselemente. Z. B. ist die moderne Diesel-Einspritzung ohne schnell und genau arbeitende, magnetische Aktoren oder Piezoaktoren nicht mehr denkbar. In einigen Sicherheitssystemen wie dem Gurtstraffer oder Airbag werden die Aktoren nur bei speziellen Ereignissen aktiviert.

Die Aktoren werden zusammen mit Sensoren in mechatronischen Systemen eingesetzt. Dabei wird versucht, in neuartigen, integrierten Systemen mechanische und elektrische Systeme miteinander zu verschmelzen und dadurch intelligente und kompakte Baueinheiten zu erzeugen. Diese Antriebe werden z. B. in zukünftigen, dem Menschen immer ähnlicher werdenden Robotern eingesetzt.

Das vorliegende Lehrbuch führt in das Gebiet der elektrischen Maschinen und Aktoren ein und stellt wichtige Funktionen meist an Beispielen vor. Die zum Verständnis notwendigen, physikalischen Grundlagen, wie die Energiewandlung, die mechanische Antriebstechnik, die magnetischen Felder, die mathematische Beschreibung von Wechselgrößen und die Pulsweitenmodulation werden präsentiert. Der Leser ist nach der Durcharbeit des Lehrstoffes in der Lage, bedeutende Aktoren wie die Magnetaktoren, Piezoaktoren, Schrittmotoren sowie die elektrischen Gleich- und Drehstrommaschinen in ihrem Aufbau zu beschreiben, wesentliche Funktionen zu erklären und grundlegende Berechnungen durchzuführen.

Das Buch spricht Studierende technischer Fachrichtungen an. Doch auch Studierende und Lernende angrenzender Fachrichtungen wie z. B. Wirtschaftsingenieur-Studierende, können sich mithilfe des Lehrbuchs in die elektrischen Maschinen und Aktoren einarbeiten. Die Erfahrung zeigt, dass die elektrotechnischen Anwendungen bei dieser Zielgruppe Verständnisschwierigkeiten hervorrufen können. An dieser Stelle versucht das Buch zu helfen, indem Herleitungen ausführlich erklärt werden und der Stoff mit vielen Bildern und Skizzen anschaulich dargestellt wird. Auch für spezielle Lehrveranstaltungen an Technikerschulen in Fächern wie z. B. Mechatronik, Aktorik, elektrische Maschinen kann das Buch als Begleittext verwendet werden.

Ingenieure oder Techniker der Praxis können sich mithilfe des Buches in das Arbeitsgebiet einarbeiten oder bekannten Stoff wiederholen, und Lehrenden soll es eine Grundlage zur Stoffvermittlung bieten.

Es handelt sich um eine Darstellung, die auch zum Selberlernen geeignet ist. Es werden nach jedem Abschnitt Beispielaufgaben mit Lösungen vorgestellt. An die Beispielaufgaben schließt sich eine Zusammenfassung an, in der die wesentlichen, zu dem Abschnitt gehörenden Ergebnisse aufgeführt werden. Kontrollaufgaben mit ausführlichen Lösungen geben dem Leser die Möglichkeit, das Erlernte bei der Bearbeitung von Aufgaben anzuwenden und zu vertiefen. An vielen Stellen werden Rechenprogramme zur Simulation genutzt, um grafische Ergebnisse wie Zeit-Liniendiagramme zur Lösung von Aufgaben zu erzeugen.

Ich danke allen, die sich an der Vorbereitung dieses Buches beteiligt haben, dem Oldenbourg Verlag für die Möglichkeit der Veröffentlichung, Herrn M. Eng. Dipl.-Ing (FH) Sebastian Schommer und Herrn B. Eng. Michael Emrich vom Umwelt-Campus der Fachhochschule Trier für die Korrektur und das Lektorat bei wesentlichen Kapiteln.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Tochter Julia Gerke für die unermüdliche Gestaltung der Zeichnungen und Skizzen. Zuletzt danke ich meiner Frau Annette für die Geduld und die vielfältige Unterstützung, die diese Arbeit erst ermöglicht hat.

Wolfgang Gerke

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einleitung	1
2 Einteilung und Aufbau von Aktoren	5
2.1 Einteilung der Aktoren.....	5
2.2 Aufbau von Aktoren.....	8
3 Arbeit, Energie, Leistung	15
3.1 Elektrische Arbeit und Energie	15
3.2 Mechanische Arbeit bei der Translation eines Körpers.....	18
3.3 Mechanische Arbeit bei der Rotation eines Körpers.....	20
3.4 Leistung	21
3.5 Grundgleichungen mechanischer Energieübertrager für Aktoren.....	22
3.6 Lastkennlinien.....	29
4 Berechnungsgrundlagen magnetischer Kreise für elektrische Maschinen und Aktoren	35
4.1 Die magnetische Flussdichte B und die Feldstärke H.....	37
4.2 Der magnetische Fluss	46
4.3 Das Durchflutungsgesetz	51
4.4 Magnetischer Widerstand.....	54
4.5 Berechnung magnetischer Größen im unverzweigten Magnetkreis.....	56
4.6 Dynamik der Stromführung in Aktor-Spulen.....	61
4.6.1 Verzögerungssystem erster Ordnung, PT1-System.....	64
4.6.2 Simulationsprogramm.....	65
5 Elektromagnetische Aktoren	69
5.1 Berechnung der Reluktanzkraft	69
5.2 Magnetaktoren	74
5.3 Magnetbetriebene Hydroventile.....	79
5.3.1 Hydraulische 4/3 Wegeventile	81

5.3.2	Stetig wirkende Proportional- und Servoventile	81
5.4	Elektrisch gesteuerte Einspritzventile im Kraftfahrzeug	84
6	Piezoaktoren	87
6.1	Stapelaktoren und Multilayer-Aktoren	89
6.1.1	Auslenkung bei Belastung	92
6.2	Bauformen	95
6.3	Wegvergrößerungssysteme	96
6.4	Anwendung Stapelaktor: Einspritzventil mit Piezoaktor	97
6.5	Piezoaktoren mit unbegrenzter Auslenkung	100
6.5.1	Inchworm-Motor	101
6.5.2	LEGS-Motor	102
6.5.3	Piezo-Aktor-Drive (PAD TM)	104
7	Elektromotorische Aktoren	107
7.1	Tauchspulenaktor	109
7.2	Linearmotor mit elektronischer Kommutierung	116
8	Elektronische Energiesteller	121
8.1	Unipolare Ansteuerung	121
8.2	Bipolare Ansteuerung	123
8.3	Pulsweitenmodulation (PWM)	124
8.4	Prinzip der Stromregelung bei Spulen und Wicklungen	129
9	Schrittmotoren	135
9.1	Reluktanz Linear-Schrittmotoren	135
9.2	Schrittmotor-Ansteuerung	138
9.3	Zweistängiger Permanentmagnet-Schrittmotor mit je 2 Spulen	140
9.3.1	Vollschrittbetrieb	142
9.3.2	Halbschrittbetrieb	144
9.3.3	Zeitlicher Momentverlauf und Kommutierungswinkel	144
9.4	Zweistängiger PM-Schrittmotor mit je 4 Spulen	148
9.5	Hybrid-Schrittmotor	150
9.6	Ansteuerungsarten	153
10	Die Gleichstrommaschine	157
10.1	Das Barlowsche Rad	157
10.2	Die Unipolarmaschine	158
10.3	Aufbau der Gleichstrommaschine	159

10.4	Kräfte auf eine Leiterschleife und mechanische Kommutierung	163
10.4.1	Gleichgewichtszustände	164
10.4.2	Berechnung des Drehmoments auf eine Spule	165
10.4.3	Kräfte auf mehrere Leiterschleifen	166
10.5	Anker mit Schleifenwicklung	170
10.5.1	Reihenschaltung von vier Leiterschleifen	170
10.5.2	Stromwendung bei der Schleifenwicklung	171
10.5.3	Einfluss der Polpaarzahl	173
10.6	Spannungsinduktion bei elektrischen Maschinen	174
10.6.1	Spannungsinduktion einer Leiterschleife	175
10.6.2	Spannungsinduktion bei mehreren am Umfang des Ankers verteilten Leitern	177
10.7	Ankerquerfeld	179
10.8	Schaltungen der Erregerfeldspannung	182
10.9	Gleichungen zur Berechnung wichtiger Größen der Gleichstrommaschine	185
10.9.1	Das innere Moment	186
10.9.2	Drehzahl-Drehmoment-Beziehung	187
10.9.3	Drehzahl-Drehmoment-Beziehung der Reihenschlussmaschine	191
10.10	Der Scheibenläufermotor	194
11	Die elektrischen Drehfeldmaschinen	199
11.1	Veränderliche Magnetfelder und Wechselstrombeziehungen	200
11.1.1	Wechselstromwiderstand	202
11.1.2	Wechselstromleistung	205
11.2	Erzeugung von mehrphasigen Wechselspannungen über eine Außenpolmaschine	209
11.2.1	Zweiphasenwechselspannung	209
11.2.2	Erzeugung einer Dreiphasen-Wechselspannung über einen Drehstrom-Außenpolgenerator	210
11.3	Stern- und Dreieckschaltung	213
11.4	Erzeugung einer dreiphasen Wechselspannung über einen Drehstrom-Innenpolgenerator	214
11.5	Drehfelder	216
11.5.1	Zweiphasensystem	217
11.5.2	Raumzeiger im Dreiphasensystem	220
11.5.3	Drehfeld bei mehreren Spulen pro Wicklungsstrang	224
12	Die Asynchronmaschine	229
12.1	Kraftentstehung	229
12.2	Stator	230
12.3	Asynchronmaschine mit Käfigläufer/Kurzschlussläufer	231
12.4	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	234

12.5	Anschluss der Asynchronmaschine an das Drehstromnetz.....	236
12.6	Wirkungsweise der Asynchronmaschine	241
12.6.1	Momentbildung	241
12.6.2	Anlauf.....	242
12.7	Spannungsinduktion bei offenen Läuferstromkreisen-Vergleich mit dem Transformator	245
12.8	Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine	248
12.8.1	Getrennte Betrachtung von Stator und Rotor.....	248
12.8.2	Umrechnung der Läufergrößen auf den Stator	249
12.8.3	Ersatzschaltbild mit galvanischer Kopplung	250
12.9	Berechnung der Stator- und der Läuferströme.....	252
12.10	Luftspaltleistung und Drehmoment	256
12.10.1	Luftspaltleistung	256
12.10.2	Drehmoment	257
12.11	Kreisdiagramme und Ortskurven.....	258
12.11.1	Ortskurvenpunkte und Strecken	259
12.11.2	Beispiel einer Ortskurve des Statorstroms	260
12.12	Die Belastungskennlinie	262
12.13	Kloßsche Formel	264
12.14	Anfahren und Bremsen	266
12.14.1	Stern-Dreieck-Schaltung	266
12.14.2	Anlauf mit Widerständen im Läuferkreis	267
12.14.3	Bremsschaltungen der Asynchronmaschine	267
12.15	Drehzahlsteuerung	268
12.15.1	Änderung der Polpaarzahl	268
12.15.2	Änderung des Schlupfes	269
12.16	Änderung der Frequenz der Drehspannung	270
13	Die Synchronmaschine	275
13.1	Aufbau und Wirkungsweise.....	276
13.2	Ersatzschaltbild der Synchronmaschine	278
13.3	Kraftentstehung bei der Innenpol-Synchronmaschine.....	279
13.3.1	Unter- oder Übererregung.....	282
13.3.2	Antriebsmoment der Vollpol-Synchronmaschine	283
13.4	Permanentmagneterregte Synchronmaschine	285
13.4.1	Bauform.....	286
13.4.2	Momententstehung	287

14	Der Synchron-Servomotor	289
14.1	Servotechnik	289
14.2	Eigenschaften des Synchron-Servomotors.....	293
14.3	Drehfeldsteuerung über Hall-Sensoren	295
14.4	Blockkommutierung	296
14.5	Sinuskommutierung	300
14.6	Lageregelung	302
15	Zusammenfassung	305
16	Lösung der Kontrollfragen	309
Literaturverzeichnis		329
Stichwortverzeichnis		333

1 Einleitung

Das vorliegende Lehrbuch gibt eine Einführung in das umfassende Fachgebiet der elektrischen Maschinen und Aktoren. Unter dem Begriff Aktor soll eine Stelleinrichtung in einem technischen System verstanden werden. Stelleinrichtungen können Bewegungen verrichten und Kräfte auf Objekte ausüben.

Die Stelleinrichtungen werden im Englischen auch *actuators* genannt, und es hat sich der Begriff Aktuator oder Aktor im deutschen Sprachgebrauch als Bezeichnung eingebürgert. Das technische Fachgebiet der Aktorik kann als ein Teilbereich der Mechatronik aufgefasst werden. Denn viele mechatronische Systeme umfassen, neben der möglichst im mechanischen System integrierten Sensorik und der Informationsverarbeitung auch die Aktorik, um Bewegungen auszuführen.

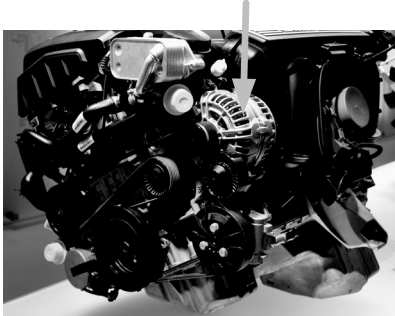
Die Aktoren wandeln *verschiedene* Energieformen in mechanische Energie um, um Stellaktionen bei industriellen Prozessen oder in mechatronischen Systemen durchzuführen. Die Kräfte und Momente in Verbindung mit den Stellwegen und Stellwinkeln können für sehr unterschiedliche Anwendungen genutzt werden.

Die elektrischen Maschinen sind Energiewandler, die *elektrische* Energie in *mechanische* Energie und umgekehrt mechanische Energie in elektrische Energie wandeln. Unter den Aktoren gibt es eine große Gruppe, die mit elektrischen Motoren betrieben werden. Diese Gruppe nutzt den Motorbetrieb der elektrischen Maschinen. Wir finden also Überschneidungen der elektrischen Maschinen mit den Aktoren, da beide eine Energiewandlung durchführen und elektrische Maschinen im Motorbetrieb eine Gruppe der Aktoren darstellen.

Zwei typische Anwendungen für elektrische Maschinen sehen wir in Abb. 1. Im linken Bild ist eine an einem Verbrennungsmotor abgebrachte elektrische Lichtmaschine markiert, die eine möglichst konstante elektrische Spannung erzeugen soll. Sie wird über einen Riemen vom Motor angetrieben. Im rechten Bild ist eine elektrische Asynchronmaschine dargestellt, die anstelle eines Verbrennungsmotors in einem Kraftfahrzeug eingebaut wurde. Diese elektrische Maschine kann als Motor arbeiten und das Auto antreiben und in Bremsphasen bzw. bei Bergabfahrten die gespeicherte kinetische Energie zurück in die Batterie speisen. Die Maschinen arbeiten mit unterschiedlichen Zielen. Der Generator erzeugt *kontinuierlich* elektrische Energie, der Elektromotor hat eine Antriebsaufgabe zu erfüllen. Beide wandeln dabei Energieformen um.

Aktoren haben im Gegensatz zu den elektrischen Maschinen die Aufgabe, Stellvorgänge durchzuführen. Wenn wir den menschlichen Körper betrachten, so kann man die Muskeln als Stellglieder betrachten, die z. B. die Arme und Beine bewegen können. Wir können mithilfe der Muskeln Kräfte erzeugen und mechanische Arbeiten verrichten. Die Muskeln mit den stabilisierenden Sehnen kann man als die Aktoren bezeichnen, die die „Stellvorgänge“ durchführen. Ähnlich wie die Muskeln kontrahieren und expandieren, werden bionisch inspirierte Roboter entwickelt, deren Antriebe sich ebenfalls verkürzen und verlängern können.

Elektrische Synchronmaschine als Generator zur Stromerzeugung (Lichtmaschine)



Elektrische Asynchronmaschine als Antrieb am Getriebe angebaut

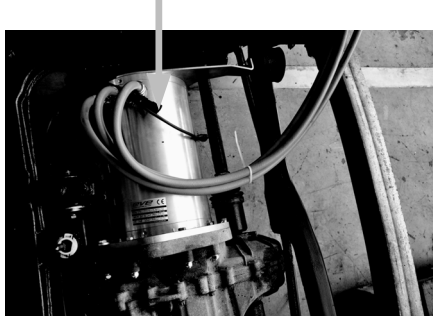


Abb. 1: Elektrische Maschinen, links: Lichtmaschine am Kfz Motor (Quelle: eigenes Foto), rechts: Elektromotor als Hauptantriebsmotor (Quelle: eigenes Foto)

Der in Abb. 2 abgebildete zweiarmige Roboter besitzt Mehrachsgelenke, die über Seilzüge betätigt werden. Die Seile sind um Antriebsscheiben gewickelt, die von elektrischen Servomotoren entsprechend einer vorgegebenen Winkellage gedreht werden.

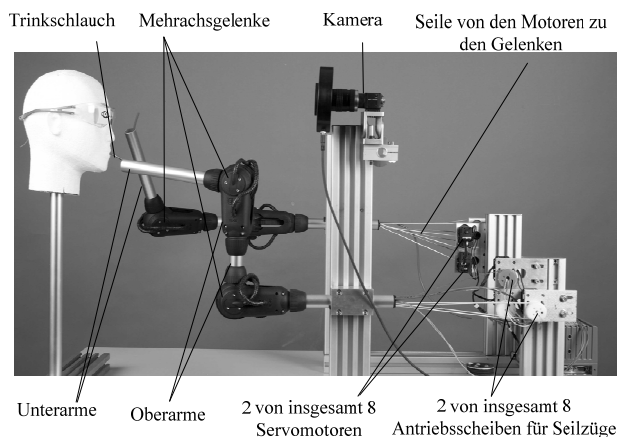


Abb. 2: Bionisch inspiriertes Robotersystem mit zwei Armen mit je 2 Kugelgelenken (Quelle: eigenes Foto)

Das Gehirn des Menschen gibt den menschlichen Aktuatoren, den Muskeln, die Befehle für bestimmte Arbeiten und nutzt für die Bewegung die Sinnesorgane. Wir erkennen z. B. mit den Augen Objekte, die wir ergreifen wollen. Genau wie im menschlichen Körper gibt es in vielen technischen Systemen vergleichbare Anforderungen, die mehr oder weniger komplex verlaufen. Der in Abb. 2 dargestellte zweiarmige Roboter soll z. B. körperlich eingeschränkte Personen durch Zuführung eines Trinkschlauchs versorgen helfen. Er soll Augenbewegungen eines bewegungsunfähigen Menschen erkennen und darüber gesteuert werden. Dazu ist er mit einer dreidimensional arbeitenden Sensorik ausgestattet. Die Augenbewegungen des Patienten werden über eine Kamera analysiert. Daraufhin berechnet ein Steuerprogramm die genaue Sollposition für den Trinkschlauch. Die Gelenkwinkel der Antriebsscheiben für die Mehrachsgelenke werden durch Servomotoren eingestellt. Über die Seile erfolgt die Bewegung der beteiligten Gelenke. Die Aktoren des Roboters sind die Motoren, die Antriebsscheiben und die Seilzüge.

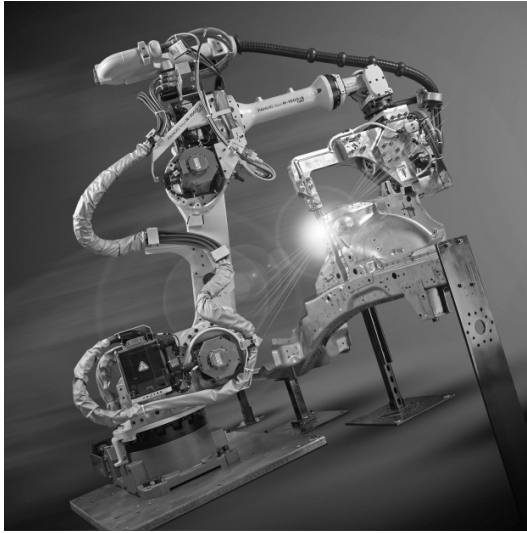


Abb. 3: Schweißroboter beim Punktschweißen (Quelle: Fanuc Robotics)

Auch die seit langem bekannten Industrieroboter, wie z. B. die in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellten Punktschweißroboter werden über elektrische Servomotoren angetrieben. Der Mittelpunkt der Schweißzange, der auch als Tool-Center-Point (TCP) bezeichnet wird, soll vorprogrammierte Raumpositionen anfahren. Man benötigt mindestens sechs Verstellmöglichkeiten für die beteiligten Arme, um räumliche Punkte mit einer vorgegebenen Orientierung anfahren zu können. Daher haben die meisten Industrieroboter auch sechs Antriebsachsen. Die elektrischen Motoren dienen als Stelleinrichtungen z. B. für den Unter- und den Oberarm. Betrachtet man die Elektromotoren genauer, erkennt man, dass sie oft mit mechanischen Getrieben und Encodern zur Drehwinkelmessung der Achse ausgestattet sind.

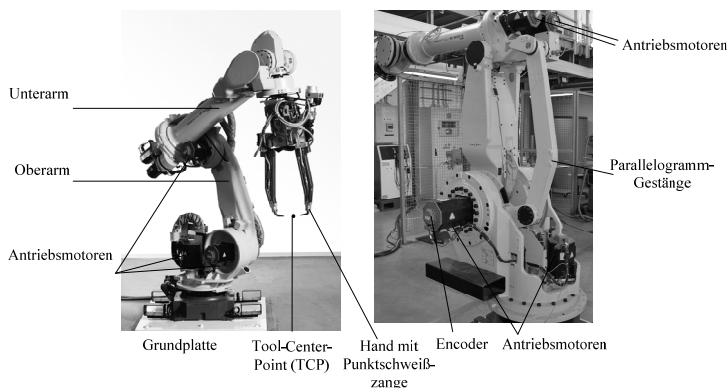


Abb. 4: Industrieroboter mit 6 Achsen, links: ohne Parallelogrammgestänge (Quelle: Firma Fanuc Robotics), rechts: Parallelogrammgestänge zur Kraftübertragung (Quelle: eigenes Foto)

Bei einigen Industrierobotern wird die Bewegung des Unterarms über ein Parallelogrammgestänge realisiert, das zusammen mit dem Motor als Stelleinrichtung dient. Die Stange wird über einen Motor bewegt und überträgt die Kraft auf den Unterarm. Dadurch kann das zu

transportierende Gewicht des Unterarms reduziert werden, denn der Antriebsmotor kann auf dem Grundgestell montiert werden. Wir sehen in Abb. 4 rechts ein Beispiel dafür.

Vom mechatronischen System im Auto bis zum Industrieroboter sind Anwendungen mit elektrisch betriebenen Aktoren zu finden. Dabei unterscheidet man Aktoren, die auf elektromagnetischem Weg oder auf elektromotorischem Weg Kraftwirkungen erzielen.

Wir werden in diesem Buch beide Arten kennenlernen. Die elektromagnetischen Aktoren, wie sie z. B. als Hubmagnete vorkommen, beruhen auf magnetischen Feldern, die durch Permanentmagnete oder durch elektrische Spulen und Wicklungen erzeugt werden. Damit lassen sich Anziehungskräfte erzeugen, die für Stellbewegungen genutzt werden können. Wir finden sie z. B. als Stellglieder in Form von Relais. Eine weitere Anwendung des Hubmagneten ist das elektrische Kraftstoff-Einspritzventil im Kraftfahrzeug. Die Verbindung von Elektromagneten mit mechanischen Federn führt zu den positionsgesteuerten Aktoren, die auch als Proportionalmagnete bezeichnet werden. Diese Aktoren bewegen sich meist linear und werden z. B. in hydraulischen Ventilen zur Steuerung von Volumenströmen genutzt. Neben diesen klassischen Aktoren werden wir die Piezoaktoren kennenlernen und von Anwendungen erfahren, bei denen Piezoaktoren als Linearaktoren mit und ohne Wegbegrenzung eingesetzt werden.

Die Kraftwirkung auf stromführende Leiter in einem magnetischen Feld führt uns zur Gruppe der elektromotorischen Aktoren. Ein Beispiel eines elektromotorischen Linearaktors ist der Tauchspulenaktor, der z. B. in Computer-Festplatten zur Positionierung des Lesekopfes benutzt wird.

Die große Gruppe der elektromotorischen Aktoren wird in diesem Buch unterteilt in die Gleichstrommaschinen, Drehstrommaschinen, Synchron-Servomotoren und die Schrittmotoren. Wir werden den Aufbau und die Wirkungsweise der genannten Aktoren behandeln und Berechnungsbeispiele angeben.

2 Einteilung und Aufbau von Aktoren

Es gibt eine Vielzahl von Aktoren, die man nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren kann. Die Energieform kann als ein Klassifikations-Kriterium dienen. Gemäß Abb. 5 können wir Aktoren unterscheiden, die mit elektrischer Energie, Fluidenergie, chemischer Energie oder thermischer Energie arbeiten.

2.1 Einteilung der Aktoren

Ausgehend von diesen bereitgestellten Energien entstehen Kräfte und Bewegungen. Die Kraftwirkungen basieren auf elektrischen Feldkräften, elektromagnetischen Kräften, Druckkräften aufgrund komprimierter Fluide, wie Wasser, Hydrauliköl oder Luft. Mit chemisch gebundener Energie lassen sich durch gezielte Explosionen Druckkräfte erzeugen. Die thermische Energie führt zu Ausdehnungen infolge von Wärmespannungen. Diese Bewegungen können auf Aktoren übertragen werden, die z. B. Schaltvorgänge ausführen. Insbesondere neuartige Aktoren der Mikrosystemtechnik nutzen molekulare Kräfte aus.

Elektrische Energie		Fluidenergie		Chemische Energie	Thermische Energie
Feldkräfte (elektrisch, magnetisch)	Atom Mole- kular-Kräfte	Hydraulische Druckkräfte	Pneumatische Druckkräfte	Explosionsdruck, Elektrolysedruck	Kräfte durch Wärmedehnung

Abb. 5: Energien und Kraftwirkungen bei konventionellen Aktoren

Wir wollen im Folgenden die Aktoren nach der verwendeten Hilfsenergie einteilen und ihre Elemente vorstellen.

Die verschiedenen Aktoren, die mit den genannten Hilfsenergien und den daraus resultierenden Kraftwirkungen Bewegungen durchführen, zeigt das nächste Bild in einer Übersicht. Die bekanntesten Aktoren sind die Elektromotoren und Elektromagnete. Diese gibt es in sehr unterschiedlichen Bauformen und Baugrößen für sehr geringe Wege bis zu großen Stellhüben. Es gibt z. B. Linearmotoren, Getriebemotoren, Schrittmotoren, Servomotoren, Tauchspulenaktuatoren, Hubmagnete und Drehmagnete. Wir werden diese besonders wichtigen Bauformen in den folgenden Kapiteln ausführlich behandeln.

Man unterscheidet die Aktoren in diejenigen, deren Wirkungen seit Langem bekannt sind und die, die relativ neu sind. Man nennt diese letzte Gruppe auch *unkonventionelle Aktoren*, die z. B. in (Janocha, 2010) beschrieben wird. Wir finden diese Gruppe in der Abb. 5 an verschiedenen Stellen wieder, da diese Aktoren mit elektrischer Energie, aber auch mit thermischer Energie und chemischer Energie arbeiten können. Wir sehen in der Übersicht unter

den elektrischen Aktoren die konventionellen elektrischen Motoren und Magnete, aber auch die unkonventionellen Aktoren, wie Piezoaktoren, elektrostriktive- und magnetostriktive Aktoren sowie die elektrorheologischen und magnetorheologischen Aktoren. Weitere unkonventionelle Aktoren sind Memory-Metall-Aktoren und elektrochemische Aktoren. Die unkonventionellen Aktoren wurden in Abb. 6 in gestrichelte Blöcke gezeichnet.

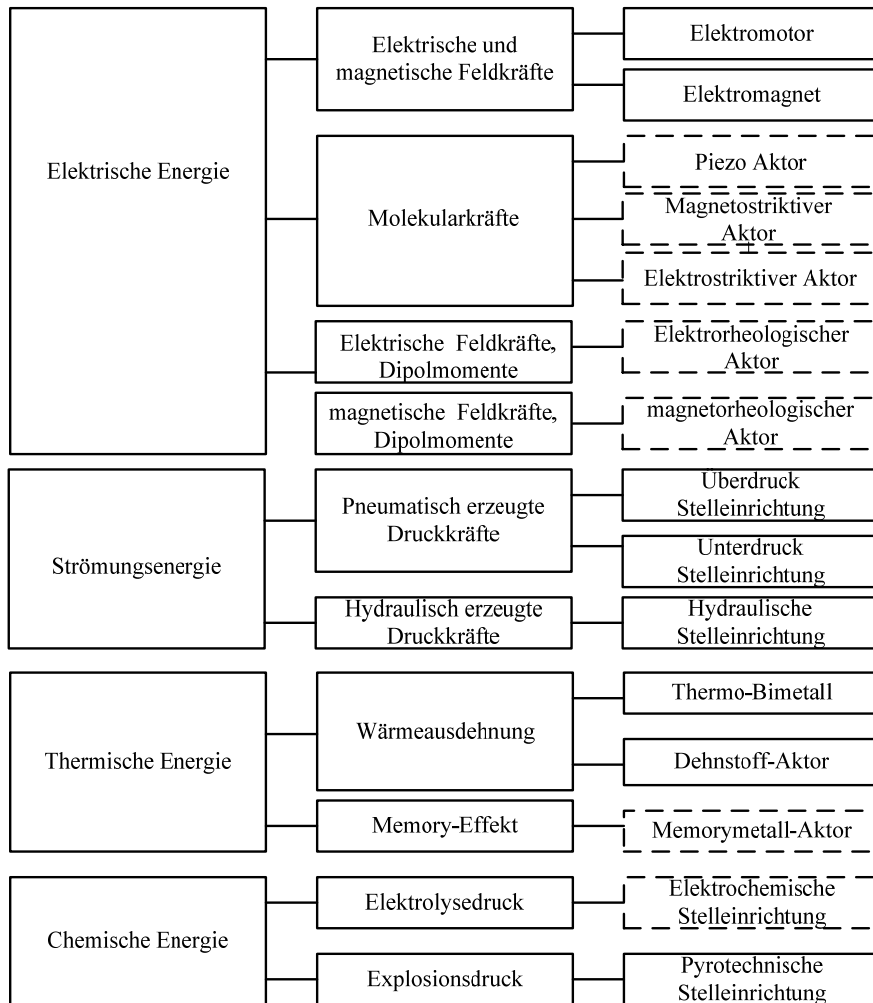


Abb. 6: Klassifizierung der Aktoren

Die mit elektrischer Energie arbeitenden *Piezoaktoren* führen relativ kurze Bewegungen aus. Piezoaktoren können Lasten bis zu mehreren Tonnen tragen und besitzen dabei Stellwege von bis zu 300 μm . Piezoaktoren werden z. B. in der Mikroelektronik bei der Wafer-Positionierung eingesetzt. Aber auch in der Medizintechnik zur Genmanipulation werden sie verwendet. Piezoaktoren ermöglichen Bewegungen fast ohne Reibung im Sub-Nanometerbereich. Die Aktoren reagieren sehr schnell auf Signale, man sagt sie haben kurze Ansprechzeiten. Ein bekannter Werkstoff für Piezoaktoren ist Blei-Zirkonat-Titanat (PZT).

Elektrostriktive Aktoren ähneln in ihrer Funktionsweise den piezoelektrischen Aktoren. Die Elektrostriktion beschreibt die Deformation eines dielektrischen Mediums in Abhängigkeit eines angelegten elektrischen Feldes. Elektrostriktive Aktoren bestehen häufig aus Blei-Magnesium-Niobat-Keramikkmaterial (PMN), das aber nicht polarisiert ist. Die Auslenkung des Werkstoffs ändert sich näherungsweise mit dem Quadrat der angelegten Spannung. Im Gegensatz zu den Piezoaktoren erfolgt in den elektrostriktiven Werkstoffen keine Polarisierung, d. h. Ladungsverschiebung in dem nicht leitenden Material. Die Elektrostriktion tritt auch bei den Piezoaktoren auf, die Ladungstrennung tritt jedoch bei den reinen elektrostriktiven Werkstoffen nicht auf. Elektrostriktive Aktoren werden nicht immer von den Piezoaktoren unterschieden und gehören wie diese zu den unkonventionellen Aktoren. Die Stellwege und Wegauflösungen sind wie bei den piezoelektrischen Aktoren.

Die Verformung eines *magnetostriktiven* Werkstoffs bei Auftreten eines magnetischen Feldes führte zur Entwicklung der magnetostriktiven Aktoren. Diese erfahren eine Dehnung, wenn sie mit einem magnetischen Feld beaufschlagt werden. Der bekannteste Werkstoff, der diesen Effekt zeigt, ist das 1971 entwickelte *Terfenol-D*. Magnetostriktive Aktoren werden z. B. zur Erzeugung von Ultraschallwellen in Sonar-Systemen genutzt. Dabei wird mit hoher Frequenz die Bewegung eines magnetostriktiven Wandlers genutzt. Magnetostriktive Wandler erzeugen Kräfte bis etwa 8 kN, allerdings ist der nutzbare Weg selbst im Resonanzfall kaum größer als einige μm .

Die *elektorrheologischen (ER)* und *magnetorheologischen (MR)* Aktoren beruhen auf der Änderung der Viskosität einer Flüssigkeit in Abhängigkeit von elektrischen bzw. magnetischen Feldern. Dadurch können Kräfte und Momente übertragen werden. Mit diesen Fluiden werden neuartige Fluid-Ventile und mechanische Kupplungen ausgerüstet.

Aktoren die auf Fluidenergie basieren sind sehr weit verbreitet. Sie werden als Stellzylinder mit hydraulischer oder pneumatischer Betätigung über Ventile angesteuert. Es handelt sich dann um Überdruckstelleinrichtungen. Pneumatische Aktoren, die mit Drücken arbeiten, die geringer sind als der Atmosphärendruck, werden auch Unterdruckstelleinrichtungen genannt. Sie kommen z. B. bei PKW-Bremsen als Bremskraftverstärker vor.

Thermobimetalle oder Dehnstoffaktoren nutzen die Wärmeenergie aus um Verformungen, meistens Längenänderungen zu bewirken. Bimetalle bestehen aus zwei verschweißten Metallen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dehnstoffaktoren kommen häufig vor in Stelleinrichtungen für warmes Wasser in der Heizungstechnik. Bimetallaktoren werden z. B. in Zweipunktregelungen verwendet. Viele Temperaturregelungen, wie sie etwa im Bügeleisen vorkommen, benutzen Bimetalle als kombinierte Sensoren und Aktoren. Die Verformung des Bimetalls bei der Wärmezufuhr schaltet den Stromkreis für die Heizung ab, wenn die Solltemperatur erreicht ist.

Ein interessanter Effekt, der aufgrund zugeführter Wärme zu beobachten ist, ist der *Memory Effekt*. Die Materialien, z. B. Nitinol (häufig zu gleichen Teilen aus Nickel und Titan bestehend), die auf diesem Effekt beruhen, werden auch Formgedächtnislegierungen genannt. Sie können sich an eine frühere Form, trotz nachfolgender Verformung, erinnern. Dadurch können Stellbewegungen in Abhängigkeit der Temperatur erzeugt werden. Man stellt z. B. einen dünnen Draht aus dem Material Nitinol her und leitet einen Strom durch diesen Draht. Durch die vom Strom herrührende Erwärmung findet eine Gefügewandlung statt und der Draht verkürzt sich um ca. 10 %. Diese Wegänderung kann in technischen „Muskeln“ genutzt werden, um einen Aktor zu bewegen.

2.2 Aufbau von Aktoren

Die notwendigen Bestandteile des Aktors werden in diesem Abschnitt an einem Beispiel erläutert. Aktoren können mit den Stellbewegungen nicht nur wie bei dem Roboter Werkzeuge oder Greifer führen, sondern auch Stoff- und Energieströme stellen. Beispielsweise soll in einem Gasofen durch die Zufuhr einer Gasmenge die Temperatur erhöht werden. Der zu steuernde Prozess ist die Wärmeübertragung auf das zu temperierende Objekt im Gasofen. Die Zuführung der Gasmenge kann durch ein Stellventil beeinflusst werden.

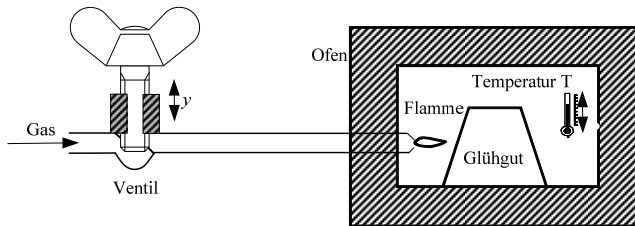


Abb. 7: Manuelle Betätigung eines Stellventils

Der freie Querschnitt in der Gasleitung wird durch Betätigen des Ventils verändert, ähnlich wie bei der Verstellung eines Wasserhahns. Die Betätigung des Ventils kann im einfachsten Fall durch den Menschen manuell erfolgen. Wir erkennen, dass der Mensch der Aktor ist, der das Ventil verstellt. Der Mensch muss eine Kraft aufbringen, um das Stellglied zu betätigen.

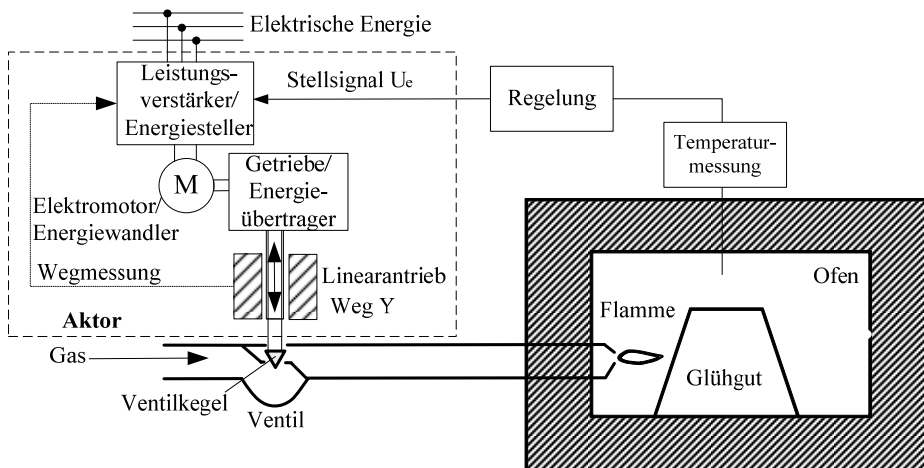


Abb. 8: Struktur einer Temperaturregelung

Natürlich kann das Stellventil auch automatisch, z. B. über einen Motor betätigt werden. Wir benötigen in diesem Fall einen Antrieb für die Verstelleinrichtung des Ventils. Dieser Antrieb wird durch einen Aktor bereitgestellt, der das Stellventil als sogenanntes Stellglied betätigt. Die Abb. 8 zeigt in dem umrandeten Kasten die Bestandteile eines Aktors. Man erkennt einen Motor, der über ein Getriebe mit einem angeschlossenen Linearantrieb den Ventilkegel bewegt und dadurch den freien Querschnitt für das strömende Gas im Stellventil verändert.

Die veränderliche Gasmenge beeinflusst die Temperatur im Gasofen. Der Motor wandelt die elektrische, zugeführte Energie in mechanische Energie, um das Ventil zu betätigen. Der Motor wandelt also Energieformen. Es handelt sich um einen *Energiewandler*.

Energiewandler

Ein Energiewandler wandelt verschiedene Formen der Energie, ohne sie zu speichern. Theoretisch kann der Wandler als verlustfrei, also ideal betrachtet werden. Real treten aber immer Verluste bei der Wandlung auf.

Komfortable, elektromotorische Aktoren können stufenlos die Motorspannung verändern. Sie werden mit einem Stellsignal geringer Leistung angesteuert, z. B. einer Spannung zwischen -10 V und 10 V . Die Verstärkung des Stellsignals erfolgt in einem Leistungsverstärker. Der Leistungsverstärker ist Bestandteil des Aktors und wird als Energiesteller bezeichnet.

Energiesteller

Ein Energiesteller erzeugt aus einem leistungsarmen Stellsignal unter Zuhilfenahme von Hilfsenergie ein leistungsstärkeres Energie-Stellsignal zur Ansteuerung des Energiewandlers.

Der Energiesteller kann unterschiedliche Energieformen als Hilfsenergie zugeführt bekommen. Die unterschiedlichen Energieformen werden im Energiewandler in Kräfte und Bewegungen umgeformt. Wir definieren den Aktor wie folgt:

Aktor

Ein Aktor oder Aktuator ist eine Stelleinrichtung, die über ein energiearmes Signal angesteuert wird und durch Zufuhr von Hilfsenergie über den Energiesteller eine wesentlich größere mechanische Energie für den Stellvorgang aufbringen kann. Der Aktor besteht mindestens aus einem Energiesteller und einem Energiewandler. In den meisten Fällen führt der Aktor eine Bewegung unter Kraftaufwendung aus und verrichtet dabei mechanische Arbeit.

Die Signalverarbeitung innerhalb eines Aktors erfolgt gemäß Abb. 9. Der Energiesteller wird durch ein externes Signal beaufschlagt und erzeugt eine dem Signal zugeordnete, dosierte Stellenergie, die im Energiewandler zur Erzeugung der Stellkraft umgeformt wird. Wichtig ist, dass eine externe Hilfsenergie bereitgestellt wird.

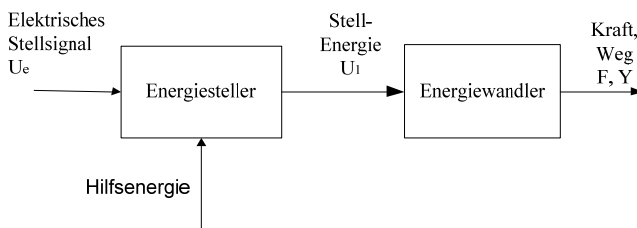


Abb. 9: Hauptbestandteile eines Aktors

Eine Spannungsveränderung des Motors durch den Energiesteller führt in der Regel zu einer unterschiedlichen Motordrehzahl. Falls der Motor mit einer konstanten Spannung angesteuert wird, schließt oder öffnet er das Ventil vollständig. Der Motor muss in diesem Fall durch einen Endschalter abgeschaltet werden. Damit der Motor eine ganz bestimmte Öffnung des Kegelventils bewirkt, muss er mit einer *Positionsregelung* ausgestattet sein. Die Positionsregelung erfordert ein Messsystem für den Stellweg und eine geeignete Regeleinrichtung. In Abb. 8 wird am Linearantrieb ein Signal abgezweigt. Daneben steht die Bezeichnung Wegmessung. Damit ist die Positionsmessung des Ventilkegels im Ventil gemeint. Nicht jeder Aktor benötigt eine Positionsregelung. Aber jeder Aktor besitzt einen Energiesteller.

Positionsregelung

Die Positionierung eines elektromotorischen Stellantriebes wird durch eine Positionsregelung ermöglicht.

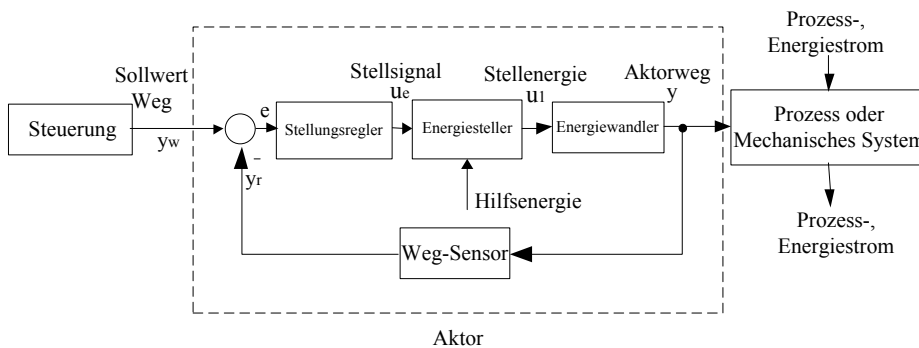


Abb. 10: Positionsregelung in einem Aktor

Die Abb. 10 stellt den geschlossenen Regelkreis für die Aktorposition dar. Die Betätigung des Energiestellers erfolgt über den Regler. Der Wegsensor erfasst die aktuelle Wegposition und übermittelt sie dem Stellungsregler. Der Regler berechnet aus der Regelabweichung zwischen dem Sollwert und dem Istwert geeignete Stellsignalwerte. Die Winkel- oder Positionsregelung mit einem Elektromotor umfasst weitere unterlagerte Regelkreise für die Motordrehzahl und den Motorstrom! Man nennt den positionsgeregelten Elektromotor dann einen *Servomotor*.

Servomotor

Ein Servomotor ist ein elektrischer Motor, der strom-, drehzahl- und/oder positionsgeregt ist. Er ermöglicht die Einstellung vorgegebener Ströme, Drehzahlen und/oder Drehwinkel.

Aktoren und elektrische Maschinen führen Bewegungen mit bestimmten Geschwindigkeiten und Kräften aus. Zur Anpassung des Motor-Drehmomentes an das geforderte Aktor-Drehmoment wird häufig ein Getriebe eingesetzt.

Mechanisches Getriebe

Ein mechanisches Getriebe dient der Anpassung von Drehzahlen und Drehmomenten des Motors an den Aktor oder die anzutreibende Last.

Das Getriebe überträgt mechanische Energie, wobei die Drehzahlen und Drehmomente an den Getriebewellen unterschiedlich sind. Daher sprechen wir von einem *Energieübertrager* im Gegensatz zu einem Energiewandler. Eine Energieübertragung ist in der Regel mit Energiewandlungen in Wärme verbunden. Diese Wandlung ist aber nicht beabsichtigt und stellt Verluste dar. Für einen Energieübertrager wird ein Wirkungsgrad angegeben. An der Energieübertragung sind zwei Größen beteiligt. Der Übertrager besitzt einen Übertragungsfaktor, mit dem das Verhältnis dieser beteiligten Größen geändert wird. So erfolgt z. B. über ein mechanisches Getriebe die Änderung der Eingangs-drehzahl und des Eingangs-drehmomentes. Es gibt Energieübertrager auch bei elektrischen Stromkreisen. Der Transformator überträgt elektrische Energie, dabei kann die Höhe der Spannung verändert werden. Auch der Transformator arbeitet nicht verlustfrei.

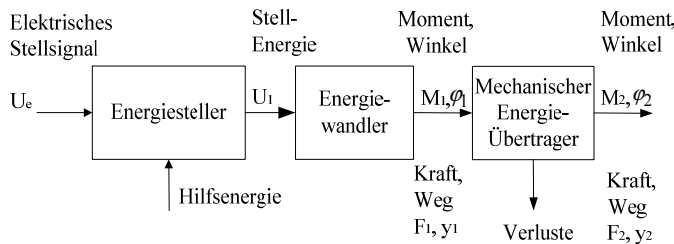


Abb. 11: Erweiterung der Bestandteile eines Aktors um einen Übertrager

Übertrager

Ein Übertrager, wie z. B. ein Getriebe, überträgt die zugeführte Energie in der Regel mit Verlusten, ohne dass eine Energiewandlung in eine andere Energieform stattfindet.

Wir erweitern unser Blockschaltbild, das den Aktor in seinen Hauptbestandteilen darstellt, um den Block mechanischer Übertrager. Die drei Bestandteile des Aktors finden wir bei dem in Abb. 12 dargestellten Linearaktor wieder.

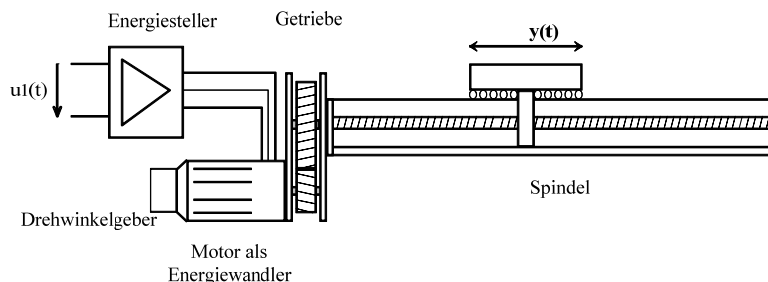


Abb. 12: Aktor mit einem Getriebe und einer Linear-Spindel

Eine kombinierte Realisierung eines Linearantriebs mit Elektromotor, Spindel und Zahnriemen zeigt Abb. 13. Der Synchron-Servomotor treibt über ein Riemengetriebe eine Kugelumlaufspindel an. Dadurch bewegt sich die Mutter, an der die Last befestigt ist. Die Anbringung des Drehwinkel-Messsystems ist unterschiedlich zu Abb. 12, denn das Messsystem sitzt nicht auf der Motorwelle, sondern auf der Welle der Spindel. Dadurch werden Fehler des Getriebes vermieden. Das Winkel-Messsystem ermöglicht die Messung des Drehwinkels der Spindel und den Aufbau eines Lage-Regelkreises zur exakten Positionierung der Mutter. Das System kann 2 kg Lasten führen, die innerhalb des 30 mm langen Arbeitshubes auf $\pm 0,1$ mm genau positioniert werden können.

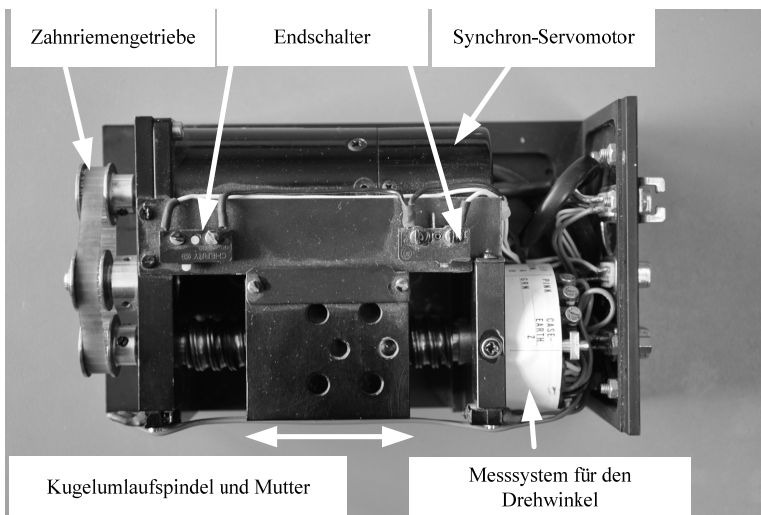


Abb. 13: Synchron-Servomotor mit 30 mm Hub, 0,1 mm Positioniergenauigkeit, 2 kg Last für Linearbewegungen (Quelle: eigenes Foto)

Wir unterscheiden Aktoren, die lineare oder rotatorische Bewegungen ausführen. Der vorgestellte Synchron-Servomotor benötigt die Kugelumlaufspindel zur Übertragung der Drehbewegung in eine geradlinige Bewegung. Der in Abb. 14 links dargestellte Hubmagnet führt ohne Getriebe eine lineare Bewegung aus. Man spricht bei der direkten Erzeugung von translatorischen Bewegungen auch von einem *Linearmotor*.

Wir werden weitere Linearmotoren kennenlernen.

Linearmotor

Ein Linearmotor führt ohne die Zwischenschaltung eines Getriebes eine geradlinige Bewegung aus.

Weiterhin unterscheidet man Aktoren mit einer begrenzten und einer unbegrenzten Auslenkung.

Aktoren mit begrenzter Auslenkung

Aktoren mit begrenzter Auslenkung sind durch einen unteren und einen oberen Grenzwert in der Bewegungsrichtung eingeschränkt.

Der in der Position geregelte Motor hat eine begrenzte Auslenkung, da er nur einen begrenzten Stellweg aufweist. Ohne eine Positionsregelung kann ein Motor unbegrenzt Drehungen ausführen. Die im nächsten Bild skizzierten Hubanker- und Drehankermagnete besitzen ebenfalls nur eine begrenzte Auslenkung.

Die Elektromagnete werden sehr häufig als Aktor eingesetzt. Es gibt einfache Anwendungen, die nur zwei Stellpositionen kennen und die sogenannten *Proportionalmagnete*, deren Stellhub gezielt vorgegeben werden kann. Der bewegliche Teil des Magneten wird *Anker* genannt.

Anker

Der bewegliche, angezogene Teil eines Hub- oder Drehmagneten wird als Anker bezeichnet.

Wir erkennen an dem Hub- und Drehankermagneten auch das Prinzip der Energiewandlung im Aktor wieder. Die über die Spule zugeführte elektrische Energie wird in mechanische Energie gewandelt.

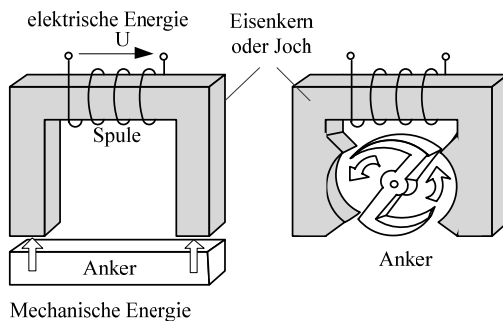


Abb. 14: Magnetaktoren, links: Aufbau eines Hubmagneten (Prinzip), rechts: Drehankermagnet

Der in Abb. 14 links dargestellte Hubmagnet ist aufgrund der Bauart bereits ein Linearantrieb. Bei den Elektromotoren sind die rotatorischen Antriebe dominierend.

Zusammenfassung

Aktoren werden mit Hilfsenergie versorgt. Die Hilfsenergie kann elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch, chemisch oder thermisch zugeführt werden. Aktoren werden in konventionelle und unkonventionelle Aktoren eingeteilt. Die unkonventionellen Aktoren sind noch nicht lange bekannt und daher ist deren Einsatz nicht so häufig. Allerdings sind einige unkonventionelle Aktoren dem Laborstadium entwachsen und werden industriell gefertigt und sind käuflich erhältlich. Interessante unkonventionelle Aktoren sind z. B. die Piezoaktoren. Aktoren bestehen in der Regel aus einem Energiesteller und einem Energiewandler. Der Energiesteller wird mit Hilfsenergie versorgt. Mit Aktoren können Prozess- oder Energieströme verstellt werden. Will man mit einem Elektromotor einen Aktor in einen bestimmten Drehwinkel oder auf einen bestimmten Hub bringen, benötigt man einen Servomotor. Dieser benötigt Messsysteme für den Drehwinkel bzw. den Hub und besitzt eine Drehwinkel- oder Hubregelung.

Die Ansteuerung des Energiestellers erfolgt mit einem Stellsignal leistungsarm. Der Energiesteller kann z. B. ein elektrischer Leistungsverstärker sein. Der Energiesteller erzeugt daraus eine Stellenergie, die dem Energiewandler zugeführt wird. Der Energiewandler wandelt die zugeführte Stellenergie in eine andere Form. So wird z. B. elektrische Stellenergie zu mechanischer Energie zum Betrieb eines Stellglieds umgewandelt. Die mechanische Energie dient der Verstellung des Stellglieds um einen Weg mit einer bestimmten Kraft. Häufig werden zur Erzeugung translatorischer Bewegungen drehende Elektromotoren eingesetzt, die erst über ein Getriebe die Translations-Bewegung bewirken. Wir bezeichnen Getriebe als mechanische Energieübertrager, die Verluste aufweisen.

Die Aktoren können nach der Bewegungsart eingeteilt werden. Wir unterscheiden, die linear wirkenden Aktoren von den Aktoren, die Dreh- oder Schwenkbewegungen ausführen. Elektromagnete werden als Aktoren mit geradlinigem Weg oder als Drehankermagnet eingesetzt. Es gibt Aktoren mit begrenzter und unbegrenzter Auslenkung. Elektromotoren haben eine unbegrenzte Auslenkung, während die Hub- oder Drehmagnete eine begrenzte Auslenkung besitzen.

Kontrollfragen

1. Welche Energieform liefert ein Aktor?
2. Welche Einschränkungen hätte ein Aktor, der nur einen Energiewandler und keinen Energiesteller enthält?
3. Beschreiben Sie den Werkstoff Nitinol.
4. Was ist ein magnetorheologisches Fluid? Nennen Sie einen Einsatzfall.
5. Welche Aktoren werden mit Terfenol-D hergestellt?
6. Beschreiben Sie den Unterschied zwischen einem Energiewandler und einem Übertrager.
7. Ist ein Linearmotor ein Servomotor?
8. Welche Bestandteile weist ein Aktor auf?
9. Handelt es sich bei der Spindelachse mit Mutter in Abb. 12 bzw. Abb. 13 um einen Übertrager oder Wandler und warum?

3 Arbeit, Energie, Leistung

Da ein Aktor die Hilfsenergie über den Energiesteller zum Energiewandler überträgt und dieser die Hilfsenergie wandelt, wollen wir die physikalischen Begriffe Energie und Arbeit definieren.

Wir leisten Arbeit, wenn wir einen Körper in eine bestimmte Richtung bewegen und dabei eine Kraft aufwenden. Voraussetzung ist dabei, dass die Bewegungsrichtung und die Kraft-richtung gleich sind. Sind diese Richtungen unterschiedlich, so wird nur durch die Komponente der Kraft in Richtung der Bewegung Arbeit verrichtet.

Der Begriff der Energie beschreibt die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Beim Verrichten von Arbeit wird Energie ausgetauscht. Alle Energieformen lassen sich in mechanische Arbeit umwandeln. Die Energie ist eine Zustandsgröße. Energie kann in verschiedenen Erscheinungsformen auftreten: Wärme, Strahlung, mechanische und chemische, elektrische und magnetische Energie.

Ein wichtiges physikalisches Prinzip ist das Prinzip der Erhaltung der Energie. Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur umgewandelt und übertragen werden.

Beispielsweise kann die potenzielle Energie in kinetische Energie gewandelt werden. Falls dabei Wärme durch Reibung produziert wird, wird die potenzielle Energie zum Teil in kinetische Energie und in Wärmeenergie gewandelt. Da dieser Prozess irreversibel ist, sagt man es entstehen Reibungsverluste.

Verrichtet man an einem Körper im Zeitintervall $t_1 < t < t_2$ Arbeit W_{12} oder führt man ihm Wärme Q_{12} zu, so wächst seine Energie. Mit Wärme kann man Energie ohne Kraft übertragen. In einem System gilt für die Änderung seiner Energie im Zeitintervall $t_1 < t < t_2$ nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik:

$$E_2 - E_1 = W_{12} + Q_{12} .$$

Aktoren, die Wärmeenergie nutzen, setzen diese in mechanische Arbeit um!

3.1 Elektrische Arbeit und Energie

Bei elektrischen Systemen unterscheidet man die Energie des elektrostatischen Feldes und die im magnetischen Feld gespeicherte Energie. Im Bereich der Aktorik treten elektrische Felder z. B. in Piezoaktoren auf, in denen durch Aufbringen einer Spannung eine Dehnung des Piezomaterials bewirkt wird. Magnetische Felder treten in Elektromagneten und elektrischen Maschinen auf. Aktoren verrichten Arbeit und wandeln Energieformen.

Elektrische Aktoren

Elektrische Aktoren wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um.

Wir wollen die Begriffe elektrische Energie und elektrische Arbeit unterscheiden und die Richtung der Energiewandlung beachten lernen. Unter elektrischer Energie versteht man die an Ladungen gebundene Erscheinungsform der Energie. Wir betrachten eine Punktladung Q . Befindet sich die Punktladung Q in einem elektrischen Strömungsfeld, so wirkt eine elektrische Kraft F_{el} auf sie.

Elektrische Arbeit

Bewegt sich die Ladung Q aufgrund dieser Kraft F_{el} , so wird durch die Kraft Arbeit geleistet. Dabei nimmt die kinetische Energie der Ladungsträger zu und die potenzielle Energie ab. Die Ladung bewegt sich von einem hohen Potenzial zu einem niedrigen Potenzial, also in Feldrichtung.

Die elektrische Spannung, welche die Potenzialdifferenz darstellt, sinkt also in der Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Bewegen sich die Ladungen in Feldrichtung und die potenzielle Energie der Ladungsträger sinkt, handelt es sich um einen Verbraucher elektrischer Energie. In der Elektrotechnik bezieht man die Aufnahme oder Abgabe von Energie auf ein sog. Pfeilsystem.

Verbraucherpfeilsystem

Im *Verbraucherpfeilsystem* ist der Bezugssinn für Strom und Spannung an einem Verbraucher gleichgerichtet. Der in die positive Klemme des Verbrauchers einfließende Strom wird positiv gezählt. Der Spannungsabfall ist ebenfalls positiv. Die verbrauchte elektrische Energie wird positiv gezählt und die abgegebene elektrische Energie (eines Generators) dementsprechend negativ.

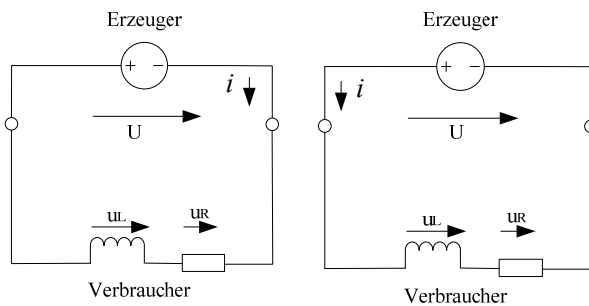


Abb. 15: Pfeilsysteme, links: Erzeugerpfeilsystem, rechts: Verbraucherpfeilsystem

Erzeugerpfeilsystem

Verwendet man das sog. *Erzeugerpfeilsystem*, wird die beim Erzeuger elektrische Energie abgegebene Leistung positiv gezählt. Der in den Verbraucher fließende Strom ist negativ zu bewerten. Daher ist im Erzeugerpfeilsystem die Abgabe elektrischer Energie positiv und die Aufnahme negativ.

Vorzugsweise werden wir im Folgenden bei elektrischen Anwendungen der Aktorik immer das Verbraucherpfleilsystem benutzen. Zuerst wollen wir die Berechnungsformel für die Energie des elektrischen Feldes angeben. In der folgenden Formel ist C die Kapazität (z. B. eines Plattenkondensators) und U die elektrische Spannung. Gehen wir von einem Plattenkondensator aus, ist A die Fläche der Kondensatorplatten und s der Abstand der Platten:

$$W_{e,12} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E^2 \cdot A \cdot s$$

Die Energie des elektrischen Feldes, bezogen auf das Volumen V , wird Energiedichte genannt und beträgt:

$$w_{e,12} = \frac{W_{e,12}}{V} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot E^2$$

In der Formel bedeutet E die elektrische Feldstärke. Die Dielektrizitätskonstante ϵ berechnet sich aus:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Die elektrische Feldkonstante ϵ_0 hat den Wert:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}},$$

der für Vakuum und Luft gilt. ϵ_r ist die relative Dielektrizitätszahl des Mediums. Sie ist dimensionslos und hat für Vakuum und annähernd auch für Luft den Wert 1.

Beispielaufgabe:

Ein sogenannter Piezostapelaktor besteht aus 10 miteinander verbundenen und elektrisch parallel geschalteten, kreisförmigen Piezokeramikscheiben. Die Scheiben besitzen einen Durchmesser von 10 mm. Das Datenblatt gibt die Kapazität jeder Scheibe mit 21 nF an. Die relative Dielektrizitätszahl beträgt $\epsilon_r = 2500$. Berechnen Sie den Abstand der Scheiben, wenn die Anordnung wie ein Plattenkondensator behandelt werden kann.

Lösung:

Die Piezoscheiben können wie Plattenkondensatoren betrachtet werden. Den Aufbau eines Piezostapelaktors werden wir später genauer behandeln. Da die Piezoscheiben parallel geschaltet werden, können wir die gesamte Kapazität durch Addition der Einzelkapazitäten berechnen. Wir formen die Gleichung nach s um und können den Abstand zweier aufeinanderfolgender Scheiben berechnen.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{s}$$

$$s = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{C} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot C}$$

$$s = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 2500 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2 \text{ m}^2}{4 \cdot 21 \cdot 10^{-9} \frac{\text{As}}{\text{V}}}$$

$$s = \frac{8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2500 \cdot \pi \cdot 0,01^2}{4 \cdot 21} \text{ m} = 8,274 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,08 \text{ mm}$$

Die Abstände zwischen den Scheiben betragen also nur 0,08 mm.

Aktoren müssen oft auf kleinem Raum untergebracht werden. Es ist dann wichtig zu wissen, welche Energiedichte, d. h. welche Energie pro Volumeneinheit, der Aktor liefern kann.

Beispielaufgabe:

Berechnen Sie die Energiedichte im elektrischen Feld eines Plattenkondensators mit der Feldstärke $E = 20 \text{ kV/cm}$ ($E = 30 \text{ kV/cm}$ ist die Durchschlagfeldstärke in Luft).

Lösung:

$$w_{e,12} = \epsilon_0 \frac{E^2}{2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{\left(20000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}\right)^2}{2} = 8,85 \cdot 10^{-14} \frac{\text{As}}{\text{Vcm}} \cdot \frac{\left(20000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}\right)^2}{2}$$

$$w_{e,12} = 1,77 \cdot 10^{-5} \frac{\text{VAs}}{\text{cm}^3} = 1,77 \cdot 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}$$

Im Vergleich zu den Aktoren, deren Energie in Spulen als magnetische Energie gespeichert werden kann, ist dieser Wert relativ gering. Aus diesem Grund gibt es mehr Aktoren, die auf elektromagnetischen Effekten beruhen.

3.2 Mechanische Arbeit bei der Translation eines Körpers

Nun wollen wir die mechanische Arbeit betrachten, die ein Aktor verrichtet. Dem Aktor wird elektrische, thermische, magnetische oder Fluid-Energie zugeführt. Ändert sich die Kraft entlang des Weges von s_1 nach s_2 gilt für die verrichtete Arbeit W :

$$W_{12} = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Mechanische Arbeit

Mechanische Arbeit ist die Energieübertragung mithilfe einer Kraft, die längs eines Weges wirkt.

In diesem Fall muss das Integral über dem Skalarprodukt aus Kraft- und Weg-Vektor berechnet werden. Die Berechnung der Arbeit erfolgt mit der folgenden Formel, wenn die Kraft F längs des Weges wirkt:

$$W_{12} = F \cdot s_{12} \quad 3.1$$

F : Kraft längs eines Weges

s_{12} : Weg, der im Zeitintervall $t_1 < t < t_2$ zurückgelegt wird

W_{12} : Arbeit, die in diesem Zeitintervall verrichtet wird

Bewegt sich der Körper, an dem die Kraft angreift, mit der Geschwindigkeit

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad 3.2$$

dann ergibt sich durch Einsetzen:

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{v} \cdot dt \quad 3.3$$

Die Dimension der Arbeit ist Kraft mal Länge. Die SI-Einheit der Arbeit ist das Joule (J). Es gilt:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm.}$$

Beispielaufgabe:

Der in der folgenden Abbildung dargestellte Schieber hat eine Masse von $m = 5 \text{ kg}$. Er wird von einem Akteur aus der Höhe $Y_1 = 1 \text{ m}$ auf die Höhe $Y_2 = 3 \text{ m}$ angehoben. Es ist die am Schieber verrichtete Arbeit zu berechnen.

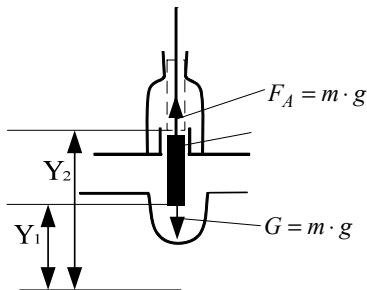


Abb. 16: Schieber als Akteur

Lösung:

$$W_{12} = F \cdot (Y_2 - Y_1) = m \cdot g \cdot (Y_2 - Y_1) = 5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (3 \text{ m} - 1 \text{ m}) = 98,1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E_2 - E_1 = W_{12} = m \cdot g \cdot (Y_2 - Y_1) = 98,1 \text{ J}$$

Die Arbeit wird dem System zugeführt. Sie erhöht die gespeicherte Energie des Schiebers. Es handelt sich um potenzielle Energie.

3.3 Mechanische Arbeit bei der Rotation eines Körpers

Auch bei an Körpern angreifenden Drehmomenten wird Arbeit geleistet. Das Moment M muss mit dem Drehwinkel multipliziert werden.

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} M \cdot d\varphi \quad 3.4$$

Wir betrachten eine sich drehende Scheibe in Abb. 17. Ein Teilchen der Scheibe im Abstand r_i hat die momentane Geschwindigkeit v_i . Es bewegt sich in der Zeit dt entlang des Bogens ds_i . Dann gilt für die Länge dieses Bogens:

$$ds_i = v_i \cdot dt \quad 3.5$$

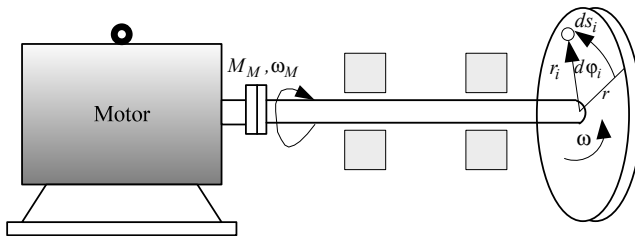


Abb. 17: Zur Winkelgeschwindigkeit

Für den Winkel, der im Bogenmaß gemessen wird und von dem Teilchen in der Zeit dt überstrichen wird, gilt:

$$d\varphi = \frac{ds_i}{r_i} \quad 3.6$$

Dieser Drehwinkel, der in der Zeit dt überstrichen wird, ist für alle Teilchen der Scheibe gleich. Wenn die Scheibe eine volle Umdrehung macht, gilt für die Länge des Kreisbogens: $\Delta s_i = 2\pi \cdot r_i$. Der Drehwinkel hat sich dann um $\Delta\varphi = 2\pi$ geändert. Die Einheit des Drehwinkels ist das Bogenmaß, eine dimensionslose Zahl. Wenn wir sagen ein Motor hat eine Drehzahl von 1000 U/min, meinen wir, dass in einer Minute der Drehwinkel um $1000 \cdot 2\pi$ wächst. Wir führen die Winkelgeschwindigkeit ω ein, die wie folgt definiert ist

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} = \frac{ds_i}{r_i \cdot dt} = \frac{v_i}{r_i} \quad 3.7$$

und ersetzen das Winkel-Inkrement $d\varphi$ in Gleichung 3.4. Die Arbeit, die durch ein Drehmoment M an einer sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω drehenden Scheibe in einer bestimmten Zeit verrichtet wird, erfordert die Berechnung des Zeitintegrals,

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} M \cdot \omega \cdot dt \quad 3.8$$

3.4 Leistung

Eine für die Berechnung von Energieübertragungen in Aktoren und elektrischen Maschinen wichtige Größe ist die Leistung. Die Arbeit, die von einer Maschine geleistet wird, ist unabhängig von der Zeit, in der die Arbeit verrichtet wird. In technischen Anwendungen muss die Arbeit in einer bestimmten Zeit geleistet werden. Daher spielt der Quotient geleistete Arbeit pro Zeiteinheit eine bedeutende Rolle:

Leistung

Die physikalische Leistung beschreibt die Änderung der Energie in einem System mit der Zeit.

Der Wert der Leistung gibt also an, wie schnell Energie von einem System auf das andere übertragen werden kann. Wirkt eine Kraft F auf ein Teilchen, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, dann gilt für die Leistung:

$$P = \frac{dW}{dt} = F \cdot v \quad 3.9$$

Wird ein Körper aufgrund eines Drehmomentes M um einen Winkel verdreht, wird die folgende Arbeit verrichtet:

$$dW = M \cdot d\phi \quad 3.10$$

Die Änderung der Arbeit nach der Zeit ergibt die Leistung bei der Dreh-Arbeit.

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{M \cdot d\phi}{dt} = M \cdot \omega \quad 3.11$$

Die elektrische Leistung ist bekanntlich aus dem Produkt von Spannung u und Strom i berechenbar. Dabei sind die bei Wechselgrößen zeitveränderlichen Werte der Spannung $u(t)$ und des Stroms $i(t)$ einzusetzen:

$$P = \frac{dW}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad 3.12$$

Beispielaufgabe:

Eine Stellschraube mit der Gewindesteigung von $s = 2 \text{ mm}$ pro Umdrehung wird um $l = 10 \text{ mm}$ mit einem Aktor in ein Stellventil eingeschraubt. Es muss eine konstante Gewindereibung von $M_R = 0,25 \text{ Nm}$ überwunden werden. Welche mechanische Arbeit wird geleistet?

Lösung:

$$\begin{aligned} W_{12} &= M_R \cdot \Delta\phi \\ &= M_R \cdot \frac{l}{s} \cdot 2 \cdot \pi \\ &= 0,25 \text{ Nm} \cdot \frac{10 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} \cdot 2 \cdot \pi = 7,85 \text{ J} \end{aligned}$$

Zusammenfassung

Wir verstehen unter der mechanischen Arbeit die Energieübertragung durch eine Kraft, die längs eines Weges wirkt. Die mechanische Leistung entspricht der pro Zeiteinheit verrichteten Arbeit und kann bei translatorischen Bewegungen aus dem Produkt Kraft mal Geschwindigkeit berechnet werden. Greift ein Drehmoment an einen Körper an, der sich um einen Winkel dreht, wird Arbeit verrichtet, die aus dem Produkt des Betrages des Drehmoments multipliziert mit dem Drehwinkel berechnet werden kann. Die mechanische Leistung bei der Rotation aufgrund eines angreifenden Drehmoments berechnet man aus dem Drehmoment multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit.

Kontrollfrage

10. Welche Antriebsleistung in Watt ist erforderlich, wenn ein Fahrzeug mit der Geschwindigkeit von 30 km/h gegen eine Kraft von 100 N bewegt werden soll. Berechnen Sie den Gleichstrom, der zum elektrischen Antrieb des Fahrzeugs notwendig ist, wenn die Spannung 40 V betragen soll. Verluste werden vernachlässigt.

3.5 Grundgleichungen mechanischer Energieübertrager für Aktoren

Die mechanischen Energieübertrager sind z. B. Getriebe, die mechanische Energie übertragen. Dabei wird die zugeführte Drehzahl herauf- oder herabgesetzt. Gleichzeitig wird das Drehmoment herab- bzw. heraufgesetzt. In Getrieben entstehen Wandlungen von mechanischer Energie in Wärmeenergie, die als Verluste abzuführen sind. Entscheidend für die Dimensionierung einer elektrischen Maschine oder eines Aktors ist der Bedarf des Aktors an mechanischer Leistung, die sich mit den Gesetzen der Mechanik bestimmen lässt. Wir gehen von einer linearen Bewegung eines Aktors aus, bei der eine Widerstandskraft F zu überwinden ist. Der Aktor soll die konstante Geschwindigkeit v besitzen, dann muss die mechanische Leistung P zugeführt werden.

$$P = F \cdot v$$

3.13

Wir sehen uns das Beispiel in Abb. 18 an. Die anzuhebende Masse m wird durch die Gewichtskraft belastet. Die Kraft F_L soll von einem Elektromotor aufgewendet werden. Dieser

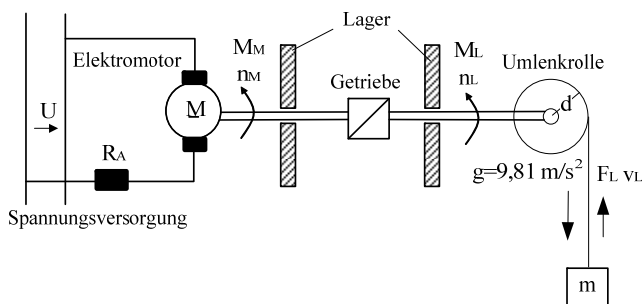


Abb. 18: Umwandlung der translatorischen in eine rotatorische Bewegung

hebt die Last mit der Geschwindigkeit v_L . Die Übertragung der Lastkraft erfolgt über die Umlenkrolle. Dadurch entsteht ein Drehmoment, das über das Getriebe auf den Motor übertragen wird.

Die Widerstandskraft F tritt also beispielsweise als Gewichtskraft, aber auch als Reibungskraft und als Luftwiderstand bei Hebezeugen, Fördergeräten, Fahrzeugen, Werkzeugmaschinen auf.

Für Vorgänge, bei denen eine Last gehoben wird, ist die Widerstandskraft unabhängig von der Geschwindigkeit des Aktors. Soll die Masse entgegen der Erdbeschleunigung bewegt werden, gilt für die aufzubringende Kraft F : $F_{W_g} = m \cdot g$.

Beispielaufgabe:

Ein Aktor soll ein Gewicht von $m = 0,5 \text{ kg}$ mit $v = 0,5 \text{ m/s}$ in vertikaler Richtung entgegen der Gravitationskraft bewegen. Die Reibungskraft beträgt näherungsweise 10 % der Gewichtskraft. Berechnen Sie die erforderliche mechanische Leistung des Aktors.

Lösung:

$$F = m \cdot g + 0,1 \cdot m \cdot g = 1,1 \cdot m \cdot g = 5,4 \text{ N}$$

$$P = F \cdot v = 5,4 \text{ N} \cdot 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2,7 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 2,7 \text{ W}$$

Reibungskräfte treten als Widerstandskräfte in mechanischen Systemen auf. Man unterscheidet verschiedene Arten der Reibung. Die wichtigsten sind die Haft- und Gleitreibung und die Viskosereibung. Die beiden Ersteren werden auch unter dem Begriff coulombsche Reibung zusammengefasst. Sie treten auf, wenn Körper untereinander mit einer Führung in Kontakt sind, also z. B. bei Lagern. Sind die Kontaktflächen ideal glatt, kann man die coulombschen Reibungseffekte vernachlässigen. Sind die Kontaktflächen hingegen nicht ideal glatt, so werden Tangentialkräfte übertragen. Die Größe dieser Tangentialkräfte ist begrenzt, sie hängt unter anderem von der Rauigkeit der Oberflächen, d. h. vom Material und dessen Bearbeitungszustand ab. Während man die Haftreibungskräfte zu Beginn der Bewegung eines Körpers überwinden muss, damit die Bewegung überhaupt ausgeführt werden kann, tritt die Gleitreibung auf, während sich Körper gegeneinander bewegen.

Die Viskosereibung tritt auf, wenn sich ein Körper durch ein Fluid bewegt, z. B. in Lagern mit Öl-Füllung, in denen der Ölfilm verdrängt werden muss. Sie hängt von der Geschwindigkeit des Körpers und von der Viskosität des Fluides ab. In vereinfachten Rechnungen nimmt man an, dass die Widerstandskraft aufgrund der viskosen Reibung proportional zur Geschwindigkeit eines Körpers ist. Mit dem Beiwert d der geschwindigkeitsproportionalen Reibung gilt dann:

$$F_{W_v} = d \cdot v$$

3.14