



Unkonventionelle Aktoren

Eine Einführung

von

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha

2., ergänzte und aktualisierte Auflage

Oldenbourg Verlag München

Lektorat: Dr. Gerhard Pappert
Herstellung: Tina Bonertz
Titelbild: Autor
Einbandgestaltung: hauser lacour

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

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

A CIP catalog record for this book has been applied for at the Library of Congress.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

© 2013 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH
Rosenheimer Straße 143, 81671 München, Deutschland
www.degruyter.com/oldenbourg
Ein Unternehmen von De Gruyter

Gedruckt in Deutschland

Dieses Papier ist alterungsbeständig nach DIN/ISO 9706.

ISBN 978-3-486-71886-7
eISBN 978-3-486-75692-0

Vorwort

Die Einsatzgebiete von Aktoren sind kaum überschaubar und umfassen alle Bereiche unserer Umwelt, angefangen bei CD-Spielern und Fotoapparaten über Büro- und Haushaltsgeräte, Heizungs- und Klimaanlage, Werkzeugmaschinen und Roboter, sowie Land-, Wasser- und Luftfahrzeuge bis hin zu Geräten der Medizintechnik und künstlichen Gliedmaßen. Aktoren sind eine unverzichtbare Systemkomponente immer dann, wenn technische oder nichttechnische Vorgänge und Abläufe („Prozesse“) zielgerichtet beeinflusst werden sollen. Hierzu müssen sie in der Lage sein, auf ein elektrisches Steuersignal an ihrem Eingang mit einer aufgabenangepassten Kraft- und/oder Weggröße an ihrem Ausgang zu reagieren.

Elektromagnetische Aktoren wie Elektromotoren oder Hubmagnete und fluidische Aktoren wie Hydromotoren oder Proportionalventile sind seit Langem bekannt und werden weltweit in Millionen-Stückzahlen produziert. Über diese konventionellen oder herkömmlichen Aktoren gibt es demzufolge ein umfangreiches Schrifttum, in dem ihre Anwendungen, sowie der Entwurf und der Aufbau beschrieben werden¹. Sucht man aber nach Informationen über Aktoren, die weder auf elektromagnetischen noch auf fluidischen Prinzipien beruhen, wird es schwierig entsprechende Publikationen zu finden, insbesondere wenn eine zusammenhängende Darstellung oder Vergleiche mit konkurrierenden Aktorprinzipien von Interesse sind. Das vorliegende Buch will helfen, diese Lücke zu schließen, indem es sich gerade dieser so genannten unkonventionellen Aktoren annimmt und deren Eigenschaften und Einsatzpotenziale präsentiert.

Nun ist es ein aussichtsloses Unterfangen, in einem Buch vertretbaren Umfangs die unkonventionelle Aktorik gemäß der obigen Definition in ihrer gesamten Vielfalt zu präsentieren. Die somit notwendige Fokussierung auf einen überschaubaren Rahmen geschieht hier unter Anlegung zweier Prämissen: Zum einen beruhen die vorgestellten unkonventionellen Aktoren ganz wesentlich auf den Eigenschaften neuer oder verbesserter Werkstoffe, zum anderen stehen sie an der Schwelle eines großtechnischen Einsatzes oder haben diese Schwelle gerade erst überschritten. Ein weiteres Kriterium ist eine akzeptable Verfügbarkeit der aktorisch wirksamen Werkstoffe, denn der Leser dieses Buches soll in die Lage versetzt werden, auf der Basis des Marktangebots auch eigene Aktorideen realisieren zu können.

Unter Berücksichtigung dieser Festlegungen ist das Buch wie folgt aufgebaut: Nach einem einleitenden Kapitel, in dem aktorrelevante Definitionen und Zusammenhänge erläutert werden, befassen die Kapitel 2 und 3 sich mit piezoelektrischen und magnetostriktiven Aktoren. Inhalte der Kapitel 4 und 5 sind Flüssigkeiten, deren Fließverhalten durch elektrische bzw. magnetische

¹ Siehe hierzu beispielsweise [Jan04].

Felder gesteuert werden kann, was die Basis elektroreologischer und magnetoreologischer Aktoren darstellt. Thermisch und magnetisch anregbare Formgedächtnis-Legierungen und entsprechende Aktoren werden in den Kapiteln 6 bzw. 7 behandelt. Thema von Kapitel 8 sind elektrochemische Aktoren, und Kapitel 9 liefert einen Überblick von Mikroaktoren, die auf unkonventionellen Aktorprinzipien beruhen. Eine Besonderheit stellen die beiden letzten Kapitel dar, da die wichtigen Themen Leistungsverstärker für Aktoren (Kapitel 10) und Self-sensing-Aktoren (Kapitel 11) in der sonstigen Aktor-Literatur meistens vernachlässigt werden.

Zwei Aktorarten, die in der jüngeren Vergangenheit zunehmend in den Vordergrund gerückt sind und ohne Zweifel ebenfalls zu den unkonventionellen Aktoren zählen, wird der Leser womöglich vermissen – nämlich Aktoren mit elektroaktiven Polymeren (EAP-Aktoren) und Aktoren mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Zu den EAP-Aktoren gibt es wohl einige wenige Muster; erfahrungsgemäß beginnt sich aber gerade erst ein Marktangebot für aktorrelevante Polymere mit stabilen Werkstoffeigenschaften zu etablieren, das den Interessenten in die Lage versetzt, entsprechende Aktoren auch ohne eigene Grundlagenforschung aufzubauen. Nach dem Stand der Dinge werden EAP-Aktoren voraussichtlich in einer der nächsten Auflagen dieses Buches zu finden sein²; eine anwendungsnahe Aktorik auf der Basis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen wird hingegen noch einige Jahre intensiver Grundlagenarbeit erfordern.

Das vorliegende Buch basiert auf meiner etwa 25-jährigen Tätigkeit auf dem Gebiet der unkonventionellen Aktoren. In dieser Zeit habe ich zusammen mit meinen Mitarbeitern zahlreiche Grundlagenuntersuchungen sowie anwendungsnahe Entwicklungsprojekte mit nationalen und internationalen Partnern aus Universitäten und kommerziellen Unternehmen durchgeführt. Das auf den folgenden Seiten zusammengefasste Wissen stammt daher aus einer Vielzahl von Quellen, die aber häufig gar nicht mit bestimmten Personen verknüpfbar sind. Darüber hinaus ist der Kreis von Informanten so groß, dass diese hier schon aus Platzgründen nicht namentlich aufgeführt werden können. Sozusagen stellvertretend für alle ‚Zuarbeiter‘ will ich daher lediglich den Herren Dipl.-Ing. (FH) T. Würtz und Privatdozent Dr.-Ing. K. Kuhnen für ihre Unterstützung danken; sie haben die Kapitel 10 bzw. 11 wesentlich mitgeschrieben.

Ich möchte dieses Vorwort mit einem Hinweis abschließen. Ich hoffe sehr, dass die folgenden Kapitel verdeutlichen können, dass die unkonventionelle Aktorik als multidisziplinäres Fach gleichermaßen spannend und zukunftssträchtig ist. Sollte daher der eine oder andere Leser erwägen, sich intensiver mit diesem Gebiet zu befassen, sei eine Mitgliedschaft im Fachausschuss „Unkonventionelle Aktorik“ der VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) empfohlen. In diesem Fachausschuss trifft sich ein überschaubarer Kreis von Fachleuten aus dem deutschsprachigen Raum zweimal im Jahr, um nach der einfachen Regel „nehmen und geben“ ihr Wissen über unkonventionelle Aktoren auszutauschen und Kooperationen anzubahnen.

Und nun wünsche ich dem Leser einen möglichst großen Nutzen und viel Freude mit diesem Buch.

Saarbrücken, im Oktober 2009

Hartmut Janocha

² Eine Übersicht der EAP-Prinzipien geben beispielsweise A. Mazzoldi, F. Carpi und D. De Rossi in [Jan07].

Vorwort zur 2. Auflage

Wie bereits im Vorwort zur 1. Auflage angekündigt und entsprechend den dort erläuterten Prämissen werden nun in der 2. Auflage auch Aktoren mit elektroaktiven Polymeren in einem eigenen Kapitel behandelt (Kapitel 9; die bisherigen Kapitel 9 bis 11 erhalten dadurch die neue Nummerierung 10 bis 12). Kapitel 7 – Aktoren mit magnetischen Formgedächtnis-Legierungen – wurde wesentlich erweitert und hat infolge der Berücksichtigung neuester Forschungsergebnisse derzeit wohl ein Alleinstellungsmerkmal im deutschsprachigen Schrifttum. Darüber hinaus erhielt Abschnitt 1.6 einige nützliche Erweiterungen, und an verschiedenen Stellen des bereits vorhandenen Buchtextes wurden aktuelle Produkt- und Anwendungsbeispiele in den bestehenden Text eingefügt.

Durch die vorgenommenen Ergänzungen und Aktualisierungen vermittelt diese 2. Auflage der „Unkonventionellen Aktoren“ einen umfassenden, nun nahezu lückenlosen Überblick vom heutigen Stand der anwendungsorientierten, unkonventionellen Aktorik. Ich bin darum zuversichtlich, dass dieses Buch von der Aktor-Gemeinde weiterhin gut angenommen wird. Bei der Erstellung der Bilder und als kritische Gesprächspartner standen mir meine Mitarbeiter Dipl.-Ing. (FH) B. Holz und Ph.D. L. Riccardi zur Seite. Ich danke ihnen für ihre Unterstützung, sowie meinem ehemaligen Mitarbeiter Prof. Dr.-Ing. J. Schäfer für seine Bereitschaft, speziell den Themenkreis Energiedichte/Kopplungsfaktor/Wirkungsgrad eingehend mit mir zu diskutieren.

Saarbrücken, im Juni 2013

Hartmut Janocha

Inhalt

Vorworte	V
1 Einführung	1
1.1 Was sind unkonventionelle Aktoren?	1
1.2 Aktoren als Systemkomponente	2
1.3 Aktoren im Zentrum von Mechatronik, Mikrosystemtechnik und Adaptronik	5
1.4 „Intelligente“ und Self-sensing-Aktoren	7
1.4.1 „Intelligente“ Festkörperaktoren	7
1.4.2 Self-sensing-Festkörperaktoren	9
1.5 Entwurf von Aktoren	10
1.6 Charakterisierung von Aktoren	13
1.6.1 Kenngrößen	13
1.6.2 Kenngrößen-Diagramme	19
2 Piezoelektrische Aktoren	23
2.1 Physikalischer Effekt	23
2.2 Piezoelektrische Bauelemente	25
2.2.1 Piezoelektrische Werkstoffe	25
2.2.2 Piezokeramische Elemente	30
2.3 Piezoaktoren mit begrenzter Auslenkung	31
2.3.1 Stapelaktoren und Multilayer-Aktoren	31
2.3.2 Streifentranslatorn	37
2.3.3 Biegewandler	37
2.3.4 Komposite-Wandler	38
2.3.5 Piezowandler mit Wegübersetzung	39
2.4 Aktoren mit unbegrenzter Auslenkung (Piezomotoren)	41
2.4.1 Motoren für den quasistatischen Betrieb	42
2.4.1.1 Wurm- und Schreitantriebe	42
2.4.1.2 Trägheitsantriebe	45
2.4.1.3 Piezo Actuator Drive (PAD TM)	45

2.4.2	Motoren für den resonanten Betrieb (Ultraschallmotoren).....	47
2.4.2.1	Stehwellen-Motoren	48
2.4.2.2	Wanderwellen-Motoren	52
2.5	Messen von piezoelektrischen Kenngrößen.....	54
2.6	Steuerelektronik für Piezoantriebe.....	56
2.6.1	Leistungsverstärker.....	57
2.6.2	Linearisierung des Aktor-Übertragungsverhaltens	60
2.7	Anwendungsbeispiele.....	61
2.7.1	Positioniertisch	61
2.7.2	Dieselinjektor	62
2.7.3	Hautscanner	63
2.7.4	Entwurfsaufgabe Piezotranslator	65
2.8	Entwicklungstendenzen	68
3	Magnetostriktive Aktoren	71
3.1	Physikalischer Effekt.....	71
3.2	Magnetostriktive Bauelemente	72
3.2.1	Werkstoffe	72
3.2.2	Magnetostriktive Elemente.....	76
3.3	Magnetostriktive Aktoren mit begrenzter Auslenkung.....	76
3.3.1	Translator.....	77
3.4	Magnetostriktive Aktoren mit unbegrenzter Auslenkung.....	82
3.5	Messen von magnetostriktiven Kenngrößen.....	84
3.6	Elektronischer Leistungsverstärker.....	85
3.7	Anwendungsbeispiele.....	86
3.7.1	Unterwasser-Sonarsystem.....	86
3.7.2	Dynamischer Vibrationsabsorber	86
3.7.3	Hybrider Linearmotor.....	88
3.7.4	Entwurfsablauf	89
3.8	Vergleich zwischen piezoelektrischen und magnetostriktiven Wandlern.....	94
3.9	Entwicklungstendenzen	95
4	Aktoren mit elektrorheologischer Flüssigkeit	97
4.1	Einige rheologische Grundlagen.....	97
4.2	Elektrorheologischer Effekt.....	99
4.3	Technische Realisierung.....	101
4.3.1	Werkstoffe	101
4.3.2	Wirkprinzipien und Entwurfshinweise	106

4.4	Messen von ERF-Kenngrößen.....	110
4.4.1	Rheologische Kenngrößen.....	110
4.4.2	Elektrische Kenngrößen	114
4.5	Elektronischer Leistungsverstärker.....	115
4.6	Anwendungsbeispiele	117
4.6.1	Stellantrieb	117
4.6.2	Tastelement.....	118
4.6.3	Entwurfsaufgabe Stoßdämpfer.....	119
4.7	Entwicklungstendenzen	123
5	Aktoren mit magnetorheologischer Flüssigkeit	125
5.1	Physikalischer Effekt	125
5.2	Technische Realisierung	126
5.2.1	Werkstoffe	126
5.2.2	Wirkprinzipien.....	129
5.2.3	Wandlerentwurf	132
5.3	Messen von MRF-Kenngrößen.....	136
5.3.1	Rheologische Kenngrößen.....	136
5.4	Elektronische Leistungsverstärker	139
5.4.1	Analoge Leistungsverstärker	140
5.4.2	Schaltende Leistungsverstärker	141
5.5	Anwendungsbeispiele	142
5.5.1	Bremse	142
5.5.2	Motorlager	143
5.5.3	Spannvorrichtung für Werkstücke	146
5.5.4	Entwurfsaufgabe Kupplung	147
5.6	Vergleich zwischen ERF- und MRF-Aktoren.....	151
5.7	Entwicklungstendenzen	152
6	Aktoren mit thermischen Formgedächtnis-Legierungen	155
6.1	Physikalischer Effekt	155
6.2	Kommerzielle Formgedächtnis-Legierungen.....	158
6.3	Aufbau von thermischen FG-Aktoren.....	161
6.3.1	Aktorkonzepte.....	161
6.3.2	Beheizung von thermischen FG-Bauteilen	163
6.3.3	Dimensionierung von NiTi-Bauteilen.....	164
6.4	Anwendungsbeispiele	166
6.4.1	Klappenantrieb.....	166
6.4.2	Modellbau.....	167

6.4.3	Stellzylinder für große Lasten.....	168
6.4.4	AF-/ OIS-Aktor.....	168
6.5	Entwicklungstendenzen	169
6.6	Vergleich mit direkt konkurrierenden Aktorprinzipien	170
7	Aktoren mit magnetischen Formgedächtnis-Legierungen	175
7.1	Physikalischer Effekt.....	175
7.2	Kommerzielle Formgedächtnis-Legierungen	177
7.3	Aufbau von magnetischen FG-Aktoren.....	179
7.3.1	Entstehung der aktorischen Kennlinienverläufe	180
7.3.2	Betriebsarten von MFG-Aktoren.....	181
7.3.3	Erzeugung orthogonaler Magnetfelder	185
7.3.4	Dynamisches und statisches Verhalten.....	187
7.4	Messen von Aktor-Kenngrößen.....	189
7.5	Elektronische Ansteuerung.....	190
7.6	Anwendungsbeispiele.....	192
7.6.1	Experimentier-Aktor von AdaptaMat	192
7.6.2	Positionsregelung.....	193
7.6.3	Multistabiler Aktor	196
7.6.4	Entwurfsablauf	197
7.7	Vergleich zwischen MFG-Aktoren und magnetostriktiven sowie TFG-Aktoren...199	
7.8	Entwicklungstendenzen	199
8	Elektrochemische Aktoren	201
8.1	Elektrochemische Reaktionen	201
8.2	Technische Realisierung.....	202
8.2.1	Nickel-Wasserstoff-Zelle.....	202
8.2.2	Zink-Luft-Zelle.....	205
8.3	Anwendungsbeispiele.....	205
8.4	Entwicklungstendenzen	207
8.5	Vergleich mit direkt konkurrierenden Aktorprinzipien	207
8.5.1	Dehnstoff-Elemente.....	207
8.5.2	Metallhydrid-Aktoren.....	209
9	Aktoren mit elektroaktiven Polymeren	211
9.1	Dielektrische Elastomeraktoren.....	212
9.1.1	Physikalischer Effekt.....	212
9.1.2	Werkstoffe.....	214

9.1.3	Aufbau von DE-Aktoren.....	217
9.1.3.1	Membranaktoren.....	217
9.1.3.2	Weitere Bauformen.....	222
9.1.4	Messen von Aktor-Kenngrößen.....	223
9.1.5	Elektronischer Leistungsverstärker.....	225
9.1.6	Anwendungsbeispiele.....	227
9.1.6.1	Experimentier-Aktor von Danfoss.....	227
9.1.6.2	Laser Speckle Reducer.....	228
9.1.6.3	Stapelaktor für hohe Frequenzen.....	230
9.1.6.4	Rechenbeispiel Membranaktor.....	230
9.1.7	Entwicklungstendenzen.....	233
9.2	Ionenaktive Polymeraktoren.....	234
10	Mikroaktoren	237
10.1	Krafterzeugungsprinzipien.....	237
10.2	Herstellungsverfahren und Werkstoffe.....	241
10.3	Anwendungsbeispiele.....	242
10.3.1	Mikrofluidische Komponenten und Systeme.....	242
10.3.2	Aktoren für mikrooptische Systeme.....	245
10.3.3	Mikroantriebe und Greifersysteme.....	246
10.4	Entwicklungstendenzen.....	249
11	Leistungsverstärker für unkonventionelle Aktoren	251
11.1	Einführung.....	252
11.1.1	Ein-, Zwei- und Vierquadranten-Betrieb.....	252
11.1.2	Schaltende, analoge und hybride Leistungsverstärker.....	254
11.1.3	Vergleich der Schaltungskonzepte.....	260
11.2	Leistungselektronik für Piezoaktoren und ERF-Aktoren.....	262
11.2.1	Ansteuerung von Piezoaktoren.....	262
11.2.2	Ansteuerung von elektrorheologischen Flüssigkeiten.....	264
11.2.3	Wichtige Kenngrößen für den Verstärkerentwurf.....	264
11.3	Leistungselektronik für magnetostruktive Aktoren und MRF-Aktoren.....	266
11.3.1	Ansteuerung von magnetostruktiven und magnetorheologischen Aktoren.....	267
11.3.2	Wichtige Kenngrößen für den Verstärkerentwurf.....	268
11.4	Vorgehensweise bei der Auswahl eines Verstärkers.....	269
12	Self-sensing-Aktoren	271
12.1	Einführung.....	271
12.2	Operatorbasierte Modellierung von Festkörperaktoren.....	273
12.2.1	Modellbeschreibung in Gleichungsform.....	274
12.2.2	Modellbildung in Form von Signalflussplänen.....	275

12.3	Methoden zur Nutzung des Self-sensing-Effektes	277
12.3.1	Zustandsgrößenbasierte Methode	277
12.3.2	Parameterbasierte Methode.....	279
12.3.3	Voraussetzungen für die Rekonstruktion der mechanischen Größen.....	280
12.4	Mess- und Leistungselektronik.....	281
12.4.1	Messkreis für Spannung und Polarisationsladung	281
12.4.2	Leistungselektronik	282
12.5	Linearisierung der Ausgang-Eingang-Charakteristik	282
12.6	Anwendungsbeispiel: Piezoelektrischer Mikropositionierantrieb	285
Nachwort		289
Literatur		291
Index		303

1 Einführung

1.1 Was sind unkonventionelle Aktoren?

Allgemein kann man Aktoren (engl. *actuators*) als Verbindungsglieder zwischen dem informationsverarbeitenden Teil von elektrischen Steuerungen und einem technischen oder nicht-technischen, z.B. biologischen, Prozess bezeichnen. Mit Hilfe von Aktoren lassen sich Energieflüsse oder Massen-/Volumenströme zielgerichtet einstellen. Ihre Ausgangsgröße ist eine Energie oder Leistung, die gewöhnlich als mechanisches Arbeitsvermögen „Kraft mal Weg“ zur Verfügung steht. Der Aktoreingang wird stets elektrisch angesteuert, im Idealfall leistungslos, auf jeden Fall aber leistungsarm mit Strömen oder Spannungen, die möglichst mikroelektronik-kompatibel sind. Es sei betont, dass insbesondere die letztgenannte Eigenschaft Aktoren von „normalen“ Stellgliedern unterscheidet.

Die Struktur von Aktoren kann durch Einführen der elementaren Funktionsglieder „Energiesteller“ und „Energiewandler“ beschrieben werden (s. Bild 1.1). Bei einem Energiesteller ist die Ausgangsgröße eine Energie; diese entstammt einer leistungsstarken Hilfsenergiequelle und wird durch eine energiearme elektrische Eingangsgröße gesteuert, so wie es bei Transistoren oder Vorsteuerventilen der Fall ist. Bei einem Energiewandler ist sowohl die Eingangsgröße als auch die Ausgangsgröße eine Energie; entweder gleicher Art wie bei Stromwandlern (elektrisch/elektrisch) oder Drehmomentwandlern (mechanisch/mechanisch) oder verschiedenartig wie bei elektromagnetischen oder piezoelektrischen Wandlern (magnetisch/mechanisch bzw. elektrisch/mechanisch).

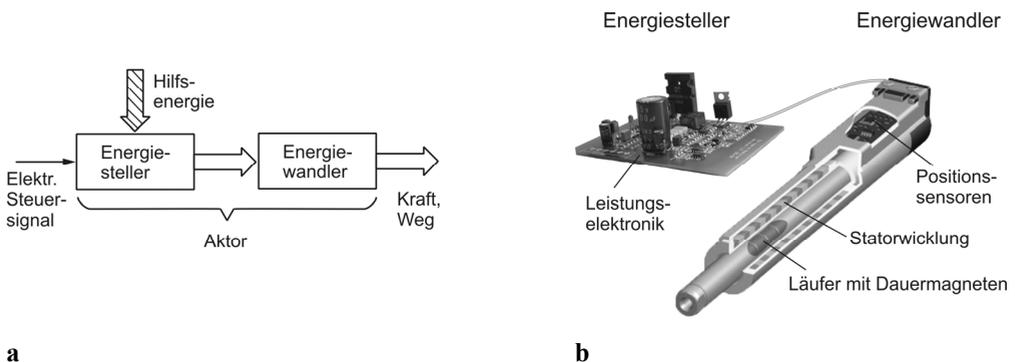


Bild 1.1 Struktur von Aktoren. **a** Energiesteller und Energiewandler als elementare Funktionsglieder, **b** Ausführungsbeispiel: Elektromagnetischer Linearaktor

Weil die Aufgabe von Aktoren darin besteht, Materieströme bzw. Energieflüsse zu steuern, muss jeder Akteur wenigstens einen Energiesteller enthalten. Im Allgemeinen setzen sich Aktoren daher aus einer Reihenschaltung von Energiestellern und Energiewandlern zusammen. In der Sprachpraxis wird allerdings ein wesentliches Merkmal des Aktors, nämlich seine leistungsarme elektrische Steuerbarkeit, meistens nicht berücksichtigt. Demzufolge wird häufig auch der Energiewandler allein als Akteur bezeichnet, und der Energiesteller wird dann beispielsweise als Leistungsverstärker oder Leistungselektronik benannt. Heutzutage sind beide Definitionen des Aktors (zum einen als reiner Energiewandler, zum anderen als Energiesteller plus Energiewandler) gleichermaßen gebräuchlich; sie werden daher auch in diesem Buch unterschiedslos verwendet.

Als unkonventionelle Aktoren werden nun – in etwas pragmatischer Weise – diejenigen Wandler-Steller-Kombinationen bezeichnet, deren Funktion auf anderen als den seit langem genutzten physikalischen Effekten basiert. Nach dieser Definition würde allerdings eine sehr große Zahl von Akteurprinzipien zu berücksichtigen sein – darunter auch weniger praxisrelevante, so dass eine Auswahl notwendig erscheint. Diese erfolgt unter Zuhilfenahme von zwei weiteren Bedingungen: Die erste legt fest, dass unkonventionelle Aktoren wesentlich auf besonderen Eigenschaften neuer oder verbesserter Werkstoffe beruhen, die zweite, dass sie das Laborstadium verlassen haben müssen und/oder an der Schwelle eines großtechnischen Einsatzes stehen. Diese Festlegung ist nicht genormt; gleichwohl wird sie von der „scientific community“ akzeptiert und angewendet.

Mit diesen Vereinbarungen lässt sich die Aufteilung in konventionelle und unkonventionelle Aktoren leicht konkretisieren: Aktoren, die beispielsweise auf elektromagnetischen, hydraulischen oder pneumatischen Prinzipien beruhen, sind seit Jahrzehnten bekannt und bewährt; sie werden daher zu den konventionellen Aktoren gezählt. Für Aktoren auf Basis von piezoelektrischen, elektrostriktiven und magnetostriktiven Werkstoffen sowie thermischen oder magnetischen Formgedächtnis-Legierungen und Aktoren mit elektro- oder magnetorheologischen Flüssigkeiten gab es bis vor wenigen Jahren hingegen lediglich einzelne Nischenanwendungen (z.B. der piezoelektrische Tintendruckerkopf). Erst seit Kurzem machen sie sich auf den Weg, neue Anwendungen und neue Märkte zu erobern. Mit solchen unkonventionellen Aktoren befasst sich das vorliegende Buch.

1.2 Aktoren als Systemkomponente

Viele Steuerungsaufgaben in der natürlichen und künstlichen Umwelt lassen sich durch eine offene Wirkungskette gemäß Bild 1.2 beschreiben: Im Mittelpunkt stehen Abläufe und Vorgänge („Prozesse“), die auf bestimmte Ziele hin verändert werden. Zu diesem Zweck greifen Aktoren in den Prozessablauf ein. Ihre mikroelektronik-kompatiblen Eingangssignale werden im informationsverarbeitenden Teil von elektrischen Steuerungen erzeugt, die häufig dezentral verteilt sind, also den verschiedenen Prozessen räumlich und funktionell individuell zugeordnet werden. Die Steuerungen („Mikrocomputer“) sind üblicherweise programmgesteuert und können auf der Basis von Personalcomputern realisiert werden. Eingriffe in den Prozess durch eine Bedienperson erfolgen über eine sog. Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. *human machine interface*, *HMI*), die im einfachsten Fall als alphanumerische Tastatur und Monitor vorliegt.

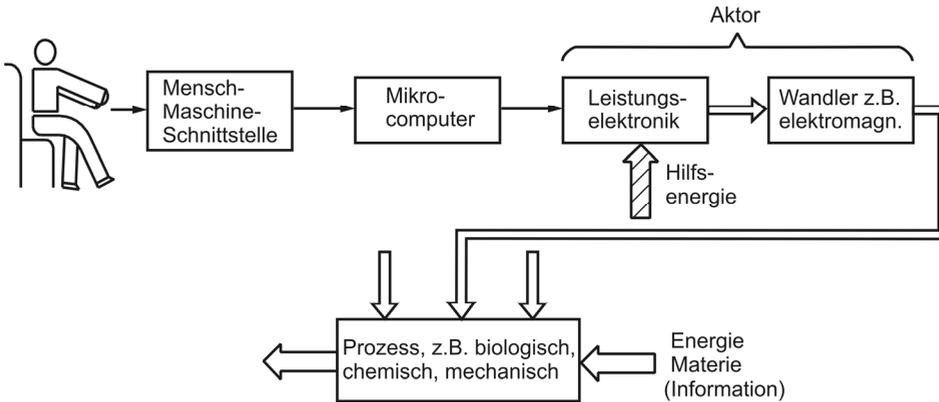


Bild 1.2 Offene Wirkungskette (Steuerung)

Bei automatisierten Prozessen erfolgt die Steuerung als geschlossener Wirkungsablauf (s. Bild 1.3). Eine Schlüsselfunktion ist die Messung charakteristischer Prozessgrößen, die nach ihrer Vorverarbeitung dem Steuerungsrechner zugeführt werden. Dieser vergleicht die gemessenen Istwerte mit vorgegebenen Sollwerten, und gemäß einer im Rechner abgelegten Regelstrategie werden aus den Abweichungen mit Hilfe von Rechenalgorithmen Stellsignale für den Aktor bzw. für die zugehörige Leistungselektronik ermittelt.

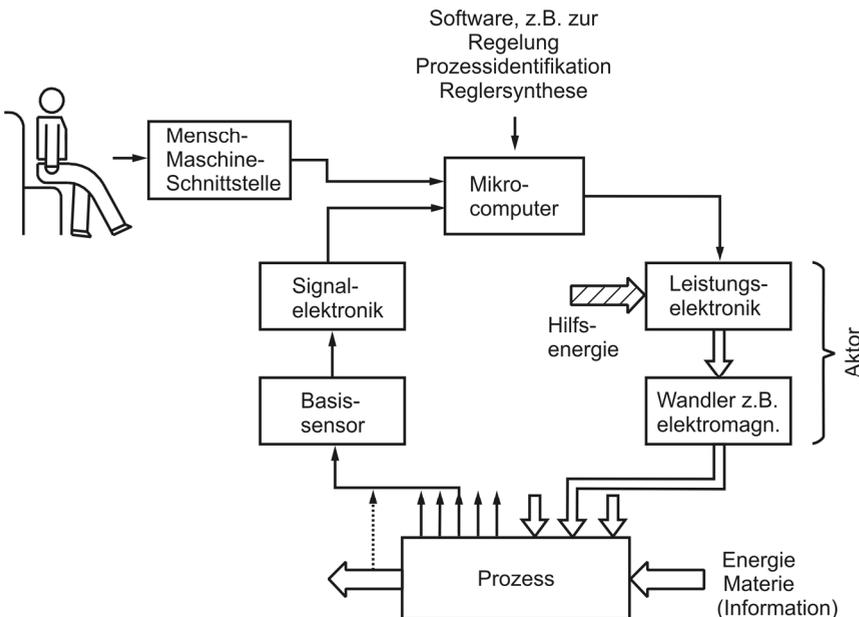


Bild 1.3 Geschlossener Wirkungsablauf (Regelkreis)

Sofern eine rechnerverwertbare Kenntnis des Prozesses vorliegt, beispielsweise in Form eines mathematischen Modells, werden dessen prozessspezifische Parameter im Zuge eines Identifikationszyklus im Rechner bestimmt. Diese Parameter bilden die Grundlage einer im

Rechner ablaufenden Reglersynthese. In einer höheren Automatisierungsstufe passt sich der Regler prozessbedingten Parameteränderungen – z.B. aufgrund von Werkzeugverschleiß – selbsttätig an: Adaptive Prozessführung (engl. *adaptive control, AC*).

Der symmetrische Systemaufbau in Bild 1.3 belegt auch phänomenologisch die duale Rolle der Sensorik und der Aktorik im Rahmen geschlossener Wirkungsabläufe. Interessant ist, dass bereits der Aktorweig allein in Aufbau und Funktion alle Eigenschaften eines vollständigen Regelsystems mit eigener Sensorik und Signalverarbeitung aufweisen kann. Ein konkretes Beispiel hierfür sind piezoelektrische Aktoren, deren Auslenkungen von direkt auf dem Piezokristall applizierten Dehnungsmessstreifen erfasst werden, um – ganz analog zu den Methoden der Fehlerkompensation bei Sensoren – temporäre oder prinzipbedingte Unvollkommenheiten des Aktors, wie Temperaturabhängigkeiten, Nichtlinearitäten oder Hystereseeffekte der Ausgang-Eingang-Charakteristik, eliminieren zu können (s. Abschnitt 1.4.1, „intelligente“ Aktoren).

In diesem Zusammenhang sei auf die deutsche Norm DIN 19226 Regelungstechnik und Steuerungstechnik (engl. *closed loop control and open loop control*) hingewiesen. Bild 1.4 beschreibt das Regelungssystem nach DIN: Im Steller wird aus der Reglerausgangsgröße y_R die Stellgröße y zur Ansteuerung des Stellglieds gebildet, das seinerseits in einen Materiestrom und/oder Energiefluss eingreift. Demzufolge sind die obigen Aktor-Definitionen am ehesten mit den DIN-Bezeichnungen Stelleinrichtung (engl. *final controlling equipment*) oder Stellglied (engl. *final controlling element*) verwandt.

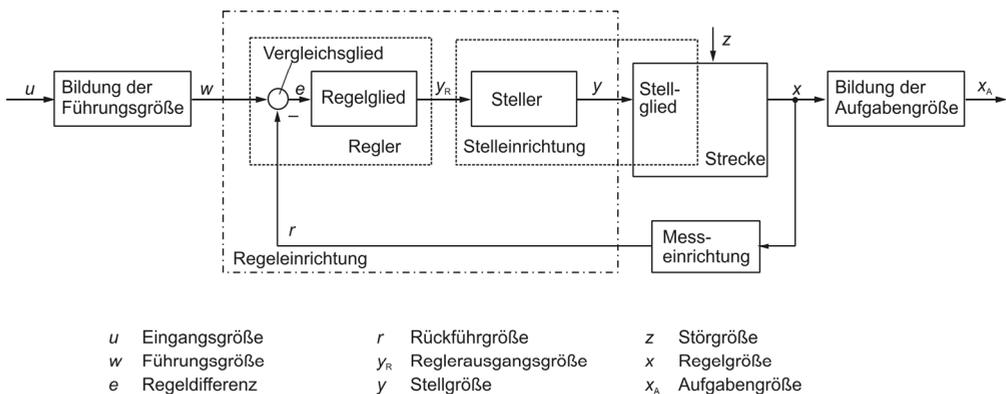


Bild 1.4 Typischer Wirkungsplan einer Regelung gemäß DIN 19226

Die Behandlung des Aktors als Systemkomponente führt folgerichtig auf die Frage nach der Art seiner Schnittstellen. Seine ausgangs- bzw. prozessseitige Schnittstelle kann so verschiedenartig sein wie der Einsatzbereich von Aktoren überhaupt und wird wesentlich vom letztlich zu realisierenden Einsatzfall bestimmt. Die eingangsseitige, bereits mit mikroelektronikkompatibel charakterisierte Schnittstelle des Aktors lässt sich hingegen wesentlich einfacher konkretisieren. Hier ergeben sich Festlegungen aus der Forderung, den Aktor „unbesehen“

an einen Steuerungsrechner mit genormten Schnittstellen anschließen zu können. Die Einbindung des Aktors in Echtzeitkonzepte macht es darüber hinaus notwendig, dass der Rechner die erforderlichen Anwenderprogramme rechtzeitig und (quasi) gleichzeitig abarbeiten kann. Normale Personalcomputer (PC) mit den üblichen Betriebssystemen sind hierzu – im Gegensatz zu Prozessrechnern, die „von Haus aus“ über die notwendigen Eigenschaften Timesharing, Multitasking und Interrupt-Fähigkeit verfügen – nicht in der Lage. Mit Hilfe entsprechender Hard- und Software lassen sich jedoch auch PCs zu Prozessrechnern aufrüsten.

Die Beschreibung und Untersuchung von Systemen aller Art ist Aufgabe der Systemtheorie oder – sofern es sich um technische Systeme handelt – der Systemtechnik. Nach den bisherigen Ausführungen ist es nahe liegend, die Rolle der Aktorik im Zusammenhang mit aktuellen Spielarten der Systemtechnik zu beleuchten, nämlich der Mechatronik, der Mikrosystemtechnik und der Adaptronik.

1.3 Aktoren im Zentrum von Mechatronik, Mikrosystemtechnik und Adaptronik

Der Begriff *Mechatronik* wurde erstmals 1969 von einem leitenden Ingenieur einer japanischen Firma als Kombination der Wörter *Mechanik* und *Elektronik* verwendet, um die wachsende Durchdringung und Vernetzung dieser Teildisziplinen bei der Entwicklung und Herstellung neuartiger Produkte zu kennzeichnen. Für das mechatronische Konzept findet man heute eine ganze Reihe ähnlicher Definitionen. Die geläufigste betont die Synergie (das Zusammenwirken) der Teildisziplinen und lautet: *Mechatronik ist die synergetische Verbindung von Mechanik mit Elektronik und „intelligenter“ Rechnersteuerung beim Entwurf und bei der Fertigung von Produkten und Prozessen*. Demnach sind Aktoren von Haus aus mechatronische Komponenten, was bereits Bild 1.3 zum Ausdruck bringt. Die Realisierungen von mechatronischen Systemen sind äußerst vielfältig, und Beispiele reichen von Industrierobotern und CNC-Werkzeugmaschinen über Antiblockier- und Antischlupfsysteme in Kraftfahrzeugen bis zu CD-Spielern und Fotoapparaten. Dabei werden sowohl konventionelle als auch unkonventionelle Aktoren eingesetzt, wobei eine problemangepasste Leistungselektronik den Entwicklungserfolg wesentlich beeinflusst.

Seit den 1980er Jahren verstärkte sich der Trend zur Miniaturisierung mechatronischer Systeme sehr rasch. Zur Kennzeichnung solcher Systeme entstand zu jener Zeit in Deutschland das Kunstwort *Mikrosystemtechnik (MST)* und in den USA der sinnverwandte Begriff *microelectromechanical systems (MEMS)*. Beide Begriffe umfassen die Entwicklung und Integration von Sensoren, Aktoren und anderen dreidimensionalen Strukturen mit sehr kleinen Abmessungen, wobei u.a. Fertigungstechniken zum Einsatz kommen, die aus dem Bereich hochintegrierter Mikroelektronik bekannt und etabliert sind. Damit stehen gewissermaßen die Herstellungstechnologien im Vordergrund, während mit dem Begriff Mechatronik die funktionalen und Entwurfs-Aspekte betont werden.

Für die Sensorik ist die Bedeutung des Einsatzes von Mikrotechniken sofort einsichtig („Mikrosensorik“). Für die Aktorik haben sie jedoch begrenzte Relevanz, weil bei den hier

interessierenden Aktoren, nämlich denjenigen mit mechanischem Leistungsausgang, mit Hilfe von mikromechanischen Strukturen natürlich nur kleinere Wege und/oder Kräfte realisiert werden können (s. Kapitel 10). Nichtsdestoweniger erhält die Mikrosystemtechnik dadurch Bedeutung für die Aktorik, dass man versucht, Unvollkommenheiten des Aktors, wie z.B. Temperaturabhängigkeiten oder nichtlineare Kennlinien, auf elektronischem Wege zu eliminieren. Hierbei besteht der Wunsch, die erforderlichen Sensoren und Schaltkreise unter Anwendung von Mikrotechniken zu miniaturisieren und im Aktorgehäuse unterzubringen (s. das Ausführungsbeispiel in Bild 1.1b); das Ergebnis wird als „intelligenter“ Aktor bezeichnet (s. Abschnitt 1.4.1).

Der Begriff *Adaptronik*, der im Herbst 1991 in Deutschland definiert und eingeführt wurde, kennzeichnet eine Disziplin, die auf internationaler Ebene unter den Bezeichnungen *smart materials*, *smart structures*, *intelligent systems* u. Ä. bekannt ist. Adaptronische Systeme und Strukturen können sich selbsttätig an unterschiedliche Betriebs- oder Umweltbedingungen anpassen („adaptieren“). Darüber hinaus und im Unterschied zum klassischen Regelkreis, dessen (Teil-)Funktionen durch separate Bauelemente realisiert werden, sind für die Adaptronik multifunktionale Elemente charakteristisch [Jan07]. Man versucht also, mehrere anwendungsspezifische Funktionen in einem einzigen Bauelement unterzubringen, das vorzugsweise unmittelbar in die Struktur oder in das System zu integrieren ist. Das Ziel besteht darin, Systeme und Strukturen möglichst einfach und leichtgewichtig aufzubauen, um letztendlich den erforderlichen Material- und Energieeinsatz für die Realisierung und den Betrieb auf ein unbedingt notwendiges Maß reduzieren zu können. Multifunktionale Werkstoffe sind unter anderem: Piezoelektrische, elektrostriktive und magnetostriktive Elemente; thermische und magnetische Formgedächtnis-Legierungen sowie elektrorheologische und magnetorheologische Fluide.

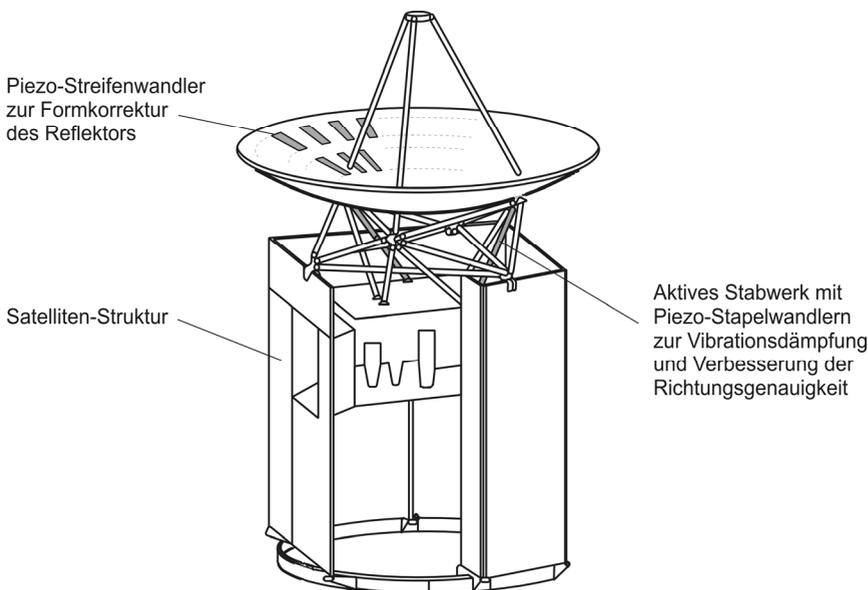


Bild 1.5 Beispiel für ein adaptronisches System: Aktive Antennenstruktur an einem Satelliten
(Quelle: DASA/EADS)

Eine typische adaptionsische Aufgabenstellung ist die aktive Steuerung von Strukturgeometrien. Hierbei wird das Übertragungsverhalten von mechanischen Strukturen mit Sensoren in-process erfasst und mit Hilfe von Aktoren gezielt eingestellt. Beispielsweise werden piezoelektrische Stapelaktoren (s. Abschnitt 2.3.1) in fachwerkartigen Strukturen als aktive Streben eingesetzt oder piezoelektrische Streifenwandler (Abschnitt 2.3.2) verformen flächenhafte Strukturen wie Platten oder Schalen (s. Bild 1.5). Dabei kann neben der aktorischen Fähigkeit der Piezowandler gleichzeitig deren inhärente Sensoreigenschaft zum Zuge kommen. Mit solchen „Self-sensing-Aktoren“ (s. Abschnitt 1.4.2 und Kapitel 12) lassen sich die erwähnten „smarten Strukturen“ realisieren, die hinsichtlich des erforderlichen Geräte- und Installationsbedarfs mit viel weniger Aufwand in Betrieb genommen werden können als dies bisher möglich ist.

1.4 „Intelligente“ und Self-sensing-Aktoren

Im Folgenden werden die in den Abschnitten 1.2 und 1.3 bereits erwähnten Konzepte des „intelligenten“ und des Self-sensing-Aktors am Beispiel von Festkörperaktoren genauer beschrieben. Ausgangspunkt der Betrachtung ist die gewünschte Sollauslenkung s_d des Aktors. Eine Steuer- oder Regelelektronik erzeugt hieraus in Verbindung mit einem Leistungsverstärker die elektrische Größe X zur direkten Ansteuerung des Aktors. Dieser wandelt die Größe X in eine Auslenkung s , die der Last F entgegen gerichtet ist; y ist die Ausgangsgröße eines Weg- oder Kraftsensors. Diese Situation liegt den Bildern 1.6 und 1.7 zugrunde.

Gewöhnlich sind Istauslenkung s und Sollauslenkung s_d nicht gleich. Interne Unvollkommenheiten, wie beispielsweise hysteresebefahfete Kennlinien und äußere Einflüsse, wie Krafteinwirkungen durch die umgebende mechanische Struktur, sind die Hauptgründe für die Abweichung zwischen den Soll- und Istwerten. Der erstgenannte Mangel (hysteretische Nichtlinearitäten) ruft Mehrdeutigkeiten zwischen den Ausgangs- und Eingangsgrößen des Wandlers hervor; letztere (äußere Einflüsse) verursachen eine Abweichung der Istauslenkung vom Sollwert beispielsweise aufgrund der endlichen Steifigkeit des Festkörperwandlers. Hysteresebefahfete Abhängigkeiten zwischen Eingangsgrößen (hier: F , X) und Ausgangsgrößen (hier: s , y) können beispielsweise mit Hilfe von sog. Operatoren (s. Kapitel 12) beschrieben werden:

$$y = \Gamma_S [X, F], \quad (1.1)$$

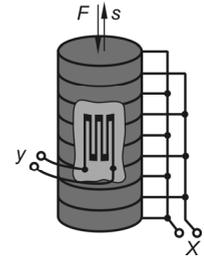
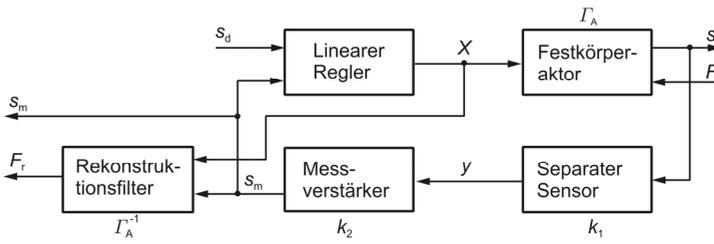
$$s = \Gamma_A [X, F]. \quad (1.2)$$

(1.1) wird Sensorgleichung des Festkörperwandlers genannt, (1.2) ist die Aktorgleichung; Γ_S bzw. Γ_A sind die entsprechenden (vektoriellen) Hystereseeoperatoren.

1.4.1 „Intelligente“ Festkörperaktoren

Festkörperaktoren werden als „intelligent“ bezeichnet, wenn ihr Übertragungsverhalten durch eine funktional zugeordnete, „elektronische Intelligenz“ bestimmt wird, falls notwen-

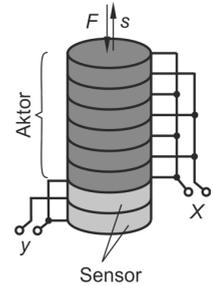
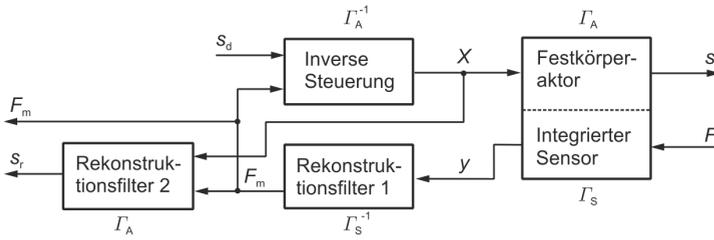
dig mit Sensorunterstützung. Solche „intelligenten“ Aktoren erkennen Abweichungen vom gewünschten Übertragungsverhalten, die von hysteretischen Nichtlinearitäten sowie von Lastrückwirkungen verursacht werden, und korrigieren sie automatisch. Der weggeregelter Aktor in Bild 1.6a ist ein Beispiel für solch einen Aktortyp. Damit können innere Unvollkommenheiten und äußere Störeinflüsse durch einen linearen Regler kompensiert werden. Dieser Regler erhält Informationen über die Aktorauslenkung von einem (separaten) Wegsensor. Mit Hilfe des inversen Operators Γ_A^{-1} wird die Kraft F_r rekonstruiert, so dass es beispielsweise möglich wird, eine Rückmeldung über die augenblickliche Belastung des Aktors an das übergeordnete Regelsystem zu geben. Hierfür ist eine Messschaltung zur Erfassung der elektrischen Steuergröße X erforderlich.



$$s = \Gamma_A [X, F] \quad s_m = k_2 \cdot y$$

$$y = k_1 \cdot s \quad F_r = \Gamma_A^{-1} [s_m, X]$$

a



$$s = \Gamma_A [X, F] \quad s_r = \Gamma_A [X, F_m]$$

$$y = \Gamma_S [F] \quad F_m = \Gamma_S^{-1} [y]$$

$$\text{Inverse Steuerung: } X = \Gamma_A^{-1} [s_d, F_m]$$

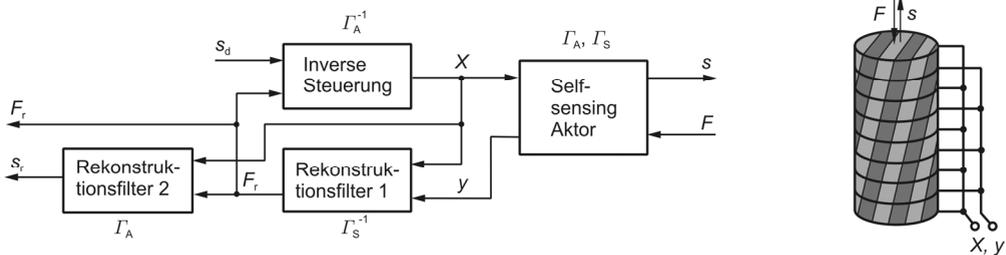
b

Bild 1.6 Wirkungsplan eines „intelligenten“ Festkörperaktors. **a** Mit separatem Sensor (z.B. Dehnmessstreifen), **b** mit integriertem Sensor (man beachte, dass die elektrische Größe y unterschiedliche mechanische Messgrößen abbildet)

Ein Ausführungsbeispiel für einen „intelligenten“ Aktor ist im rechten Teil von Bild 1.6a angedeutet; dort wird die Auslenkung eines piezoelektrischen Stapelwandlers (s. Abschnitt 2.3.1) mit Hilfe eines Dehnungsmessstreifens erfasst, der unmittelbar auf den aktiven Werkstoff geklebt ist. Ebenfalls bei piezoelektrischen Stapelwandlern wird manchmal das Konzept gemäß Bild 1.6b genutzt. Hierbei wirken einige der Keramikscheiben als Sensoren, um die Kraft zu messen, wobei der größere Teil des Stapels als Aktor fungiert. Für die korrekte Messung der Kraft muss das hysteretische Übertragungsverhalten des integrierten Piezosensors mittels des inversen Operators Γ_S^{-1} im Rekonstruktionsfilter 1 kompensiert werden. Die Auslenkung s wird im Filter 2 mit Hilfe des Operators Γ_A aus der elektrischen Steuergröße X und der gemessenen Kraft F_m rekonstruiert. Hysteretische Nichtlinearitäten und Lastrückwirkungen, die während des Aktorbetriebs auftreten, werden mit Hilfe der inversen Steuerung Γ_A^{-1} kompensiert.

1.4.2 Self-sensing-Festkörperaktoren

Der in Bild 1.7 dargestellte Self-sensing-Festkörperaktor hat den höchsten Integrationsgrad. Charakteristisch für Self-sensing-Aktoren ist die simultane Nutzung von aktorischen und sensorischen Eigenschaften desselben aktiven Materials. Im Unterschied zu dem Konzept des „intelligenten“ Aktors in Bild 1.6 verfügen sie über eine Leistungselektronik mit integrierter Messelektronik zur Erfassung der gegebenen elektrischen Steuergröße X und der dualen elektrischen Größe y , welche die Sensorinformation beinhaltet. Aus den gemessenen elektrischen Größen X und y werden dann die mechanischen Größen Auslenkung s_r und Last F_r in den Rekonstruktionsfiltern 1 und 2 berechnet. Die zentrale Aufgabe der Signalverarbeitung ist in diesem Fall die Linearisierung der Kennlinienhysteresen und die Entkopplung der Sensor- von der Aktorfunktion.



$$s = \Gamma_A [X, F] \quad s_r = \Gamma_A [X, F_r]$$

$$y = \Gamma_S [X, F] \quad F_r = \Gamma_S^{-1} [y, X]$$

$$\text{Inverse Steuerung: } X = \Gamma_A^{-1} [s_d, F_r]$$

Bild 1.7 Wirkungsplan eines Self-sensing-Festkörperaktors

Die Entkopplung von Sensor- und Aktorfunktion für die Rekonstruktion sowohl der Kraft als auch der Auslenkung ist der Hauptunterschied zwischen self-sensing und „intelligentem“ Aktorkonzept in Bild 1.6. Im erstgenannten Fall wird die Ausgangsgröße y des Sensorpfades stark von der Steuergröße X des Festkörperwandlers beeinflusst und muss als äußerer Störeinfluss auf den Sensorbetrieb betrachtet werden. Im letztgenannten Fall bleibt die Ausgangsgröße y des Sensorpfades von der Steuergröße X des Festkörperwandlers unbeeinflusst. Daher ist in diesem Fall eine modellbasierte Entkopplung der Sensor- und der Aktorfunktion nicht erforderlich. Eine detaillierte Behandlung des Self-sensing-Prinzips aus systemtheoretischer Sicht erfolgt in Kapitel 12.

1.5 Entwurf von Aktoren

Wie in anderen technisch-wissenschaftlichen Bereichen erfolgt auch der Entwurf von unkonventionellen Aktoren zunehmend mit Rechnerhilfe. Er beginnt damit, dass der Aktor und seine Umgebung als Softwaremodell nachgebildet werden. Solche Modelle sind eine Voraussetzung für die Simulation des dynamischen Systemverhaltens im vorgesehenen Einsatzfall. Auf diese Weise lassen sich alle wichtigen Eigenschaften des Systems bereits am Rechner erkennen, und die wesentlichen Parameter des Aktors können bezüglich der gewünschten Zielgrößen optimiert werden, bevor seine prototypische Realisierung erfolgt. Dieser Entwurfsweg wird nun kurz am Beispiel eines Schwingungstilgers (engl. *dynamic vibration absorber*) vorgeführt, der hier als schwach gedämpftes Masse-Feder-System angenommen wird

Schwingungstilger werden zum Beispiel in der Automobil- und Luftfahrtindustrie zur Reduzierung der Schwingungsneigung von Karosserien bzw. Flugzeugrümpfen eingesetzt. Zum Aufstellen eines einfachen Näherungsmodells kann die mechanische Struktur an der Stelle der maximalen Schwingung ersatzweise durch eine Basismasse m_1 beschrieben werden (s. Bild 1.8). Die monofrequente oder schmalbandige Störkraft F_1 ist eine Folge der Wechselwirkung zwischen m_1 und der restlichen mechanischen Struktur, welche an anderen Stellen durch extern oder intern angreifende Kräfte angeregt wird. Die Aufgabe des Schwingungstilgers besteht darin, die Hilfsmasse m_2 gerade so auszulenken, dass sich eine Sekundärkraft $F_2 = m_2 a_2$ einstellt, die in der Lage ist, die Primärkraft F_1 zu kompensieren und damit der Anregung der Masse m_1 entgegenwirkt.

Gewöhnlich setzt man Schwingungstilger dann ein, wenn die Störkraft F_1 monofrequent oder schmalbandig ist. Durch die passende Wahl seiner Parameter Federsteifigkeit c , Dämpfungskoeffizient k und Masse m_2 wird die Eigenfrequenz eines Tilgers auf die Frequenz von F_1 abgestimmt. Die schwingungsreduzierende Wirkung beruht in diesem Fall auf einer Kompensation von F_1 durch die vom Tilger hervorgerufene Massenkraft. Bei verstellbaren, passiven Tilgern ist es möglich, die Kopplung zwischen den beiden interagierenden Massen variabel zu gestalten, wodurch man eine frequenzveränderliche Tilgerwirkung erreicht. Von diesem Gedanken ausgehend lässt sich beispielsweise das passive Material zwischen m_1 und m_2 (vgl. Bild 1.8a) durch einen piezoelektrischen Aktor ersetzen. Hierdurch ist man in der Lage, die nun durch die elastischen Eigenschaften des Aktors festgelegten Parameter Federsteifigkeit und Dämpfungskoeffizient elektrisch zu steuern.

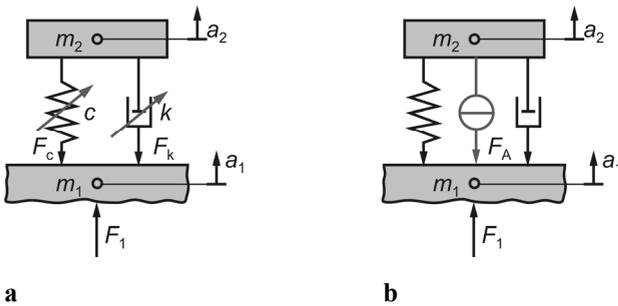


Bild 1.8 Tilger-/Dämpferprinzip. **a** Verstellbarer Schwingungstilger (Hilfsmassedämpfer), **b** aktiver Schwingungsdämpfer (seismischer Dämpfer)

Mit Hilfe einer rechnerischen Modalanalyse unter Einsatz kommerziell verfügbarer Software kann beispielsweise das Eigenschwingverhalten des beschriebenen Systems bereits in der Entwurfsphase simuliert werden. Das hierzu erforderliche Systemmodell lässt sich durch Nutzung ebenfalls kommerziell verfügbarer FEM³-Software unmittelbar aus der am CAD⁴-Rechner erstellten Konstruktionszeichnung ableiten. Bild 1.9 zeigt das FEM-Modell eines verstellbaren, passiven Tilgers, bei dem die Kopplung zwischen m_1 und m_2 durch einen piezoelektrischen Stapeltranslator (s. Abschnitt 2.3.1) erfolgt, der hier mit einem Stellwegvergrößerer (s. Abschnitt 2.3.5) ausgestattet ist. Ein Vergleich der Teilbilder vermittelt einen Eindruck vom dynamischen Verhalten des Tilgers (maximale/minimale Schwingungsamplitude).

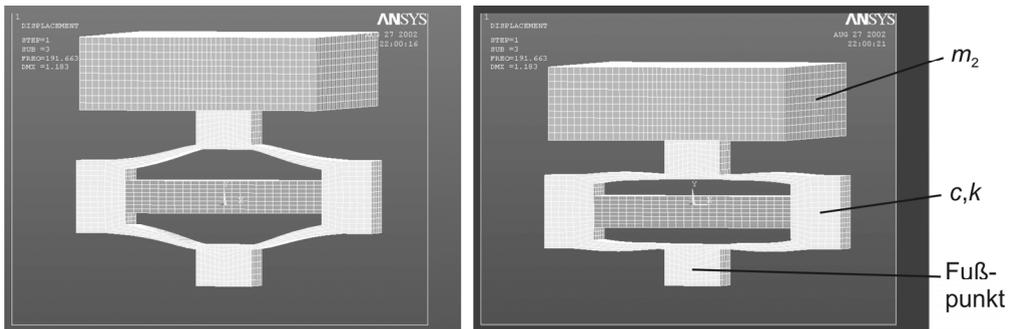


Bild 1.9 Dynamisches Verhalten des Schwingungstilgers, analysiert mit FEM-Software

Eine weitere Nutzung des Piezowandlers als „Kraftgenerator“ ermöglicht es, aus dem verstellbaren passiven Tilger einen aktiven Schwingungsdämpfer zu entwickeln, der aktorisch zusätzlich eine Kompensationskraft F_A erzeugt, die – ebenso wie F_c und F_k – gegenphasig zur

³ FEM: Finite-Elemente-Methode.

⁴ CAD: Computer aided design (= rechnergestützter Entwurf).

Störkraft F_1 in die Basisstruktur geleitet wird (s. Bild 1.8b). In diesem Fall dient m_2 als sog. seismische Masse, und die Schwingungsreduzierung erfolgt verhältnismäßig breitbandig in einem Frequenzbereich deutlich oberhalb der Dämpfer-Eigenfrequenz. Für den Betrieb als aktiver Dämpfer wird beispielsweise die gemessene Basisbeschleunigung a_1 als Regelgröße auf den Eingang der Spannungsquelle für den Piezoaktor zurückgeführt, s. Bild 1.10. Auf der Grundlage des dargestellten Wirkungsplans kann die Effizienz der Kraftkompensation mit Hilfe eines geeigneten Simulations- und Analyseprogramms – zum Beispiel mit der weit verbreiteten Software MATLAB/Simulink® – am Rechner untersucht werden.

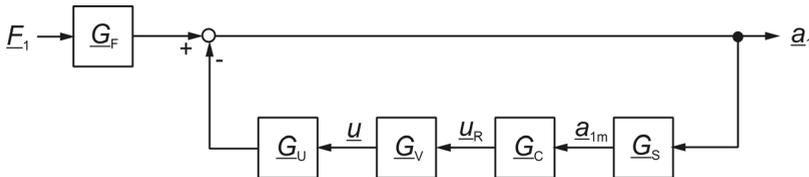


Bild 1.10 Kraftkompensation in geschlossenem Wirkungsablauf (a_1 , a_{1m} : tatsächliche bzw. gemessene Beschleunigung der Masse m_1 ; F_1 : Störkraft; u_R : Eingangsspannung der Spannungsquelle; u : Steuerspannung des Piezoaktors, \underline{G} : steht für die verschiedenen Frequenzgangfunktionen, \underline{G}_S : Sensor, \underline{G}_C : Regler, \underline{G}_V : Spannungsquelle, \underline{G}_U : Führungsgröße, \underline{G}_F : Störgröße)

Bild 1.11 zeigt einige Ergebnisse der Simulation. Die Frequenzkennlinien in Bild 1.11a weisen die Charakteristik einer Bandsperrre auf, welche die Kompensation der Kraft F_1 im Bereich zwischen 70 Hz und 329 Hz bewirkt. In Bild 1.11b ist im Zeitbereich das Ergebnis der Kraftkompensation im geschlossenen Wirkungsablauf dargestellt, wobei die Simulation für das Zeitintervall von 0 ... 0,4 s durchgeführt wurde. Während des Intervalls 0 ... 0,1 s ist der Regler deaktiviert, so dass der Schwingungsdämpfer passiv, d.h. als Tilger arbeitet. Bei Erregung mit F_1 ergibt sich in diesem Betriebszustand für die Beschleunigung a_1 ein maximaler Amplitudenwert von 5 m/s^2 . Das Einschalten des Reglers zum Zeitpunkt $t = 0,1 \text{ s}$ regt die Dynamik des Gesamtsystems an.

Dies äußert sich in der schnell abfallenden Amplitude einer Schwingung hoher Frequenz, welche dem zweiten Maximum des in Bild 1.11a dargestellten Amplitudengangs entspricht. Die Störschwingung wird überlagert von einer langsamer abnehmenden Schwingung mit niedriger Frequenz. Diese entspricht dem ersten Maximum des Amplitudengangs in Bild 1.11a. Nach Abklingen aller Einschwingvorgänge verbleibt nur noch eine Restbeschleunigung aufgrund der unvollkommenen Dämpferwirkung. Der maximale Amplitudenwert der Beschleunigung a_1 im stationären Zustand beträgt ca. $0,25 \text{ m/s}^2$; somit wird die resultierende Kraft an der Basismasse m_1 um den Faktor 20 verringert.

Natürlich lässt sich mit Hilfe der Analyse-Software beispielsweise auch die dynamische Stabilität des Schwingungsdämpfers untersuchen und optimieren, so dass nach dem anschließenden Aufbau eines Prototypen keine unliebsamen Überraschungen zu erwarten sein werden. Eine konkrete Realisierung und Anwendung des hier beschriebenen Tilger-/Dämpferprinzips wird in Abschnitt 3.7.2 präsentiert.

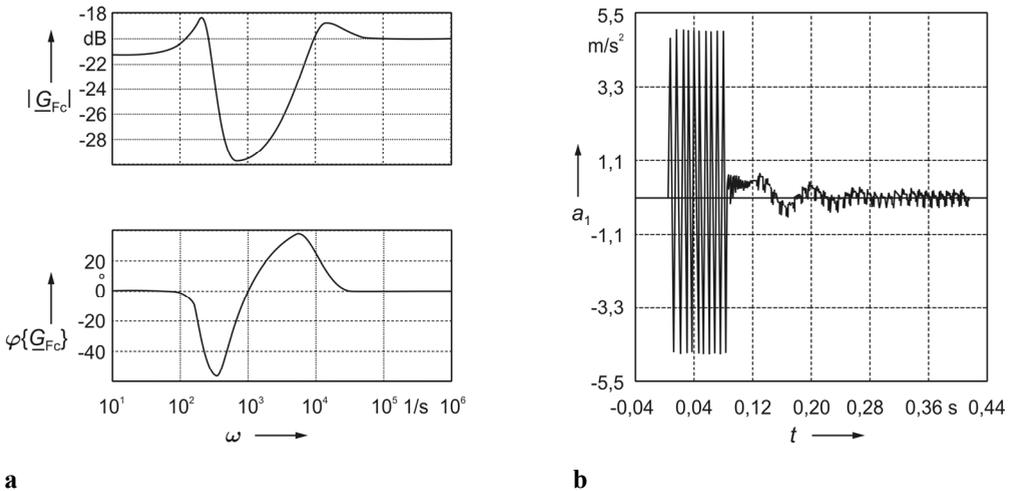


Bild 1.11 Aktiver Schwingungsdämpfer. a Amplituden- und Phasengang ($G_{Fc} = a1 / F1$: Frequenzgangfunktion der Störgröße in geschlossener Wirkungskette), b Kompensationseffekt im Zeitbereich

1.6 Charakterisierung von Aktoren

In diesem Abschnitt werden zunächst einige Kenngrößen erläutert und kommentiert, mit denen praxisrelevante Eigenschaften von Aktoren beschrieben und quantifiziert werden können. Anschließend wird gezeigt, dass sog. Kenngrößen-Diagramme ein gutes Mittel sind, wenn man sich einen ersten Eindruck von generellen Unterschieden zwischen den Aktorfamilien in Bezug auf bestimmte Kenngrößen verschaffen möchte.

1.6.1 Kenngrößen

Die *Dehnung* (engl. *strain*) beschreibt die Auslenkung eines Aktors im angesteuerten Zustand, bezogen auf die in Richtung der Auslenkung ursprünglich vorhandene Länge oder Form. Die Dehnung wird üblicherweise durch die Buchstaben S oder ε symbolisiert. Sie kann positiv oder negativ sein; man spricht auch von Elongation bzw. Kontraktion des Aktors. Die maximal erzielbare Dehnung S_{\max} des aktiven Materials ist eine wichtige Entwurfsgröße, die, über alle Aktorfamilien gesehen, einen großen Wertebereich umfasst. Bei magnetostriktiven Wandlern beispielsweise (s. Kapitel 3) erreicht S_{\max} Werte bis etwa 0,15 %, wobei im Wesentlichen die magnetische Sättigung der Legierung begrenzend wirkt. Bei thermischen Formgedächtnis-Legierungen (s. Kapitel 6) ist S_{\max} durch die Streckgrenze des Materials limitiert und liegt bei ungefähr 8 % (Einweg-Effekt). Bei Elastomeren (s. Kapitel 9) beschränkt die elektrische Durchschlagfeldstärke die maximale Dehnung auf Werte der Größenordnung 100 %.

Die *mechanische Spannung* (engl. *stress*) ist die Kraft pro Fläche, mit der ein Aktor betriebsmäßig belastet wird. Für sie sind die Symbole T oder σ reserviert. Die Kraft, die ein Aktor ausüben kann, ist durch die höchste zulässige Spannung T_{\max} im aktiven Material begrenzt. Um große

Aktorkräfte realisieren zu können, sind also Werkstoffe mit großem T_{\max} einzusetzen. Werkstoffe, die nur kleine Dehnungen erzeugen können und darüber hinaus spröde sind (z.B. Piezokeramiken), haben maximal zulässige Zugspannungen, die viel kleiner sind als die Druckspannungen. In diesem Zusammenhang versteht man unter *Blockierspannung* die mechanische Spannung, die in einem Aktor entsteht, wenn er mit maximal zulässiger Amplitude der elektrischen Steuergröße beaufschlagt und gleichzeitig seine Auslenkung oder Formänderung unterbunden („blockiert“) wird. Die maximalen Spannungen reichen von etwa 1 N/mm^2 (z.B. bei Elastomeren) bis zu mehreren 100 N/mm^2 (z.B. bei Formgedächtnis-Legierungen).

Eine weitere wichtige Kenngröße ist die *Energie* oder *Energiedichte* (= Energie pro Volumen). Die gesamte, im aktiven Wandlermaterial gespeicherte Energiedichte setzt sich (bei Festkörperwandlern) aus drei Anteilen zusammen: Einer rein elektrischen oder – je nach Wandlerprinzip – rein magnetischen Energiedichte, einer verkoppelten Energiedichte, die für die elektro- bzw. magnetomechanische Energiewandlung zuständig ist, sowie einer rein elastischen Energiedichte (manchmal auch mechanische Energiedichte genannt). Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich auf die elastische Energiedichte; sie zeigt sich am Ausgang des Wandlers als dessen Fähigkeit, mechanische Arbeit zu verrichten. Die im Wandler-element erzeugbare elastische Energiedichte wird auch als *Arbeitsvermögen* (engl. *work output*) bezeichnet und erhält das Symbol e_{erz} . Das Arbeitsvermögen ist – wie folgende Beispiele belegen werden – nicht notwendigerweise gleich der am Wandlerausgang verfügbaren Energiedichte, die als ‚technisch nutzbare, elastische Energiedichte‘ mit dem Formelzeichen e_{nutz} versehen wird.

Die *elastische* Energiedichte stellt als Produkt von Dehnung S mal Spannung T das Arbeitsvermögen pro Hub dar, bezogen auf das Volumen V des aktiven Werkstoffs. In der Regel bleiben hierbei die Volumina von Stromversorgungen, magnetischen Flussführungen, Gehäusen, usw. unberücksichtigt; sie skalieren nicht immer mit der abgegebenen Energie und müssen daher für sich betrachtet werden. Aus der Energiedichte-Definition folgt, dass in einem S, T -Koordinatensystem die von der Wandlerkennlinie und den beiden Achsabschnitten $[0, T_{\max}]$ und $[0, S_{\max}]$ umschlossene Fläche $(T \cdot S)_{\max}$ ein Maß für das maximale Arbeitsvermögen e_{erz}^{\max} des Wandlers ist, siehe Bild 1.12a. Vereinfachend wird hierfür in den Datenblättern häufig das Produkt $T_{\max} \cdot S_{\max}$ angegeben. Offensichtlich ist die entsprechende Energiedichte jedoch nur dann am Aktorausgang verfügbar, wenn beide Maximalwerte gleichzeitig auftreten, wie dies beispielsweise bei pneumatischen und hydraulischen Aktoren mit ihren nahezu achsparallelen S, T -Kennlinien der Fall sein kann.

Unkonventionelle Aktoren liefern die Maximalwerte S_{\max} und T_{\max} in der Regel nicht simultan, und oft sind sie sogar mit den Zuständen verschwindend kleine Spannung bzw. Dehnung verknüpft. Ein Beispiel hierfür ist die Kennlinie in Bild 1.13a, deren Verlauf für Piezowandler typisch ist. Die Kennlinie gelte für den Fall maximaler Ansteuerung ($u = u_{\max}$), somit sind die beiden Achsabschnitte identisch mit der Blockierspannung T_B bzw. der maximalen Leerlaufdehnung S_0 . In den technischen Daten dieser Aktorspezies findet man für das maximale Arbeitsvermögen zuweilen die Angabe $T_B \cdot S_0$ (was dem Produkt $T_{\max} \cdot S_{\max}$ entspricht). Bild 1.13a zeigt, dass die tatsächlich erzeugbare, maximale Energiedichte $e_{\text{erz}}^{\max} = (T \cdot S)_{\max}$ sich hiervon deutlich unterscheidet; sie kann infolge des aktorspezifischen Kennlinienverlaufs den Wert $T_B \cdot S_0 / 2$ nicht überschreiten.

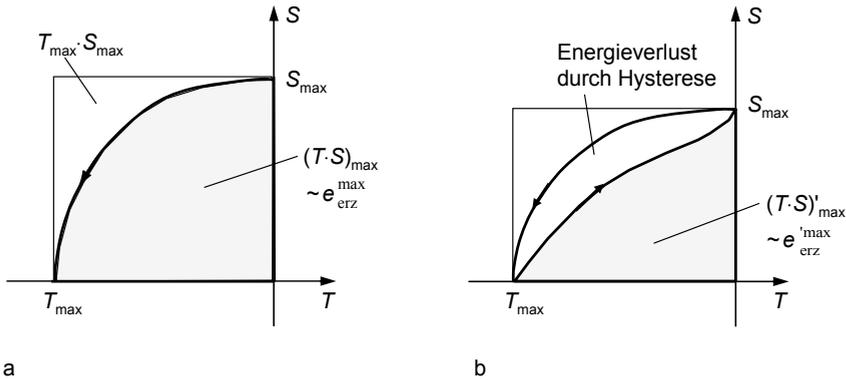


Bild 1.12 $S(T)$ -Kennlinie und aktorisches Arbeitsvermögen: Flächeninhalt $(T \cdot S)_{\max}$ als Maß für das maximale Arbeitsvermögen. **a** Einmaliger Aktorhub, **b** zyklischer Aktorbetrieb (die Hysterese ist übertrieben groß dargestellt)

Die Bilder 1.13b und 1.13c erläutern für diesen Piezoaktor die beiden Lastfälle konstante Gewichtskraft, d.h. $T_G = -mg/A$ (A : Wandlerfläche, auf die T_G wirkt), und wegabhängige Federkraft, also $S = -T/E$ (E : Elastizitätsmodul). Im ersten Fall gibt der Wandler die elastische Energiedichte $e_{\text{nutz}} = T_G \cdot S_A$ an die Last ab, siehe die schraffierte Fläche in Bild 1.13b. Sie ist dann am größten, nämlich $T_B \cdot S_0/4$, wenn der Aktor im Arbeitspunkt $(T_B/2, S_0/2)$ betrieben wird. Der zweite Fall liegt etwas komplexer: Die Dreiecksfläche zwischen Lastgerade und S -Achse in Bild 1.13c steht für die Energiedichte e_{nutz} , die der Wandler an die Feder liefert. Diese Fläche ist dann maximal, wenn die Steigungen von Wandler- und Lastkennlinie gleich sind; dies ist der Fall, wenn die Steifigkeiten oder die Elastizitätsmoduln der beiden Elemente übereinstimmen („Anpassung“). Die Energiedichte ist dann ebenfalls $T_B \cdot S_0/4$, jedoch wird nur die Hälfte davon an die Feder abgegeben (einfach schraffierte Fläche); die andere Hälfte (kreuzschraffiert) wird benötigt, um die erwähnte Kopplungsenergie zu generieren und hiermit einen für die Energiewandlung (elektrisch \rightarrow mechanisch) notwendigen inneren Spannungszustand aufzubauen. Im Falle konstanter Last besorgt dies die Gewichtskraft.

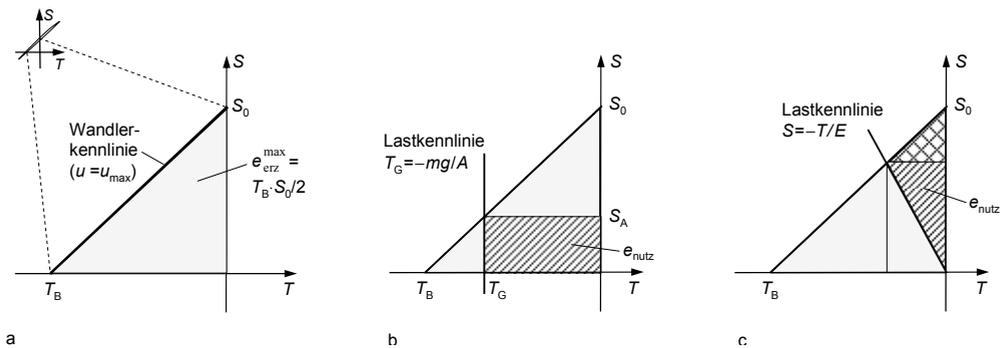


Bild 1.13 Beispiel Piezoaktor. **a** $S(T)$ -Kennlinie des Wandlers und maximales Arbeitsvermögen, **b** Lastkennlinie und gespeicherte elastische Energiedichte bei konstanter Druckbeanspruchung, **c** Lastkennlinie und elastische Energiedichten bei wegabhängiger Druckbeanspruchung

Die Ansteuerung des Aktors mit einer Wechselgröße der *Frequenz* f bewirkt seinen zyklischen Betrieb, der am Ausgang die sog. *spezifische Leistung* (Leistung pro Volumen) $p_m \sim T \cdot S \cdot f$ zur Folge hat. Zu beachten ist, dass beim zyklischen Durchlaufen der $S(T)$ -Kennlinie Hystereseverluste wirksam werden können, die eine Verkleinerung der „Arbeitsfläche“ nach sich ziehen, siehe Bild 1.12b. In jedem Falle nimmt die mechanische Leistung am Ausgang mit wachsender Frequenz zunächst zu und nähert sich dann einer oberen Grenze, die durch die maximalen Größen $p_{m,max}$ oder f_{max} gekennzeichnet wird. Während als Kriterium für $p_{m,max}$ meistens die höchste zulässige Temperatur des aktiven Werkstoffs infolge innerer Verlustleistung und äußerer Wärmezufuhr herangezogen wird, gelten für f_{max} unterschiedliche Vereinbarungen.

Häufig bezeichnet f_{max} die Frequenz, bei der die Dehnung oder die spezifische Leistung auf einen bestimmten Bruchteil ihrer Werte bei niedrigen Frequenzen („quasistatischer Betrieb“) abgefallen ist, z.B. auf 70 %, entsprechend -3 dB. Bei Festkörperaktoren ist es auch üblich, als f_{max} eine Frequenz festzulegen, die hinreichend unterhalb der ersten Eigenfrequenz des Aktors liegt. Etwa ab der ersten Eigenfrequenz wird der Einfluss von Trägheitskräften immer größer, und das Dehnungsvermögen und die Ausgangsleistung des Aktors verringern sich umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenz. Andere Gründe für eine obere Grenzfrequenz sind die endliche Dauer der Energiewandlung (z.B. aufgrund von Ladezeitkonstanten oder Wirbelströmen) oder die Schallgeschwindigkeit im aktiven Werkstoff.

Als Maß für die Wirksamkeit der elektromechanischen Energiewandlung wird der aus der Vierpoltheorie bekannte *Kopplungsfaktor* k (engl. *coupling factor*) verwendet. Im Aktorbetrieb steht sein Quadrat für das Verhältnis von gespeicherter elastischer Energie $e_{erz} \cdot V$ zu gesamter gespeicherter Energie, sofern keine äußeren Kräfte wirksam sind:

$$k^2 = \frac{\text{gespeicherte elastische Energie}}{\text{gesamte gespeicherte Energie bei } T = 0} \quad 5 \quad (1.3)$$

Anzustreben ist ein möglichst großer Kopplungsfaktor – ein größerer k -Wert bedeutet, dass auch ein größerer Teil der aus dem Energieversorgungsnetz oder dem Leistungsverstärker stammenden Energie in Arbeitsvermögen des Aktors gewandelt wird. Folglich ist dann nur ein vergleichsweise kleiner Energieanteil erforderlich, um die Voraussetzungen für die elektromechanische Energiewandlung, beispielsweise den Auf- und Abbau eines elektrischen Feldes, zu schaffen. Eine anschauliche Interpretation des Kopplungsfaktors vermitteln (die später noch näher zu erläuternden) Aktor-Ersatzschaltungen. So begegnen uns beispielsweise in Bild 2.9a die in Gl. (1.3) vorausgesetzten Speicher für elektrische und elastische Energie als Kondensator mit der Kapazität C bzw. als Feder mit der Steifigkeit c_p . Indem man ihren Kennwert, die Nachgiebigkeit $1/c_p$, als Kapazität C_p auf die elektrische Seite der Ersatzschaltung transformiert⁶, kann man auch schreiben [Koc88, Len75]:

$$k^2 = \frac{C_p}{C + C_p} = \frac{1}{1 + C/C_p} \quad (1.4)$$

⁵ Infolge der Bedingung $T = 0$ verschwinden der elastische und der gekoppelte Energieanteil, so dass die Energie im Nenner identisch ist mit der (gespeicherten) rein elektrischen Energie.

⁶ Diese Transformation erfolgt unter Nutzung der sog. Kraft-Spannung-Analogie.

Die geometrieabhängigen Anteile der Kapazitäten im Quotienten C/C_p kürzen sich heraus, so dass k^2 sich letztlich als reine Materialkenngröße erweist. Ein Beispiel hierfür liefert Gl. (2.2), die den Kopplungsfaktor des piezoelektrischen Translators angibt. In der Aktorik liegen die Werte der Kopplungsfaktoren im Allgemeinen im Bereich $k = 0,7 \dots 0,9$.

Als *Wirkungsgrad* η wird das Verhältnis der am Wandlerausgang abgebbaren elastischen Energie $e_{\text{nutz}} \cdot V$ zu der in den Wandlereingang eingespeisten elektrischen Energie bezeichnet:⁷

$$\eta = \frac{\text{nutzbare elastische Energie}}{\text{eingespeiste elektrische Energie}}. \quad (1.5)$$

Ein Teil dieser aufgenommenen Energie geht der gewünschten Nutzung jedoch verloren und steht am Wandlerausgang nicht zur Verfügung. Die Ursachen für die Entstehung von nicht nutzbaren Energieanteilen sind vielfältig. Mit am bekanntesten ist die Kennlinienhysterese (vgl. Bild 1.12b); die hierdurch bedingten Verluste machen sich im zyklischen Aktorbetrieb als Verlustleistung (Wärmeverluste) bemerkbar, die proportional zur Fläche der Hystereseschleife und zur Betriebsfrequenz wächst. In den elektromechanischen Ersatzschaltungen werden die Verluste durch ohmsche Widerstände und Dämpferelemente im Eingangs- bzw. Ausgangsteil berücksichtigt (u.a. in den Bildern 4.11, 7.11).

Greift man das Beispiel des Piezowandlers noch einmal auf, so wird seine unter konstanter Last T_G abgegebene Energiedichte e_{nutz} dann am größten, wenn $T_G = T_B/2$, siehe Bild 1.13b. Dies bedeutet, dass ein Anteil von höchstens 50 % der maximalen elastischen Energiedichte e_{elz} technisch genutzt werden kann. Wenn $T_G = T_B/2$, ist auch der Wirkungsgrad maximal, und es gilt

$$\eta_{\text{max}} = \frac{1}{2} k^2. \quad (1.6)$$

Zahlenbeispiel: Für $k = \sqrt{2}/2 \approx 0,71$ folgt $\eta_{\text{max}} = 0,25$.

Bei wegabhängiger Last sind im Anpassungsfall die Kennlinien-Steigungen von Wandler und Feder gleich groß (Verhältnis $r = 1$), und für den Wirkungsgrad ergibt sich

$$\eta(r = 1) = \frac{1}{2} \frac{k^2}{2 - k^2}. \quad (1.7)$$

Zahlenbeispiel: Wenn $k = \sqrt{2}/2 \approx 0,71$ folgt $\eta(r = 1) = 0,167$.

Dieser Wirkungsgrad ist aber nicht maximal. Eine nähere Untersuchung zeigt, dass man das Maximum erhält, wenn $r = (1 - k^2)^{-1/2}$. Für beide r -Werte sind die Verläufe $\eta(k)$ in Bild 1.14 dargestellt. Da sie im technisch relevanten Bereich $k \leq 0,8$ nahezu deckungsgleich sind, empfiehlt es sich, den Arbeitspunkt des Wandlers in Hinblick auf die maximal abgebbare Energie festzulegen.

⁷ Vergleicht man Gl.(1.3) mit dieser Definition, so wird klar, dass k^2 nicht als Wirkungsgrad interpretiert werden darf.

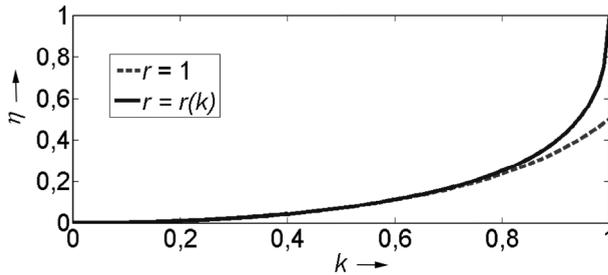


Bild 1.14 Wirkungsgrad η als Funktion des Koppelfaktors k für einen federbelasteten Piezoaktor

Abschließend sei betont, dass diese Wirkungsgrad-Betrachtungen sich ausschließlich auf das aktive Wandlerelement beziehen und die vorher erwähnten Hystereseeinflüsse hierbei nicht berücksichtigt sind. Durch zusätzlich notwendige, verlustbehaftete Aktorkomponenten (Leistungsverstärker, Feldspulen,...) wird der ohnehin niedrige Wirkungsgrad noch weiter verringert, so dass sich Maßnahmen zur Rückgewinnung der gespeicherten Feldenergien als sinnvoll erweisen können (vgl. hierzu Abschnitte 5.4.2 und 11.1.3).

Anmerkung. In diesem Buch kommt für die physikalischen Größen das SI-Einheitensystem⁸ zur Anwendung. Für die mechanische Spannung T gilt demnach die Einheit ‚Newton durch Quadratmeter‘ oder ‚Pascal‘: $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$. Zuweilen wird auch von den Zusammenhängen

$$1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

Gebrauch gemacht. Die Einheit der Dehnung S ist ‚Meter durch Meter‘: m/m . Mit dieser Einheit sind die Dehnungswerte (Maßzahlen) aber oft unhandlich klein, so dass man zusätzlich die Bruchteile 10^{-2} , 10^{-3} oder 10^{-6} zu Hilfe nimmt, z.B. $0,0012 \text{ m/m} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/m}$. Im täglichen Gebrauch wird die Einheit m/m dann sogar häufig weggelassen („weggekürzt“), und man spricht nur noch von ‚Prozent‘ ($1 \% = 10^{-2}$) oder ‚Promille‘ ($1 \text{ ‰} = 10^{-3}$) oder ‚Mikron‘ ($1 \mu = 10^{-6}$), z.B. $S = 1,2 \text{ ‰}$ ($= 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/m}$). Eine solche Verkürzung erhöht allerdings die Fehleranfälligkeit und darum sollten beim Rechnen mit Größengleichungen alle Einheiten bis zum Schluss mitgeführt werden. Nur so erhält man beispielsweise für die Energiedichte $e = T \cdot S$ die korrekte Einheit ‚Joule durch Kubikmeter‘:

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} = \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

⁸ Système International d’Unités.

1.6.2 Kenngrößen-Diagramme

Selbst innerhalb ein- und derselben Aktorfamilie überstreichen die Kenngrößen derart große Wertebereiche, dass es zunächst kaum möglich erscheint, familien-spezifische Aktoreigenschaften herauszukristallisieren, um damit dem Anwender zumindest eine Vorauswahl zu erleichtern. In solchen Fällen haben Diagramme mit ‚bezogenen Kenngrößen‘ den Vorteil, dass sie die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Aktorfamilien deutlicher zum Ausdruck bringen.

Ein Beispiel dafür zeigt Bild 1.15, wo die spezifische Leistung (Leistung pro Masse, d.h. Leistung bezogen auf die Masse des aktiven Materials) über dem Wirkungsgrad der Aktoren aufgetragen ist. Die Darstellung basiert auf umfangreichen Datenerhebungen [ZAF02]. Man sieht, dass die Eigenschaften von Aktorfamilien sich zwar überlappen oder ergänzen, sie jedoch deutlich voneinander unterschieden werden können. Thermobimetall- oder (thermische) Formgedächtnis-Aktoren haben an sich einen niedrigen Wirkungsgrad, da sie aufgeheizt und abgekühlt werden müssen. Andererseits verfügen diese Werkstoffe über eine hohe (Ausgangs-) Leistung bei geringer Masse. Entsprechende Aktortechnologien können hierdurch große wirtschaftliche Bedeutung haben, beispielsweise in der Mikroaktuatorik (vgl. Kapitel 10). Daher kann es durchaus sinnvoll sein, einem Aktorprinzip mit kleinem Wirkungsgrad, aber geringer Masse, den Vorzug gegenüber einem anderen Aktorprinzip mit höherem Wirkungsgrad, aber größerer Masse zu geben. Piezoelektrische und magnetostruktive Aktoren können hohe Ausgangsleistungen liefern, obwohl ihre Auslenkungen sehr klein sind. Die hohen Leistungen kommen zustande, weil diese Festkörperaktoren mit Frequenzen bis in den Kilohertz-Bereich betrieben werden können.

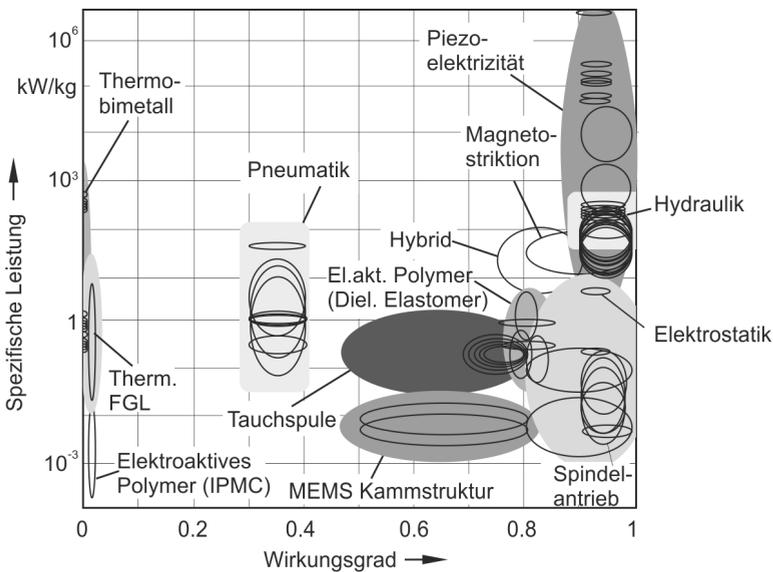


Bild 1.15 Spezifische Leistung als Funktion des Wirkungsgrads für ausgewählte Aktorfamilien (nach [ZAF02])