

Der Herausgeber:

Dr. Holger Böse, ehemals Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg

Die Autoren:

Heiko Atzrodt, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Dr. Torsten Bartel, Schenck Process Europe GmbH

Dr. Andrea Böhm, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Dr. Holger Böse, ehemals Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg

Dr. André Bucht, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Johannes Ehrlich, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg

Dr. Sven Herold, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Dr. William Kaal, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Dr. Thomas Mäder, Fraunhofer-Institut für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen IWU, Dresden

Michael Matthias, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Prof. Dr. Paul Motzki, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Dr. Jürgen Nuffer, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Dr. Kenny Pagel, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Dr. Thorsten Pretsch, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam

Prof. Dr. Stefan Seelecke, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Dr. Michael Wegener, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam

Weitere Informationen:

www.vogel-fachbuch.de

 www.facebook.com/vogelfachbuch

Lektorat: Ulrike Klein, Berlin

Titelmotiv: Adobe Stock Nr. 437557838 und Vogel Communications Group

ISBN 978-3-8343-3388-9

1. Auflage. 2023

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Hungary, General

Copyright 2022 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Das Fachgebiet der Mechatronik, d. h. die Verbindung von Mechanik, Elektronik und Informatik bzw. von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik, hat insbesondere in den letzten zwei Dekaden einen rasanten Aufschwung erlebt. Diese Entwicklung ist wesentlich darauf zurückzuführen, dass die elektronische Steuerung mechanischer Funktionen entscheidende Vorteile bietet, da mithilfe von Software umfangreiche und ausgefeilte Steuer- und Regelverfahren genutzt werden können. Ein weiterer besonderer Vorteil liegt darin, dass jederzeit Aktualisierungen durch Software-Updates möglich sind. Beispiele dafür finden sich besonders in der Automatisierungstechnik sowie im Automobilbau, doch sind auch andere Branchen wie die Medizintechnik davon stark betroffen.

Bislang werden in der Mechatronik überwiegend die bereits lange bekannten technischen Grundkonzepte wie z. B. Elektromotoren und mechanische Übersetzungs-Getriebe genutzt, d. h. Technologien, die mehr als 100 Jahre alt sind. Somit stützt sich die Mechatronik maßgeblich noch auf die Zusammenführung von gut beherrschten konventionellen Technologien. Durch die langjährige Optimierung dieser Technologien sind die Verbesserungsmöglichkeiten jedoch weitgehend ausgeschöpft. Damit sind mit diesen konventionellen Ansätzen nur noch graduelle Fortschritte zu erwarten.

Auch bei den verwendeten Materialien handelt es sich in der Regel um bewährte Werkstoffe wie Metalle und immer weiter zunehmend auch Kunststoffe. Diesen Materialien ist gemeinsam, dass ihre Eigenschaften durch die chemische Zusammensetzung und das Herstellungsverfahren genau vorbestimmt sind und sich von außen allenfalls durch die Temperatur beeinflussen lassen. Die Funktion mechatronischer Systeme wird dabei durch das Design ihrer Komponenten bestimmt, die aus den bekannten und immer weiter optimierten Werkstoffen bestehen. Auch hier ist nur noch mit eher geringfügigen Verbesserungen zu rechnen.

Zukünftig werden mechatronische Funktionen jedoch mehr und mehr durch adaptive Materialien erzeugt oder zumindest unterstützt werden. Im Gegensatz zu den bereits etablierten Werkstoffen handelt es sich dabei um Materialien, deren Eigenschaften sich durch externe Anregungen wie Licht, Wärme sowie elektrische und magnetische Felder in starkem Maße beeinflussen lassen. Wegen der Variabilität ihrer Eigenschaften werden solche Materialien entweder adaptiv oder auch smart oder sogar intelligent genannt. Dabei weckt letzteres sicherlich überzogene Erwartungen, da das Material keine mit Lebewesen vergleichbare Intelligenz im Sinne einer Lernfähigkeit aufweist, sondern auf den externen Stimulus in immer der gleichen Weise reagiert.

Dieses Buch gibt eine Einführung in die besonderen Eigenschaften von adaptiven Materialien. Es soll dem entwickelnden Ingenieur, der neue Wege in der Produktentwicklung gehen will, eine Hilfestellung dabei geben, die besonderen Potentiale von Smart Materials für neue mechatronische Produkte nutzen zu können. Es wird der englische Begriff «Smart Materials» verwendet, da er im deutschen Sprachgebrauch inzwischen etabliert ist. Wichtig ist es, bereits an dieser Stelle zu betonen, dass für eine gewinnbringende Nutzung dieser Potentiale bei den Anwendern von Smart Materials ein Umdenken notwendig ist. Diese Notwendigkeit einer veränderten Betrachtungsweise resultiert daraus, dass mechatronische Funktionen, die bisher von komplexen Komponenten oder Systemen erfüllt wurden, nun zumindest teilweise von einem Material übernommen werden. Damit wird eine Vereinfachung erreicht, die dabei helfen kann, den Aufwand und damit die Kosten für ein neues Produkt zu senken oder sogar neue mechatronische Funktionen zu erschließen, die mit konventionellen Technologien nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisierbar sind.

Das vorliegende Buch richtet sich damit vorwiegend an Entwickler, die bei der Produktentwicklung bestehende Grenzen überwinden und über den Stand der Technik hinausgehende Potentiale nutzen wollen. Während die bekannten klassischen Technologien in der Regel nur noch kleine Fortschritte ermöglichen, ergeben sich durch die Verwendung von Materialien, die sich elektronisch steuern lassen, ganz neuartige Möglichkeiten bei der Problemlösung. Hierzu soll das Buch eine Grundlage und Hilfestellung bereitstellen, indem es einen Einblick in verschiedene Klassen von Smart Materials vermittelt. Dabei werden sowohl die beeindruckenden Eigenschaften dieser außergewöhnlichen Materialien als auch die vielfältigen Möglichkeiten zur Realisierung neuer Produkte dargestellt, die sich mit den damit verbundenen Materialeigenschaften ergeben.

Der Herausgeber möchte an dieser Stelle Herrn Johannes Ehrlich für die kritische Durchsicht großer Teile dieses Buches herzlich danken. Danken möchte er auch der Fraunhofer-Gesellschaft und verschiedenen öffentlichen Fördergebern, insbesondere dem Bayerischen Wirtschaftsministerium, für die Unterstützung sowie den ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, ohne die viele der in dem Buch dargestellten Forschungsergebnisse nicht möglich gewesen wären.

Würzburg, im Februar 2023

Holger Böse

Der Herausgeber:

Dr. Holger Böse, ehemals Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg

Herr Böse studierte Physik an der Universität Hamburg und promovierte dort 1989 in Physikalischer Chemie. Von 1990 bis 2021 war er am Fraunhofer ISC als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. In dieser Zeit baute er am Institut den Forschungsbereich Smart Materials auf. Er war zunächst Kompetenzfeldleiter, dann wissenschaftlich-technischer Leiter sowie stellvertretender Leiter des Center Smart Materials (CeSMA) und später stellvertretender Leiter des Center Smart Materials and Adaptive Systems (CeSMA). Im Themenfeld der Smart Materials umfasst sein Fachgebiet die Materialklassen der elektro- und magnetorheologischen Flüssigkeiten sowie der magnetorheologischen und dielektrischen Elastomere. Einen Schwerpunkt bilden mögliche Anwendungen dieser steuerbaren Materialien in Form von Aktoren, Sensoren, Dämpfern, Kupplungen, Bremsen, Bedienelementen etc. Besondere Bedeutung hat dabei die Verbindung von Materialien und Technologien in Form von smarten Systemen. Herr Böse ist an etwa 30 Patentfamilien beteiligt und Autor von mehr als 100 Veröffentlichungen.

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Heiko Atzrodt, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Herr Atzrodt hat 2002 sein Studium an der TU Dresden im Fachbereich Maschinenbau, Vertiefungsrichtung und angewandte Mechanik abgeschlossen.

Seit 2019 leitet er am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF die Abteilung «Strukturdynamik und Schwingungstechnik».

Zuvor war Herr Atzrodt 17 Jahre mit verschiedenen Aufgaben u. a. als Gruppenleiter «Numerische Methoden und Analysen» und als Geschäftsführer der Fraunhofer-Allianz Adaptionik am Fraunhofer LBF betraut.

Dr.-Ing. Torsten Bartel, Schenck Process Europe GmbH

Herr Bartel war zwischen 2008 und 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer LBF und promovierte im Bereich piezoelektrischer Schwingungsisolierung.

Ab 2014 war er Leiter der Gruppen «Schwingungstechnische Optimierung» und anschließend «Elektromechanik und Automatisierung».

Unter anderem leitete er in dieser Zeit das Seminar «Schwingungsmesstechnik» des AMA-Fachverbands. Seit 2020 ist er bei Schenck Process im Bereich Zustands- und Prozessüberwachungssysteme tätig.

Dr.-Ing. Andrea Böhm, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Frau Böhm studierte Metallkunde an der TU Bergakademie in Freiberg, war danach am Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden wissenschaftlich tätig und hat 1997 ihre Promotion zum Thema «Bruchmechanische Eigenschaften eines höherfesten Feinkornbaustahles mit erhöhtem Silizium-Gehalt» an der Technischen Universität in Dresden abgeschlossen. Seit Ende 2001 hat sie die wissenschaftliche Bearbeitung und Projektleitung von verschiedenen werkstoff- und fertigungstechnischen Themen insbesondere zu thermischen und magnetischen Formgedächtnislegierungen am Fraunhofer IWU übernommen. Weiterhin gründete sie 2010 das

Netzwerk für Formgedächtnislegierungen in Deutschland und war als Vorsitzende des VDI-Richtlinienausschusses zur Schaffung der VDI-Richtlinie 2248 zur Formgedächtnistechnologie tätig.

Dr.-Ing. André Bucht, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Herr Bucht studierte Elektrotechnik sowie Adaptronik und promovierte mit einer Arbeit zur Formgedächtnisaktork. Er ist am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik beschäftigt, wo er im Bereich Mechatronik Aktoren und Sensoren auf Basis von Smart Materials entwickelt.

M. Eng. Johannes Ehrlich, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg

Herr Ehrlich studierte an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Schweinfurt Elektro- und Informationstechnik und ist seit 2006 am Fraunhofer ISC im Center Smart Materials and Adaptive Systems (CeSMA) als Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter tätig. Dort umfasst sein Aufgabengebiet die Anwendungsentwicklung mit smarten magnetischen und elektrischen Aktoren sowie die Elektronikentwicklung für smarte Sensoren.

Dr.-Ing. Sven Herold, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Herr Herold studierte Maschinenbau mit der Vertiefung angewandte Mechanik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und promovierte an der TU Darmstadt zum dynamischen und akustischen Verhalten aktiver Systeme.

Seit 2003 ist er Mitarbeiter des Fraunhofer LBF und leitet seit 2016 den Forschungsbereich Adaptronik. Sven Herold ist Sprecher des Fraunhofer Geschäftsbereichs Adaptronik, Vorstandsmitglied des Kompetenznetz Adaptronik e.V. sowie der European Automotive Research Partners Association – EARPA.

Dr.-Ing. William Kaal, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Herr Kaal studierte Maschinenbau an der TU Darmstadt und promovierte über dielektrische Elastomerwandler in der Strukturdynamik.

Seit 2008 ist er Mitarbeiter des Fraunhofer LBF und leitet dort seit 2017 die Gruppe «Schwingungstechnische Optimierung».

Dr.-Ing. Thomas Mäder, Fraunhofer-Institut für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen IWU, Dresden

Thomas Mäder studierte Maschinenbau in den Fachrichtungen Kunststoffverarbeitung und Textilmaschinen an der Technischen Universität Chemnitz. In seiner Promotion am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik vertiefte er seine Erfahrungen im Bereich Materialwissenschaften und erforschte integrierbare Dehnungssensoren für die Anwendung in Faserverbundwerkstoffen. Die Promotion schloss er 2014 ab und arbeitet seitdem beim Fraunhofer IWU. Seit 2016 entwickelt er dort Dehnungssensoren aus Formgedächtnislegierungen und untersucht vielfältige Anwendungen.

Dipl.-Ing. (FH) Michael Matthias, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Herr Matthias studierte Werkstofftechnik an der Fachhochschule Osnabrück. Nach dem Studium arbeitete er zunächst am Institut für Strukturmechanik des DLR in Braunschweig. Seit 2001

ist er Mitarbeiter des Fraunhofer LBF und dort seit 2012 Leiter der Abteilung «Experimentelle Analysen und Elektromechanik».

Er ist Mitglied in unterschiedliche Arbeitsgruppe u. a. des VDI zu den Themen Aktorik, Sensorik und experimentelle Analysen.

Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Herr Motzki studierte Mechatronik an der Universität des Saarlandes, wo er 2018 promoviert wurde. Im Jahre 2022 wurde er auf die gemeinsame Professur «Smarte Materialsysteme für innovative Produktion» zwischen dem Fachbereich Systems Engineering der Universität des Saarlandes und dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken berufen. Am ZeMA ist er seitdem der Direktor des Forschungsbereichs Smarte Materialsysteme.

Dr. rer. nat. Jürgen Nuffer, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Herr Nuffer studierte Physik an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main und promovierte im Fachbereich Materialwissenschaft an der TU Darmstadt.

Seit 2004 ist er Mitarbeiter des Fraunhofer LBF und dort seit 2017 Leiter der Gruppe «Zuverlässigkeit und Sicherheit aktiver Systeme».

Dr.-Ing. Kenny Pagel, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Herr Pagel ist seit 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Formgedächtnislegierungen am Fraunhofer IWU tätig. Er promovierte 2018 mit einer Arbeit über die Entwicklung von Formgedächtnisaktoren mit inhärenter Führungsfunktion. Seit 2022 ist er Leiter der Abteilung Formgedächtnistechnik. Seine Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung von Formgedächtnisaktoren.

Dr. Thorsten Pretsch, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam

Thorsten Pretsch studierte Chemie an der Freien Universität Berlin, wo er 2001 die Diplomprüfung ablegte und 2004 promovierte. Nach einem einjährigen Gastaufenthalt als Leopoldina-Stipendiat an der University of Sydney baute er die Arbeitsgruppe Formgedächtnispolymere an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auf. 2015 wechselte er an das Fraunhofer IAP, für das er seitdem den Forschungsbereich Synthese- und Polymertechnik und die Arbeitsgruppe Formgedächtnispolymere leitet.

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Seelecke, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Herr Seelecke studierte Physikalische Ingenieurwissenschaft an der Technischen Universität Berlin, wo er 1995 promoviert wurde und sich 1999 im Fach Thermodynamik habilitierte. Im Jahre 2000 folgte er einem Ruf an das Department of Mechanical & Aerospace Engineering der North Carolina State University in Raleigh, USA, wo er unter anderem den CAREER Award der National Science Foundation für Arbeiten auf dem Gebiet der Modellierung von Piezoaktuatoren erhielt. Seit 2011 ist er Professor für Mechatronik (jetzt Systems Engineering) und seit 2015 auch für Materialwissenschaften und Werkstofftechnik an der Universität des Saarlandes, wo er den Lehrstuhl für Intelligente Materialsysteme leitet. Von 2005 bis 2010 war Seelecke Editor-in-Chief des Springer Journals Continuum Mechanics and Thermodynamics, gegenwärtig ist er u. a. Associate-Editor von Smart Materials & Structures, des International Journals of Smart and Nano Materials sowie Vorsitzender des VDI/VDE Fachausschusses GMA 4.16 Smart Materials and Systems.

Dr. Michael Wegener, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam

Herr Wegener studierte Physik und Mathematik für das Lehramt, promovierte in Polymerphysik und habilitierte in Experimentalphysik. Seit 2007 ist er am Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung tätig. Dort leitet er die Abteilung «Sensoren und Aktoren» und ist stellvertretender Leiter des Forschungsbereichs «Funktionale Polymersysteme». Die Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Abteilung liegen in ferro-, relaxor-ferro-, pyro- und piezoelektrischen Polymeren und Kompositen sowie in Raumladungselektreten und deren Integration in Anwendungen, ferner in der Synthese thermisch- oder chemisch-responsiver Polymere, in Material- und Prozessentwicklungen für dielektrische Elastomer-Aktoren sowie in holographischen Verfahren für die Herstellung polymerer diffraktiv optischer Elemente.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	17
2 Nutzbare Effekte und grundlegende Eigenschaften von Smart Materials	23
2.1 Nutzbare Effekte von Smart Materials	23
2.1.1 Aktorik	24
2.1.2 Sensorik	31
2.1.3 Generatorik	32
2.1.4 Steuerbare Dämpfung	32
2.2 Zusammensetzung von Smart Materials	32
2.3 Mechanische Eigenschaften von Smart Materials	33
2.4 Zusammenfassung und Ausblick	34
3 Piezokeramische Materialien	35
3.1 Einleitung	35
3.2 Materialzusammensetzung und Struktur	36
3.3 Materialeigenschaften	37
3.4 Materialherstellung	39
3.5 Materialvariabilität, mögliche Anpassbarkeit von Eigenschaften für spezielle Anwendungen	41
3.6 Langzeitverhalten und Recycling	42
3.6.1 Langzeitverhalten	42
3.6.2 Recycling	45
3.7 Aktorwirkung	46
3.7.1 Aktorisch relevante Zustände	46
3.7.2 Ansteuerung von Piezoaktoren	48
3.7.3 Arbeitsdreieck von Piezoaktoren	50
3.7.4 Genauigkeit von Piezoaktoren	50
3.7.5 Bauweisen piezokeramischer Aktoren	51
3.8 Piezokeramische Aktorsysteme	53
3.9 Anwendungsbeispiele piezokeramischer Aktoren	57
3.9.1 Anwendungen piezokeramischer Stapel-/Multilayeraktoren	57
3.9.1.1 Ultraschallmotoren/Schrittmotoren	57
3.9.1.2 Kraftstoffinjektoren	58
3.9.1.3 Feinpositionierung	58
3.9.1.4 Aktive Lagerungen zur Schwingungsreduktion/ Schwingungsbeeinflussung	59
3.9.1.5 Prüftechnik	65
3.9.2 Anwendungen flächiger piezokeramischer Aktoren	67
3.9.2.1 Formkontrolle	68
3.9.2.2 Aktive Schwingungsreduktion und Schwingungsbeeinflussung	69
3.9.2.3 Shunt damping	73
3.9.2.4 Energy Harvesting aus Vibrationen	77

3.10	Piezoelektrische Sensoren	79
3.11	Anwendungsbeispiele piezoelektrischer Sensorik	82
3.11.1	Strukturdynamische Messverfahren	82
3.11.2	Messverfahren basierend auf Ultraschallsensoren	84
3.11.3	Strukturüberwachung	85
3.12	Zusammenfassung und Ausblick	86
4	Thermische Formgedächtnislegierungen	91
4.1	Einleitung	91
4.2	Materialstruktur und Materialzusammensetzung	91
4.3	Materialeigenschaften	93
4.4	Materialherstellung	97
4.5	Formgedächtnisaktoren	97
4.5.1	Aktorwirkung	97
4.5.2	Systemaufbau	99
4.5.3	Energieeffiziente Systeme	101
4.6	Aktorische Anwendungsbeispiele	102
4.7	Sensorische Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen	112
4.7.1	Sensorwirkung	112
4.7.2	Systemaufbau Sensorik und sensorische Anwendungen	114
4.8	Ausblick: Elastokalorik	116
4.9	Zusammenfassung und Ausblick	117
5	Dielektrische Elastomere	121
5.1	Elektroaktive Polymere – Vorbemerkung	121
5.2	Einleitung	123
5.3	Materialzusammensetzung von dielektrischen Elastomeren	124
5.4	Materialeigenschaften von dielektrischen Elastomeren	128
5.5	Herstellungsverfahren von dielektrischen Elastomeren	136
5.6	Nutzeffekte von dielektrischen Elastomeren	140
5.6.1	Dielektrische Elastomeraktoren	140
5.6.1.1	Aktorprinzip	140
5.6.1.2	DEA-Systemaufbau	150
5.6.1.3	DEA-Anwendungen	153
5.6.1.4	Langzeitverhalten von DEA	161
5.6.2	Dielektrische Elastomersensoren	162
5.6.2.1	Sensorprinzip	162
5.6.2.2	DES-Systemaufbau	174
5.6.2.3	DES-Anwendungen	176
5.6.2.4	Langzeitverhalten von DES	187
5.6.3	Dielektrische Elastomergeneratoren	188
5.7	Zusammenfassung und Ausblick	191
6	Piezoelektrische Polymere	199
6.1	Einleitung	199
6.2	Piezoelektrischer Effekt	199
6.3	Piezoelektrische Charakterisierungsmethoden	201
6.4	Piezoelektrische Polymermaterialien	204

6.5	PVDF und PVDF-Copolymere	206
6.5.1	Struktureigenschaften	206
6.5.2	Prozessierung von Schichten und Folien	208
6.5.3	Elektrische Funktionalisierung ferroelektrischer Polymere	209
6.5.4	Charakterisierung und Integration piezoelektrischer Wandler	210
6.5.5	Anwendungsbeispiele	212
6.6	Ferroelektrete	214
6.6.1	Konzept und Materialien	214
6.6.2	Prozessierung zellulärer Folien	215
6.6.3	Elektrische Funktionalisierung zellulärer Polymerstrukturen	217
6.6.4	Charakterisierung und Integration von Ferroelektret-Wandlern	217
6.6.5	Anwendungsbeispiele	219
6.6.6	Weitere Entwicklungen	221
6.7	Zusammenfassung und Ausblick	222
7	Formgedächtnispolymere	227
7.1	Grundlagen	227
7.2	Charakterisierung	232
7.3	Effekte	238
7.4	Anwendungsbeispiele	244
7.5	Zusammenfassung und Ausblick	249
8	Magnetorheologische Flüssigkeiten	261
8.1	Einleitung	261
8.2	Materialzusammensetzung von MRF	263
8.2.1	Magnetisierbare Partikel	263
8.2.2	Trägerflüssigkeit	264
8.2.3	Additive	265
8.3	Materialeigenschaften von MRF	266
8.3.1	Basisviskosität	266
8.3.2	Schubspannung im Magnetfeld	267
8.3.3	Sedimentationsstabilität	268
8.3.4	Redispergierbarkeit	271
8.3.5	Magnetische Eigenschaften	272
8.3.6	Einsatztemperaturbereich	273
8.3.7	Ansprechzeit	274
8.3.8	Langzeitverhalten der MRF	275
8.4	Herstellung von MRF	275
8.5	Aktorwirkung von MRF	276
8.5.1	Schermodus	277
8.5.2	Fließmodus	278
8.5.3	Quetschmodus	279
8.6	Magnetkreis mit MRF	280
8.7	Systemaufbau mit MRF	284
8.8	Anwendungen von MRF	285
8.8.1	Adaptive Dämpfung	285
8.8.2	Steuerbare Kupplungen und Bremsen	294
8.8.3	Weitere Anwendungen von MRF	305

8.9	Langzeitverhalten von MRF-Systemen	309
8.10	Zusammenfassung und Ausblick	309
9	Elektrorheologische Flüssigkeiten	315
9.1	Einleitung	315
9.2	Polarisationsmechanismen von ERF	317
9.3	Materialzusammensetzung von ERF	320
9.3.1	Polarisierbare Partikel	320
9.3.2	Trägerflüssigkeit	323
9.3.3	Additive	324
9.4	Materialeigenschaften von ERF	324
9.4.1	Basisviskosität	324
9.4.2	Schubspannung im elektrischen Feld	325
9.4.3	Elektrische Stromdichte	327
9.4.4	Sedimentationsstabilität	328
9.4.5	Einsatztemperaturbereich	329
9.4.6	Ansprechzeit	329
9.4.7	Langzeitverhalten von ERF	329
9.5	Herstellung von ERF	330
9.6	Aktorwirkung von ERF	331
9.6.1	Schermodus	331
9.6.2	Fließmodus	332
9.6.3	Quetschmodus	333
9.6.4	Vergleich der Wirkmoden	333
9.7	Systemaufbau mit ERF	334
9.8	Anwendungen von ERF	335
9.8.1	Adaptive Dämpfung	335
9.8.2	Steuerebare Kupplungen und Bremsen	337
9.8.3	Weitere Anwendungen von ERF	340
9.9	Langzeitverhalten von ERF-Systemen	342
9.10	Zusammenfassung und Ausblick	343
10	Magnetorheologische Elastomere	347
10.1	Einleitung	347
10.2	Materialzusammensetzung von MRE	348
10.3	Materialeigenschaften von MRE	350
10.3.1	Mechanische Eigenschaften	350
10.3.2	Magnetomechanische Eigenschaften	352
10.3.3	Magnetische Eigenschaften	356
10.3.4	Anisotropie	357
10.3.5	Einsatztemperaturbereich	360
10.4	Materialherstellung von MRE	361
10.5	Aktorwirkung von MRE	362
10.6	Magnetkreis mit MRE	363
10.7	Systemaufbau mit MRE	366
10.8	Anwendungen von MRE	367
10.9	Langzeitverhalten von MRE	378
10.10	Zusammenfassung und Ausblick	379

11 Magnetische Formgedächtnislegierungen	383
11.1 Einleitung	383
11.2 Chemische Zusammensetzung und Kristallstruktur von Ni-Mn-Ga-Legierungen	383
11.3 Verformungsmechanismus	385
11.4 Herstellung von Ni-Mn-Ga-Aktorsticks	387
11.4.1 Ni-Mn-Ga-Einkristallzucht und Wärmebehandlung	387
11.4.2 Orientierung von Ni-Mn-Ga-Einkristallen	389
11.4.3 Trennen und Polieren	390
11.4.4 Training und magneto-mechanische Charakterisierung von Ni-Mn-Ga-Aktorsticks	390
11.5 Aktorisches oder sensorisches Wirkprinzip	390
11.6 Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Dehnung	392
11.7 Systemaufbau eines Aktors	393
11.8 Anwendungen	395
11.9 Werkstoffeigenschaften des einkristallinen Ni-Mn-Ga-Materials	399
11.10 Zusammenfassung und Ausblick	401
12 Magnetostriktive Materialien	405
12.1 Einleitung	405
12.2 Magnetostriktive Aktorwerkstoffe	407
12.2.1 Terfenol-D	408
12.2.2 Galfenol	411
12.3 Vergleich magnetostriktiver Materialien mit piezokeramischen Materialien	413
12.4 Aktoren auf Basis magnetostriktiver Materialien	414
12.5 Anwendungsgebiete	416
12.5.1 Aktorik	416
12.5.2 Sensorik	416
12.5.3 Anwendungsgebiete von INVAR-Legierungen	417
12.6 Zusammenfassung und Ausblick	417
13 Neue Produkte mit Smart Materials	419
13.1 Vergleich der Aktorwirkung von Smart Materials	419
13.2 Smart Materials für die Handhabungstechnik	424
13.3 Kurzer Leitfaden zum Einsatz von Smart Materials	428
Stichwortverzeichnis	435

1 Einleitung

Dr. Holger Böse

Vor dem Einstieg in die Welt der Smart Materials sollen zunächst die damit verbundenen Begriffe geklärt werden. Anstatt von Smart Materials spricht man ebenso von *adaptiven* oder *intelligenten Werkstoffen*, auch die Bezeichnung *Responsive Materials* ist gebräuchlich. Doch wird hier im weiteren Verlauf der Begriff *Smart Materials* bevorzugt verwendet, der sich auch im deutschen Sprachgebrauch weitgehend durchgesetzt hat.

In einem Buch über Smart Materials kommt erst einmal die Frage auf, worin sich diese Materialien von anderen Materialien unterscheiden. Bereits die Definition von Smart Materials bereitet schon gewisse Schwierigkeiten. Anders gesagt, es gibt viele Definitionen für diese adaptiven Werkstoffe. In einer besonders weit gefassten Definition werden darunter Materialien verstanden, bei denen eine oder mehrere Eigenschaften durch externe Stimuli signifikant, reproduzierbar und nach Möglichkeit auch reversibel verändert werden können [1.1]. Man kann sie folglich entlang der weiteren Fragen klassifizieren, um welche Materialien es sich handelt, welche Materialeigenschaften verändert werden können und welche Stimuli dafür erforderlich sind. Dazu folgen zunächst einige Beispiele.

Schon seit einigen Jahrzehnten bekannt sind phototrope Gläser, die in selbst schaltenden Sonnenbrillen eingesetzt werden. Sobald Sonnenlicht auf das Glas fällt, verdunkelt es sich. Dabei zersetzt sich durch UV-Bestrahlung das in das Brillenglas oder in eine Beschichtung eingearbeitete Silberhalogenid in einer photochemischen Reaktion und bildet kleine Silberteilchen, die die Lichtdurchlässigkeit stark reduzieren. Fällt die UV-Bestrahlung weg, so verläuft die Reaktion umgekehrt und das Silberhalogenid bildet sich zurück. Durch diese Reversibilität der Reaktion geht auch die Verdunkelung wieder zurück und die Transparenz steigt auf den ursprünglichen Wert an. In diesem Fall ist die sich verändernde Eigenschaft die optische Transparenz und der Stimulus besteht in der Bestrahlung mit UV-Licht.

Ein weiteres Beispiel sind Formgedächtnislegierungen, die sich unter Wärmeeinwirkung verformen. Durch eine definierte Temperaturerhöhung nimmt ein Körper aus einem solchen Material eine andere Form an, die ihm vorher durch eine thermomechanische Behandlung antrainiert wurde. Beim Abkühlen kann das Material wieder in die ursprüngliche Form zurückgehen, d. h. dieser Effekt ist ebenfalls reversibel. Die sich verändernde Eigenschaft ist in diesem Fall ein Längenmaß oder die geometrische Form, während der Stimulus die Temperaturveränderung ist. Bei der Formänderung spricht man von einem *Aktoreffekt*, der z. B. für mechanische Schalt- oder Steuervorgänge genutzt wird. Der Begriff *Aktor* oder synonym *Aktuator* (englisch *actuator*) wird im Folgenden für solche Smart Materials verwendet, die sich unter einem äußeren Einfluss verformen.

Die wohl bekannteste Klasse von Smart Materials sind die Piezoelektrika. Hier wird an das Material eine elektrische Spannung und damit ein elektrisches Feld angelegt, das in dem piezoelektrischen Material eine definierte Verformung hervorruft. Der Grad der Verformung steigt mit der Feldstärke kontinuierlich an. Beim Abschalten des Feldes geht die Verformung wieder zurück, d. h. auch diese Aktuation ist reversibel. Der Stimulus ist die elektrische Spannung bzw. das elektrische Feld und die Antwort darauf die Formveränderung. Neben der Aktuation gibt es bei Piezoelektrika auch einen Sensoeffekt. Dabei handelt es sich um den umgekehrten Effekt. Das Material wird durch einen von außen angelegten mechanischen Druck deformiert und elektrisch polarisiert. Dies erzeugt eine elektrische Ladungsverschiebung und damit eine Spannung. Solche piezoelektrischen Aktor- und Sensor-Effekte treten sowohl bei speziellen keramischen Werkstoffen als auch bei einigen Polymeren auf.

Ein viertes Beispiel sind sogenannte dielektrische Elastomere. Wie bei den Piezoelektrika kommt es bei diesen Verbundmaterialien beim Anlegen einer elektrischen Spannung als Stimulus zu einer reversiblen Verformung des Materials. Neben der Aktuation zeigt dieses Material ebenfalls einen Sensoreffekt. Im Gegensatz zu den Piezoelektrika wird durch die mechanische Verformung des dielektrischen Elastomers in Form einer Dehnung oder einer Kompression jedoch nicht eine elektrische Spannung erzeugt, sondern es ändert sich als messbare Eigenschaft des Verbundmaterials die elektrische Kapazität stetig mit dem Grad der Verformung. Damit kann kontinuierlich die aktuell erreichte Verformung bestimmt werden.

Als letztes Beispiel werden magnetorheologische Flüssigkeiten betrachtet. Solche Flüssigkeiten versteifen sich beim Anlegen eines Magnetfeldes und werden zu einem festen Gel, d. h. die Veränderung entspricht einem Phasenübergang von einer flüssigen in eine quasi feste Phase. Auch dieser Effekt ist reversibel, da das feste Gel nach dem Abschalten des Magnetfeldes wieder in die flüssige Phase zurückgeht. Die sich ändernde Eigenschaft ist dabei die Konsistenz bzw. die mechanische Härte des Materials, und der Stimulus ist das Magnetfeld. Derartige Materialien lassen sich für steuerbare Stoß- oder Schwingungsdämpfer verwenden.

Auf dem Gebiet der adaptiven Werkstoffe sind bereits mehrere Bücher zu unterschiedlichen Themen bekannt [1.2]–[1.7]. Manche dieser Bücher beschäftigen sich vor allem mit den theoretischen Grundlagen der Materialien. Andere Werke behandeln stärker die Anwendungen bestimmter Klassen von Smart Materials. In einigen Büchern wird ein besonderer Schwerpunkt auf Design und Architektur gelegt [1.8]–[1.12]. Auch zu einzelnen Klassen von Smart Materials wie Piezomaterialien, Formgedächtnislegierungen und elektroaktiven Polymeren existieren Werke, die jeweils einen breiten Überblick über die betreffende Materialklasse geben [1.13]–[1.17].

Die Darstellung in diesem Buch behandelt demgegenüber materialübergreifend verschiedene Klassen von Smart Materials, die einen besonderen Bezug zu zahlreichen Anwendungen in der Mechatronik haben. Das Buch soll damit als Einführung dienen, um wesentliche Merkmale und Potentiale dieser smarten Materialien für die Mechatronik kennenzulernen. Zunächst werden die Materialien selbst und ihre Eigenschaften vorgestellt, um anschließend eine Vielzahl möglicher Anwendungen aufzuzeigen, in denen diese Eigenschaften unterschiedlich genutzt werden können. Dabei wird besonders der Systembezug betont, d. h. das Smart Material ist nur eine, wenn auch entscheidende Komponente in einem mechatronischen System.

Die zuvor aufgeführten Beispiele deuten bereits die Vielfalt der möglichen Effekte und der Materialklassen an, in die sich Smart Materials eingruppiieren lassen. Die eingesetzten Stimuli und die damit veränderbaren Eigenschaften können sehr unterschiedlich ausfallen. In allgemeiner Form lassen sich die Stimuli (Input) einteilen in mechanische, elektrische, magnetische, thermische und optische Einflüsse in Form von mechanischer Spannung, elektrischen und magnetischen Feldern, Wärme und Licht. Auch die Reaktionen des Materials (Output) können in verschiedene Kategorien wie Dehnung (mechanisch), Strom oder Ladung (elektrisch), Magnetisierung (magnetisch), Temperatur (thermisch) und Lichterzeugung (optisch) eingeteilt werden. Für jede Kombination dieser Stimuli und Reaktionen lassen sich nun Beispiele für tatsächlich existierende physikalische Effekte finden. Tabelle 1.1 gibt hierzu einen Überblick.

Einige dieser Effekte sind allgemein bekannt, da sie in allen oder zumindest vielen Materialien auftreten. So kann für jedes Festkörper-Material ein E-Modul definiert werden, der die Dehnung als Reaktion auf eine auf das Material einwirkende mechanische Spannung wiedergibt. Auch hat jedes Material eine spezifische Wärmekapazität, die angibt, welche Wärmezufuhr für eine bestimmte Temperaturerhöhung notwendig ist. Die in der Diagonale in Tabelle 1.1 aufgeführten Effekte sind damit keine Besonderheit von speziellen Materialien. Ähnlich verhält es sich auch mit einigen anderen Effekten in den hellblau hinterlegten Feldern in Tabelle 1.1. Die thermische Ausdehnung eines Materials als mechanische Wirkung auf die Zufuhr von Wärme als thermischer

Einfluss ist ebenfalls hinlänglich bekannt. Ebenso führt der Ohm'sche Widerstand eines Materials dazu, dass sich beim Anlegen eines elektrischen Feldes in Form einer Spannung als Input die Temperatur als Output erhöht, da elektrische Energie im Material in Wärme umgewandelt wird.

Tabelle 1.1 *Physikalische Effekte aufgrund von mechanischen, elektrischen, magnetischen, thermischen oder optischen Einflüssen auf Materialien*

Output Input	Dehnung	Strom/ Ladung	Magnetisie- rung	Tempera- tur	Licht
Mechanische Spannung	E-Modul	Direkter piezo- elektrischer Effekt	Villari-Effekt	Mechanoka- lorischer Effekt	Photoelasti- scher Effekt
Elektrisches Feld	Umgekehrter piezoelektri- scher Effekt	Elektrische Leitfähigkeit / Permittivität	Elektro- Magnetismus	Ohm'scher Widerstand	Elektroopti- scher Effekt
Magnetfeld	Magnetostrik- tion	Wirbelstrom- Effekt	Permeabilität	Magnetoka- lorischer Effekt	Magnetoop- tischer Effekt
Wärme	Thermische Ausdehnung	Thermo- und pyroelektrischer Effekt	Thermo- Magnetismus	Spezifische Wärmekapa- zität	Thermolumi- neszenz
Licht	Photostriktion	Photovoltaischer Effekt	Photo- Magnetismus	Photothermi- scher Effekt	Brechungs- index

Viele der in Tabelle 1.1 genannten Effekte in den hellblau unterlegten Feldern treten jedoch nur in wenigen Materialien deutlich oder zumindest in solch einem Ausmaß auf, dass sie technisch nutzbar sind. Materialien, die solche Effekte in ausreichender Stärke zeigen, können als Smart Materials bezeichnet werden.

Die Behandlung aller in Tabelle 1.1 aufgeführten Effekte und der damit verbundenen Klassen von Smart Materials würde den Rahmen dieses Buches sprengen. Wir konzentrieren uns daher im Folgenden auf solche Smart Materials, die für mechatronische Anwendungen eine besondere Bedeutung haben. Bei dieser Auswahl handelt es sich zum einen um solche Materialien, deren Veränderungen durch den externen Stimulus geometrische oder mechanische Eigenschaften betreffen, wie die Form eines Körpers aus dem Material, dessen E-Modul oder die Konsistenz einer Flüssigkeit oder eines weichen Festkörpers bzw. Gels. Zum anderen wird der Schwerpunkt bei der Steuergröße bzw. beim Stimulus auf eine elektrische Anregung durch eine angelegte elektrische Spannung gelegt, da die Spannung elektronisch auf einfache Weise flexibel und schnell gesteuert bzw. geregelt werden kann. In diese Auswahl fallende Klassen von Smart Materials lassen sich auf geradezu ideale Weise mit den in großer Vielfalt verfügbaren elektronischen Steuer- und Regelsystemen kontrolliert beeinflussen und damit in zahlreichen Anwendungen technisch nutzen.

Ausdrücklich eingeschlossen sind hierbei auch solche nicht-elektrischen Stimuli, die sich elektrisch steuern lassen. Dies betrifft beispielsweise ein Magnetfeld, das durch den durch eine Spule fließenden Strom erzeugt und verändert wird. Daher werden im Folgenden auch über ein Magnetfeld gesteuerte Smart Materials betrachtet. Darüber hinaus werden ebenso temperaturgesteuerte Smart Materials einbezogen, denn die Temperatur lässt sich über eine Widerstandsheizung ebenfalls elektronisch regeln. Damit ergeben sich für die in diesem Buch behandelten Klassen von Smart Materials als bevorzugte Steuergrößen die Stärke von elektrischen und magnetischen Feldern sowie die Temperatur. Smart Materials, die auf andere Steuergrößen ansprechen, werden allenfalls am Rande betrachtet. Erwähnt sei noch, dass es auch Smart Materials gibt, die nicht nur auf einen Stimulus, sondern auf verschiedene Steuergrößen reagieren.

Zusätzlich zur Steuerung mechanischer Eigenschaften des Materials durch einen elektrischen Stimulus wird hier auch die Umkehrung berücksichtigt. Ein solcher umgekehrter Effekt, bei dem durch einen mechanischen Einfluss eine elektrische Eigenschaft des Materials verändert wird, lässt sich vorteilhaft für Sensoren nutzen, die den mechanischen Einfluss detektieren und dazu ein elektrisches Signal liefern. Wenn die Generierung eines solchen elektrischen Signals auch noch mit einer verwertbaren Menge an elektrischer Energie verbunden ist, kann dieser Effekt sogar zum sog. *Energy Harvesting* in einem Generator genutzt werden.

Tabelle 1.2 Klassen von Smart Materials mit elektrischem, magnetischem oder thermischem Stimulus und mechanischer Antwort sowie mit mechanischem Stimulus und elektrischer oder magnetischer Antwort

Antwort Stimulus	Mechanisch	Elektrisch	Magnetisch
Mechanisch		<ul style="list-style-type: none"> ■ Piezokeramiken ■ Piezopolymere ■ Ionische elektroaktive Polymere ■ Dielektrische Elastomere 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Magnetostriktive Materialien
Elektrisch	<ul style="list-style-type: none"> ■ Piezokeramiken ■ Piezopolymere ■ Ionische elektroaktive Polymere ■ Dielektrische Elastomere ■ Elektorrheologische Flüssigkeiten 		
Magnetisch	<ul style="list-style-type: none"> ■ Magnetostriktive Materialien ■ Magnetische Formgedächtnislegierungen ■ Magnetorheologische Flüssigkeiten ■ Magnetorheologische Elastomere 		
Thermisch	<ul style="list-style-type: none"> ■ Formgedächtnislegierungen ■ Formgedächtnispolymere 		

Auch in dieser Auswahl von Smart Materials ergibt sich noch eine größere Anzahl von Materialklassen, die in Tabelle 1.2 zusammengestellt sind. Gegenüber der Darstellung in Tabelle 1.1 sind hier zusätzlich auch solche Materialien aufgeführt, bei denen die mechanische Wirkung nicht aus einer Dehnung des Materials besteht, sondern aus der Veränderung einer anderen mechanischen Eigenschaft wie z. B. der Viskosität oder Konsistenz einer Flüssigkeit. Die Gemeinsamkeit der in Tabelle 1.2 aufgeführten Klassen von Smart Materials besteht im Zusammenhang zwischen einem mechanischen, elektrischen, magnetischen oder thermischen Stimulus und einer mechanischen, elektrischen oder magnetischen Antwort darauf. Man erkennt in Tabelle 1.2, dass manche Felder durch mehrere Materialklassen belegt werden. So werden insgesamt vier Materialklassen genannt, die eine mechanische Wirkung auf einen magnetischen Stimulus erzeugen, nämlich magnetostriktive Materialien, magnetische Formgedächtnislegierungen, magnetorheologische Flüssigkeiten und magnetorheologische Elastomere. Die in Tabelle 1.2 fett hervorgehobenen Materialklassen werden im weiteren Verlauf in diesem Buch ausführlich behandelt.

Die wichtigste Frage für einen Ingenieur ist natürlich, was der technische Nutzen eines adaptiven Materials ist. Diese Frage lässt sich nur schwer allgemein und umfassend beantworten. Zu unterschiedlich sind die speziellen Effekte, die von den verschiedenen Klassen von Smart Materials erzeugt werden können. Auch kann dieselbe Materialklasse durchaus verschiedene Effekte liefern, die sich für unterschiedliche Anwendungen nutzen lassen. Ein Beispiel sind die bereits genannten aktorischen und sensorischen Fähigkeiten eines Materials, mit denen beispielsweise eine Ausdehnung oder eine andere Formveränderung des Materials elektronisch gesteuert wird und gleichzeitig der auf das Material wirkende Druck in ein elektrisches Signal umgewandelt wird, um die Aktuation zu regeln. Eine solche Verbindung aktorischer und sensorischer Effekte im selben Material ist besonders interessant, da hier Synergien genutzt werden können.

Ein wesentlicher Schwerpunkt beim Einsatz von Smart Materials liegt in der Vereinfachung eines mechatronischen Systems. Mit adaptiven Materialien kann eine bisher von einem komplexen elektromechanischen Mechanismus wie etwa einem Elektromotor erzeugte Bewegung durch eine elektrisch gesteuerte Verformung des Materials ersetzt werden. Besonders bei Polymer-basierten Smart Materials kann außerdem das geringe Gewicht einen entscheidenden Vorteil darstellen, da sich Polymere durch eine geringe Dichte auszeichnen. Ein weiterer Vorteil besteht im kompakten und robusten Aufbau eines Aktors aus einem Smart Material im Vergleich zu einem komplexen mechatronischen System, das häufig einen Elektromotor mit einem mechanischen Übersetzungsgetriebe enthält. Aktoren auf der Basis von Smart Materials zeichnen sich in der Regel durch Geräuscharmheit oder sogar Geräuschlosigkeit aus und sind in dieser Hinsicht anderen elektromechanischen Antrieben überlegen. Schließlich können mitunter auch geringere Kosten ein Argument für den Einsatz von Smart Materials darstellen, doch ist dies nicht immer der Fall. Höhere Kosten müssen natürlich durch eine erweiterte Leistungsfähigkeit des adaptiven Systems gerechtfertigt werden.

Häufig stehen Lösungen für technische Aufgaben auf der Grundlage von Smart Material rein passiven Lösungen gegenüber. Ein Beispiel ist die Dämpfung von Schwingungen, die entweder mit passiven Materialien mit inhärenter Dämpfung oder – adaptiv oder aktiv – mit Smart Materials erfolgen kann. Dabei fällt die passive Lösung immer einfacher und kostengünstiger aus. Sofern eine solche passive Lösung für die gestellte Aufgabe ausreicht, ist sie meist zu bevorzugen. Aufwändigere Lösungen mit dem Einsatz von Smart Materials kommen erst dann ins Spiel, wenn der einfache passive Ansatz keine zufriedenstellende Lösung bietet, der Ansatz mit Smart Materials aber neue Funktionalitäten ermöglicht. Nur die erweiterte Funktion durch die erhöhte Anpassungsfähigkeit rechtfertigt in der Regel die Nutzung von Smart Materials gegenüber passiven Materialien. Dadurch, dass in vielen technischen Bereichen die Anforderungen nicht zuletzt an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit mit der Zeit weiter steigen, werden Smart Materials aber immer interessanter, da sie genau diesen Anforderungen Rechnung tragen können. Den größten Nutzen haben Smart Materials dort, wo sie Lösungen anbieten, die mit konventionellen Ansätzen gar nicht oder nicht wirtschaftlich realisierbar sind.

Ein entscheidender Aspekt bei der Anwendung von Smart Materials ist der Systemgedanke. Das Gesamtsystem besteht aus mechanischen Bauteilen, elektrischen und elektronischen Komponenten mit Hard- und Software zur Energieversorgung und zur elektrischen Ansteuerung sowie dem smarten Material selbst. Es ist immer als Ganzes zu betrachten. Das Smart Material allein stellt nur eine – wenn auch die zentrale – Komponente in dem System dar, ohne selbst eine autonome Funktionsfähigkeit aufzuweisen. Der Nutzen von Smart Materials wird erst bei der umfassenden Betrachtung des Gesamtsystems deutlich. Wer sich bisher schon mit mechatronischen Systemen beschäftigt hat, bringt die notwendigen Voraussetzungen für diese Betrachtung aber in der Regel bereits mit. Bild 1.1 zeigt schematisch den Aufbau eines mechatronischen Systems mit dem Einsatz von Smart Materials.

In diesem Buch wird ein Überblick über die verschiedenen Klassen von Smart Materials gegeben, bei denen sich mechanische Eigenschaften über ein elektrisches Feld, ein Magnetfeld oder

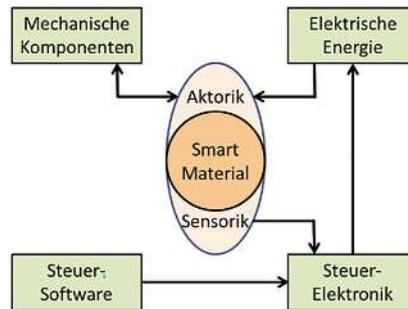


Bild 1.1 Schematischer Aufbau eines mechatronischen Systems mit dem Einsatz von Smart Materials. (Copyright Fraunhofer ISC)

über die Temperatur steuern lassen. Bevor die einzelnen Klassen von Smart Materials detaillierter behandelt werden, erfolgt im nächsten Kapitel zunächst eine materialübergreifende Einführung in wesentliche Eigenschaften von Smart Materials. Im Zusammenhang damit werden auch mögliche Kategorisierungen dieser Materialklassen vorgestellt und erläutert.

Literaturverzeichnis

- [1.1] https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_material (abgerufen am 24.04.2022)
- [1.2] M. V. Gandhi, B. D. Thompson: Smart Materials and Structures. Springer Netherlands, 1992. ISBN: 978-0-412-37010-6
- [1.3] H. Janocha (Ed.): Adaptronics and Smart Structures. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 978-3-540-71965-6
- [1.4] D. J. Leo: Engineering Analysis of Smart Material Systems. Wiley, 2007. ISBN: 978-0-471-68477-0
- [1.5] M. Schwartz (Ed.): Smart Materials. Taylor & Francis, 2008. ISBN-13: 978-1420043723
- [1.6] H. Janocha: Unkonventionelle Aktoren: Eine Einführung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2013. ISBN-13: 978-3486718867
- [1.7] M. Shahinpoor (Ed.): Fundamentals of Smart Materials. Royal Society of Chemistry, 2020. ISBN-13: 9781782626459
- [1.8] D. M. Addington: Smart Materials and Technologies in Architecture. Architectural Press, 2004. ISBN-13: 978-0750662253
- [1.9] A. Ritter: Smart Materials in Architektur, Innenarchitektur und Design. Birkhäuser Basel, 2007. ISBN: 978-3-7643-7326-9
- [1.10] M. Addington, D. Schodek: Smart Materials and Technologies: For the architecture and design professions. Routledge, 2016. ISBN-13: 978-1138143357
- [1.11] M. Bengisu, M. Ferrara: Materials that Move: Smart Materials, Intelligent Design. Springer, 2018. ISBN-13: 978-3319768885
- [1.12] A. S. Y. Mohamed: Smart Materials Innovative Technologies in architecture; Towards Innovative design paradigm. Energy Procedia 115 (2017) 139-154
- [1.13] K. Uchino (Ed.): Advanced Piezoelectric Materials. Elsevier, 2017. ISBN: 978-0-08-102135-4
- [1.14] L. Lecce, A. Concilio: Shape Memory Alloy Engineering. Elsevier, 2015. ISBN: 978-0-08-099920-3
- [1.15] Y. Bar-Cohen (Ed.): Electroactive Polymer Eap Actuators As Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges. SPIE Press, 2004. ISBN-13: 978-0819452979
- [1.16] F. Carpi, D. De Rossi, R. Kornbluh, R. Pelrine, P. Sommer-Larsen (Eds.): Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology. Elsevier, 2011. ISBN: 9780080557724
- [1.17] F. Carpi (Ed.): Electromechanically Active Polymers. Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-31528-7

2 Nutzbare Effekte und grundlegende Eigenschaften von Smart Materials

Dr. Holger Böse

Das Interesse an Smart Materials entsteht wesentlich aus bestimmten Effekten, die sie ausüben und die technisch auf unterschiedliche Weise genutzt werden können. Im Vordergrund stehen hier aktorische oder sensorische Effekte sowie Energieumwandlung und steuerbare Dämpfung. Ebenfalls wichtig zur Beschreibung der Smart Materials ist der Stimulus, über den das Material angesprochen wird. Wie in der Einleitung benannt, werden in diesem Buch die Steuergrößen *elektrisches Feld*, *Magnetfeld* und *Temperatur* verwendet. Mit der Zuordnung zu Steuergrößen erfolgt gleichzeitig eine Kategorisierung der Klassen von Smart Materials. Eine andere Kategorisierung entsteht durch die Materialzusammensetzung. So können Smart Materials beispielsweise in Metalle, Keramiken, Kunststoffe etc. eingeteilt werden. Schließlich unterscheiden sich die verschiedenen Klassen von Smart Materials auch in ihren grundlegenden mechanischen Eigenschaften wie E-Modul oder Dichte. Die nutzbaren Effekte und mögliche Kategorisierungen von Smart Materials werden im Folgenden näher betrachtet.

2.1 Nutzbare Effekte von Smart Materials

Bei allen Unterschieden in ihrer stofflichen Zusammensetzung und in der Struktur weisen die in diesem Buch behandelten Klassen von Smart Materials die Gemeinsamkeit auf, dass mechanische Eigenschaften des Materials durch einen Stimulus wie ein elektrisches Feld, ein Magnetfeld oder eine Temperaturänderung gezielt gesteuert werden können. Umgekehrt kann ein mechanischer Einfluss auf das Material eine elektrische, eine magnetische oder auch eine thermische Eigenschaft des Materials verändern. Die steuerbare Veränderung mechanischer bzw. elektrischer Eigenschaften hat verschiedene Effekte zur Folge, die sich technisch für vielfältige Anwendungen nutzen lassen:

- Beim **Aktoreffekt** führt der Stimulus zu einer Ausdehnung, einer Kontraktion oder einer anderen Verformung des Materials. Damit wird eine mechanische Arbeit geleistet, indem beispielsweise ein Gegenstand bewegt wird. Die Größe der geleisteten Arbeit und die dafür umgewandelte Energie werden durch die Aktuationskraft und den Weg bestimmt, über den sich das Material verformt.
- Dieser Aktoreffekt lässt sich bei manchen Smart Materials auch umkehren. Durch eine von außen einwirkende Kraft wird das Material verformt, wodurch eine elektrische Spannung erzeugt oder eine elektrisch messbare Eigenschaft verändert wird. Damit zeigt das Smart Material einen **Sensoreffekt**, mit dem sich mechanische Sensoren zur Messung von Kräften, Drücken oder Verformungen realisieren lassen.
- Wenn durch die Einwirkung einer äußeren Kraft eine elektrische Spannung erzeugt wird oder elektrische Ladungen im Material verschoben werden, kann dies auch mit der Umwandlung von mechanischer Verformungsenergie in elektrische Energie verbunden sein. Damit wirkt das Smart Material als Energiewandler und weist einen **Generatoreffekt** auf.
- Darüber hinaus zeigen manche Smart Materials einen **Versteifungseffekt**. Dabei werden die rheologischen Eigenschaften des Materials durch einen Stimulus beeinflusst, was sich in einer teilweise drastischen Änderung der Konsistenz äußert. Dies hat zur Folge, dass das Material auf

eine von außen einwirkende Kraft eine veränderliche Widerstandskraft ausübt und damit dämpfend wirkt oder eine Kraft bzw. ein Drehmoment mit variabler Stärke übertragen kann.

Besonders interessant sind solche Smart Materials, die verschiedene Effekte gleichzeitig aufweisen. So kann beispielsweise ein Material nicht nur eine Aktuation erzeugen, sondern außerdem auch sensorisch wirken. Mit dem Sensoreffekt lässt sich dann die Aktuation überwachen und bedarfsgerecht nachregeln. Damit stellen solche Smart Materials eine ideale Grundlage für einen Regelkreis dar.

2.1.1 Aktorik

Ein bevorzugtes Anwendungsfeld von Smart Materials sind mechanische Aktoren, die sich durch einen externen Stimulus ausdehnen oder auf andere Weise verformen und damit prinzipiell einen konventionellen elektromechanischen Antrieb wie einen Elektromotor ersetzen können. Die Aktorik liefert in der Regel die wesentliche Motivation für den Einsatz von Smart Materials. Aus diesem Grund wird im Folgenden ausführlich auf den Aktoreffekt eingegangen. Hierzu werden kurz die allgemeinen Grundlagen von Aktormaterialien erläutert. Die speziellen Aktoreigenschaften der einzelnen Klassen von Smart Materials werden anschließend in den materialbezogenen Kapiteln dargestellt. Für die Bewertung der Performance eines Aktors sind einige Kenngrößen von entscheidender Bedeutung. Hierzu gehören insbesondere der Weg, über den sich die Verformung eines Aktors erstrecken kann, sowie die Kraft, mit der die Verformung ausgeführt wird. Der Einfachheit halber wird hier bei der Aktuation von einer linearen Ausdehnung des Materials in eine definierte Richtung, d. h. beispielsweise von einer Längenvergrößerung ausgegangen. Die bei der Verformung erzeugte Kraft bestimmt maßgeblich, welche mechanische Arbeit von dem Aktor verrichtet werden kann. Sowohl der Verformungsweg als auch die Verformungskraft hängen natürlich von den geometrischen Dimensionen des Aktors ab. Um diese Abhängigkeit auszuschließen, werden zwei Relativgrößen eingeführt: der relative Verformungsweg bzw. die Aktuationsdehnung ε_a

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l_a}{l_0} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit der Längenänderung des Aktors Δl_a durch die Aktuation und der Anfangslänge l_0 , sowie die Dehnungsspannung bzw. die Aktuationsspannung σ_a

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

mit der Aktuationskraft F_a und der Aktorfläche A .

Bei einer durch eine von außen einwirkende Kraft erzeugten Verformung des Aktorkörpers gilt mit der vereinfachenden Annahme einer linearen Abhängigkeit der entsprechenden mechanischen Spannung σ von der damit erzeugten Dehnung ε

$$\sigma = Y_a \cdot \varepsilon \quad (\text{Gl. 2.3})$$

mit dem Elastizitätsmodul (E-Modul) des Aktormaterials Y_a . Gl. 2.3 beschreibt das Hook'sche Gesetz eines elastischen Materials.

Die Abhängigkeit zwischen der durch den Stimulus hervorgerufenen Aktuators- bzw. Aktorspannung σ_a und der zugehörigen Aktuators- bzw. Aktordehnung ϵ_a wird häufig in der gleichen Vereinfachung durch einen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Größen dargestellt. Hierfür gilt dann

$$\sigma_a = \sigma_{ab} - Y_a \cdot \epsilon_a \quad (\text{Gl. 2.4})$$

mit der Blockierspannung des Aktormaterials σ_{ab} . Trägt man diesen Zusammenhang zwischen Aktorspannung und -dehnung schematisch auf wie in Bild 2.1a, so ergibt sich eine Gerade. Sie schneidet die x-Achse der Aktordehnung bei einem Wert ϵ_{af} , der die freie Aktordehnung des Aktormaterials angibt, und die y-Achse der Aktorspannung bei der Blockierspannung σ_{ab} . Die freie Aktordehnung drückt aus, wie weit sich das Aktormaterial dehnt, wenn dieser Dehnung kein äußerer Widerstand entgegengesetzt wird. In der Regel arbeitet der Aktor aber gegen einen äußeren Widerstand. Mit steigender Widerstandskraft bzw. -spannung gegenüber der Aktorausdehnung nimmt diese ab, da das Aktormaterial durch die entgegenwirkende Kraft gestaucht wird. Wird die Widerstandskraft unendlich groß – d. h. der Aktor drückt gegen eine starre Wand – so erfolgt keine Aktordehnung mehr. Die vom Aktor ausgeübte Aktorspannung ist unter dieser Blockierbedingung am höchsten und wird daher *Blockierspannung* genannt. Unter geringeren Gegenspannungen als der Blockierspannung dehnt sich das Aktormaterial soweit aus, bis die sinkende Aktorspannung mit der Gegenspannung im Gleichgewicht ist. Auf diese Weise kann sich der Aktor beispielsweise gegen eine konstante Gegenkraft ausdehnen. Die Ausdehnung erfolgt solange, bis die mit der Ausdehnung sinkende Aktorkraft mit der Gegenkraft übereinstimmt und so ein Gleichgewicht erreicht wird.

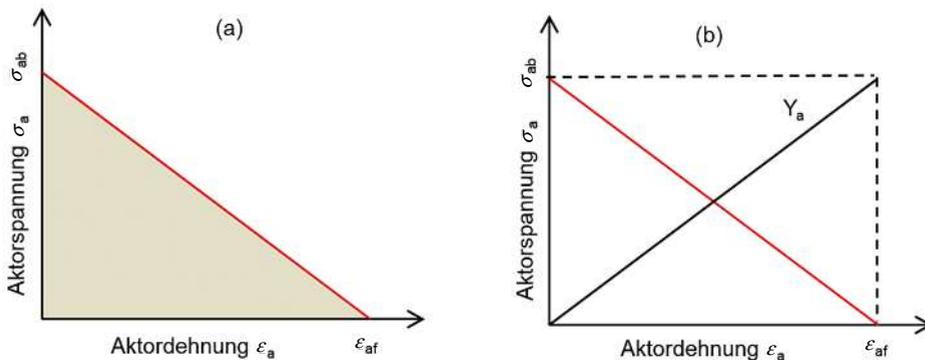


Bild 2.1 Schematische Darstellung des linearen Zusammenhangs zwischen Aktorspannung σ_a und Aktordehnung ϵ_a (a) mit farbiger Flächenmarkierung der Energiedichte des Aktormaterials und (b) mit Spannungs-Dehnungs-Geraden, deren Steigung der E-Modul Y_a des Aktormaterials ist. (Copyright Fraunhofer ISC)

Die rote Gerade in Bild 2.1a ist damit die Verbindungslinie zwischen der Blockierspannung σ_{ab} und der freien Aktordehnung ϵ_{af} . Sie stellt die Grenze dar, bis zu der der Aktor bei einer bestimmten Aktivierung durch seinen Stimulus arbeitet und die damit nicht überschritten werden kann. An welcher Stelle die rote Gerade erreicht wird, hängt von der Gegenkraft ab, gegen die der Aktor arbeitet. Die Aktivierung erfolgt beispielsweise durch das Anlegen einer

elektrischen Spannung an den Aktor. Bei einer stärkeren Aktivierung durch eine höhere Spannung verschiebt sich die rote Gerade im Diagramm weiter nach rechts-oben, d. h. die freie Aktordehnung und die Blockierspannung werden größer. Umgekehrt verschiebt sich die rote Gerade bei einer schwächeren Aktivierung durch eine geringere angelegte elektrische Spannung an den Aktor nach links-unten, womit die Blockierspannung und die freie Aktordehnung kleiner werden.

Die Fläche zwischen der roten Geraden und den beiden Achsen in Bild 2.1a gibt die durch die elektrische Aktivierung bei der freien Aktordehnung im Aktormaterial vorliegende mechanische Energiedichte aufgrund der elastischen Verformung wieder. Wenn keine Arbeit vom Aktor gegen eine äußere Kraft geleistet wird, entspricht dies der maximalen Energie, die durch die elektrische Aktivierung in das Aktormaterial übertragen werden kann. Wie Bild 2.1a zu entnehmen ist, beträgt diese maximale Energiedichte E_{\max} des Aktormaterials

$$E_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_{ab} \cdot \varepsilon_{af} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Da mit steigender elektrischer Aktivierung sowohl die Blockierspannung als auch die freie Aktordehnung größer werden, nimmt auch die maximale Energiedichte des Aktormaterials entsprechend zu. Von dieser im Aktormaterial vorhandenen Energie kann ein Teil zur Verrichtung einer mechanischen Arbeit in Form der Aktuation genutzt werden, wie später in zwei Beispielen gezeigt wird.

Bild 2.1a zeigt außerdem, dass mit der Dehnung des Aktormaterials die mechanische Aktorspannung abnimmt. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Aktormaterial bei der aktorischen Ausdehnung elastisch verformt wird. Mit steigender Dehnung wirkt eine immer stärkere Rückstellspannung des elastisch verformten Materials der Ausdehnung entgegen. Diese Rückstellspannung reduziert die Aktorspannung mit zunehmender Ausdehnung immer weiter. Hat die Dehnung des Aktormaterials den Wert der freien Aktordehnung erreicht, so steht die Rückstellspannung des Aktormaterials mit der Aktorspannung im Gleichgewicht. Der Aktor kann sich unter diesen Bedingungen auch ohne eine von außen einwirkende Gegenspannung nicht mehr weiter ausdehnen.

Die im Schema in Bild 2.1a gezeigte rote Verbindungsgerade zwischen der Blockierspannung σ_{ab} und der freien Aktordehnung ε_{af} hängt mit dem E-Modul Y_a des Aktormaterials zusammen. Der Quotient aus der Blockierspannung und der freien Aktordehnung ergibt gerade den E-Modul. Üblicherweise wird die Abhängigkeit der mechanischen Spannung eines Festkörpermateriale von der Dehnung durch eine Gerade durch den Ursprung des Koordinatensystems dargestellt, d. h. die Spannung ist proportional zur Dehnung. Die Steigung dieser Geraden ist identisch mit dem E-Modul Y_a des Aktormaterials. Dieser Zusammenhang ist mit der schwarzen Geraden in Bild 2.1b dargestellt. Die Gerade gibt die mechanische Spannung vs. die Dehnung des Aktormaterials an und schneidet die rote Verbindungsgerade zwischen der Blockierspannung σ_{ab} und der freien Aktordehnung ε_{af} genau in deren Mitte.

An dieser Stelle sei nochmals betont, dass der hier angenommene lineare Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung und der Dehnung eines Materials eine starke Vereinfachung darstellt. Der E-Modul wird damit als konstant angenommen. Diese Näherung ist meist nur für sehr kleine Dehnungen bis etwa 1 % der Ausgangslänge eine gute Beschreibung des tatsächlichen Zusammenhangs. Manche Aktormaterialien wie piezoelektrische Keramiken erreichen selbst bei stärkster Aktivierung nur freie Aktordehnungen von unter 1 %. Bei solchen Materialien kann die Näherung eines linearen Zusammenhangs zwischen mechanischer Spannung und

Dehnung ohne Probleme verwendet werden. Andere Aktormaterialien wie dielektrische Elastomere erreichen dagegen freie Aktordehnungen von 10 % oder sogar deutlich mehr. Hier ist die Annahme einer Linearität nur noch eine sehr grobe Näherung, die mit steigender Dehnung immer ungenauer wird. Für eine genauere Beschreibung muss der tatsächliche Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung und der Dehnung herangezogen werden. Der E-Modul ist dann keine Konstante mehr, sondern eine Funktion der Dehnung. Zudem unterscheidet sich der E-Modul bei einer Ausdehnung des Materials vom entsprechenden Wert bei einer Stauchung. Auch bei den nachfolgenden Betrachtungen zur mechanischen Wirkung von Aktoren beschränken wir uns jedoch zur Vereinfachung auf einen linearen Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und Dehnung, d. h. auf einen konstanten E-Modul.

In vielen Anwendungen soll ein Aktor eine mechanische Arbeit verrichten, indem er sich gegen eine von außen einwirkende Gegenkraft ausdehnt und damit gegen diese Kraft arbeitet. Dies kann beispielsweise das Anheben eines Gegenstandes mit einem definierten Gewicht sein. In diesem Fall ist die von außen auf den Aktor einwirkende Gegenkraft konstant und nicht von der Aktordehnung abhängig. Das aufliegende Gewicht komprimiert zunächst den Aktor entsprechend der Steifigkeit des Aktormaterials. Wird der Aktor z. B. elektrisch aktiviert, so sinkt die mechanische Aktorspannung und damit die vom Aktor ausgeübte Kraft mit steigender Dehnung immer weiter ab, wie in Bild 2.2 gezeigt wird. Damit kann der Aktor den Gegenstand nur soweit anheben, bis die Aktorkraft auf die Größe der Gewichtskraft abgesunken ist und die beiden Kräfte im Gleichgewicht stehen. Wenn das Gewicht des Gegenstandes genau so groß ist wie die Blockierkraft des Aktors, kann sich dieser nicht ausdehnen und damit keine mechanische Arbeit verrichten.

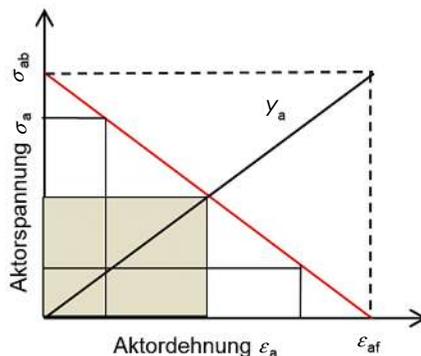


Bild 2.2 Schematische Darstellung des linearen Zusammenhangs zwischen Aktorspannung σ_a und Aktordehnung ϵ_a . Die rechteckigen Flächen markieren die Energiedichten der mechanischen Arbeit bei verschiedenen Auflagedrücken von Gegenständen, wobei die farbige Fläche die maximale Energiedichte beim Heben eines Gegenstandes mit dem Auflagedruck $\sigma_{ab}/2$ wiedergibt. Die Steigung der schwarzen Geraden entspricht dem E-Modul Y_a des Aktormaterials. (Copyright Fraunhofer ISC)

Liegt die Gewichtskraft unterhalb der Blockierkraft des Aktors, ist die an dem Gegenstand verrichtete mechanische Arbeit gleich dem Produkt aus der Gewichtskraft und der absoluten Aktordehnung. Da sowohl die Gewichtskraft als auch die absolute Aktordehnung von den Dimensionen des Gegenstandes und des Aktors abhängen, sollte auch dieser Zusammenhang besser unabhängig hiervon ausgedrückt werden. Dazu wird ein sich vertikal ausdehnender Aktor angenommen, auf dem ein Gegenstand mit der gleichen Auflagefläche aufliegt (Bild 2.3).

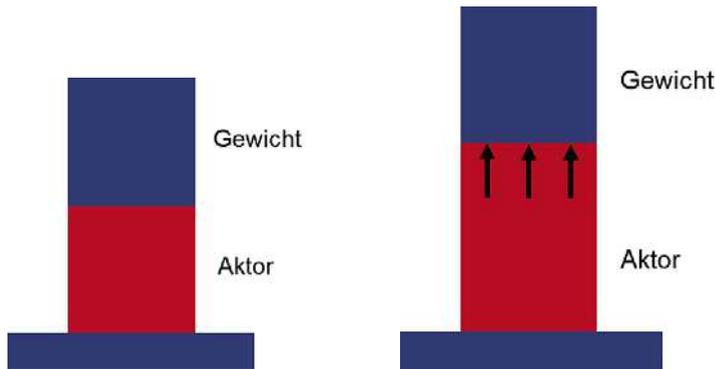


Bild 2.3 Schematische Darstellung eines Aktors, der sich vertikal ausdehnt und dabei ein Gewicht hebt, unaktiviert (links) und aktiviert (rechts). (Copyright Fraunhofer ISC)

Betrachten wir nun die vom Aktor geleistete Hubarbeit W_{Gewicht} bezogen auf das Aktorvolumen, so ergibt sich diese als das Produkt aus dem Auflagedruck des Gegenstandsgewichtes, der mit der Aktorspannung σ_a im Gleichgewicht steht, und der relativen Dehnung des Aktors ϵ_a .

$$W_{\text{Gewicht}} = \sigma_a \cdot \epsilon_{\text{af}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_{\text{ab}}}\right) = \epsilon_{\text{af}} \cdot \sigma_a - \frac{\epsilon_{\text{af}} \cdot \sigma_a^2}{\sigma_{\text{ab}}} \quad (\text{Gl. 2.6})$$

Die volumenbezogene Arbeit des Aktors wird in Bild 2.2 durch die Fläche eines Rechtecks wiedergegeben, das vollständig unterhalb der roten Geraden liegt und dessen Höhe gleich der vom Gegenstandsgewicht erzeugten Spannung ist. Dabei wird deutlich, dass die vom Aktor geleistete Arbeit vom Auflagedruck des anzuhebenden Gegenstandes abhängt. Wenn der Auflagedruck des Gegenstandes gleich der Blockierspannung des Aktors ist, wird der Gegenstand nicht angehoben und damit keine Hubarbeit geleistet. Ist der Gegenstand extrem leicht, so dehnt sich der Aktor bis zur freien Aktordehnung aus, leistet aber wegen des fehlenden Gegendrucks auch fast keine Hubarbeit. Die maximale Hubarbeit $W_{\text{Gewicht,max}}$ kann der Aktor leisten, wenn der Auflagedruck des Gegenstandes gleich der halben Blockierspannung des Aktors ist. Damit ergibt sich:

$$W_{\text{Gewicht,max}} = \frac{1}{4} \sigma_{\text{ab}} \cdot \epsilon_{\text{af}} \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Der Vergleich von Gl. 2.7 mit Gl. 2.5 zeigt, dass zum Anheben des Gegenstandes durch den Aktor maximal die Hälfte der im Aktormaterial vorhandenen Energie genutzt werden kann. In allen anderen Fällen, wenn der anzuhebende Gegenstand einen kleineren oder einen größeren Auflagedruck erzeugt als die halbe Blockierspannung ausmacht, wird ein geringerer Anteil der im Aktormaterial vorhandenen Energie für die zu verrichtende mechanische Arbeit genutzt.

In einem anderen Szenario arbeitet der Aktor gegen eine elastische Struktur aus einem anderen Material und komprimiert dieses Material bei seiner Ausdehnung. Die Struktur kann hier als eine

elastische Feder angesehen werden, die durch den Aktor gestaucht wird. Dabei hängt die vom Aktor verrichtete mechanische Arbeit von der Steifigkeit der Struktur (von deren Federkonstante) ab. Zur Vereinfachung wird hier angenommen, dass die Querschnittsflächen ebenso wie die Längen des Aktors und der zu komprimierenden Struktur aus dem anderen Material übereinstimmen und sich an der Kontaktstelle komplett überdecken, wie es in der schematischen Darstellung in Bild 2.4 gezeigt ist. Zudem wird hier vorausgesetzt, dass nicht nur der Aktor, sondern auch die Struktur auf der dem Aktor entgegengesetzten Seite blockiert ist und somit dorthin nicht ausweichen kann.

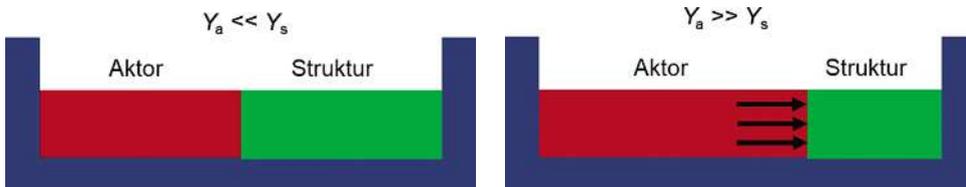


Bild 2.4 Schematische Darstellung eines Aktors, der sich horizontal ausdehnt und dabei eine elastische Struktur komprimiert, unaktiviert (links) und aktiviert (rechts). (Copyright Fraunhofer ISC)

Im Grundzustand ohne Aktuation berühren sich der Aktor und die Struktur an der Kontaktstelle ohne Kraftausübung. Sobald sich der Aktor horizontal ausdehnt, kommt es jedoch zu einer Kompression der Struktur. Dabei hängen die Größe der Kompression und die auf die Struktur übertragene Kompressionsenergie vom Verhältnis der E-Modul-Werte der beiden Materialien ab. Zur Vereinfachung wird hier von einem E-Modul der Struktur Y_s gesprochen, auch wenn die Struktur nicht aus einem homogenen Material bestehen muss. Der E-Modul ergibt sich dann aus der Federkonstante, die für die Kompression der Struktur angenommen werden kann, und ihren geometrischen Abmessungen. Bild 2.5 zeigt schematisch die Spannungs-Dehnungs-Geraden verschiedener Strukturen mit unterschiedlichen E-Modulen Y_s im Vergleich zum E-Modul Y_a des Aktors. Wenn der E-Modul der Struktur wesentlich größer als der E-Modul des Aktors ist ($Y_s \gg Y_a$), wird die Struktur nur geringfügig komprimiert, d. h. auch der Aktor dehnt sich selbst nur wenig aus. Im Grenzfall einer unendlich hohen Steifigkeit der Struktur erfolgt keine Kompression, obwohl der Aktor seine maximale Kraft in der Höhe der Blockierkraft aufwendet. Wegen der ausbleibenden Kompression wird auch keine Energie auf die Struktur übertragen.

Wenn im entgegengesetzten Fall der E-Modul der Struktur wesentlich kleiner als der E-Modul des Aktors ist ($Y_s \ll Y_a$), wird die Struktur sehr stark komprimiert, d. h. der Aktor dehnt sich selbst deutlich aus (Bild 2.5). Im Grenzfall einer verschwindend geringen Steifigkeit der Struktur ergibt sich ihre maximal mögliche Kompression, wobei sich der Aktor bis zur freien Dehnung ausdehnt, die nicht mehr überschritten werden kann. Da der Aktor wegen der verschwindend geringen Steifigkeit der Struktur nahezu keine Kraft ausüben muss, wird auch hier fast keine Energie auf die Struktur übertragen. Der Aktor muss nur Energie aufwenden, um sich selbst zu verformen.

Nehmen wir den idealisierten Fall an, dass der Aktor elektrisch angesteuert wird, verlustfrei arbeitet und auch umgekehrt als Generator mechanische in elektrische Energie ohne Energieverlust umwandeln kann. Wenn außerdem bei der Aktuation keine Dämpfung vorliegt, die mechanische Energie in Wärme umwandelt, kann die Verformungsenergie des Aktors theoretisch vollständig als elektrische Energie zurückgewonnen werden. Diese idealen Bedingungen sind bei realen Aktoren natürlich nicht gegeben.

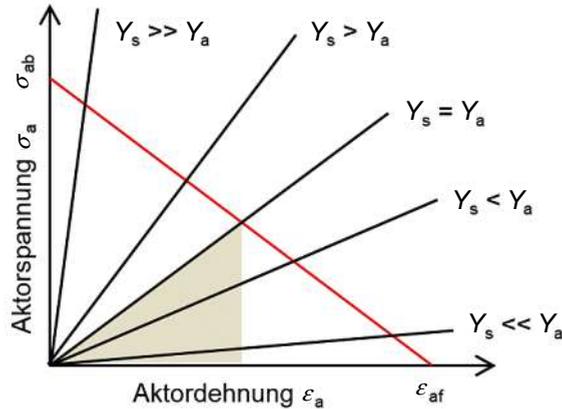


Bild 2.5 Schematische Darstellung des linearen Zusammenhangs zwischen Aktorspannung σ_a und Aktordehnung ϵ_a sowie von Spannungs-Dehnungs-Geraden verschiedener vom Aktor komprimierter elastischer Strukturen mit unterschiedlichen E-Modulen Y_s (angegeben im Vergleich zum E-Modul des Aktormaterials Y_a). Die farbige Fläche markiert die maximale Energiedichte der mechanischen Arbeit beim Komprimieren einer Struktur mit dem gleichen E-Modul ($Y_s = Y_a$). (Copyright Fraunhofer ISC)

In der Regel wird der E-Modul der zu komprimierenden Struktur zwischen den beiden genannten Extremfällen liegen. Ein Sonderfall liegt vor, wenn beide E-Modul-Werte übereinstimmen, die Steifigkeiten von Aktor und Struktur also gleich sind. Bei dieser Konstellation wird vom Aktor die maximal mögliche Energie auf die Struktur übertragen. Die dabei übertragene Energiedichte wird durch das Integral der Aktorspannung über die Dehnung (oder umgekehrt) bis zum Kräftegleichgewicht bestimmt. Bild 2.5 zeigt dieses Integral für den Sonderfall, $Y_s = Y_a$ als farbige markierte Fläche in Form eines Dreiecks. Bei allen anderen Werten des E-Moduls der Struktur kann nur weniger mechanische Arbeit vom Aktor verrichtet werden.

Wie Bild 2.5 zu entnehmen ist, beträgt die maximale Arbeit $W_{\text{Struktur,max}}$ des Aktors zur Kompression einer elastischen Struktur bei einer Übereinstimmung der beiden E-Modul-Werte

$$W_{\text{Struktur,max}} = \frac{1}{8} \sigma_{\text{ab}} \cdot \epsilon_{\text{af}} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Der Vergleich von Gl. 2.8 mit Gl. 2.5 zeigt, dass bei der Kompression einer elastischen Struktur maximal ein Viertel der im Aktormaterial vorhandenen Energie genutzt werden kann. In allen anderen Fällen – bei kleinerem oder größerem E-Modul der Struktur – wird ein geringerer Anteil der im Aktormaterial vorhandenen Energie für die zu verrichtende mechanische Arbeit übertragen. Im Vergleich zum Heben eines Gegenstandes kann hier also nur die Hälfte der mechanischen Arbeit geleistet werden.

Ein ideales Aktormaterial würde eine sehr große Verformung ϵ mit einer sehr hohen mechanischen Spannung σ erzeugen. Reale Aktormaterialien verhalten sich jedoch in der Regel so, dass sie entweder eine sehr große Verformung oder eine sehr hohe mechanische Spannung liefern, aber nicht beides zugleich. Ob der Aktor eine eher große Verformung oder eine hohe mechanische Spannung erzeugt, hängt wesentlich vom E-Modul des Aktormaterials ab. Bei einem weichen Aktormaterial mit einem geringen E-Modul wird der Verformung durch die geringe Steifigkeit wenig Widerstand entgegengesetzt, sodass sich der Aktor stärker ausdehnen kann als bei einem

harten Aktormaterial. Umgekehrt muss ein hartes Aktormaterial gegen einen starken inneren Widerstand arbeiten und hierfür eine große mechanische Spannung erzeugen.

2.1.2 Sensorik

Nicht nur in der aktorischen Performance, sondern auch bei den sensorischen Eigenschaften unterscheiden sich die verschiedenen Klassen von Smart Materials deutlich. Wie bei der Aktorik beschränken wir uns auch bei der Sensorik auf den Zusammenhang von elektrischen und mechanischen Größen, der durch das Material vorgegeben wird. Eine äußere mechanische Einwirkung auf das Material hat hier eine elektrische Auswirkung. Die mechanische Einwirkung besteht beispielsweise in einer Stauchung oder einer Dehnung des Materials, die durch eine von außen auf das Material einwirkende mechanische Spannung hervorgerufen wird.

Die sensorische Wirkung fällt bei den einzelnen Klassen von Smart Materials sehr unterschiedlich aus. Bei der Verformung durch eine äußere Kraft oder einen Druck können verschiedene elektrische Effekte im Material auftreten, aus denen eine Messgröße für die mechanische Verformung bzw. die Dehnung oder für die ausgeübte Kraft bzw. den Druck abgeleitet wird. Daraus ergeben sich verschiedene Arten von Sensoren, die sich unterschiedlich verhalten und damit in verschiedenen Anwendungsszenarien eingesetzt werden können.

Bei den piezoelektrischen Materialien wie Piezokeramiken und Piezopolymeren kommt es bei der Ausübung von Druck im Material zu einer Ladungstrennung bzw. Ladungsverschiebung und dadurch zur Erzeugung einer elektrischen Spannung, die gemessen werden kann. Da die Spannung sehr klein ist, wird häufig ein Ladungsverstärker eingesetzt. Dieses Messprinzip eignet sich besonders zur Messung zeitlich veränderlicher Kräfte und Drücke, auch bei hohen Frequenzen, aber nicht zur Bestimmung statischer Belastungen. Bei einem lang anhaltenden statischen Druck auf das piezoelektrische Material kommt es mit der Zeit nämlich zu einem Abbau der Ladungstrennung, da das Material keinen unendlich großen elektrischen Widerstand aufweist, der die Entladung verhindert. Beim Wegfall des Druckes entsteht eine entgegengesetzte Aufladung, die ebenfalls mit der Zeit durch den endlichen Widerstand des Materials abgebaut wird. Damit eignet sich das piezoelektrische Sensorprinzip eher zur Messung dynamischer als statischer Drücke.

Sensoren aus dielektrischen Elastomeren arbeiten mit einem kapazitiven Messprinzip. Durch ihren Aufbau verhalten sie sich wie ein verformbarer Kondensator, bei dem zwischen zwei integrierten Elektrodenschichten eine elektrische Kapazität gemessen wird. Bei der Verformung des Materials durch eine äußere Kraft oder durch eine Aktuation verändert sich die Kapazität des Kondensators. Dieses Messprinzip lässt sich sowohl statisch als auch dynamisch einsetzen. Bei sehr hohen Frequenzen wird die Messung jedoch dadurch begrenzt, dass die Trägheit des weichen Elastomermaterials es daran hindert, der schnellen Verformungskraft zu folgen. Außerdem benötigt auch die Kapazitätsmessung besonders bei großen Kapazitäten eine bestimmte Zeit, die die erreichbare Messfrequenz limitiert.

Ein weiteres Messprinzip zur Verformungsmessung kann bei Formgedächtnislegierungen genutzt werden. Bei der Ausdehnung der metallischen Legierung durch eine äußere Kraft oder durch eine Aktuation ändert sich der elektrische Widerstand in noch stärkerer Weise als es bei den bekannten Dehnungsmessstreifen der Fall ist, da die geometrisch bedingte Widerstandsänderung durch eine Kristallphasenumwandlung bei der Dehnung verstärkt wird. Durch eine Widerstandsmessung lässt sich somit die Verformung der Formgedächtnislegierung jederzeit erfassen. Solche Messungen können sowohl statisch als auch dynamisch bis zu hohen Frequenzen durchgeführt werden.

2.1.3 Generatorik

Mit einigen Klassen von Smart Materials ist es möglich, mechanische Energie, die von außen zugeführt wird, teilweise in elektrische Energie umzuwandeln. Auf diese Weise entstehen Generatoren, die für eine autarke Versorgung mit elektrischer Energie genutzt werden können. Diesem sogenannten *Energy Harvesting* liegen unterschiedliche Mechanismen der Energieumwandlung bei den verschiedenen Smart Materials zugrunde.

Bei der durch eine äußere Krafteinwirkung hervorgerufenen Verformung von piezoelektrischen Materialien kommt es, wie bereits beim Sensoreffekt dargestellt, zu einer Ladungstrennung im Material, die mit der Erzeugung einer elektrischen Spannung verbunden ist. Das Produkt aus Spannung und Ladung ergibt die im Material enthaltene elektrische Energie. Zwar ist die auf diese Weise gewinnbare Energiemenge sehr klein, doch kann der Energiewandlungsprozess mit hoher Frequenz erfolgen, wodurch die elektrische Leistung des Generators steigt. Das Prinzip eignet sich beispielsweise zur Gewinnung elektrischer Energie aus mechanischen Schwingungen.

Bei dielektrischen Elastomeren verläuft der Energiewandlungsprozess auf grundlegend andere Weise. Wie bereits beim Sensoreffekt erläutert, wird bei der Verformung des Materials durch eine äußere Kraft nicht wie bei piezoelektrischen Materialien eine elektrische Spannung erzeugt, sondern die elektrische Kapazität zwischen zwei Elektrodenschichten wird verändert. Zur Energieumwandlung wird das Material zunächst so verformt, dass die Kapazität deutlich ansteigt. In diesem Zustand wird der Kondensator elektrisch aufgeladen, d. h. es muss erst einmal elektrische Energie zugeführt werden. Wird anschließend die äußere Kraft zurückgenommen, so erfolgt eine elastische Rückverformung des dielektrischen Elastomers, wodurch die Kapazität sinkt und die elektrische Spannung zwischen den Elektroden ansteigt. Schließlich werden die Ladungen mit ihrer erhöhten Energie wieder abgezogen. Damit ergibt sich ein Nettogewinn an elektrischer Energie. Ein solcher Generator arbeitet wegen der notwendigen starken Verformung des Elastomers bei niedrigen Frequenzen und eignet sich beispielsweise zur Gewinnung elektrischer Energie aus Schritten durch die Gehbewegung oder aus der Wasserbewegung in Meereswellen.

2.1.4 Steuerbare Dämpfung

Bei den magnetorheologischen Materialien (magnetorheologische Flüssigkeiten und Elastomere) kommt es durch das Anlegen eines Magnetfeldes zu einer reversiblen Versteifung des Materials. Eine magnetorheologische Flüssigkeit vollzieht im Magnetfeld quasi einen Phasenübergang von einer flüssigen Phase zu einem weichen Festkörper. Dieser Versteifungseffekt ist von den zuvor beschriebenen Aktoreffekten zu unterscheiden. Während ein Aktor, durch seinen Stimulus gesteuert, eine aktive Bewegung und dabei eine aktive Kraft erzeugt, wird bei einer magnetorheologischen Flüssigkeit die Bewegung eines externen Körpers, der sich durch die Flüssigkeit bewegt, gebremst. Es handelt sich dabei also nicht um eine aktive Kraft, die einen Gegenstand bewegt, sondern um eine passive Kraft infolge von Reibung. Die Stärke dieser Bremskraft lässt sich durch die Magnetfeldstärke stufenlos einstellen.

2.2 Zusammensetzung von Smart Materials

Smart Materials können aus sehr unterschiedlichen Grundmaterialien bestehen. So sind Piezoelektrika in der Regel keramische Werkstoffe. Daneben gibt es jedoch auch Polymermaterialien, die piezoelektrische Effekte zeigen. Bei Formgedächtnislegierungen handelt es sich, wie schon der

Name sagt, um metallische Legierungen. Aber auch Formgedächtniseffekte können ebenso von Polymeren erzeugt werden.

Mit Metallen, Keramiken und Kunststoffen sind die drei wohl am weitesten in technischen Anwendungen verbreiteten Materialklassen bereits aufgeführt. Smart Materials sind jedoch nicht immer nur reine Materialien mit homogener Zusammensetzung. In vielen Fällen ergibt sich der Nutzeffekt eines Smart Materials erst durch die Kombination von verschiedenen Grundmaterialien mit aufeinander abgestimmten Eigenschaften. Es handelt sich dann um Kompositmaterialien, die verschiedene Materialphasen enthalten, deren Zusammenwirken erst die gewünschten Effekte erzeugt.

Als ein Beispiel für solche Kompositmaterialien seien magnetorheologische Elastomere genannt, die aus magnetisierbaren Metallpartikeln in einer Elastomermatrix bestehen. Bei diesem Kompositmaterial handelt es sich damit um eine Verbindung aus einer dispersen metallischen Phase und einer Polymerphase. Analog bestehen magnetorheologische Flüssigkeiten aus magnetisierbaren Metallpartikeln, die in einer Trägerflüssigkeit fein verteilt sind. Dieses Smart Material ist damit eine Suspension. Ein weiteres Beispiel stellen dielektrische Elastomere dar. Sie bestehen aus mehreren miteinander verbundenen Schichten, mindestens einer Elastomerschicht und zwei Elektrodenschichten. Damit ist der Komposit in diesem Fall ein Schichtverbund.

2.3 Mechanische Eigenschaften von Smart Materials

Große Unterschiede bestehen in den mechanischen Eigenschaften verschiedener Klassen von Smart Materials, die in diesem Buch in den nachfolgenden Kapiteln behandelt werden. An dieser Stelle wird nur auf die mechanischen Grundeigenschaften wie E-Modul und Dichte eingegangen. Während der E-Modul von keramischen Piezoelektrika wie Bleizirkonattitanat (PZT) und von metallischen Formgedächtnislegierungen wie Nickel-Titan (NiTi) im Bereich von einigen 10 GPa liegt, weisen polymere Piezoelektrika wie Polyvinylidendifluorid (PVDF) einen E-Modul von etwa 1 GPa auf. Demgegenüber kann der E-Modul von weichen Elastomermaterialien wie dielektrischen Elastomeren (DE) oder magnetorheologischen Elastomeren (MRE) auf Siliconbasis noch einmal um mehrere Größenordnungen niedriger ausfallen und sogar bei weniger als 1 MPa liegen. Geht man zu den noch weicheren fluiden Materialien wie magnetorheologischen Flüssigkeiten (MRF) über, so lässt sich ein E-Modul gar nicht mehr messen, da sich das Material im Grundzustand ohne angelegtes Magnetfeld mehr viskos als elastisch verhält. Dagegen entsteht bei der Aktivierung durchaus ein messbarer E-Modul, da sich die MRF im Magnetfeld versteift. Ähnliches gilt für magnetorheologische Elastomere, deren anfänglich geringer E-Modul im Magnetfeld ansteigt.

Auch die mechanischen Dichten der verschiedenen Klassen von Smart Materials fallen stark unterschiedlich aus. Die Polymer- bzw. Elastomer-basierten Materialien mit einer weitgehend organisch-chemischen Zusammensetzung weisen überwiegend Dichten im Bereich von etwa 1 g/cm^3 bis 2 g/cm^3 auf und eignen sich daher besonders für Anwendungen im Leichtbau. Lediglich die Dichte von magnetorheologischen Elastomeren kann wegen deren teilweise hohen Metallgehalten deutlich nach oben abweichen. Dagegen liegen die Dichten der Smart Materials mit keramischer und metallischer, d. h. anorganisch-chemischer Zusammensetzung in einem Bereich zwischen 5 g/cm^3 und 10 g/cm^3 . Tabelle 2.1 gibt einen groben Überblick über die E-Modul-Bereiche sowie über die Dichtebereiche verschiedener Klassen von Smart Materials. Dabei wird deutlich, dass die große Familie der Smart Materials bereits bei den mechanischen Eigenschaften sehr heterogen zusammengesetzt ist.

Tabelle 2.1 E-Modul-Bereiche sowie Dichtebereiche verschiedener Klassen von Smart Materials [2.1]

Materialklasse	Zusammensetzung	E-Modul [GPa]	Dichte [10^3 kg/m^3]
Piezokeramiken	Bleizirkonattitanat (PZT)	50 ... 70	7,6
Piezopolymere	Polyvinylidendifluorid (PVDF)	2,1 ... 2,5	1,78
Formgedächtnislegierungen	Nickel-Titan-Legierung	70 ... 110	6,45
Formgedächtnispolymere	Thermoplastisches Polyurethanelastomer	0,01 ... 10	1,18 ... 1,42
Magnetische Formgedächtnislegierungen	Nickel-Mangan-Gallium-Legierung	0,45 ... 0,82	8,36
Magnetostriktive Materialien	Terbium-Eisen-Dysprosium-Legierung	25 ... 65	9,15 ... 9,25
Dielektrische Elastomere	Siliconelastomer mit RuBelektroden	0,0001 ... 0,01	1,10 ... 1,15
Magnetorheologische Elastomere	Siliconelastomer mit Eisenpartikeln	0,0001 ... 0,01	2,0 ... 4,5
Magnetorheologische Flüssigkeiten	Mineralöl mit Eisenpartikeln	0	2,0 ... 4,5
Elektrorheologische Flüssigkeiten	Siliconöl mit Polymerpartikeln	0	1,0 ... 1,5

2.4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem einleitenden Kapitel wurden die Grundlagen der physikalischen Effekte, die Smart Materials zeigen und die in verschiedenen technischen Anwendungen genutzt werden können, in allgemeiner Form dargestellt. Außerdem wurde besprochen, in welchen Eigenschaften sich die aufgeführten Klassen von Smart Materials teilweise deutlich unterscheiden. Hier sind besonders die stoffliche Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften zu nennen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden nun die verschiedenen Klassen von Smart Materials einzeln vorgestellt. Dabei werden zunächst jeweils die Effekte erläutert, die die betreffende Materialklasse zeigt. Anschließend wird auf die stofflichen Aspekte eingegangen, d. h. es wird detaillierter dargestellt, woraus die betreffenden Smart Materials bestehen und wie sie hergestellt werden können. Daraufhin werden die wesentlichen aktiven Eigenschaften der Materialklasse beschrieben, aus denen sich die technisch nutzbaren Effekte ergeben. Soweit möglich, wird auch auf die Verbindung zwischen der chemischen Zusammensetzung des Materials und den sich daraus ergebenden Eigenschaften eingegangen. Es folgen mögliche Anwendungen der betreffenden Klassen von Smart Materials unter besonderer Berücksichtigung der von dem Material erzeugten Effekte. In diesem Zusammenhang werden auch einige Beispiele für Anwendungen aufgezeigt, die bereits zu kommerziellen Produkten geführt haben. Wichtig ist dabei auch die Kenntnis möglicher Einschränkungen, die die technische Nutzung des betreffenden Materials begrenzen. Am Schluss eines Kapitels wird jeweils eine Zusammenfassung gegeben, in der die wesentlichen Aspekte noch einmal hervorgehoben werden.

Literaturverzeichnis

- [2.1] H. P. Monner: Smart materials for active noise and vibration reduction. Novem – Noise and Vibration: Emerging Methods, Saint-Raphaël, France, 2005.

3 Piezokeramische Materialien

Heiko Atzrodt, Dr. Torsten Bartel, Dr. Sven Herold, Dr. William Kaal, Michael Matthias,
Dr. Jürgen Nuffer

3.1 Einleitung

Piezoelektrische keramische Materialien sind elektrisch nichtleitende Festkörper-Wandler, die aufgrund des piezoelektrischen Effektes mechanische in elektrische Energie bzw. elektrische in mechanische Energie wandeln können. Dementsprechend unterscheidet man zwischen dem direkten und dem indirekten piezoelektrischen Effekt.

Der direkte piezoelektrische Effekt bewirkt, dass die Deformation eines piezoelektrischen Materials, hervorgerufen durch eine auf das Material einwirkende mechanische Belastung, zur Generierung einer elektrischen Ladungstrennung führt. Ursache für dieses Verhalten ist die durch Verformung hervorgerufenen Bildung von Dipolen (die Verschiebung von Ladungsschwerpunkten) innerhalb der Elementarzellen piezoelektrischer keramischer Materialien, deren Aufsummierung über alle Elementarzellen zu einer makroskopisch messbaren elektrischen Spannung führt. Die Richtung dieser Spannung ist dabei abhängig von der Richtung (Druck oder Zug) der auf das Material einwirkenden mechanischen Beanspruchung. Dieser Effekt lässt sich sensorisch nutzen und ist Grundlage diverser Sensorprinzipien.

Der indirekte oder auch inverse piezoelektrische Effekt bewirkt, dass ein piezoelektrisches keramisches Material unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes deformiert wird. Hier bewirkt das elektrische Feld eine Verschiebung der Ladungsträger innerhalb der Elementarzelle (Bild 3.1). Die daraus entstehende Verformung ist proportional zum angelegten Feld und analog zum direkten Effekt richtungsabhängig vom Vorzeichen des elektrischen Feldes. Aufgrund dieses Effektes lassen sich mittels piezoelektrischer keramischer Materialien Aktoren aufbauen, welche die Grundlage vielfältiger Stellelemente und Antriebseinheiten sind [3.1].

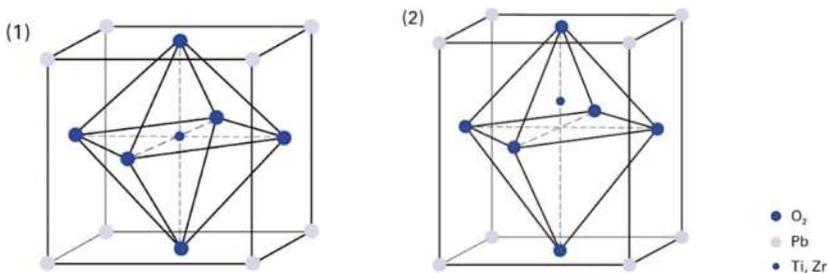


Bild 3.1 Deformation einer piezokeramischen Elementarzelle im elektrischen Feld. (Copyright PI Ceramic GmbH, [3.1])

Die piezoelektrischen Effekte wurden 1880 von den Brüdern Jaques und Pierre Curie an Turmalinkristallen entdeckt, die unter einer mechanischen Verformung eine elektrische Ladung auf der Materialoberfläche zeigten.

Wie bei allen Effekten, auf denen Festkörperwandler beruhen, ist der direkte und auch der indirekte piezoelektrische Effekt durch eine sehr hohe Reproduzierbarkeit gekennzeichnet und unterliegt innerhalb des nutzbaren Temperaturbereiches keiner Degradation. Aktoren und Sensoren auf Basis piezoelektrischer Materialien sind deshalb nahezu verschleißfrei und extrem

langlebig. Diese Eigenschaften sind ein Grund für ihre weite Verbreitung in kommerziellen Anwendungen und die vielfältigen Aktivitäten, um neue Anwendungsmöglichkeiten für diese Materialien zu erschließen.

3.2 Materialzusammensetzung und Struktur

Technisch verwertbare piezoelektrische Materialien sind in der Regel keramische Werkstoffe auf Basis des sog. PZT (Bleizirkonat-Titanat). In einigen, insbesondere sensorischen Anwendungen werden auch einkristalline piezoelektrische Materialien eingesetzt, auf die im Nachfolgenden jedoch nicht näher eingegangen wird. Der Grund für die technische Verwertbarkeit des PZT liegt in der wirtschaftlich realisierbaren Massenfertigung dieser Werkstoffe sowie der Möglichkeit, diese industriell einem standardisierten Polarisierungsverfahren zu unterwerfen, wodurch der Werkstoff erst seine makroskopischen piezoelektrischen Eigenschaften erhält. PZT besitzt eine sogenannte *Perowskitstruktur*. Perowskit-Kristalle haben kubische oder pseudokubische Symmetrie mit der allgemeinen chemischen Formel ABO_3 . In Bild 3.2a ist eine Einheitszelle dieser Struktur gezeigt.

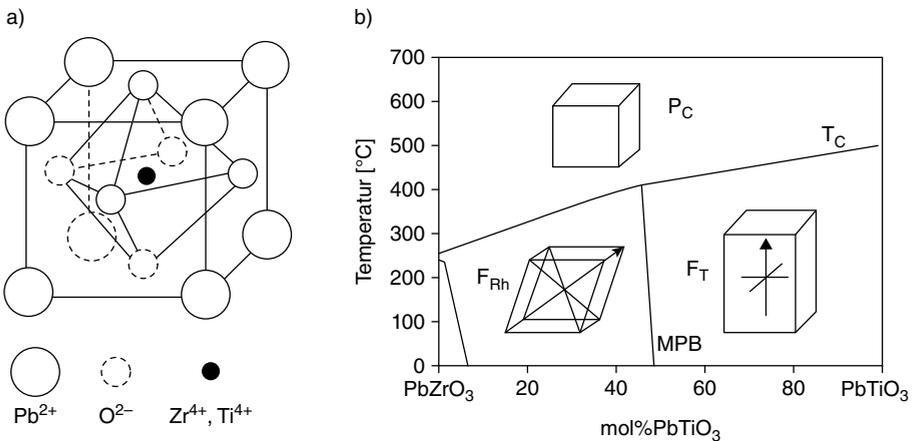


Bild 3.2 a) Kubische Einheitszelle der Perowskitstruktur des PZT oberhalb der Curie-Temperatur. b) Phasendiagramm des PZT nach [3.2]. Eingezeichnet sind die Lage des Vektors der spontanen Polarisation beider ferroelektrischer Phasen F_{Rh} und F_T , ebenso wie die morphotrope Phasengrenze (MPB) und der Verlauf der Curie-Temperatur T_C mit der Zusammensetzung. Oberhalb dieser Temperatur ist PZT paraelektrisch (P_C). (aus [3.3])

Am Zustandsdiagramm $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ nach Jaffe [3.2] (Bild 3.2b) kann man erkennen, dass es unterhalb der sogenannten Curie-Temperatur T_C zwei Modifikationen gibt, eine tetragonale F_T und eine rhomboedrische F_{Rh} . Oberhalb von T_C ist PZT kubisch und damit paraelektrisch (P_C). Beide ferroelektrischen Phasen werden durch einen schmalen Koexistenzbereich an der *morphotropen Phasengrenze* (MPB) voneinander getrennt. Materialzusammensetzungen im Bereich der MPB sind technisch wegen der hier erreichbaren Materialeigenschaften – wie z. B. hohe mögliche Dehnungen – von besonderem Interesse. Grundvoraussetzung für das Auftreten einer spontanen Polarisation in Kristallen ist eine sich ausbildende polare Symmetrie. Dazu betrachten wir die tetragonale Modifikation des PZT. In dieser Konfiguration kann das zentrale B-Kation aus thermodynamischen Gründen nicht mehr in der geometrischen Mitte (Schnittpunkt der Raumdiagonalen) der Einheitszelle bleiben (Bild 3.3).

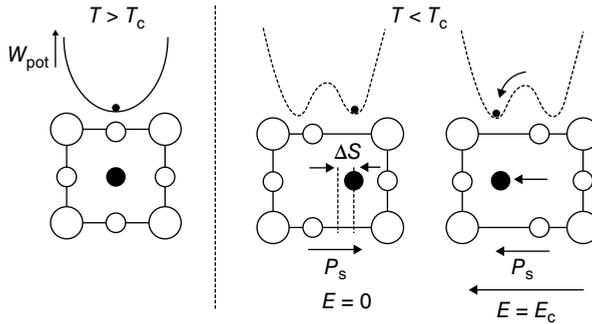


Bild 3.3 Schematische Darstellung zur Entstehung der spontanen Polarisation P_s und Dehnung ΔS in tetragonalem PZT beim Abkühlen unter die Curie-Temperatur. Für $T < T_c$ (rechte Seite) wird aus dem parabolischen Potential der kubischen Phase ($T > T_c$, linke Seite) eine Doppelmulde, sodass das Zentralion delokalisiert wird. Durch Anlegen eines Gegenfeldes mit einer Stärke oberhalb von E_c (der Koerzitivfeldstärke) wird der Polarisationsvektor um 180° gedreht. (aus [3.3])

Aus dieser Asymmetrie erklären sich die wesentlichen Eigenschaften piezoelektrischer Keramiken wie z. B. das Zustandekommen der Dehnung unter Anlegen eines Feldes (inverser Piezoeffekt) und Ladungsgenerierung durch mechanische Verformung (direkter Piezoeffekt), was im Folgenden weiter ausgeführt wird.

3.3 Materialeigenschaften

Piezoelektrisches Verhalten

Wie bereits beschrieben, reagieren piezoelektrische Materialien auf das Anlegen eines elektrischen Feldes mit einer Geometrieänderung, die technisch nutzbar ist (Aktoreffekt). Umgekehrt reagiert der Werkstoff auf Verformung mit einer messbaren Ladungsverschiebung (Sensoreffekt). Bild 3.4 illustriert schematische diese beiden wesentlichen Nutzungsformen.

Aus diesem Grund ergibt sich für den aktorischen Betrieb ein funktionaler Zusammenhang zwischen der angelegten elektrischen Spannung bzw. dem elektrischen Feld und der Dehnung.

In Bild 3.5 ist die Aktor-Dehnung S in Abhängigkeit von der angelegten elektrischen Feldstärke schematisch dargestellt. Wird der Aktor mit einer Feldstärke zwischen $E = 0$ und $E = E_{\max}$ angesteuert, spricht man vom unipolaren Betrieb. (Dabei ist $E_{\max} \approx 2 \cdot E_c$ mit der Koerzitivfeldstärke E_c .) Dies ist der technisch häufigste Anwendungsfall, da die Kennlinie hier die größte Linearität und die geringsten Hystereseanteile aufweist. Ebenfalls anzutreffen ist auch der sogenannte semi-bipolare Betrieb, bei dem bis zu einer geringen negativen Feldstärke angeregt wird. Die dadurch hinzugewonnene Dehnung ΔS wird durch größere Hysterese und damit verbundene Eigenerwärmung, höhere benötigte Ansteuerleistung und ggf. auch reduzierte Lebensdauer des Elements erkauft. Typische erreichbare Aktordehnungen liegen im Bereich von nur 0,1 %; diese geringen Dehnungen schließen Piezoaktoren von einigen Anwendungen aus.

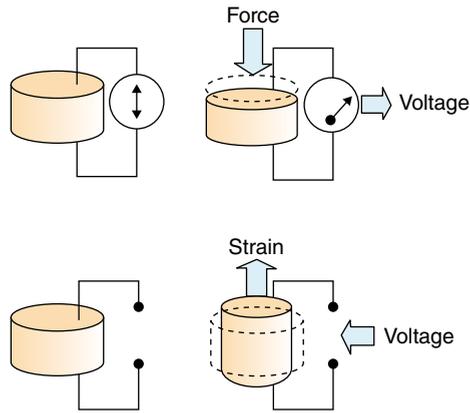


Bild 3.4 Direkter (oben) und indirekter (unten) piezoelektrischer Effekt. (Copyright Fraunhofer LBF)

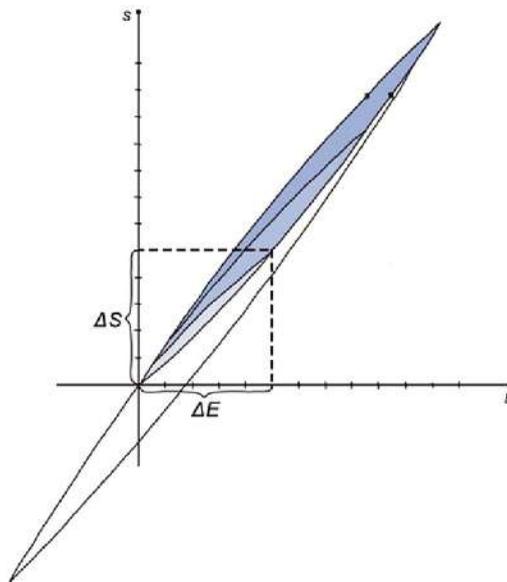


Bild 3.5 Dehnung S ferroelektrischer Piezokeramiken bei verschiedenen Ansteueramplituden des elektrischen Feldes E parallel zur Polarisationsrichtung. (Copyright PI Ceramic GmbH, [3.4])

Mechanische Eigenschaften

Sowohl bei Aktor- also auch bei Sensoranwendungen spielen die mechanischen Eigenschaften eine besondere Rolle bzgl. möglicher Anwendungsfelder. Piezokeramiken besitzen die für keramische Werkstoffe typischen mechanischen Eigenschaften wie ein relativ hoher E-Modul und eine geringe Bruchzähigkeit. Durch den hohen E-Modul können Piezokeramiken im aktorischen Betrieb sehr hohe Kräfte generieren, andererseits ergeben sich im sensorischen oder auch im generatorischen Betrieb («Energy Harvesting») Probleme bei der mechanischen Steifigkeitsanpassung durch die geringen Stellwege bei mechanischer Belastung. Tendenziell erreichen

Piezoelemente ihre optimale Performanz bei höheren Anregungsfrequenzen. Aufgrund des spröden Bruchverhaltens sind bei hohen mechanischen Belastungen besondere Vorkehrungen zu treffen, insbesondere zur Vermeidung von Querkräften. Darauf wird in Abschnitt 3.8 näher eingegangen.

Dielektrische Eigenschaften

In der technischen Umsetzung spielen neben den piezoelektrischen Eigenschaften auch die dielektrischen Eigenschaften eine Rolle. Geometrisch stellen Piezoelemente in den herkömmlichen Aktor- und Sensoranwendungen häufig Plattenkondensatoren dar, die das Piezomaterial als Dielektrikum enthalten. Die relative Dielektrizitätszahl des Piezomaterials ist daher eine wichtige Größe, die insbesondere bei der Dimensionierung von Verstärkerschaltungen berücksichtigt werden muss. Sie ist im uni- und semi-bipolaren Betrieb (s. o.) nahezu feldunabhängig und kann den Datenblättern der Hersteller entnommen werden.

Thermisches Verhalten

Grundsätzlich ist ein stabiler Betrieb eines Piezoelements aufgrund thermischer Depolarisationseffekte bis ca. zur Hälfte der Curie-Temperatur T_C möglich [3.5]; typische Werte für T_C liegen bei ca. 300–500 °C und sind stark abhängig von der Materialzusammensetzung. Um die piezokeramischen Materialien technisch anwendbar zu machen, werden diese in Form von Folienmodulen oder Mehrschichtaktoren zu standardisierten Bauformen vorkonfektioniert (siehe Abschnitt 3.8). Hierfür wird das piezokeramische Material mit unterschiedlichen Kunststoffen kombiniert. Dabei entstehen komplexere Werkstoffsysteme, bei denen die Einsatzgrenzen aufgrund der geringeren Temperaturbeständigkeit der als Matrixmaterialien oder als Verklebungen dienenden Kunststoffe deutlich niedriger liegen als die der piezokeramischen Materialien. Innerhalb der Einsatzgrenzen, die typischerweise bei –20 °C oder auch darunter beginnen, nehmen bei abnehmender Temperatur sowohl die remanente Dehnung als auch die Koerzitivfeldstärke sowie die absolute Länge des Piezoelements zu. Letzteres drückt sich in einem negativen Temperaturkoeffizienten aus. Die makroskopisch erreichbare Aktordehnung nimmt bei gegebener elektrischer Feldstärke mit abnehmender Temperatur ab.

3.4 Materialherstellung

Zur Herstellung von piezokeramischen Materialien (beispielsweise PZT, Bleizirkonat-Titanat) wird aus den Grundstoffen – hier Bleioxid, Zirkonoxid und Titanoxid – durch Mischen, Mahlen, Kalzinieren und Vorsintern ein homogenes und rieselfähiges Keramikpulver (Granulat) hergestellt. Dieses Pulver wird in einer Presse unter hohem Druck zu einem zylindrischen Formkörper (Grünling) verpresst. Der Formkörper wird anschließend bei Temperaturen von bis zu 1300 °C zu einem festen monolithischen Keramikblock versintert [3.6].

Mittels mechanischer Bearbeitungsverfahren wie Trennsägen, Schleifen etc. wird der Keramikblock in einzelne Keramikscheiben geschnitten. Durch die gewählte Schichtdicke legt man in diesem Bearbeitungsschritt fest, mit welcher Ansteuerspannung der herzustellende Aktor betrieben werden muss. Üblich sind PZT-Schichtdicken von 0,5 mm und 0,1 mm. Bei einer für PZT zur Ansteuerung üblichen Feldstärke von 2000 V/mm ergibt sich bei 0,5 mm dicken Schichten eine Ansteuerspannung von 1000 V (Hochvoltaktoren) und bei 0,1 mm dicken Schichten eine Ansteuerspannung von 200 V (Niedervoltaktoren).

Auf diese Keramikscheiben werden mittels Siebdruck- oder PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition bzw. Sputtern) beidseitig Elektrodenschichten aus einem Edelmetall wie Silber oder Platin aufgebracht und anschließend bei Temperaturen von ca. 800 °C in die Oberfläche eingebrannt. Die Schichtdicke der Elektrode beträgt je nach Verfahren zwischen 1 und 10 µm.

Nach dem Herstellungsprozess werden die Keramikscheiben polarisiert. Hierzu sind Feldstärken von bis zu 4000 V/mm üblich. Nach der Polarisation führt das erneute Anlegen eines Feldes unterhalb der Polarisationsfeldstärke zu einer Ausdehnung der Keramik.

Die polarisierten Keramikscheiben können anschließend als einlagige Aktormodule verwendet oder durch Aufstapeln und Verkleben zu Mehrschichtaktoren bzw. Stapelaktoren beliebiger Höhe weiterverarbeitet werden (Bild 3.6).



Bild 3.6 Aus einzelnen piezokeramischen Scheiben aufgebaute Stapelaktoren. (Copyright PI Ceramic GmbH, [3.6])

Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung individuell anpassbarer Aktoren, hat sich jedoch für die Serienfertigung preiswerter Aktoren als zu aufwendig herausgestellt. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass die minimal realisierbare Dicke der piezokeramischen Einzelschichten oft zu groß ist. Wie zuvor dargestellt, benötigt das Material mit einer Schichtdicke von 0,1 mm bei einer Feldstärke von 2000 V/mm zur vollständigen Aktivierung Ansteuerspannungen von bis zu 200 V. Für viele mögliche Anwendungen ist dieser Spannungsbereich zu hoch.

Aus diesem Grund wurde ein Herstellungsverfahren zur Serienfertigung piezokeramischer Aktoren entwickelt, welches die Möglichkeit bietet, die Schichtdicken zu reduzieren und die notwendigen Ansteuerspannungen herabzusetzen.

Bei dem sogenannten Multilayer-Cofiring-Verfahren wird das pulverförmige Ausgangsmaterial mit einem Bindemittel vermischt und zu einer dünnen Schicht vergossen. Diese Schicht wird bei niedrigen Temperaturen getrocknet (Grünzustand) und anschließend mit Elektroden bedruckt. Diese Einzelfolien werden auf die geforderte Aktorgröße gestapelt und in einem einzigen Prozessschritt versintert. Anschließend werden aus diesem Keramikblock einzelnen Aktoren herausgeschnitten und polarisiert (Bild 3.7).



Bild 3.7 Piezokeramische Multilayer-Aktoren. (Copyright PI Ceramic GmbH)

Auf diese Weise lassen sich kostengünstige piezokeramische Aktoren mit Schichtdicken von unter 0,1 mm realisieren, die mit Ansteuerspannungen von ca. 150 V betrieben werden können.

3.5 Materialvariabilität, mögliche Anpassbarkeit von Eigenschaften für spezielle Anwendungen

Wie zuvor beschrieben, hängen die piezo- und ferroelektrischen Eigenschaften von der Kristallstruktur des PZT ab, die sich wiederum durch das Zr-Ti-Verhältnis variieren lässt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Eigenschaften von PZT-Keramiken durch den Einbau von Dotierstoffen in das Perowskitgitter zu beeinflussen.

Im Ergebnis entstehen als wichtigste Ableger des undotierten PZT sogenannte weiche und harte PZT-Keramiken. Diese Termini beziehen sich nicht auf die mechanischen, sondern auf die ferroelektrischen Eigenschaften.

Weiche Keramiken haben ein kleines E_c und sind leicht zu polarisieren, bei harten Keramiken ist es umgekehrt. PZT-Keramiken, die mithilfe von Donator-Ionen dotiert sind, zeigen «weichere» piezo- und ferroelektrische Eigenschaften wie z. B. moderate Dielektrizitätskonstanten und geringere Koerzitivfeldstärken sowie hohe Piezokonstanten und hohe Kopplungsfaktoren. Die Bedeutung der piezoelektrischen Konstanten wird später erläutert. Der Kopplungsfaktor beschreibt die Eigenschaft des piezokeramischen Elementes, elektrische in mechanische bzw. mechanische in elektrische Energie zu wandeln. Weiche PZT-Materialien kommen daher insbesondere in aktori-schen Anwendungen zum Einsatz, aber auch in Beschleunigungsaufnehmern und elektroakustischen Anwendungen wie Tonabnehmern. Durch Akzeptor-Dotierungen können «harte» PZT-Keramiken hergestellt werden.

Harte PZT-Keramiken haben eine erhöhte Koerzitivfeldstärke und sind damit schwieriger zu polen. Damit zeigen sie aber auch eine erhöhte mechanische Depolarisationsfestigkeit und damit eine geringere mechanisch induzierte Degradation des makroskopischen Piezoeffekts. Darüber hinaus haben diese Keramiken nur geringe hysteretische Verluste und eine hohe Konstanz der Eigenschaften auch unter hoher Belastung. Das klassische Anwendungsfeld sol-

cher harten Keramiken sind daher resonant betriebene Hochleistungsapplikationen wie z. B. Ultraschallgeber. Weiterführende Informationen zum Thema Dotierung und Substitution finden sich z. B. in [3.7].

3.6 Langzeitverhalten und Recycling

3.6.1 Langzeitverhalten

Das Langzeitverhalten von Piezokeramiken wird von den beiden Effekten Alterung und Degradation bestimmt. Unter Alterung versteht man die Änderung der Eigenschaften mit der Zeit ohne Einfluss der Betriebsbelastung (*on the shelf-Verhalten*). Die Alterungsrate folgt einem logarithmischen Zeitgesetz und ist u. a. stark von der Zusammensetzung des Materials und der Verarbeitung abhängig.

Unter Degradation wird die Abnahme der Performanz unter zyklischer Aufprägung der elektromechanischen Belastung sowie ggf. der Umweltbedingungen verstanden. Anhand des Vielschichtaktors werden einige mögliche Fehlerbilder, die im Langzeitbetrieb auftreten können, beschrieben. Bild 3.8 fasst schematisch einige Schädigungsmechanismen zusammen und ordnet diese der Anwendung und der damit verbundenen Art der elektrischen Anregung zu.

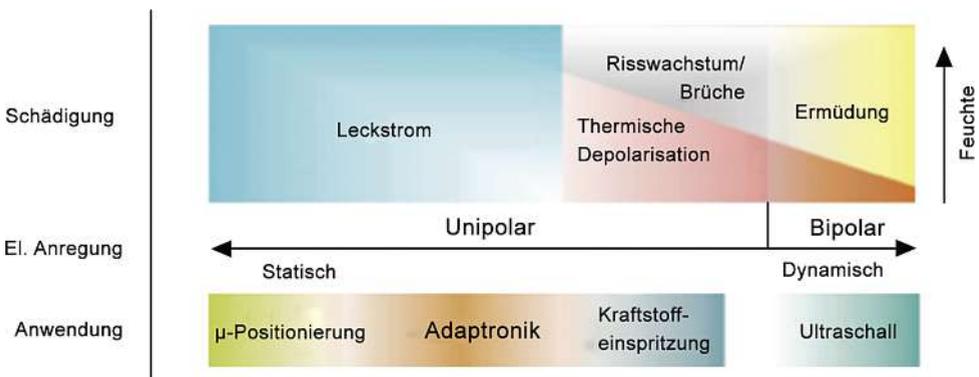


Bild 3.8 Schematische Darstellung möglicher Fehlermechanismen in Vielschichtaktoren in Abhängigkeit von der elektrischen Anregung, aufgeteilt in statische/dynamische und unipolare/bipolare Anregung und zugeordnete Anwendungsfelder sowie Einfluss der Umweltbedingungen (Feuchte). (aus [3.8])

Ermüdung

Im aktorischen Betrieb kann unter elektrischer Wechselfeld-Ansteuerung ferroelektrische Ermüdung auftreten, worunter eine mit fortschreitender Zyklenzahl abnehmende erreichbare Dehnung (Aktorhub) oder dielektrische Polarisation zu verstehen ist. Die Ausprägung dieses Effekts hängt stark von der Art der Ansteuerung ab [3.9]. Die Ermüdung nimmt mit zunehmender elektrischer Feldamplitude und zunehmendem Gegenfeld (semi-bipolare Ansteuerung, vgl. Abschnitt 3.3) zu (Bild 3.9). Wenn das Gegenfeld denselben Betrag wie die positive Feldamplitude erreicht hat, spricht man vom bipolaren Betrieb, was zur raschesten Degradation führt. Rein unipolare Belastung hingegen führt zu keiner nennenswerten Ermüdung. Diese spielt somit im Standardfall der unipolaren

Ansteuerung, die bei den meisten Anwendungen verwendet wird, in der Praxis eine untergeordnete Rolle.

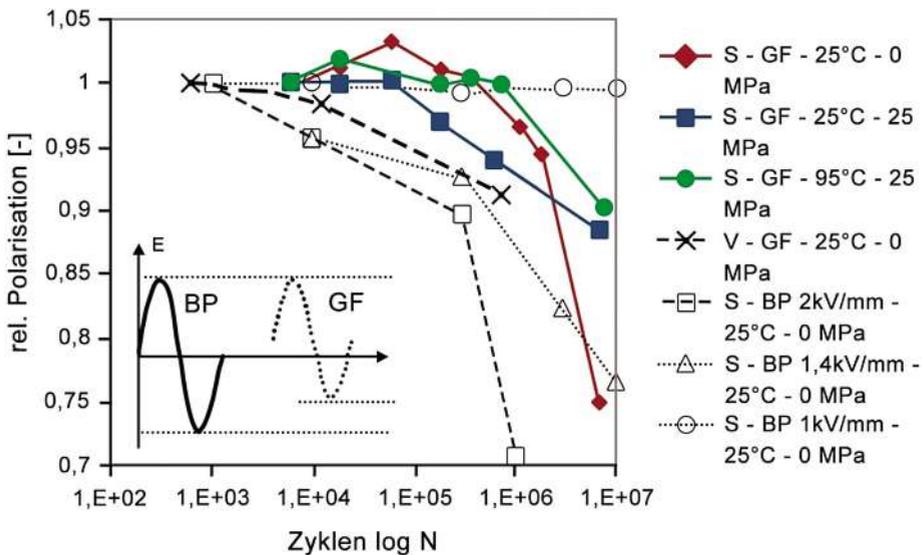


Bild 3.9 Änderung der generierten Polarisationswerte mit der Zyklenzahl bei unterschiedlichen mechanischen Vorspannungen. S: Scheibenprobe, V: Vielschichtaktor. GF: Gegenfeldansteuerung (volle Symbole), BP: Bipolare Ansteuerung (offene Symbole). (aus [3.10])

Risswachstum und Bruch

In bestimmten Designs des Vielschichtaktors treten Rissbildung und -wachstum auf. In Bild 3.10 ist schematisch ein Querschnitt durch einen Vielschichtaktor gezeigt. Im Kantenbereich erzeugt die Kammstruktur der zueinander etwas versetzten Elektroden einen inaktiven Keramikbereich, was zu einer Dehnungsinkompatibilität zum aktiven Materialbereich und damit zunächst zur Mikrorissbildung führt [3.11]. Dieser Prozess ist in der Regel unkritisch, allerdings können diese Risse so lange weiterwachsen, bis ein makroskopischer Bruch oder ein Durchschlagspfad zur benachbarten Elektrode entsteht. In beiden Fällen ist in der Regel der Ausfall des Aktors die Folge. Ob dies geschieht, ist insbesondere abhängig von der Höhe der mechanischen Belastung und dem konkreten Design des Aktors.

Thermische Depolarisation

In manchen Anwendungen wie z.B. der Dieseleinspritzung oder bei Klopfensoren (nahe am Motorraum) können externe Temperaturen von weit über 100°C erreicht werden, die dann mit der aus intrinsischer Energiedissipation herrührenden Temperaturerhöhung überlagern. In diesem Fall können lokal im Aktor kritische Werte von über der halben Curie-Temperatur erreicht werden, was zur lokalen Depolarisation und damit zur Beeinträchtigung des Betriebs führt. Im weiteren Verlauf können auch irreversible Schädigungen des Aktors die Folge sein.

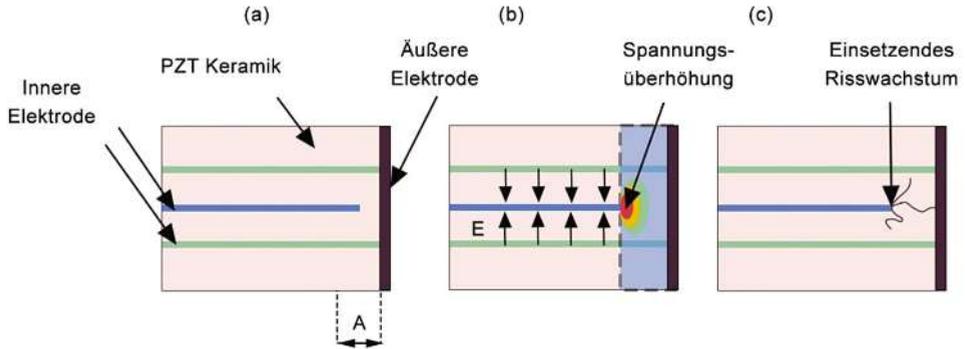


Bild 3.10 Schematische Darstellung des Mikrorisswachstums. a) Randbereich eines Vielschichtaktors mit Abstand A , b) durch Einwirken des elektrischen Feldes E kommt es zu Spannungserhöhungen am Ende der innenliegenden Elektrode, c) Risswachstum setzt ein. (aus [3.8])

Leckstrom

Unter dem Überbegriff des Leckstroms ist ein Fehlerszenario subsummiert, das sich dadurch äußert, dass der normalerweise hohe intrinsische ohmsche Widerstand der Piezokeramik abnimmt. Dadurch steigt der Leckstromanteil und bewirkt aufgrund der fortschreitenden lokalen Erwärmung des Piezomaterials die Bildung eines leitfähigen Pfades, bis schließlich ein elektrischer Durchschlag mit Zerstörung des Aktors erfolgt. Dies äußert sich auch vorzeitig durch einen starken Anstieg der Leistungsabgabe der Treiberelektronik. Zum Auftreten dieses Fehlerbildes muss ein nicht zu vernachlässigender Gleichfeldanteil in der elektrischen Anregung enthalten sein. Das ist bei unipolarer Ansteuerung der Fall, und je niederfrequenter diese Ansteuerung ist, desto stärker tritt der Effekt zutage. Insbesondere bei niederfrequenten Anwendungsgebieten, wie z. B. der aktiven Schwingungsreduktion, hat dieser Mechanismus eine vergleichsweise hohe Relevanz. Stark abhängig ist dieser Mechanismus zudem von Umweltbedingungen, insbesondere der Umgebungsfuchte [3.12]. Bild 3.11 zeigt diesen Zusammenhang anhand von exemplarischen Messungen.

Zuverlässigkeitsorientiertes Design

Auftreten und Ausprägung der oben skizzierten Fehler hängt stark von dem Anwendungsszenario und den Umgebungsbedingungen ab. Deswegen wurden verschiedene Anstrengungen unternommen, piezokeramische Systeme gegen diese Degradationsmechanismen durch entsprechendes Design zu schützen und somit trotz widriger Einsatzbedingungen hohe Lebensdauern zu erreichen. Bei Stapelaktoren werden makroskopische Rissbildung und mechanische Zerstörung grundsätzlich durch eine mechanische Einhausung verhindert. Ausfälle durch mechanische Zerstörung sind somit bei Einhalten der spezifizierten Einsatzgrenzen selten zu erwarten. Der Mechanismus der Leckstrombildung ist nach wie vor ein Thema der Forschung und beschäftigt auch die Hersteller. Es wurde gezeigt, dass der durch Feuchteangriff an den Elektrodenkanten beginnende Degradationsmechanismus durch ein spezielles Design des Stapelaktors minimiert und die Lebensdauer deutlich gesteigert werden kann [3.13]. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Lebensdauer vom konkreten Design des Aktors und von den Umweltbedingungen ist es stets ratsam, die beabsichtigte Anwendung des Piezoelements eingehend mit dem Hersteller zu besprechen, speziell dann, wenn es sich nicht um eine Anwendung handelt, zu der es bereits

erprobte Systemdesign-Richtlinien gibt. Die Hersteller haben sehr weitreichende Erfahrung mit ihren Piezoelementen bzgl. deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

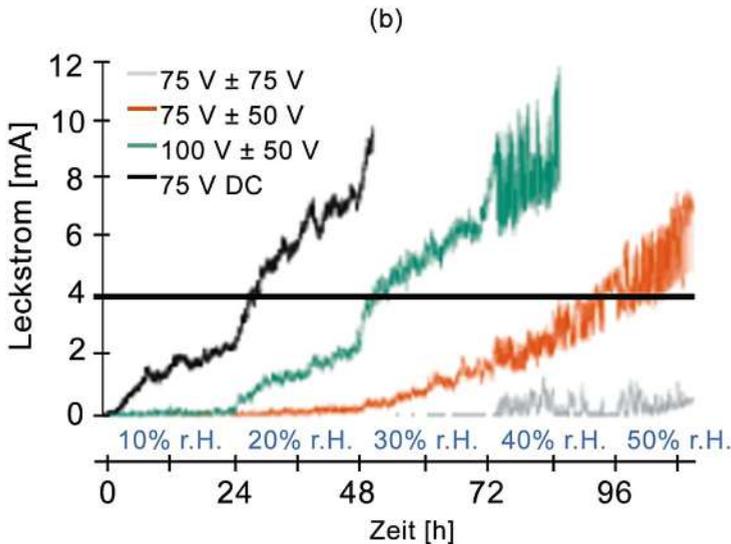


Bild 3.11 Zunahme des Leckstroms unter verschiedenen Ansteuerungen bei stufenweise zunehmender Feuchte. Mit zunehmendem DC-Anteil nimmt die Zeit bis zum Einsetzen des Leckstroms und zum Erreichen des maximal zulässigen Grenzwertes ab, hier der gängige Wert von 4 mA. (aus [3.8])

3.6.2 Recycling

Da PZT Blei enthält, welches bekanntermaßen toxisch und umweltbelastend ist, bestanden seit jeher Bedenken bzgl. des Recyclings. Maßgeblich für den Umgang mit PZT in Europa ist die RoHS-Richtlinie (**R**estriction **o**f (the use of certain) **H**azardous **S**ubstances) der Europäischen Union (EU). Diese bezeichnet zusammenfassend die EU-Richtlinie 2011/65/E4 zum Verbot bestimmter Substanzen bei der Herstellung und Verarbeitung von elektrischen und elektronischen Geräten und Bauteilen sowie die jeweilige Umsetzung in nationales Recht. Sie verbietet seit dem Juli 2006 die Verwendung bestimmter Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten [3.14]. Allerdings sind hierfür einige Ausnahmen formuliert worden, die sinngemäß und vereinfachend ausgedrückt besagen, dass bestimmte Stoffe trotz RoHS solange zulässig sind, wie keine vergleichbare und unbedenklichere Alternative gefunden wird. Das betrifft aktuell auch PZT gemäß der Anhänge III und IV dieser Richtlinie [3.15]. Allerdings müssen diese Ausnahmen immer wieder neu beantragt und genehmigt werden. Da aktuell weitgehende Bemühungen im Gange sind, PZT durch bleifreie Keramiken zu ersetzen, ist zu erwarten, dass in Zukunft die bestehende Ausnahmeregelung nicht verlängert wird und somit PZT nicht mehr verwendet werden darf. Da hiervon zunächst die Endanwender und damit die Entsorger betroffen wären, indirekt aber auch die Hersteller, informieren Hersteller von Piezoelementen über *RoHS Statements* über den aktuellen legalen Status ihrer Produkte [3.14], [3.15].

3.7 Aktorwirkung

3.7.1 Aktorisch relevante Zustände

Wie bereits dargestellt, wird die aktorische Wirkung piezoelektrischer Materialien als inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Infolge eines induzierten elektrischen Feldes in einem piezoelektrischen Material ergibt sich eine Verformung.

Im aktorischen Betrieb existieren, wie im sensorischen Betrieb, mehrere technisch relevante Effekte. So muss zwischen Longitudinal- (d_{33}), Transversal- (d_{31}) und Schereffekt (d_{15}) unterschieden werden. Die Effekte unterscheiden sich durch die Richtungsvektoren des elektrischen Feldes und der resultierenden Dehnung des piezoelektrischen Materials. Die Indizes richten sich nach der sog. Voigt'schen Notation. Die Effekte (Wirkmodi) sind schematisch in Bild 3.12 dargestellt [3.5].

Der piezoelektrische Effekt kann dabei durch piezoelektrische Konstanten quantifiziert werden, wobei häufig die piezoelektrische Ladungskonstante d verwendet wird, die das Verhältnis von erzeugter Ladung bei anliegender Kraft bzw. die Längenänderung bei anliegender Spannung angibt. Für die Einheit gilt also $[d] = \frac{C}{N} = \frac{m}{V}$. Bei Piezokeramiken liegt der Wert für den Longitudinal- und den Transversaleffekt in der Regel bei einigen $100 \frac{pC}{N}$.

Die aktorisch bedeutsamen Größen sind hierbei die mechanische Dehnung \mathbf{S} in Abhängigkeit von einem äußeren elektrischen Feld \mathbf{E} und einer mechanischen Spannung \mathbf{T} . Dabei ergibt sich die Dehnung eines elektrisch ($E = \text{const.}$) und mechanisch ($T = \text{const.}$) freien, nicht gegen eine äußere Kraft wirkenden Piezoelementes wie folgt:

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \cdot \mathbf{T} + \mathbf{d} \cdot \mathbf{E} \quad (3.1)$$

Die Matrizen \mathbf{S} und \mathbf{T} sind 6×1 -Vektoren der Dehnungen und Spannungen, \mathbf{s}^E ist die 6×6 -Matrix der Nachgiebigkeiten, \mathbf{d} die 6×3 -Matrix der piezoelektrischen Koeffizienten für alle genannten Effekte und \mathbf{E} der 3×1 -Vektor der elektrischen Feldstärke.

Je nach Anwendung werden einzelne oder auch mehrere Modi kombiniert, wobei üblicherweise jeweils ein Aktor nur eine Wirkrichtung benutzt. Longitudinal- und Transversaleffekte treten jedoch stets gemeinsam auf.

Bei der Ansteuerung eines unbelasteten Aktors treten eine freie Verformung Δl_0 und die sog. Blockierkraft F_B in Abhängigkeit von der Aktorsteifigkeit c_A^E auf. Die Blockierkraft entspricht der maximal möglichen Kraft des Aktors. Die freie Verformung wiederum ergibt sich aus dem Produkt der piezoelektrischen Ladungskonstanten d_{ka} sowie der Aktorlänge l und der elektrischen Feldstärke E_k .

$$F_B = c_A^E \cdot \Delta l_0 \quad (3.2)$$

$$\Delta l_0 = d_{ka} \cdot l \cdot E_k \quad (3.3)$$

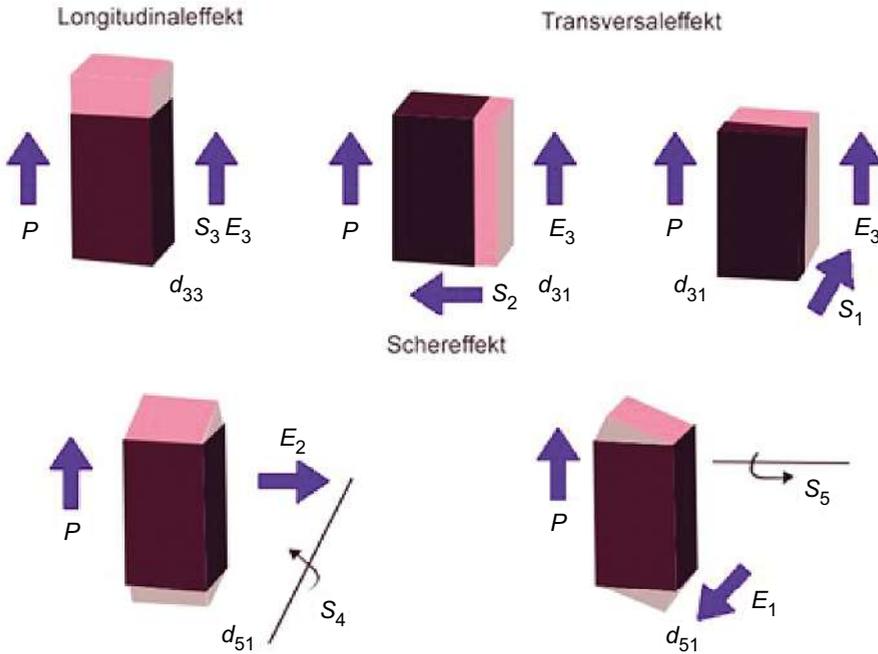


Bild 3.12 Technisch relevante Wirkmodi von piezoelektrischen Aktoren. (Copyright Fraunhofer LBF)

Arbeitet der Aktor gegen eine äußere Kraft, nimmt die Verformung ab, während die Blockierkraft nicht überschritten werden kann. Die aktorisch produzierbare Kraft F_a beim Arbeiten gegen eine Feder mit konstanter Federsteifigkeit c_f errechnet sich aus der Blockierkraft sowie dem Steifigkeitsverhältnis aus Aktor und Feder.

$$F_a = c_A^E \cdot \Delta l_0 \cdot \left(1 - \frac{c_A^E}{c_A^E + c_f}\right) \quad (3.4)$$

$$F_a = F_B \cdot \left(1 - \frac{c_A^E}{c_A^E + c_f}\right) \quad (3.5)$$

Die erreichbare Verformung Δl reduziert sich somit auf:

$$\Delta l = \Delta l_0 \cdot \left(1 - \frac{c_A^E}{c_A^E + c_f}\right) \quad (3.6)$$

3.7.2 Ansteuerung von Piezoaktoren

Für die Korrelation der Ansteuerspannung eines Aktors mit seiner Ausdehnung über einen definierten Lade-/Entladevorgang innerhalb eines bestimmten Spannungsbereiches ergibt sich eine Hystereseurve (Bild 3.13). Die genaue Kurvenform hängt dabei vom applizierten Spannungshub ab. Dargestellt ist hier die Kurve für einen offenen Kreis, d. h. der Piezoaktor ist elektrisch mit einem unendlich hohen Widerstand angeschlossen, im Gegensatz zum geschlossenen Kreis, bei dem der Piezoaktor als kurzgeschlossen betrachtet wird. Üblicherweise können Piezoaktoren bis ca. 10 % der maximalen Spannung auch durch eine umgepolte Spannung beaufschlagt werden, wodurch eine Verkürzung des Aktors erreicht wird. Durch Beaufschlagungen von Spannungen außerhalb der entsprechenden Spezifikationen sinkt in der Regel die Lebensdauer des Aktors.

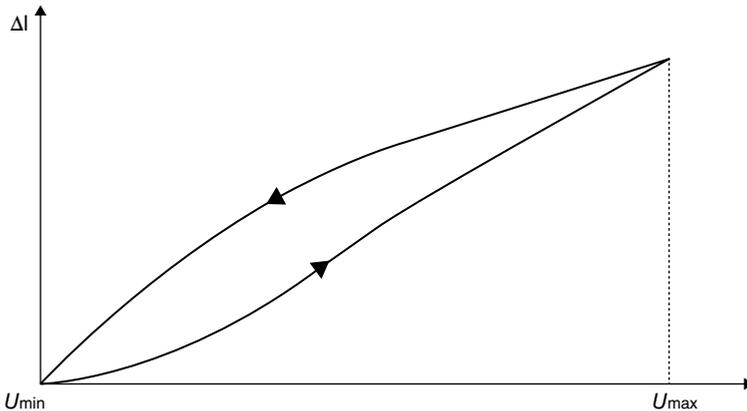


Bild 3.13 Qualitatives Spannungs-Weg-Diagramm bei Durchlaufen des Spannungsbereiches U_{min} bis U_{max} und zurück. (Copyright Fraunhofer LBF)

Arbeitet der Aktor gegen eine äußere Kraft, verschiebt sich die Hystereseurve in einen Bereich niedrigerer Dehnung Δl . Die genaue Form der Hystereseurve hängt u. a. von der Zyklusdauer ab und ist umso ausgeprägter (d. h. die eingeschlossene Fläche in Bild 3.13 wird größer) je länger ein Lade- Entladezyklus andauert. Bei nichtzyklischer Ansteuerung ergibt die wiederholte Ansteuerung mit einer Betriebsspannung (open-loop) eine Ungenauigkeit von Δl von ca. 10 %. Daher wird oft eine Ladungs- oder Stromregelung in die Ansteuerung eingebracht, wodurch die Genauigkeit auf ca. 1 % verbessert werden kann. Durch den Einsatz von Stapelaktoren in Kombination mit einer Positionsregelung erreicht man zudem theoretisch Auflösungen im Picometerbereich. [3.16]

Klein- und Großsignalverhalten

Das gezeigte ausgeprägte Hystereseverhalten ist erst bei elektrischen Feldstärken $> 200 \text{ V/mm}$ zu beobachten und aufgrund seiner Nichtlinearität aktorisch relevant. Der Betriebsbereich $< 200 \text{ V/mm}$ wird als *Kleinsignalbereich* bezeichnet und ergibt eine annähernd lineare Kennlinie. Aktorisch bedeutsame Betriebsfeldstärken liegen im Bereich von 1,5 bis $2,0 \text{ kV/mm}$, die als *Großsignalbetrieb* bezeichnet werden. In diesem Bereich steigt die mechanische Dehnung amplitude mit dem elektrischen Steuerfeld nichtlinear an und es zeigt sich beim zyklischen Durchlaufen eines Spannungsbereiches die in Bild 3.13 dargestellte Hysterese, da dielektrische Verluste stark zunehmen [3.17].

Temperaturverhalten

Die Kalibrierung von Piezoaktoren erfolgt üblicherweise bei einer angegebenen Betriebstemperatur. Bei erhöhten Temperaturen zeigt sich neben der Wärmedehnung der Aktormaterialien auch eine Zunahme der Aktorkapazität. Bei Erreichen der aktorspezifischen Curie-Temperatur ab ca. 150 °C tritt eine Entpolarisierung auf. Bei gängigen Betriebstemperaturen werden bis zu 20 % der elektrischen Ansteuerleistung in Wärme umgesetzt. Aufgrund der schlechten Wärmeleitung vieler Aktoren und nichtlinearer ferroelektrischer Phänomene der Wärmeumsetzung werden herstellereitig dynamische Lastfälle definiert, um eine Entpolarisierung innerhalb des Aktors im Betrieb zu vermeiden. Es existieren verschiedene Sonderbauformen für den Einsatz bei hoher Dynamik, bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt oder auch für Anwendungen im Vakuum. [3.16]

Mögliche Verfahren zur Ansteuerung von Piezoaktoren sind die

- Spannungssteuerung,
- Stromsteuerung,
- Ladungssteuerung,
- Energiesteuerung,
- Ansteuerung über inverse Modelle.

Die erreichbare Genauigkeit sowie das Drift- und Dynamikverhalten werden wesentlich durch die Art und Qualität der Regelstrecke bestimmt.

Spannungssteuerung

Üblicherweise wird die Ansteuerung über die Regelung der angelegten Spannung realisiert. Hierfür sind entsprechend hohe Ströme erforderlich. Die durch mechanische Lasten erzeugten Ladungen fließen über die Spannungsquelle ab, um die Aktorspannung konstant zu halten.

Stromsteuerung

Die Proportionalität von Spannung und Auslenkung zeigt sich näherungsweise auch in den entsprechend abgeleiteten Größen Strom und Geschwindigkeit, die ebenfalls proportional zueinander sind. Der Zusammenhang von Strom und Geschwindigkeit ist dabei quasi hysteresefrei. Soll die Geschwindigkeit eines Aktors geregelt werden, kann dies daher über eine Stromsteuerung realisiert werden.

Ladungssteuerung

Der Zusammenhang zwischen Weg und Ladung ist abhängig von der Belastung des Aktors (konstante Kraft oder Federkraft), eine Steuerung über die Ladung ist vor allem in quasistatischen Fällen relevant. Zusätzlich ist eine Spannungsregelung vorzusehen, um Drifts in unzulässige Bereiche zu vermeiden.

Energiesteuerung

Erfolgt die Ansteuerung über einen definierten Zwischenspeicher wie einen Kondensator, spricht man im Allgemeinen von einer Energiesteuerung. Die eigentliche Ansteuerung kann als Mischform der anderen Verfahren zur Ansteuerung verstanden werden.