

Klaus Kuhnen

---

# **Kompensation komplexer gedächtnisbehafteter Nichtlinearitäten in Systemen mit aktiven Materialien**

---

Grundlagen - Erweiterte Methoden - Anwendungen

Habilitationsschrift, Universität des Saarlandes

Tag des wissenschaftlichen Vortrags und des Kolloquiums: 04. Mai 2007

Gutachter:

Prof. Dr. Hartmut Janocha  
Lehrstuhl für Prozessautomatisierung, Universität des Saarlandes

Prof. Dr. Andreas Kugi  
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, TU Wien

Prof. Dr. Martin Brokate  
Lehrstuhl für numerische Mathematik und Steuerungstheorie, TU München

**Dr.-Ing. Klaus Kuhnen**

Robert Bosch GmbH  
Zentralbereich für Forschung und Vorausentwicklung  
Angewandte Forschung 2  
Elektrodynamik und Antriebstechnik (CR/ARE3)  
Robert-Bosch-Platz 1  
D-70839 Gerlingen-Schillerhöhe

**E-mail:** klaus.kuhnen@de.bosch.com

war bis Ende 2006 wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA) der Universität des Saarlandes und ist seit Beginn 2007 bei der Robert Bosch GmbH in der zentralen Forschung tätig. Seine Arbeitsgebiete sind die Festkörperaktorik und -sensorik sowie die Modellbildung, Identifikation und Steuerung von Systemen und Antrieben mit aktiven Materialien. Zu seinen Forschungsinteressen gehören außerdem die adaptive Steuerungs- und Regelungstechnik.

**Anschrift:**

Riegeläckerstraße 10  
D-71229 Leonberg/Warmbronn

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

**Klaus Kuhnen**

**Kompensation komplexer  
gedächtnisbehafteter Nichtlinearitäten  
in Systemen mit aktiven Materialien**

Grundlagen - Erweiterte Methoden - Anwendungen

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Habil.-Schr., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7610-2

ISSN 0945-1005

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Meinen Eltern  
in Erinnerung



# Vorwort

Systematische Entwurfsverfahren für Kompensatoren zur Linearisierung *komplexer gedächtnisbehafteter Materialnichtlinearitäten (Hysterese, Kriechen)* sind in der ingenieurwissenschaftlichen Forschung noch verhältnismäßig neu und als Folge davon in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung nahezu unbekannt. Dies steht im krassen Gegensatz zu ihrer Bedeutung und Leistungsfähigkeit in modernen Steuerungs- und Signalverarbeitungskonzepten für Systeme mit aktiven Materialien. Andererseits existiert ein gut ausgebauter mathematischer Apparat zur systematischen Behandlung skalarer hysteresebehafteter Nichtlinearitäten. Dieser Fundus an Grundlagenliteratur [KP89,Vis94,BS96,Kre96,Pes89,BS00] ist jedoch selbst für ausgebildete Ingenieure nur wenig nutzbar, da der durch die Strenge der Darstellung bedingte mathematische Formalismus häufig den Blick für die technisch nutzbaren Aspekte verstellt. Die wenigen ingenieurgerechten Darstellungen richten ihre Aufmerksamkeit nahezu ausschließlich auf den sogenannten Preisach Hystereseoperator [Pre35,May91,May06,Ber98,Del99] oder den dazu verwandten, aber stärker thermodynamisch motivierten Ansatz von [Smi05]. Diese sind aufgrund ihrer hohen Flexibilität für die Modellierung von komplexen hysteresebehafteten Nichtlinearitäten in großer Breite einsetzbar. Allerdings führt die hohe Modellkomplexität und die Tatsache, dass die zugehörige Inverse im allgemeinen numerisch berechnet werden muss, dazu, dass die genannten Methoden für den Einsatz in echtzeitfähigen Kompensatoren weniger gut geeignet sind, als beispielsweise der sehr viel einfacher strukturierte Prandtl-Ishlinskii Hystereseoperator [KP89,BS96,Kre96].

Eine methodisch orientierte, auf die für den Kompensatorentwurf wichtige Invertierung ausgerichtete und für Ingenieure gut lesbare Darstellung solcher Nichtlinearitäten war mir zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Buches nicht bekannt. Basierend auf den in [Kuh01] dokumentierten Vorarbeiten entstand aus dieser Situation heraus die Idee, die mathematischen Methoden zur Behandlung von skalaren gedächtnisbehafteten Nichtlinearitäten in ingenieurwissenschaftlich verständlicher Form aufzubereiten und zu automatisierbaren Entwurfsverfahren für echtzeitfähige Kompensatoren weiterzuentwickeln. Das Ergebnis dieser Bemühungen besteht aus drei Teilen, die derzeit an der Universität des Saarlandes im Fachbereich Mechatronik von mir als zweisemestrige Lehrveranstaltung angeboten werden.

Im *ersten* Teil werden die mathematischen Grundlagen zur Behandlung skalarer gedächtnisloser sowie hysteresebehafteter Nichtlinearitäten vorgestellt und darauf aufbauend die mathematischen Verfahren zur Synthese entsprechender Kompensatoren auf der Basis gemessener Ausgang-Eingang Charakteristiken erarbeitet. Im *zweiten* Teil werden diese Syntheseverfahren um die Berücksichtigung von instationären Kriechprozessen erweitert und so modifiziert, dass sie im Rahmen von selbsteinstellenden und adaptiven Kompensationssteuerungen für komplexe gedächtnisbehaftete Nichtlinearitäten eingesetzt werden können. Im *dritten* Teil wird

das praktische Einsatzpotential der Entwurfsverfahren an praktischen Beispielen aus dem Bereich der Aktorik und Sensorik mit aktiven Materialien aufgezeigt.

Der Teil *Grundlagen* besteht aus fünf Kapiteln. Zum Einstieg werden im *ersten* Kapitel die Eigenschaften der in Aktoren und Sensoren auftretenden Arten ratenunabhängiger Nichtlinearitäten kurz vorgestellt und anhand grundlegender Strukturen (Parallel-, Reihen- und Kreisstruktur) Möglichkeiten zur Kompensation solcher Nichtlinearitäten aufgezeigt sowie ihre Vor- und Nachteile diskutiert. Der zweite Teil dieses einführenden Kapitels widmet sich einer zweiten zentralen Fragestellung, nämlich wie aus gemessenen Daten des Ausgangs- und Eingangssignals eines Übertragungssystems die Parameter eines gegebenen Modells oder eines Kompensators des Übertragungssystems bestimmt werden können. Dieser Prozess wird als Modellparameteridentifikation bezeichnet und ist ein integraler Bestandteil eines jeden rechnergestützten Syntheseprozesses, der auf realen Messdaten der Steuerstrecke aufbaut. Das *zweite* Kapitel basiert im Wesentlichen auf den Ergebnissen in [Kuh01] und behandelt ein Off-line Syntheseverfahren zur Nachbildung und Kompensation gedächtnisloser skalarer Nichtlinearitäten, das in den nachfolgenden Kapiteln intensiv als grundlegendes Modellbildungswerkzeug eingesetzt wird. Das *dritte* Kapitel baut mit der Definition der grundlegenden mathematischen Eigenschaften skalarer hysteresehafteter Nichtlinearitäten auf den in [BS96, KP89, Vis94] vermittelten Grundlagen auf und formuliert für die nachfolgenden Kapitel die minimalen Anforderungen (Madelung'sche Regeln, Kreuzungseigenschaft, Invertierbarkeit, Thermodynamische Konsistenz) an ein Hysteresemodell für die Kompensatorsynthese bei Aktoren und Sensoren aus aktiven Materialien. Das *vierte* Kapitel widmet sich der ersten großen Klasse von Hystereseoperatoren, den Operatoren mit lokalem Gedächtnis. Der Duhemoperator [Vis94] ist in der Literatur weitverbreitet und bestimmt daher den ersten Teil dieses Kapitels. Er dient in vielen unterschiedlichen Ingenieurdisziplinen als Modell für nichtlineare Effekte wie beispielsweise ratenunabhängige Reibung in mechanischen Systemen [Dah75, Alt99], ferromagnetische und ferroelektrische Effekte in Festkörperaktoren und -sensoren [AK00, SO00, DC99, Smi98] und Plastizitätseffekte in mechanischen Werkstoffen [NK99]. Der zweite Teil dieses Kapitels behandelt die sogenannten Hysterons und ist in großen Teilen an die Originalliteratur [KP89] angelehnt. Obwohl Hysterons auch unmittelbar zur Modellierung von Hystereseeffekten eingesetzt werden, ein wichtiges Beispiel hierfür ist das ratenunabhängige Reibmodell von Dahl [Bli92], besteht ihr wesentlicher Wert aber darin, dass sie im Unterschied zum Duhemoperator die drei Madelung'schen Regeln erfüllen. So lassen sich aus ihnen auf einfache Art und Weise komplexe hysteresehaftete Nichtlinearitäten konstruieren, die diese wünschenswerte Eigenschaft ebenfalls besitzen. Das *fünfte* Kapitel beschäftigt sich mit der zweiten großen Klasse von Hystereseoperatoren, den Operatoren mit komplexem Gedächtnis. Ausgehend vom Preisachgedächtnis werden in diesem Kapitel Off-line Entwurfsverfahren für schwellwertdiskrete Approximationen und den dazugehörigen Kompensatoren aus der Klasse der Prandtl-Ishlinskii Hystereseoperatoren, der modifizierten Prandtl-Ishlinskii Hystereseoperatoren und der Preisach Hystereseoperato-

ren vorgestellt. Die Verfahren für die beiden erstgenannten Operatortypen gehen in weiten Teilen auf die Arbeiten in [Kuh01] zurück. Das Verfahren für die Klasse der Preisachoperatoren hingegen basiert im Unterschied zu der üblichen Darstellung in der Literatur [May91,WL98] auf der Darstellung von Krejci [Kre89a,BS96] und verwendet eine neuartige Parametrierung der dazugehörigen schwellwertdiskreten Approximation [KJ06a].

Der Teil *erweiterte Methoden* beginnt mit dem *sechsten* Kapitel, das die Erweiterung der Entwurfsverfahren um instationäre Kriechprozesse, wie sie verstärkt bei den technologisch wichtigen piezoelektrischen Keramiken auftreten, behandelt. Auch in diesem Kapitel gehen die Erweiterungen für die Prandtl-Ishlinskii Methode und die modifizierte Prandtl-Ishlinskii Methode im Wesentlichen auf die Arbeiten in [Kuh01] zurück. Die Erweiterung für die Preisach Methode hingegen ist ein Ergebnis der Arbeiten in [KK06b]. Das *siebente* Kapitel präsentiert, basierend auf den Entwurfsverfahren im fünften Kapitel, ein Syntheseverfahren für Kompensatoren von parameterabhängigen, hysteresebehafteten Nichtlinearitäten vom Preisachtyp [Kuh06]. Diese lassen sich immer dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Hysteresecharakteristiken aktiver Materialien wesentlich von einer zweiten externen Einflussgröße wie beispielsweise der mechanischen Belastung oder auch der Temperatur abhängen. Im *achten* Kapitel werden die Randbedingungen und Anforderungen für den Betrieb selbststellender Kompensatoren formuliert und die sich daraus ergebenden Kompensatorstrukturen vorgestellt. Diese bestehen im Wesentlichen aus den Off-line Kompensatorstrukturen und den Transformationsabbildungen zur Berechnung der Kompensatorparameter aus dem Grundlagenteil und einer On-line Identifikation zur Bestimmung der Fehlermodellparameter aus den Messwerten der Steuerstrecke. Das *neunte* Kapitel befasst sich mit der On-line Identifikation von verallgemeinerten linearen Fehlermodellen in konvexen Polyedern und basiert auf der in [NZ96] ausführlich behandelten Theorie gewöhnlicher Differentialgleichungen mit Projektionsmechanismus für nichtglatte Berandungen. Eine Anpassung und Weiterentwicklung dieser Theorie zur Lösung des On-line Identifikationsproblems ist in [KK04] dokumentiert und stellt einen wesentlichen Beitrag der Arbeiten zu diesem Buch dar. Aufbauend auf der On-line Identifikation werden dann im *zehnten* Kapitel zwei On-line Kompensatoren als hybride Systeme formuliert, wobei die Kompensatorsynthese bei der ersten Realisierung rein zeitgesteuert abläuft und im Prinzip für alle im Grundlagenteil behandelten Nichtlinearitäten einsetzbar ist. Bei der zweiten Realisierung läuft die Kompensatorsynthese ereignisgesteuert ab. Sie ist vornehmlich für die Kompensation von zwei identischen Nichtlinearitäten in einer Parallelstruktur geeignet.

Der Teil *Anwendungen* besteht aus fünf Kapiteln. Zur Motivation der nachfolgenden Kapitel gibt das *elfte* Kapitel einen Überblick über typische Anwendungsbeispiele für mechatronische Systeme mit aktiven Materialien aus der Praxis. Diese Beispiele sind in der Originalliteratur [Dyb86,KJ04,JK06,FM02, KP06,NK06, Swi04,KT05,KJ06] wesentlich detaillierter ausgeführt und daher dem interessierten Leser als weiterführende Lektüre empfohlen. Im *zwölften* Kapitel wird am Beispiel eines Wandlers aus magnetostruktivem Werkstoff und piezoelektrischer

Keramik die Vorgehensweise zur operatorbasierten Modellbildung von Aktoren und Sensoren auf der Basis aktiver Materialien behandelt. Im *dreizehnten* Kapitel, das einen Auszug der Originalarbeiten [Kuh01,KJ04,JK06] darstellt, wird am Beispiel eines einachsigen piezoelektrischen Positioniersystems demonstriert, wie mit Hilfe der im Grundlagenteil entwickelten Methoden die notwendigen Steuerungs- und Signalverarbeitungskomponenten erzeugt werden können, um sogenannte Self-sensing Festkörperaktoren auch im praktisch relevanten Großsignalbetrieb zu realisieren. Gegenstand des *vierzehnten* Kapitels ist die Entwicklung von geeigneten Steuerungskonzepten zur Realisierung eines magnetostriktiven Hilfsmassedämpfers für den semiaktiven, aktiven und aktiv-semiaktiven Betrieb. Es handelt sich bei diesem Kapitel um eine erweiterte Fassung der Originalarbeit [KP06]. Während in den Anwendungen des dreizehnten und vierzehnten Kapitels die Off-line Syntheseverfahren des Grundlagenteils zum Zuge kommen, wird im *fünfzehnten* Kapitel ein neuartiges Steuerungskonzept für ein zweiachsiges, parallelkinematisches Mikropositioniersystem aus piezoelektrischen Keramiken abgeleitet. Dieser Beitrag kombiniert in raffinierter Weise optimale Steuerungsmethoden der linearen Zustandsraumtheorie für strukturdynamische Systeme mit den im Erweiterungsteil behandelten selbststellenden Kompensatoren für komplexe gedächtnisbehafte Nichtlinearitäten.

Obwohl das Buch einen ausgeprägten mathematischen Charakter besitzt, stand die mathematische Strenge bei der Gestaltung des Textes nicht an erster Stelle. Dies ist schon daran zu erkennen, dass die für die mathematische Literatur typische Satz-Beweis-Struktur hier nicht auftaucht. Auch werden an einigen Stellen Theoreme verwendet, ohne dazu einen Beweis zu führen. Allerdings wurde darauf geachtet, an diesen Stellen die Originalliteratur zu zitieren, um dem interessierten Leser die Möglichkeit zu geben, sich intensiver mit den mathematischen Grundlagen zu befassen. Zudem wurde ein logischer Aufbau angestrebt und darauf geachtet, dass die wesentlichen Schlussfolgerungen leicht nachvollziehbar sind. Dazu werden neben ausführlichen Herleitungen auch anschauliche Beispiele angegeben, die zugunsten einer besseren Lesbarkeit des Textes in ihrer Schriftgröße etwas vom eigentlichen Haupttext abgesetzt sind. Obwohl die Anwendung der Methoden erst Gegenstand des Anwendungsteils ist, werden die entwickelten Entwurfsverfahren schon im Grundlagenteil anhand von einfachen Beispielen aus dem Bereich der Aktorik und Sensorik mit aktiven Materialien veranschaulicht.

Das Buch ist zum Selbststudium geeignet und richtet sich an interessierte Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften im Hauptstudium sowie berufstätige Ingenieure, Physiker und Forscher, die auf diesem und/oder benachbarten Gebieten tätig sind. Vorausgesetzt werden Grundlagenkenntnisse über lineare Algebra, gewöhnliche Differentialgleichungen und die grundlegenden Konzepte der linearen System- und Signaltheorie (Laplacetransformation, Fouriertransformation, Zustandsraummethodik), wie sie üblicherweise im Rahmen der mathematischen Vorlesungen im Grundstudium und der Grundlagenvorlesungen über Regelungstechnik im Hauptstudium vermittelt werden.

Zum Schluss möchte ich die Gelegenheit wahrnehmen, allen jenen Personen zu danken, die zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben. An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank meinem Mentor und Leiter des Lehrstuhls für Prozessautomatisierung Prof. Hartmut Janocha, der mir in vorbildlicher Weise die Unterstützung zukommen lies, die zur Durchführung und zum Gelingen der Arbeiten notwendig war. Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Prof. Hartmut Janocha, Prof. Andreas Kugi und Prof. Martin Brokate für die Erstellung der Gutachten. Mein besonderer Dank gilt auch Dr. Pavel Krejci vom Weierstraß Institut für Angewandte Mathematik und Stochastik (WIAS) in Berlin, der in enger Kooperation mit mir große Teile des mathematischen Fundamentes der hier behandelten Methoden gelegt hat. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei Prof. Jürgen Sprekels und Prof. Hartmut Janocha dafür bedanken, dass sie mir die Möglichkeit gaben, diese Kooperation im Rahmen meiner Forschungsaufenthalte am WIAS zu intensivieren. Besonders danken möchte ich auch meinen Kollegen Dott.-Ing. Pietro Pagliarulo und B.Sc. Chris May für ihren Beitrag zum vierzehnten Kapitel des Anwendungsteils sowie Dipl.-Ing. Denis Pesotski für seine unermüdliche Arbeit bei der Entwicklung und dem Aufbau eines FPGA-basierten Steuerrechners zur Realisierung der hier behandelten Steuerungs- und Signalverarbeitungsmethoden in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Besonders danken möchte ich auch Prof. Andreas Kugi und Dipl.-Ing. Daniel Thull für die zahlreichen anregenden Diskussionen im Rahmen unserer Kooperation über piezoelektrische Biegegewandler. Darüber hinaus gilt mein Dank auch meinen aktuellen und ehemaligen Arbeitskollegen für das angenehme Betriebsklima während meiner Zeit am Lehrstuhl. Ein besonderes Anliegen ist mir der Dank an meine Kollegen Frank Bruckmann und Julius Scherthan aus der mechanischen Werkstatt sowie Manfred Rachor und Marianeh Rezaei aus der elektrischen Werkstatt, die mit ihrem vorbildlichen Einsatz bei der Realisierung der Laboraufbauten und Prototypen einen ganz wesentlichen Beitrag zu den hier dokumentierten Ergebnissen geliefert haben. Danken möchte ich außerdem Petra Detemple für die Anfertigung einiger Zeichnungen im Anwendungsteil.

Saarbrücken, August 2008

Klaus Kuhnen



# Inhaltsverzeichnis

## Teil I: Grundlagen

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Sensoren und Aktoren als Übertragungsglieder	2
1.2	Kompensation von Sensor- und Aktornichtlinearitäten	10
1.2.1	Parallelstruktur	10
1.2.2	Kettenstruktur	13
1.2.3	Kreisstruktur	14
1.2.4	Ketten-Kreisstruktur	16
1.2.5	Ketten-Parallelstruktur	16
1.2.6	Ketten-Kreis-Parallelstruktur	17
1.2.7	Bemerkungen	18
1.3	Grundlagen der Modell- und Filtersynthese	21
1.3.1	Modellparameteridentifikation und Optimierung	23
1.3.2	Nichtlineare, konvexe und quadratische Programme	27
1.3.3	Lineare Fehlermodelle und quadratische Programme	31
1.3.4	Bedingungen für hinreichende Anregung des Fehlersystems	33
<b>2</b>	<b>Skalare gedächtnislose Nichtlinearitäten</b>	<b>35</b>
2.1	Prandtl-Ishlinskii Superpositionsoperator	37
2.1.1	Neukurve	38
2.1.2	Schwellwertdiskrete Approximation	39
2.1.3	Monotonieeigenschaften und Invertierbarkeit	42
2.1.4	Invertierung	43
2.1.5	Vektorielle Notation	48
2.1.6	Identifikation und Kompensatorsynthese	50
	Anhang zum 2. Kapitel	55
A2.1	Bestimmung des Approximationsfehlers für $S$	55

A2.2	Lipschitz-Stetigkeit von $S_\delta$	57
<b>3</b>	<b>Skalare hysteresebehaftete Nichtlinearitäten</b>	<b>59</b>
3.1	Eigenschaften hysteresebehafteter Nichtlinearitäten	62
3.1.1	Ratenunabhängiges Verzweigungsverhalten	63
3.1.2	Speichereigenschaften und Gedächtnisstruktur	64
3.1.3	Auslöscheigenschaft und Madelung'sche Regeln	69
3.1.4	Monotonieeigenschaften und Invertierbarkeit	71
3.1.5	Thermodynamische Konsistenz	73
<b>4</b>	<b>Hystereseoperatoren mit lokalem Gedächtnis</b>	<b>77</b>
4.1	Ratenunabhängige Differentialgleichungen	77
4.1.1	Geometrische Interpretation	78
4.1.2	Verzweigungscharakteristik	79
4.2	Duhemoperator	79
4.2.1	Geometrische Interpretation	80
4.2.2	Verzweigungscharakteristik und Madelung'sche Regeln	82
4.2.3	Invertierung	83
4.3	Hysterons	86
4.3.1	Axiome des Hysterons	86
4.3.2	Differentielle Formulierung	89
4.3.3	Geometrische Interpretation	90
4.3.4	Verzweigungscharakteristik und Madelung'sche Regeln	92
4.3.5	Invertierung	94
4.4	Elementare Hysterons	97
4.4.1	Gewöhnlicher Playoperator	97
4.4.2	Nichtlinearer Playoperator	99
4.4.3	Verallgemeinerter Playoperator	100
4.4.4	Gewöhnlicher Stopoperator	104
4.4.5	Relayoperator	104
<b>5</b>	<b>Hystereseoperatoren mit komplexem Gedächtnis</b>	<b>107</b>
5.1	Hystereseoperatoren mit Preisachgedächtnis	107

---

5.1.1	Geometrische Interpretation	108
5.1.2	Zustandsminimale Darstellung	114
5.2	Prandtl-Ishlinskii-Hystereseeoperator	115
5.2.1	Neukurve	116
5.2.2	Masing-Eigenschaft	117
5.2.3	Schwellwertdiskrete Approximation	120
5.2.4	Monotoniebedingungen	122
5.2.5	Thermodynamische Konsistenz	123
5.2.6	Invertierung	125
5.2.7	Vektorielle Notation	131
5.2.8	Identifikation und Kompensatorsynthese	133
5.3	Modifizierter Prandtl-Ishlinskii Hystereseeoperator	137
5.3.1	Neukurve	138
5.3.2	Schwellwertdiskrete Approximation	138
5.3.3	Monotoniebedingungen	139
5.3.4	Thermodynamische Konsistenz	139
5.3.5	Invertierung	140
5.3.6	Identifikation und Kompensatorsynthese	141
5.4	Preisach Hystereseeoperator	146
5.4.1	Neukurve	148
5.4.2	Kongruenz-Eigenschaft	149
5.4.3	Schwellwertdiskrete Approximation	151
5.4.4	Monotoniebedingungen	154
5.4.5	Thermodynamische Konsistenz	156
5.4.6	Invertierung	158
5.4.7	Vektorielle Notation	159
5.4.8	Identifikation und Kompensatorsynthese	162
	Anhang zum 5. Kapitel	166
A5.1	Bestimmung des Approximationsfehlers für $H$	166
A5.2	Bestimmung des Approximationsfehlers für $R$	169

## Teil II: Erweiterte Methoden

<b>6 Skalare Kriecherweiterungen</b>	<b>175</b>
6.1 Elementares Kriechen	177
6.1.1 Elementarer linearer Kriechoperator	178
6.1.2 Elementarer schwellwertbehafteter Kriechoperator	180
6.2 $\text{Log}(t)$ -Kriechen	183
6.2.1 $\text{Log}(t)$ -Kriechoperatoren	183
6.2.2 Asymptotisches Verhalten	185
6.2.3 Vektorielle Notation	186
6.3 Komplexes Kriechen	186
6.3.1 Prandtl-Ishlinskii Kriechoperator	186
6.3.2 Asymptotisches Verhalten	187
6.3.3 Thermodynamische Konsistenz	188
6.3.4 Vektorielle Notation	189
6.3.5 Preisach Kriechoperator	190
6.3.6 Asymptotisches Verhalten	191
6.3.7 Thermodynamische Konsistenz	191
6.3.8 Vektorielle Notation	195
6.4 Konsistente Kriecherweiterungen	196
6.4.1 Kompensatoren für konsistente Kriecherweiterungen	197
6.4.2 Prandtl-Ishlinskii Kriecherweiterung	198
6.4.3 Modifizierte Prandtl-Ishlinskii Kriecherweiterung	200
6.4.4 Preisach Kriecherweiterung	201
6.5 Identifikation der Kriecherweiterungen	202
6.5.1 Identifikation der Prandtl-Ishlinskii Kriecherweiterung	203
6.5.2 Identifikation der mod. Prandtl-Ishlinskii Kriecherweiterung	208
6.5.3 Identifikation der Preisach Kriecherweiterung	213
Anhang zum 6. Kapitel	217
A6.1 Bestimmung des Approximationsfehlers für $K$	217

---

A6.2	Bestimmung des Approximationsfehlers für $C$	220
<b>7</b>	<b>Parameterabhängige Erweiterungen</b>	<b>231</b>
7.1	Parameterabhängige Preisacherweiterung	232
7.1.1	Monotoniebedingungen	233
7.1.2	Numerische Kompensation	237
<b>8</b>	<b>Aufbau selbsteinstellender Kompensatoren</b>	<b>243</b>
8.1	Randbedingungen und Anforderungen	243
8.2	Einfluss der Parallelstruktur	249
<b>9</b>	<b>Identifikationsverfahren für lineare Fehlersysteme mit nichtglatten Parameterbeschränkungen</b>	<b>253</b>
9.1	Unbeschränkte quadratische Optimierung	257
9.1.1	Optimalitätsbedingung	257
9.1.2	Differentialgleichung mit Gradientenvektorfeld	258
9.2	Quadratische Optimierung in konvexen Polyedern	260
9.2.1	Optimalitätsbedingung	260
9.2.2	Projektionsabbildungen	262
9.2.3	Differentialgleichung mit projiziertem Gradientenvektorfeld	264
9.2.4	Vektorieller Stopoperator mit polyhedraler Charakteristik	265
9.2.5	Operatordifferentialgleichung mit Lipschitz-stetiger rechter Seite	267
9.2.6	Stabilitätsverhalten	268
9.2.7	Robustheit gegenüber Störungen	269
9.2.8	Modifikationen für Robustheit gegenüber Störungen	272
9.2.9	Numerische Integration	275
9.2.10	Projektionsabbildung $Q$ bei regulärer Matrix $U_E$	278
	Anhang zum 9. Kapitel	287
A9.1	Bestimmung des Fehlersignals $d_S$ für $S$	291
A9.2	Bestimmung des Fehlersignals $d_H$ für $H$	292
A9.3	Bestimmung des Fehlersignals $d_M$ für $M$	294
A9.4	Bestimmung des Fehlersignals $d_R$ für $R$	296

A9.5	Bestimmung des Fehlersignals $d_{HK}$ für $H_K$	298
A9.6	Bestimmung des Fehlersignals $d_{MK}$ für $M_K$	301
A9.7	Bestimmung des Fehlersignals $d_{RC}$ für $R_C$	306
<b>10</b>	<b>On-line Kompensation</b>	<b>311</b>
10.1	On-line Kompensation ohne Schwellwertanpassung	311
10.1.1	Übergeordnete Ablaufsteuerung	311
10.1.2	Rücksetzbarer Zeitgeber	315
10.1.3	Kompensatorgleichungen	316
10.1.4	Offset-Schätzung im verallgemeinerten Fehlermodell	319
10.2	On-line Kompensation mit Schwellwertanpassung	331
10.2.1	Erzeugung der Steuerereignisse	331
10.2.2	Übergeordnete Ablaufsteuerung	333
10.2.3	Schwellwertanpassung	334
10.2.4	Kompensatorgleichungen	338
<b>Teil III: Anwendungen</b>		
<b>11</b>	<b>Systeme mit aktiven Materialien</b>	<b>349</b>
11.1	Einspritzventil mit Festkörperaktoren	350
11.2	Adaptronischer Hilfsmassedämpfer	351
11.3	Paralleles piezoelektrisches Positioniersystem	353
11.4	Aktive Vibrationsdämpfung mit verteilten Aktoren	355
11.5	Piezoelektrischer Biegebalken	357
11.6	Gliederung des Anwendungsteils	359
<b>12</b>	<b>Festkörperwandler</b>	<b>361</b>
12.1	Magnetostriktiver Wandler	361
12.1.1	Spontane und induzierte Magnetisierung	361
12.1.2	Magnetische Domänenprozesse und Magnetostriktion	362
12.1.3	Bauform, Arbeitsbereich und Arbeitspunkteinstellung	364

---

12.1.4	Experimentelle Strukturanalyse	368
12.1.5	Modellierung der Querempfindlichkeit	376
12.2	Piezoelektrischer Wandler	382
12.2.1	Spontane und induzierte Polarisierung	382
12.2.2	Ferroelektrizität und elektrische Domänenprozesse	384
12.2.3	Bauform, Arbeitsbereich und Arbeitspunkteinstellung	387
12.2.4	Experimentelle Strukturanalyse	391
12.2.5	Modellierung der Querempfindlichkeit	402
<b>13</b>	<b>Self-sensing Festkörperaktoren</b>	<b>407</b>
13.1	Verallgemeinertes Self-sensing Modell	408
13.2	Verallgemeinertes Self-sensing Konzept	409
13.3	Mess- und Ansteuerelektronik	414
13.3.1	Messkreis für Spannung und Polarisationsladung	414
13.3.2	Ansteuerelektronik für piezoelektrische Festkörperwandler	418
13.3.3	Messkreis für Strom und magnetischen Fluss	422
13.3.4	Ansteuerelektronik für magnetostruktive Festkörperwandler	424
13.4	Piezoelektrisches Self-sensing Positioniersystem	427
<b>14</b>	<b>Magnetostruktiver Hilfsmassedämpfer</b>	<b>433</b>
14.1	Schwingungskompensation durch Gegenkrafteinleitung	433
14.2	Passiver Hilfsmassedämpfer	436
14.3	Semiaktiver Hilfsmassedämpfer	439
14.3.1	Ladungsverstärker	442
14.3.2	Leistungsstromquelle	445
14.3.3	Hysteresekompensation	447
14.3.4	Aktive Feder und aktiver Dämpfer	448
14.3.5	Wegübersetzung	450
14.3.6	Semiaktiver Betrieb	457
14.4	Aktiver Hilfsmassedämpfer	461
14.4.1	Beschleunigungssensor	461
14.4.2	Kraftkompensation in geschlossener Wirkungskette	464

---

14.5	Gekoppelt aktiv-semiaktiver Hilfsmassedämpfer	468
14.6	Messergebnisse	470
<b>15</b>	<b>Paralleles piezoelektrisches Positioniersystem</b>	<b>477</b>
15.1	Modellierung der Steuerstrecke	477
15.1.1	Piezoelektrische Antriebseinheit	477
15.1.2	Mechanik	479
15.1.3	Berücksichtigung des Differenzbetriebs	483
15.1.4	Modellierung und Identifikation der Aktornichtlinearitäten	486
15.1.5	Modellierung der Strukturdynamik	488
15.1.6	Identifikation der Strukturdynamik im Frequenzbereich	493
15.1.7	Strukturdynamik des piezoelektrischen Positioniersystems	498
15.2	Steuerungskonzept	500
15.2.1	Kompensation der Strukturdynamik	404
15.2.2	Kompensation der Aktornichtlinearitäten	511
15.2.3	Simulation der erreichbaren Kompensationswirkung	511
15.3	Messergebnisse	517
15.3.1	On-line Kompensation der Aktornichtlinearitäten	519
15.3.2	Rechteckbetrieb	528
15.3.3	Stepperbetrieb	534
	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>539</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>543</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>555</b>