

***Rafal Król***

***Eine Reduktionsmethode zur Ableitung  
elektromechanischer Ersatzmodelle für  
piezoelektrische Wandler unter  
Verwendung der Finite-Elemente-  
Methode (FEM)***

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2011

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Gestaltung: Rafal Król

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG  
Druck · Buch · Verlag  
Münster

Printed in Germany

## Geleitwort

Piezelektrische Systeme finden sich in vielen Bereichen der Technik als Sensor, Generator, Aktor oder Transformator. Oft spielt dabei das dynamische Verhalten eine große Rolle und eine wichtige Aufgabe besteht darin, geeignete Ersatzmodelle zu entwickeln, mit denen die wichtigsten Merkmale im dynamischen Betrieb beschrieben werden können.

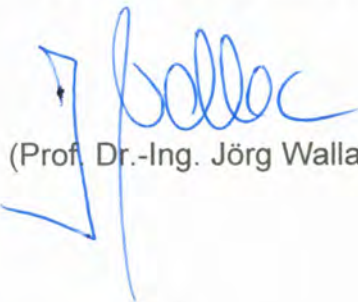
Als leistungsfähiges Werkzeug findet die Methode der Finiten Elemente breiten Einsatz in der Praxis. Die dabei generierten Ersatzmodelle haben jedoch meist eine sehr große Anzahl an Freiheitsgraden und stellen hohe Anforderungen an die Rechenleistung, so dass sie bei vielen Anwendungen, wie z.B. bei der Regelung oder Online-Überwachung, nicht - oder nur sehr begrenzt - eingesetzt werden können.

Herr Król beschreibt in seiner Dissertation ein Verfahren zur systematischen Reduktion großer Finite Elemente Modelle auf einfache Ersatzmodelle mit wenigen Freiheitsgraden. Das von ihm entwickelte Reduktionsverfahren verwendet eine modale Superposition und gestattet es, die Übertragungseigenschaften eines piezelektrischen Systems innerhalb eines vorwählbaren Frequenzbereichs mit hoher Genauigkeit zu approximieren.

Die vorgestellte Methodik ist allgemein anwendbar. Sie wird beispielhaft zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines piezelektrischen Ultraschall-Transducers verwendet.

Die Dissertation von Herrn Król stellt einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Modellierungs- und Berechnungsverfahren für piezelektrische Systeme dar.

Hannover, den 8.3.2011



(Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek)



*Meiner Familie*

*und*

*Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, recht herzlichen Dank!*

*Rafael Jürl*



# **Eine Reduktionsmethode zur Ableitung elektromechanischer Ersatzmodelle für piezoelektrische Wandler unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Rafal Król  
aus Szczecin (Polen)

Tag des Kolloquiums: 29. November 2010  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro





## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Piezoelektrizität .....</b>	<b>3</b>
2.1 Piezoelektrisches Materialverhalten.....	3
2.2 Allgemeiner historischer Überblick .....	3
2.3 Piezo-, Pyro- und Ferroelektrizität .....	6
2.4 Piezokeramiken .....	7
<b>3 Mathematische Grundgleichungen .....</b>	<b>11</b>
3.1 Mechanische und elektrische Feldgleichungen.....	11
3.2 Lineare konstitutive Gleichungen .....	13
<b>4 Eindimensionale Modellierung und Analyse des dynamischen Verhaltens von piezoelektrischen Systemen .....</b>	<b>23</b>
4.1 Nichtparametrisches Modell.....	23
4.2 Mason-Modell .....	26
4.3 Redwood-Modell.....	28
4.4 KLM-Modell .....	29
4.5 BVD-Modell.....	30
4.6 Äquivalente elektromechanische Ersatzmodelle.....	32
4.7 Parameteridentifikation .....	34
<b>5 Finite-Elemente-Methode (FEM) .....</b>	<b>39</b>
5.1 Einführung in die allgemeine strukturmechanische Finite-Elemente-Methode..	39
5.2 Finite-Elemente-Methode für piezoelektrische Strukturen .....	41
5.3 Herleitung der FE-Formulierung für piezoelektrische Materialien.....	43
5.4 Kondensierte Darstellungsform.....	47
5.5 FE-Analyse von piezoelektrischen Materialien .....	48
5.5.1 Statische Finite-Elemente-Analyse.....	49
5.5.2 Modalanalyse.....	49
5.5.3 Harmonische Analyse.....	53

---

5.5.4	Dämpfung .....	54
<b>6</b>	<b>Modale Beschreibung des Systems .....</b>	<b>57</b>
6.1	Modale Beschreibung und modale Superpositionsmethode für mechanische Systeme .....	58
6.2	Modale Beschreibung und modale Superpositionsmethode für piezoelektrische FE-Modelle.....	63
6.3	Einfluss der Residualkorrekturen auf die Frequenzgänge von piezoelektrischen Modellen.....	67
6.4	Ableitung der Zustandsraumdarstellung aus der modalen Beschreibung .....	71
<b>7</b>	<b>Parameterbestimmung für die Ersatzmodelle .....</b>	<b>75</b>
7.1	Parameterbestimmung eines rein mechanischen Modells.....	76
7.2	Parameterbestimmung eines piezoelektrischen Ersatzmodells .....	76
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel .....</b>	<b>83</b>
8.1	Ultraschall-Drahtbonden .....	83
8.2	Erstellung des FE-Modells .....	86
8.3	Simulationsergebnisse .....	91
8.3.1	Statische Analyse.....	91
8.3.2	Modalanalyse und Ermittlung der Ersatzparameter .....	92
8.3.3	Harmonische Analyse.....	96
8.3.4	Transiente Analyse .....	99
8.4	Experimentelle Validierung .....	102
8.5	Diskussion der Ergebnisse.....	105
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>122</b>
Werkstoffdaten für PIC-181 .....		122
<b>Lebenslauf .....</b>		<b>123</b>

## Formelzeichen

### Lateinische Formelzeichen

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
$A$	<i>Hebellänge im mechanischen Ersatzmodell</i>	$N/V$
$A$	<i>Systemmatrix</i>	
$B$	<i>Eingangsmatrix</i>	
$B_\varphi, B_u$	<i>Differentialoperatormatrizen</i>	
$C$	<i>Ausgangsmatrix</i>	
$C, C_p, C_i, C_0$	<i>Kapazität im Ersatzmodell</i>	$F$
$c$	<i>Federsteifigkeit</i>	$N/m$
$c_{ijkl}^E$	<i>Elastizitätskonstante bei konstanten elektrischen Feld</i>	$N/m^2$
$D$	<i>Dämpfungsmatrix</i>	$Ns/m$
$D, D_{HF}$	<i>Durchgangsmatrix</i>	
$D, D_i$	<i>dielektrische Verschiebung, bzw. deren Komponenten</i>	$C/m^2$
$D_i$	<i>modale Dämpfungsrate</i>	
$d, d_i$	<i>Dämpfung im Ersatzmodell</i>	$Ns/m$
$E, E_i$	<i>elektrische Feldstärke, bzw. deren Komponenten</i>	$V/m$
$e_{ijk}$	<i>piezoelektrische Konstante</i>	$C/m^2$
$F$	<i>Vektor der äußeren Kräfte</i>	$N$
$f$	<i>Frequenz</i>	$Hz$
$F, F_1, F_2, F_i$	<i>Kraft</i>	$N$
$f_a$	<i>Antiresonanzfrequenz</i>	$Hz$

$f_m$	Maximaladmittanzfrequenz	Hz
$f_n$	Minimaladmittanzfrequenz	Hz
$f_p$	Parallelresonanzfrequenz	
$f_r$	Resonanzfrequenz	Hz
$f_s$	Serienresonanzfrequenz	Hz
$\mathbf{G}$	Matrix der Übertragungsfunktionen	m/N
$\mathcal{G}$	statische Antwort des Systems	
$g_{ikl}$	piezoelektrische Konstante	Vm/N
$H$	elektrische Enthalpiedichte	J/m <sup>3</sup>
$\mathbf{H}$	Matrix der Übertragungsfunktionen	C/V
$h_{ikl}$	piezoelektrische Konstante	V/m
$I$	Elektrischer Strom	A
$\mathbf{I}_{(A)}, \mathbf{I}_{(m)}$	Einsenvektor	
$i$	elektrischer Strom	A
$\mathbf{K}$	Steifigkeitsmatrix	N/m
$\mathbf{K}_{UU}$	mechanische Steifigkeitsmatrix	N/m
$\mathbf{K}_{U\Phi}, \mathbf{K}_{\Phi,U}^{*(m)}, \mathbf{K}_{\Phi,U}^{*(a)}$	piezoelektrische Kopplungsmatrix	N/V
$\mathbf{K}_{\Phi\Phi}$	dielektrische Steifigkeitsmatrix	C/V
$k_{eff}$	Kopplungsfaktor	
$L$	Lagrange-Funktion	J
$L, Li$	Induktivität im Ersatzmodell	H
$L_A^{(a)}, L_A^{(m)}$	modale Ladungsamplitude	
$l$	Länge des Piezoelements	m

$\mathbf{M}$	Massenmatrix	kg
$m$	Masse	kg
$N$	Übersetzungsverhältnis des Transformators	$N/V$
$\mathbf{N}_\varphi, \mathbf{N}_u$	Vektoren der Ansatzfunktionen	
$\mathbf{P}$	Polarisationsvektor	
$p$	Anzahl der berücksichtigten Eigenmoden	
$\mathbf{Q}, \mathbf{Q}_A^{(m)}, \mathbf{Q}_{A(0)}^{(m)}$	Vektor der elektrischen Ladungen	C
$Q_A$	elektrische Ladung	C
$Q_p$	konzentrierte Ladung	C
$q$	modale Koordinaten	m
$q_s$	elektrische Oberflächenladung	C
$R, R_0, R_l, R_p$	Widerstand im Ersatzmodell	$\Omega$
$S, S_{ij}, S_i$	Dehnungstensor, bzw. dessen Komponenten	
$S_{ijkl}^E$	elastische Nachgiebigkeit bei konstantem elektrischen Feld	$m/N$
$S_{ijkl}^D$	elastische Nachgiebigkeit bei konstanter dielektrischer Verschiebung	$m/N$
$T, T_i, T_{ij}$	Spannungstensor, bzw. dessen Komponenten	MPa
$t$	Zeit	s
$t$	Dicke des Piezoelements	m
$U$	innere Energie	J
$\mathbf{U}$	Verschiebungsvektor	m
$\mathbf{u}, u_i$	Verschiebungsvektor, bzw. dessen Komponenten	m
$\mathbf{u}$	Eingangsvektor	
$V, V_A, V_S$	elektrische Spannung	V
$V$	Volumen	$m^3$

$v$	<i>mechanische Geschwindigkeit</i>	<i>m/s</i>
$W$	<i>verrichtete Arbeit</i>	<i>J</i>
$w$	<i>Breite des Piezoelements</i>	<i>m</i>
$\mathbf{X}$	<i>Verschiebungsvektor</i>	<i>m</i>
$x_i$	<i>i-te Raumkoordinate</i>	<i>m</i>
$\mathbf{x}$	<i>Zustandsvektor</i>	
$Y_{11}$	<i>Kurzschluss-Eingangsadmittanz</i>	<i>A/V</i>
$Y_{12}$	<i>Kurzschluss-Kernadmittanz rückwärts</i>	<i>A/V</i>
$Y_{21}$	<i>Kurzschluss-Kernadmittanz vorwärts</i>	<i>A/V</i>
$Y_{22}$	<i>Kurzschluss-Ausgangsadmittanz</i>	<i>A/V</i>
$\mathbf{y}$	<i>Ausgangsvektor</i>	
$Z_0$	<i>Akustische Impedanz</i>	<i>V/A</i>

### Griechische Formelzeichen

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
$\alpha, \beta$	<i>Proportionalitätskonstante zur Berechnung der Rayleigh-Dämpfung</i>	
$\beta_{ik}^S$	<i>dielektrische Impermeabilität bei konstanter mechanischer Dehnung</i>	<i>m/F</i>
$\beta_{ik}^T$	<i>dielektrische Impermeabilität bei konstanter mechanischer Spannung</i>	<i>m/F</i>
$\epsilon_{ik}^T$	<i>dielektrische Konstante bei konstanter mechanischer Spannung</i>	<i>C/V/m</i>
$\epsilon_0$	<i>Permittivität im freien Raum</i>	<i>C/V/m</i>
$\theta$	<i>Temperatur</i>	<i>K, C<sup>0</sup></i>
$\mathbf{A}$	<i>Diagonalmatrix der Eigenwerte</i>	
$\xi$	<i>Lehrsches Dämpfungsmaß, modale Dämpfung</i>	

$\rho$	<i>Massendichte</i>	$\text{kg/m}^3$
$\sigma$	<i>Entropie</i>	$\text{J/K}$
$\Phi, \Phi_A^{(a)}$	<i>Vektor der elektrischen Potentiale</i>	$V$
$\phi$	<i>elektrisches Potential</i>	$V$
$\varphi$	<i>Übersetzungsverhältnis des Transformators</i>	$N/V$
$\Psi$	<i>Modalmatrix</i>	
$\psi_i$	<i>Eigenvektor</i>	
$\Omega$	<i>Kreisfrequenz der Anregung</i>	$\text{Hz}$
$\Omega_1, \Omega_2$	<i>Fläche</i>	$\text{m}^2$
$\omega$	<i>Kreisfrequenz (<math>2\pi f</math>)</i>	$\text{Hz}$
$\omega_{0i}$	<i><math>i</math>-te Resonanzkreisfrequenz</i>	$\text{Hz}$
$\omega_0$	<i>Resonanzkreisfrequenz</i>	$\text{Hz}$

Ableitungen nach der Zeit werden mit einem Punkt (·) gekennzeichnet.

Vektoren und Matrizen werden in Fettdruck repräsentiert bzw. durch Klammern gekennzeichnet.





## 1 Einleitung

Effektivität, Flexibilität, Bedienkomfort, Zuverlässigkeit, Robustheit und auch Umweltfreundlichkeit bilden heutzutage die Anforderungen, die immer häufiger durch die Benutzer und auch durch die Gesetzgebung an neue Produkte gestellt werden. Um diesen steigenden Anforderungen gerecht zu werden, müssen Produkte immer mehr Funktionen erfüllen. Die Mechatronik bietet durch Integration verschiedener Fachdisziplinen vielfältige Möglichkeiten und ausgezeichnete Potenziale für derartige Innovationen. Das synergetische Zusammenspiel der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik führt dazu, dass neue mechatronische Produkte immer komplexer werden. Diese zunehmende Komplexität, gepaart mit wachsendem Kostendruck und vom Markt bzw. Wettbewerb geforderter kürzerer Produkteinführungszeit, stellt einen besonderen Anspruch an die Entwicklung dieser Produkte dar. Der Entwurf und Aufbau eines mechatronischen Produktes erfordert die Berücksichtigung der Anforderungen aller beteiligten Fachdisziplinen in der frühen konzeptionellen Phase. Geeignete Simulationsmodelle spielen hierbei eine zentrale Rolle und unterstützen die richtige und zielgerichtete Integration von allen Teilsystemen zu einem optimal wirkenden Gesamtsystem.

Bei der Entwicklung mechatronischer Produkte nehmen numerische Simulationen einen festen Platz im Entwicklungsvorgehen ein. In den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses werden numerische Simulationen verwendet, um das Systemverhalten und die Einflüsse der Umgebung auf die Systemeigenschaften zu erfassen. Insbesondere beim Aufbau von Systemen, in denen Schwingungen von Strukturkomponenten eine wesentliche Rolle spielen, wie z.B. in der Ultraschalltechnik, werden dazu Modelle benötigt, mit denen die Dynamik dieser Komponenten beschrieben werden kann. Die numerischen Simulationen mit geeigneten Modellen ergänzen die aufwändigen, messtechnischen Experimente und können unter Umständen sogar in der Lage sein, diese Experimente zu ersetzen.

Als Standard-Werkzeug zur Simulation und Analyse von Modellen hat sich die Methode der Finiten Elemente herausgebildet, mit der eine detaillierte Modellierung möglich ist. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode können kontinuumsmechanische Modelle aufgestellt werden, die das Verhalten der Systeme unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen verschiedener physikalischer Disziplinen beschreiben. Diese Modelle können auch benutzt werden, um z.B. eine Bauteiloptimierung durchzuführen. In Anbetracht der großen Dimension und der hohen strukturellen Komplexität von Finite-Elemente-Modellen, welche mit großem Rechenaufwand verbunden sind, ist es in der Regel nicht möglich, diese Modelle direkt für die Reglerauslegung oder Online-Überwachung, zu benutzen. Es ist deshalb oftmals erforderlich, eine Modellreduktion durchzuführen, die zu vereinfachten Modellen mit wenigen Freiheitsgraden führt. Trotz ihrer kleinen Dimensionen sollen diese vereinfachten Modelle relevante Aspekte des originalen übergeordneten Modells widerspiegeln.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methodik zu erarbeiten, mit der äquivalente vereinfachte Modelle zur Beschreibung der Dynamik eines komplexen Systems mit dazugehörigen Modellparametern direkt aus Finite Elemente Simulationen ermittelt werden können. Die Modellreduktion sollte dabei so vorgenommen werden, dass die zur Eingangs-/Ausgangsbeschreibung erforderlichen Übertragungsfunktionen des Systems innerhalb eines vorwählbaren Frequenzbereiches mit hinreichender Genauigkeit approximiert werden.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Modellierung von piezoelektrischen Materialien, die wegen ihrer Eigenschaften in mechatronischen Produkten als Aktoren und Sensoren verwendet werden können. Die Grundlagen des piezoelektrischen Effektes, ein historischer Überblick und andere wichtige Informationen zu piezoelektrischen Keramik werden in Kapitel 2 beschrieben. Im Kapitel 3 wird die mathematische Beschreibung des linearen piezoelektrischen Systemverhaltens dargestellt. Zudem werden die konstitutiven Gleichungen hergeleitet. Die 1-dimensionalen Modelle zur Beschreibung des Verhaltens piezoelektrischer Komponenten werden in Kapitel 4 vorgestellt. Dazu werden äquivalente elektromechanische Ersatzmodelle sowie die messtechnische Parameteridentifikation beschrieben. Die Finite-Elemente-Methode, welche eine Grundlage dieser Arbeit bildet, wird in Kapitel 5 vorgestellt. Nach einer Einführung in die allgemeine Theorie der Finiten Elemente Methode wird, basierend auf den zuvor dargestellten Grundgleichungen, die FE-Formulierung zur Beschreibung piezoelektrischer Elemente hergeleitet. Anschließend werden die kondensierte Darstellungsform und die wichtigsten Analysenarten der FEM vorgestellt. Dazu werden auch die Reduktionsmethoden für FE-Modelle beschrieben, die auf der Element-Ebene bzw. auf der Struktur-Ebene durchgeführt werden. Eine andere Möglichkeit, die Ordnung von linearen FE-Modellen zu reduzieren, bietet das Verfahren der modalen Superposition, das in Kapitel 6 vorgestellt wird. Dabei werden die ursprünglichen Systemgleichungen auf modale Koordinaten transformiert, und anschließend wird durch Superposition der mit den modalen Koordinaten multiplizierten Eigenvektoren eine neue Beschreibungsform des Systemverhaltens abgeleitet. Diese Beschreibung wird in Kapitel 7 verwendet, um ein einfaches kompaktes Ersatzmodell des piezoelektrischen Systems zu bilden und die dazugehörigen Ersatzparameter zu bestimmen. Im Gegensatz zu dem klassischen Ersatzschaltbild beschränkt sich das hier vorgestellte Modell nicht nur auf einen Frequenzbereich in der Nähe einer Resonanzstelle, sondern ist in der Lage das Systemverhalten in einem breiten Frequenzbereich abzubilden. Kapitel 8 stellt ein praxisrelevantes Anwendungsbeispiel vor. Es handelt sich bei diesem Beispiel um einen piezoelektrischen Ultraschall-Transducer, der in einer Draht-Bondmaschine eingesetzt wird. Hierzu wird dargestellt, wie ausgehend von einem sehr komplexen FE-Modell mittels der Modalanalyse eine einfache Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Ultraschall-Transducers abgeleitet werden kann. Abschließend wird im Kapitel 9 eine Zusammenfassung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse gegeben und es werden Ausblicke bezüglich weiterer Entwicklungen auf diesem Gebiet diskutiert.

## 2 Grundlagen der Piezoelektrizität

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Methodik wird auf Systeme angewendet, die piezoelektrische Komponenten enthalten. In diesem Kapitel werden die innerhalb dieser Arbeit benötigten Grundlagen der Piezoelektrizität behandelt. Dabei wird insbesondere auf die speziellen Eigenschaften von piezoelektrischen Materialien und deren mathematische Beschreibung eingegangen.

### 2.1 Piezoelektrisches Materialverhalten

Piezoelektrizität stellt eine elektromechanische Wechselwirkung zwischen den mechanischen und den elektrischen Zuständen in bestimmten Kristallen dar [Jen 95]. Da dieser Prozess ähnlich wie die meisten physikalischen Effekte umkehrbar ist, unterscheidet man den direkten piezoelektrischen Effekt und den inversen piezoelektrischen Effekt.

Als direkten piezoelektrischen Effekt bezeichnet man die Tatsache, dass eine mechanische Deformation des Kristalls von einer hierzu proportionalen Änderung der elektrischen Polarisation und einer entsprechenden Ladungsverschiebung begleitet wird. Dieser Effekt wird vor allem in der Sensorik genutzt.

Der inverse bzw. reziproke piezoelektrische Effekt beschreibt die Umkehrung des direkten piezoelektrischen Effektes, nämlich das Auftreten innerer mechanischer Spannungen, die zu einem äußeren elektrischen Feld proportional sind und eine Deformation des Kristalls verursachen. Diese Eigenschaft von piezoelektrischen Materialien wird beispielsweise in der Aktorik verwendet.

Die beiden Effekte sind nicht unabhängig voneinander. Die erzeugte Ladungsverschiebung durch mechanische Spannungen beim direkten piezoelektrischen Effekt kann ihrerseits wiederum infolge des inversen Effektes mechanische Spannungen induzieren, die den ursprünglichen mechanischen Spannungen entgegenwirken.

Eine ausführliche und detaillierte Darstellung kann [NeuBri 97] oder z.B. [Jan 92], [Wal 00a] entnommen werden.

### 2.2 Allgemeiner historischer Überblick

Das Phänomen des direkten piezoelektrischen Effektes wurde von den Brüdern Curie im Jahre 1880 entdeckt und beschrieben. Dieser Effekt wurde erstmals bei Untersuchungen an natürlich vorkommenden Turmalinkristallen beobachtet, obwohl die elektrischen Eigenschaften des Turmalins (die erhitzten Turmalinkristalle ziehen an einer Seite Ascheteilchen an und

stoßen diese an der gegenüberliegenden Seite ab) schon seit längerem in Indien und Ceylon bekannt waren [TicGau 80].

Im 18. Jahrhundert brachten die holländischen Seefahrer diese Kristalle als sogenannte Ceylonmagnete nach Europa. 1756 beschreibt der deutsche Physiker Aepenius die entgegengesetzte elektrische Polarität erhitzter Turmalinkristalle. Dieses Phänomen wurde 1824 durch schottischen Physiker Brewster auch an anderen Kristallen beobachtet und als Pyroelektrizität bezeichnet. 1877 begründet Lord Kelvin den Zusammenhang zwischen Pyroelektrizität und Piezoelektrizität. Es stellte sich heraus, dass der Großteil der pyroelektrischen Aufladung des Turmalins auf dem piezoelektrischen Effekt beruht, der durch die elastischen Beanspruchungen des Kristalls bei Temperaturänderungen hervorgerufen wird. Basierend auf den Aussagen Lord Kelvins fanden die Brüder Pierre und Jacques Curie heraus, dass die Turmalinkristallen bei mechanischer Deformation eine proportionale elektrische Ladung erzeugen. Im Experiment konnten sie nachweisen, dass eine elektrische Oberflächenspannung entstand, sobald der Kristall mechanischem Druck ausgesetzt wurde. Dieses Phänomen wurde nach dem griechischen Wort „piezo“ (Druck) benannt [Wag 05].

Kurze Zeit nach der Entdeckung des piezoelektrischen Effekts gelang es, durch Anlegen eines elektrischen Feldes an einem Kristall eine mechanische Verformung zu erzeugen. Dieser Effekt, allgemein als reziproker bzw. inverser piezoelektrischer Effekt bekannt, wurde von Lippmann aufgrund von thermodynamischen Zusammenhängen zunächst in 1881 vorausgesagt und kurz darauf wieder von den Brüdern Curie im Experiment nachgewiesen. Damals konnten sie nicht ahnen, welche technischen Möglichkeiten diese Entdeckung nach sich ziehen würde.

Über die nächsten 25 Jahre zählte der piezoelektrische Effekt eher zu den Kuriositäten der Wissenschaft. Dies änderte sich erst ab 1910 als Voigt, dessen Hauptinteresse die Eigenschaften der Kristalle im Zusammenhang mit ihren Symmetrieeigenschaften waren, das Buch „Lehrbuch der Kristallphysik“ veröffentlichte. In diesem grundlegenden Werk der Kristallographie wurde der damalige Wissensstand über Piezoelektrizität dokumentiert [NeuBri 97].

Auf die erste technische Anwendung des piezoelektrischen Effektes musste man bis Ende des 1. Weltkriegs warten: die Erfindung piezoelektrischer Resonatoren durch Paul Langevin. Auslöser für diese Erfindung war die Untersuchung der Nachrichtenübermittlung unter Wasser mit Hilfe von Ultraschallwellen. Dabei wurde eine Methode zur Bestimmung der Wassertiefe und zur Lokalisierung von Objekten im Wasser entwickelt. Den Kern bildete hierbei ein piezoelektrischer Wandler, der aus dünnen Quarzkristallen bestand, die zwischen zwei Stahlplättchen befestigt wurden. Dieser Wandler war in der Lage Ultraschall zu senden sowie zu empfangen. Mit diesem sogenannten SONAR (Sound Navigation and Ranging) konnte man eine Resonanzfrequenz von 50 kHz erreichen. In diesem Zusammenhang wurde erstmals das Phänomen der Resonanz beschrieben [NeuBri 97].

Im Jahre 1919 verwendet Cady einen Quarzschwinger mit zwei Elektrodenpaaren zur Stabilisierung der Frequenz eines Oszillators. Als erste zivile Anwendung des Piezoeffekts wurden Piezoresonatoren als frequenzbestimmende Elemente in Rundfunksendern eingesetzt. Damit konnten in der immer dichter werdenden Rundfunksenderlandschaft die Sendefrequenzen stabil gehalten werden.

In 1925 zeichnet van Dyke das Ersatzschaltbild für den Zweielektrodenquarz bestehend aus einem dynamischen Serienkreis und einer parallelgeschalteten statischen Kapazität [VDy 25]. In diesen Zeiten haben Quarzkristalle eine große Rolle unter piezoelektrischen Materialien gespielt. Ihre Eigenschaften, besonders stabile periodische Schwingungen bei Verbindung mit einer Spannungsquelle, ermöglichten in 1927 die Entwicklung der Quarzuhr.

Nach dem 2. Weltkrieg wurden, neben den bereits bekannten natürlich vorkommenden Kristallen von Quarz, Turmalin und Seignettesalz, weitere Materialien entdeckt, die piezoelektrische Eigenschaften besitzen. Besonders der Einsatz piezoelektrischer Keramiken, der mit der Entdeckung der piezoelektrischen Eigenschaften von Bariumtitanat und der Synthetisierung der ersten PZT-Verbindungen (Blei-Zirkonat-Titanat) begann, trug wohl maßgeblich dazu bei, dass der Piezoeffekt eine solch große Verbreitung erfuhr [BCJ 64]. Im Gegensatz zu den piezoelektrischen Einkristallen können die piezoelektrischen Keramiken sehr leicht hergestellt werden, und darüber hinaus können ihre piezoelektrischen Eigenschaften durch das Mischungsverhältnis ihrer Rohkomponenten gezielt beeinflusst werden.

In den letzten fünfzig Jahren beschäftigten sich die Forscher vor allem mit den synthetisch hergestellten Piezokeramiken, die möglichst viele optimale Eigenschaften wie zum Beispiel gute zeitliche Effektstabilität, minimaler Temperaturkoeffizient, hoher Curiepunkt, temperaturstabile Frequenzeigenschaften oder Herstellung aus einfachen preiswerten Rohstoffen besitzen sollen.

Nach dem Krieg kam man auch in der Theorie zu neuen Entdeckungen, die in den zahlreichen Veröffentlichungen erschienen. In der Fachliteratur wurden Schriften publiziert, in denen die neu entwickelten Methoden zur Messung der dielektrischen, elastischen und piezoelektrischen Konstanten dargestellt wurden, und in denen auch die Koeffizienten der verschiedenen Materialien aufgeführt wurden. Das führte dazu, dass viele analytische Methoden und Modelle entwickelt wurden, die in der Lage waren das statische sowie dynamische Verhalten der Piezomaterialien zu beschreiben. In den 70er Jahren wurden erste Arbeiten vorgestellt, die sich mit der numerischen Berechnung von gekoppelten elektromechanischen Systemen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode befassten.

Diese Erkenntnisse in der Theorie haben einen großen Beitrag zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete geleistet. Heute gibt es viele Anwendungen des piezoelektrischen Effektes. Piezoelektrische Komponenten werden nun in Produkten des täglichen Lebens, in

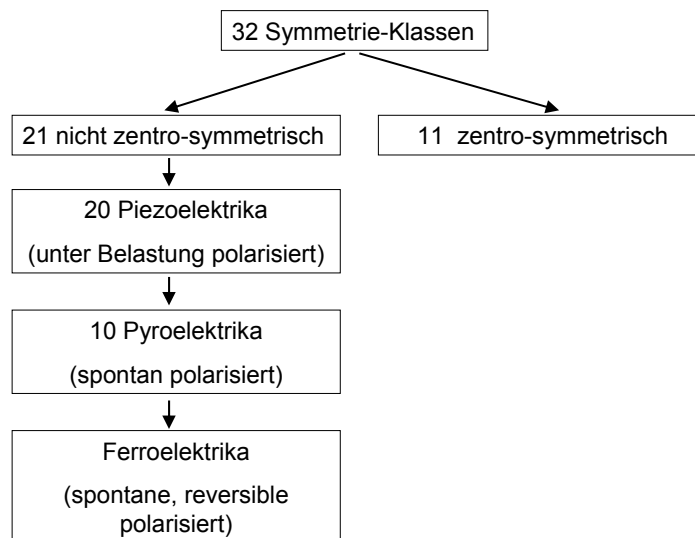
der Industrie, der Medizintechnik oder der Forschung eingesetzt. Der Effekt wird dabei sowohl in Sensoren als auch in Aktoren genutzt.

Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist heute noch nicht abgeschlossen, und es werden immer neue Anwendungen und auch neue Piezowerkstoffe entwickelt [Ceramtec, Agilon].

### 2.3 Piezo-, Pyro- und Ferroelektrizität

Wie schon erwähnt wurde, versteht man unter Piezoelektrizität eine elektromechanische Wechselwirkung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Zustand in Kristallen.

Der piezoelektrische Effekt kann grundsätzlich nur in Dielektrika mit einem unsymmetrischen Kristallaufbau auftreten. Von den insgesamt 32 bestehenden Kristallklassen besitzen 21 kein Symmetriezentrum. Innerhalb dieser 21 Kristallklassen finden sich 20, bei denen der piezoelektrische Effekt auftritt.



*Bild 2.1: Einteilung der Kristallgruppen nach ihren elektrischen Eigenschaften [GauCon]*

Piezoelektrischen Kristalle haben mindestens eine polare Achse. Entlang dieser Achsen führt eine mechanische Deformation aufgrund des unsymmetrischen Kristallaufbaus zu einer Trennung und Verschiebung der positiven und negativen Ladungsschwerpunkte in jeder Elementarzelle und damit zur Polarisation des Kristalls. Diese Polarisation ist mit der spontanen Ausbildung von Oberflächenladungen auf der Außenfläche des Kristalls verknüpft. Die gebildete Ladungsmenge ist dabei proportional zu der angelegten mechanischen Deformation (direkter piezoelektrischer Effekt). Umgekehrt kann durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes eine mechanische Deformation des Kristalls erzeugt werden (inverser piezoelektrischer Effekt).

Dieser Effekt ist praktisch linear und außerdem richtungsabhängig, d.h. die durch äußeren Druck erzeugte Oberflächenladung hat das entgegengesetzte Vorzeichen wie die durch Zug erzeugte Ladung.

Pyroelektrische Stoffe sind eine Untergruppe der Piezoelektrika. Pyroelektrische Eigenschaften besitzen die 10 Kristallklassen, in denen nur eine einzige polare Achse auftritt. Parallel zu dieser Achse existiert ein permanentes elektrisches Dipolmoment, welches durch die Kristalloberflächenladung kompensiert wird. Diese Kristalle zeichnen sich dadurch aus, dass sie neben der induzierten Polarisierung eine sogenannte spontane Polarisierung zeigen, die ohne Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes auftreten kann. Temperaturänderungen führen bei diesen Kristallen zu einer Verformung entlang der singulären polaren Achse und damit zu einer Veränderung des elektrischen Dipolmomentes. Die hieraus resultierende Änderung der Oberflächenladung aufgrund einer Temperaturänderung wird als pyroelektrischer Effekt bezeichnet.

Eine besonders wichtige Untergruppe der pyroelektrischen Kristalle bilden Ferroelektrika. Im Gegensatz zu reinen Pyroelektrika kann bei den Ferroelektrika die auftretende spontane Polarisierung durch das Anlegen eines äußeren Feldes in eine andere stabile Lage ausgelenkt oder umgepolt werden, so dass die Ferroelektrizität als dielektrische Analogie zum Ferromagnetismus verstanden werden kann. Die Polarisierung trifft nicht im ganzen Kristall gleichmäßig auf, sondern bildet sich aus energetischen Gründen in begrenzten Bereichen, sogenannten ferroelektrischen Domänen, aus. Innerhalb einer Domäne ist die spontane Polarisierung homogen, d.h. die Polarisierungsrichtung ist einheitlich.

Ein weiteres wesentliches Merkmal von Ferroelektrika ist, dass die spontane Polarisierung sehr stark von der Temperatur abhängt und dass es eine Phasenumwandlungstemperatur (Curie-Temperatur) gibt, bei der der Übergang in eine unpolare paraelektrische Phase erfolgt. Oberhalb dieser materialspezifischen Curie-Temperatur tritt keine spontane Polarisierung und damit auch keine Piezoelektrizität mehr auf.

## 2.4 Piezokeramiken

Als Piezokeramiken werden die ferroelektrischen polykristallinen Keramiken bezeichnet. Zu den wichtigsten Piezokeramiken zählen Bariumtitanat  $\text{BaTiO}_3$  und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Im Gegensatz zu den natürlichen Piezokristallen, wie z.B. Quarz und Turmalin, bestehen diese Werkstoffe aus einer großen Anzahl kleiner Kristallite. Diese polikristallinen Strukturen werden synthetisch in einem mehrstufigen Herstellungsprozess erzeugt, bei dem ausgehend von den pulverisierten Ausgangsstoffen verschiedene Prozesse durchlaufen werden, deren Abschluss das Sintern bei hoher Temperatur und anschließendes Polen bildet.

Aus kristallografischer Sicht zeigen Piezokeramiken eine sogenannte Perowskit-Kristallstruktur, deren Bezeichnung von dem in der Natur auftretenden kubischen Mineral Perowskit stammt. Die allgemeine chemische Formel ist  $A^{2+}B^{4+}O_3^{2-}$ , wobei  $A^{2+}$  ein niedrig geladenes Kation (wie z. B. Blei oder Barium),  $B^{4+}$  ein höher geladenes Kation (z. B. Titan oder Zirkon) und  $O^{2-}$  ein Sauerstoff-Anion bedeutet.

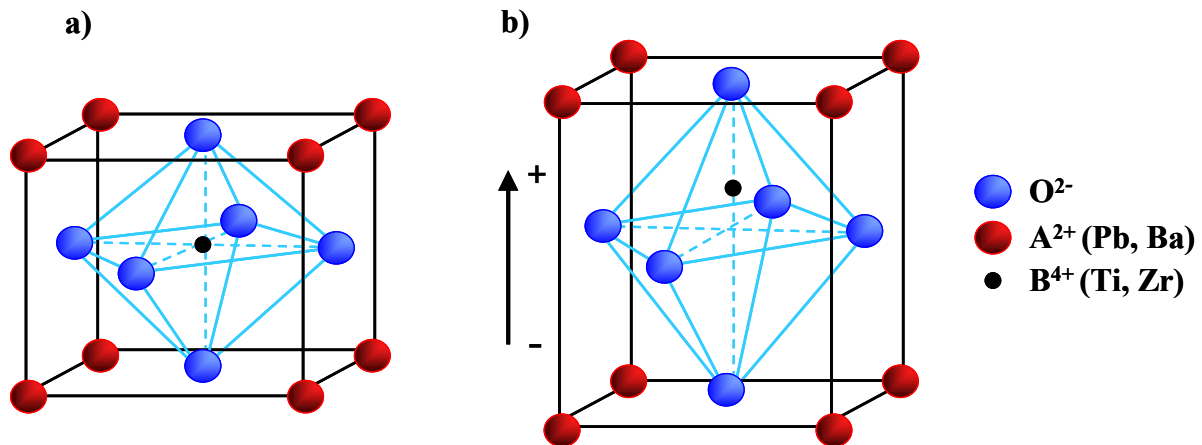


Bild 2.2: Perowskitstruktur einer piezokeramischen Elementarzelle [Rus 94]:

a) kubisches Gitter (oberhalb der Curie-Temperatur)

b) tetragonales Gitter (unterhalb der Curie-Temperatur)

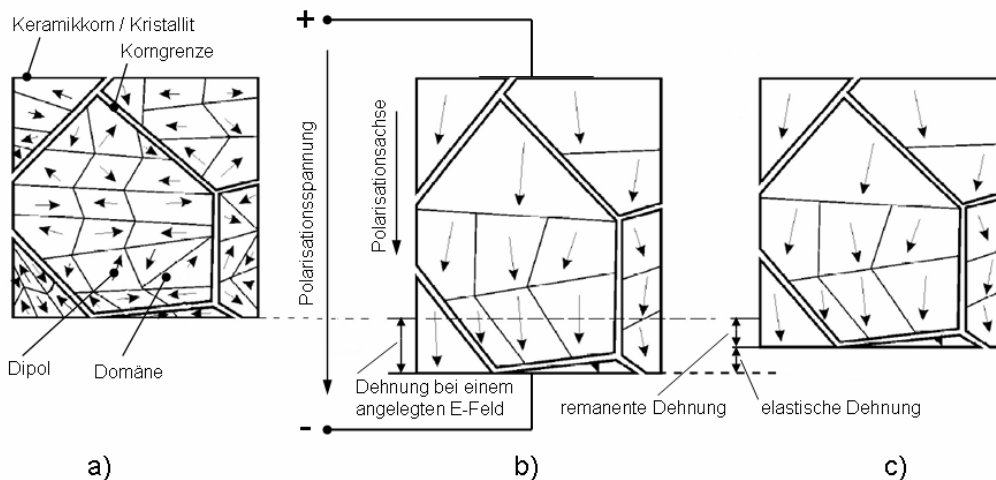
Oberhalb der materialspezifischen Curie-Temperatur weisen die Elementarzellen eine kubische Gitterstruktur auf, in der die Ladungsschwerpunkte der Kationen und Anionen im Raummittelpunkt aufeinander liegen, so dass keine Unsymmetrien in einer Elementarzelle vorhanden sind und damit keine spontane Polarisierung möglich ist, siehe Bild 2.2a. Bei Unterschreiten der Curie-Temperatur verzerren sich diese Gitter aus energetischen Gründen in ein unsymmetrisches rhomboedrisches oder auch ein tetragonales Kristallgitter. Die Elementarzelle ist nun von der paraelektrischen Phase in die ferroelektrische Phase übergegangen. Bei diesem Phasenübergang wird die geometrische Verformung von einer Verschiebung der Abstände zwischen den positiven und negativen Ladungen in der Elementarzelle begleitet, siehe Bild 2.2b. Dabei findet eine spontane Ladungstrennung und eine Ausbildung eines elektrischen Dipols in der Elementarzelle statt. Dieser Dipol richtet sich entlang der längsten Kristallachse (beim tetragonalen Gitter) bzw. in Richtung der längsten Raumdiagonale (rhomboedrisches Gitter) aus.

Durch die spontane Verzerrung des Kristallgitters beim Übergang von der paraelektrischen in die ferroelektrische Phase entsteht ein Zustand großer elastischer Energie, die mit den inneren mechanischen Spannungen zwischen angrenzenden Elementarzellen verbunden ist. Um diese Spannungen zu minimieren, bilden sich spontan Bereiche einheitlicher Dipolausrichtung und gleicher spontaner Polarisierung aus, sogenannte Weiss'sche Bezirke oder Domänen, wobei ein Kristallit (Keramikkorn) aus einer oder mehreren Domänen bestehen kann. Bei einer tetrago-



nenen Kristallgeometrie ändert sich die spontane Polarisationsrichtung im Übergangsbereich zwischen den benachbarten Domänen innerhalb eines Kornes um  $90^\circ$  oder  $180^\circ$ .

Die gesamte Keramik weist makroskopisch betrachtet aufgrund der statistischen Verteilung der Domänen noch keine Polarisation und somit auch keine piezoelektrischen Eigenschaften auf, obwohl das Material selbst piezoelektrisch ist. Um eine technisch nutzbare Piezoelektrizität zu erhalten, müssen die resultierenden Dipolmomente der Kristallite weitestgehend in eine bestimmte Richtung ausgerichtet werden. Dazu wird die Keramik unterhalb der Curie-Temperatur einem starken elektrischen Polungsfeld in der gewünschten Richtung ausgesetzt.



*Bild 2.3: Schematische Darstellung der Domänenstruktur einer polykristallinen Keramik und Polarisationsvorgang mit überzeichneten Kristalldehnungen [Mel 01]:*

*a) vor der Polarisierung, b) während der Polarisierung, c) nach der Polarisierung*

Durch die Polung der ferroelektrischen Keramiken erfolgt eine starke Störung des Ordnungszustandes der ferroelektrischen Domänen. Die einzelnen Domänen in den Kristallgittern werden durch das einwirkende elektrische Feld in den möglichen Polarisationsrichtungen verschoben und neu positioniert. Dies geschieht derart, dass die Dipole der Domänen näherungsweise in Richtung des anliegenden Polungsfeldes umgeklappt werden (*Bild 2.3b*). Hierbei können  $90^\circ$ - sowie  $180^\circ$ -Umklappprozesse stattfinden.

Die Orientierung der Domänen durch ein elektrisches Gleichfeld resultiert in der Anisotropie der dielektrischen, elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften, und je vollständiger die Domänenorientierung ist, desto größer ist die Anisotropie [BBGHS 76].

Nach diesem Polungsvorgang ergibt sich als Summe der spontanen Polarisation der einzelnen Domänen eine makroskopische verbleibende remanente Polarisation, die bei Überschreiten der mechanischen, thermischen und elektrischen Grenzwerte des Materials wieder abgebaut

wird. Ein zusätzlich angelegtes elektrisches Feld induziert eine makroskopische Dehnung, die sich aus einem remanenten und einem elastischen Anteil zusammensetzt, wobei nach dem Abschalten des äußeren Polungsfeldes nur remanente Dehnung verbleibt (*Bild 2.3c*).

Die so behandelten Keramiken zeigen nach der Polarisierung einen ausgeprägten piezoelektrischen Effekt. Im Vergleich zu den natürlich vorkommenden Einkristallmaterialien besitzen Piezokeramiken wesentlich höhere piezoelektrische Konstanten, eine relativ freie Formbarkeit und geringe Herstellkosten [Jen 95].

Am weitesten verbreitet sind heute PZT-Keramiken, die aus festen Lösungen von antiferroelektrischem Bleizirkonat  $\text{PbZrO}_3$  und ferroelektrischem Bleititanat  $\text{PbTiO}_3$  bestehen. Diese Keramiken finden ihren technischen Einsatz meist in modifizierter Form, da durch die Dotierung mit Fremdkationen die piezoelektrischen Eigenschaften gezielt auf die entsprechenden Anforderungen abgestimmt werden können. Je nach Ladung des Dotierungskations unterscheidet man prinzipiell zwei Sorten von Dotierungen, woraus sich auch die Unterscheidung in „weiche“ (donatordotierte) und „harte“ (akzeptordotierte) PZT-Keramiken ergibt.

Weiche PZT-Keramiken erhält man durch Substitution von Blei bzw. Zirkon/Titan durch Kationen mit höherer Ladung (z. B. Lanthan, Neodym oder Niob), die als Donatoren wirken. Durch ihre Anwesenheit kommt es zu einer Erhöhung der Bleilückenkonzentration und dadurch zu einer Erhöhung der Sinterfähigkeit. Die PZT-Keramiken, die mit Hilfe solcher Donator-Ionen dotiert sind, zeigen „weichere“ piezoelektrische Eigenschaften, wie z.B. erhöhte Dielektrizitätskonstanten. Zusätzlich haben diese Materialien höhere elektromechanische Kopplungsfaktoren und lassen sich leichter polarisieren als unmodifizierte PZT-Keramiken.

Im Gegensatz zu einer Donator-Dotierung können durch Akzeptor-Dotierungen sogenannte „harte“ PZT-Keramiken hergestellt werden. Meist werden Blei- bzw. Zirkon-/Titan-Ionen durch Fremdkationen mit niedriger Ladung (z.B. Eisen, Magnesium oder Kalium) substituiert. Gegenüber undotierter PZT-Keramik kommt es zu einer Verminderung der Bleilückenkonzentration, und dadurch ergibt sich eine messbare Abnahme der dielektrischen und piezoelektrischen Eigenschaften. Die harten PZT-Keramiken zeigen auch eine schwerere Polarisierbarkeit und eine höhere Depolarisationsfeldstärke.

Weitere Details zum Aufbau und zur Herstellung von piezoelektrischen Keramiken finden sich u.a. in [Weh 03], [Böh 99], [Han 03] sowie beispielsweise in [BBGHS 76].

### 3 Mathematische Grundgleichungen

Die mathematische Beschreibung des linearen piezoelektrischen Systemverhaltens kann mit Hilfe von sogenannten konstitutiven Gleichungen für piezoelektrische Materialien erfolgen. Hierhin wird der piezoelektrische Effekt als lineare Relation zwischen den mechanischen Feldgrößen und den elektrischen Feldgrößen dargestellt.

In diesem Abschnitt werden zuerst die für den weiteren Verlauf der Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen bezüglich der mechanischen und elektrischen Feldgleichungen formuliert und schließlich die konstitutiven Gleichungen hergeleitet, die als Ausgangspunkt für weitere numerische Strukturanalysen dienen.

#### 3.1 Mechanische und elektrische Feldgleichungen

Für ein mechanisches Kontinuum erfolgt eine Verknüpfung von Verschiebung und Dehnung eines Materialpunktes durch die folgende Beziehung, die die elastische Deformation in Form des Verzerrungstensors der linearen mechanischen Dehnung beschreibt:

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3.1)$$

wobei

$$u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \text{und} \quad u_{j,i} = \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad i, j = x, y, z \text{ bzw. } i, j = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

die partiellen Ableitungen der Verschiebungen nach den kartesischen Koordinaten beschreiben.

Bei Vernachlässigung der Volumenkräfte lautet der Impulssatz

$$T_{ij,i} = \rho \ddot{u}_j. \quad (3.3)$$

Er führt auf die Bewegungsgleichungen des Systems. Hier beschreibt  $\rho$  die Massendichte des Materials und  $T_{ij,i}$  die Ableitungen der auftretenden mechanischen Spannungen nach den einzelnen Koordinaten, wobei diese Ableitungen gemäß der Summenkonvention über doppelte Indizes summiert werden:

$$T_{ij,i} = \frac{\partial T_{1j}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{2j}}{\partial x_2} + \frac{\partial T_{3j}}{\partial x_3}. \quad (3.4)$$

Der erste Index des mechanischen Spannungstensors  $T_{ij}$  gibt an, in welcher Schnittebene  $x_i = \text{const.}$  die Spannung betrachtet wird. Der zweite Index gibt an, welche Richtung die entsprechende Komponente des Spannungstensors hat [Wall 00a].

In piezoelektrischen Materialien treten neben mechanischen auch elektromagnetische Wellen auf. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit mechanischer Wellen etwa um fünf Größenordnungen kleiner ist als die elektromagnetischer Wellen, kann der Einfluss von magnetischen Feldern vernachlässigt und das elektrische Feld als statisch betrachtet werden [Tie 69].

Unter dieser Annahme lassen sich die Maxwell'schen Gleichungen vereinfachen. Das elektrische Feld wird dann durch den Vektor der elektrischen Feldstärke

$$E_i = -\frac{\partial\varphi}{\partial x_i} = -\varphi_{,i} \quad (3.5)$$

beschrieben, der als Ableitung des skalaren elektrischen Potentials  $\varphi$  nach dem Ort berechnet wird.

Aufgrund ihrer dielektrischen Eigenschaften können piezoelektrische Materialien keine freien Ladungen erhalten. Damit gilt, dass die Divergenz der Ladungsdichte innerhalb der Piezokeramiken verschwinden muss [Kro 99]:

$$D_{i,i} = \frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} + \frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0. \quad (3.6)$$

Die beiden Feldgrößen elektrische Feldstärke  $E_i$  und dielektrische Verschiebung  $D_i$  sind über die Gleichung

$$D_i = \varepsilon_0 E_i + P_i \quad (3.7)$$

miteinander verknüpft, wobei  $P_i$  die Komponenten des Polarisationsvektors und  $\varepsilon_0$  die Permittivität im freien Raum bezeichnet.

Der oben vorgestellte Impulssatz und die Dehnungs-Verschiebungsbeziehungen verknüpfen die mechanischen Feldgrößen. Der Zusammenhang der elektrischen Feldgrößen wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben. Die mechanischen und elektrischen Feldgrößen werden schließlich über die Materialgesetze für piezoelektrische Materialien miteinander verknüpft. Diese können aus den thermodynamischen Grundgesetzen mit Hilfe der entsprechenden Potentialfunktionen, wie z. B. Enthalpiedichte, hergeleitet oder als Erfahrungstatsache, aufgrund experimenteller Ergebnisse, postuliert werden. Die genaue Beschreibung der Herleitung der elektrischen Enthalpiedichte, welche die potentielle Energie für mechanische Systeme im Prinzip von Hamilton ersetzt, und die Herleitung einer zugehörigen virtuellen Arbeit finden sich in [Wag 03], [Wol 00].

### 3.2 Lineare konstitutive Gleichungen

Da eine direkte vollständige Beschreibung der Kopplung zwischen verschiedenen physikalischen Phänomenen in piezoelektrischen Festkörpern allein durch lokale Feldgrößen nicht möglich ist, werden Energiebilanzen verwendet, um diese Verkopplung zu analysieren und anschließend piezoelektrischen Effekt mathematisch beschreiben zu können. Aus diesem Grund ist es für die weiteren Betrachtungen erforderlich, den energetischen Zustand eines piezoelektrischen Volumenelementes als Funktion der mechanischen und elektrischen Feldgrößen anzugeben.

Der energetische Zustand in einem System lässt sich allgemein als thermodynamisches Potential auffassen. Aus ihm kann man sehr einfach durch partielle Differentiation auf Zustandsgrößen (gesuchten Materialkonstanten) schließen. Die Zustandsgrößen werden dabei in intensive und extensive Größen eingeteilt, die jeweils zusammen paarweise bei der Beschreibung einer Energieform auftreten [TicGau 80]. Die Beziehungen zwischen diesen Zustandsgrößen wurden in 1925 von Heckmann anschaulich in einem Diagramm zusammengefasst, siehe *Bild 3.1*.

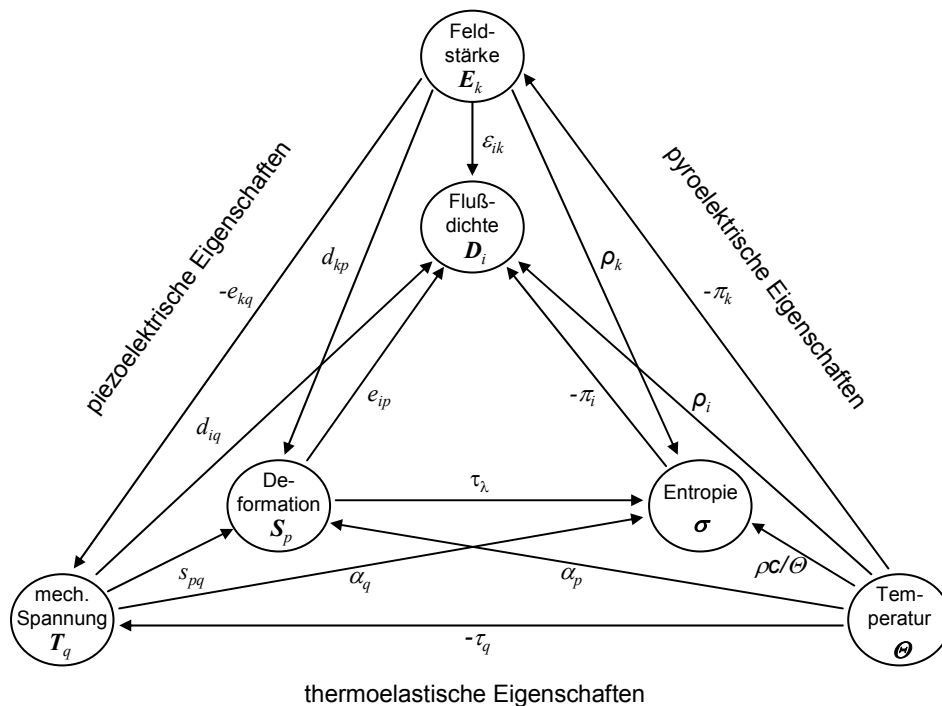


Bild 3.1: Das Heckmann-Diagramm [TicGau 80]

Die intensiven Zustandsgrößen stehen in den Ecken des äußeren Dreiecks und die extensiven Zustandsgrößen in den Ecken des inneren Dreiecks. In diesem Diagramm sind neben den Materialkonstanten des piezoelektrischen Effektes auch die Materialkonstanten der thermoelastischen, und pyroelektrischen Effekte enthalten. Die kurzen Verbindungslinien zwischen den gleichgelegenen Eckpunkten des äußeren und inneren Dreiecks stellen die thermischen,

die mechanischen und die elektrischen Haupteffekte dar. Die restlichen Verbindungslinien im Diagramm repräsentieren die Kopplungseffekte zwischen den drei Feldern. Die Gleichungen für die Beschreibung der Kopplungseffekte lassen sich aus den entsprechenden Gleichgewichtsbedingungen entwickeln.

Für die hier untersuchten piezoelektrischen Materialien werden die Materialbeziehungen ausgehend von den thermodynamischen Grundgesetzen abgeleitet. Dabei gilt zunächst der erste Hauptsatz der Thermodynamik

$$dU = dW + \theta d\sigma \quad (3.8)$$

in dem die Änderung der inneren Energie  $dU$  als die Summe der verrichteten Arbeit  $dW$  und Änderung der Wärmemenge, die durch die Temperatur  $\theta$  und die Änderung der Entropie  $d\sigma$  gegeben ist, definiert wird.

Da für die weiteren Betrachtungen der piezoelektrischen Materialbeziehungen ausschließlich adiabatische (d.h. wärmeaustauschfreie) Vorgänge zu Grunde gelegt werden, wird die Änderung der Entropie  $d\sigma$  zu Null gesetzt. Unter dieser Annahme vereinfacht sich die Änderung der inneren Energie der piezoelektronischen Materialien zu:

$$dU = dW . \quad (3.9)$$

Bei piezoelektrischen Materialien entspricht die verrichtete Arbeit  $dW$  der Summe der mechanischen verrichteten Arbeit (mechanische Deformationsenergie) und der elektrischen Arbeit

$$dW = dW_{mech} + dW_{el} = T_{ij} dS_{ij} + E_i dD_i, \quad (3.10)$$

wobei die mechanisch verrichtete Arbeit durch das Produkt der mechanischen Spannungen  $T_{ij}$  und der Änderungen der Dehnungen  $dS_{ij}$  gebildet wird und die elektrische Arbeit durch das Produkt der elektrischen Feldstärke  $E_i$  und der Änderungen der dielektrischen Verschiebungen  $dD_i$  ausgedrückt wird. Die hier dargestellte Änderung der inneren Energie ist eine Funktion intensiver Zustandsgrößen  $T_{ij}, E_i$  und extensiver Zustandsgrößen  $S_{ij}, D_i$ .

Unter der Voraussetzung, dass die Gesamtenergie eine eindeutige Zustandsfunktion der Variablen  $T_{ij}, S_{ij}, E_i, D_i$  und  $dW$  ein vollständiges Differential ist, lassen sich aus der Gesamtenergie  $W$  weitere Potentialfunktionen ableiten, die ebenfalls die Eigenschaft einer Zustandsfunktion haben. Je nachdem welche zwei Größen als unabhängige Variable verwendet werden, können verschiedene Potentialfunktionen aus der inneren Energie durch eine Legendre Transformation aufgestellt werden.

Eine von diesen Funktionen ist die elektrische Enthalpiedichte, die sich für piezoelektrische Materialien wie folgt angeben lässt [Tie 69]

$$H = U - E_i D_i . \quad (3.11)$$

Unter Beachtung der vorhergehenden Überlegungen folgt zunächst das totale Differential der elektrischen Enthalpiedichte

$$dH = dU - E_i dD_i - D_i dE_i . \quad (3.12)$$

Setzt man (3.9) und (3.10) in der obigen Gleichung (3.12) ein, so ergibt sich

$$dH = T_{ij} dS_{ij} - D_i dE_i . \quad (3.13)$$

Da in der folgenden Gleichung eine totale differentielle Beziehung beschrieben wird, lässt sich die differentielle Form der elektrischen Enthalpiedichte wie folgt angeben

$$dH = \frac{\partial H}{\partial S_{ij}} dS_{ij} + \frac{\partial H}{\partial E_i} dE_i . \quad (3.14)$$

Vergleicht man dies mit Gleichung (3.13), so erhält man die Beziehungen

$$T_{ij} = \frac{\partial H}{\partial S_{ij}} , \quad D_i = -\frac{\partial H}{\partial E_i} . \quad (3.15)$$

Die unabhängigen Zustandsgrößen werden hier nun durch die mechanische Dehnung  $S_{ij}$  und elektrische Feldstärke  $E_i$  repräsentiert, so dass sich als abhängige Variablen, die mechanische Spannung  $T_{ij}$  und die elektrische Verschiebung  $D_i$ , ergeben.

Werden die Verzerrungen  $S_{kl}$  und das elektrische Feld  $E_k$  als unabhängige Größen angenommen, so können konstitutive Gleichungen für die Spannungen  $T_{ij}$  und die elektrische Verschiebung  $D_i$  in Abhängigkeit dieser Größen in eine Taylorreihe entwickelt werden

$$T_{ij} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}} S_{kl} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial E_k} E_k \quad (3.16)$$

$$D_i = \frac{\partial D_i}{\partial S_{kl}} S_{kl} + \frac{\partial D_i}{\partial E_k} E_k , \quad (3.17)$$

wobei die beiden Gleichungen nach dem linearen Glied abgebrochen und im Material eingeprägte Eigenspannungen vernachlässigt wurden [Sim 02].

Unter Verwendung von Gleichungen (3.15) werden folgende Gleichungen wie folgt umgeformt

$$T_{ij} = \frac{\partial^2 H}{\partial S_{ij} \partial S_{kl}} S_{kl} + \frac{\partial^2 H}{\partial S_{ij} \partial E_k} E_k \quad (3.18)$$

$$D_i = -\frac{\partial^2 H}{\partial E_i \partial S_{kl}} S_{kl} - \frac{\partial^2 H}{\partial E_i \partial E_k} E_k. \quad (3.19)$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass es sich um reversible Zustandsänderungen handelt. Dies schließt an dieser Stelle ein, dass das Material elastisch, dielektrisch und piezoelektrisch verlustfrei ist und daher keine Dämpfung auftritt, vgl. [Wag 03].

Unter der Voraussetzung, dass die elektrische Enthalpiedichte homogen quadratisch in den unabhängigen Feldgrößen ist [IEEE 176]

$$H = \frac{1}{2} c_{ijkl}^E S_{ij} S_{kl} - e_{ijk} E_i S_{jk} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^S E_i E_j, \quad (3.20)$$

leiten sich die linearen Zustandsgleichungen mit Hilfe der Gleichungen (3.15) ab. Hieraus ergeben sich die linearen konstitutiven Gleichungen für piezoelektrisches Material, welche die folgende Form haben

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{ijk} E_k \quad (3.21a)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ik}^S E_k. \quad (3.21b)$$

Dabei sind  $c_{ijkl}^E$  elastische,  $e_{ijk}$ ,  $e_{ikl}$  piezoelektrische und  $\varepsilon_{ik}^S$  dielektrische Konstanten, und sie stellen den Zusammenhang zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen her. Der hier eingeführte Koeffizient  $e_{ijk}$  zeigt beispielsweise, welche mechanische Spannung (Indizes  $ij$ ) in einem piezoelektrischen Material auftritt, wenn ein elektrisches Feld in  $k$ -Richtung angelegt wird und die Verformung des Materials verhindert wird ( $S=0$ ). Der in den konstitutiven Gleichungen hochgestellte Buchstabe  $E$  bzw.  $S$  gibt an, dass diese Größen bei konstantem elektrischem Feld bzw. konstanter Verzerrung bestimmt werden müssen.

Gleichung (3.21b) beschreibt dabei den direkten piezoelektrischen Effekt und Gleichung (3.21a) den inversen Effekt.

Vergleicht man die konstitutiven Gleichungen mit Gleichungen (3.18) und (3.19), so erhält man die folgenden Beziehungen, welche die Materialeigenschaften beschreiben:

$$c_{ijkl}^E = \frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}} = \frac{\partial^2 H}{\partial S_{ij} \partial S_{kl}} \quad (3.22)$$



$$\varepsilon_{ik}^S = -\frac{\partial D_i}{\partial E_k} = -\frac{\partial^2 H}{\partial E_i \partial E_k} \quad (3.23)$$

$$e_{ijk} = -\frac{\partial T_{ij}}{\partial E_k} = -\frac{\partial^2 H}{\partial S_{ij} \partial E_k} \quad (3.24)$$

$$e_{ikl} = \frac{\partial D_i}{\partial S_{kl}} = \frac{\partial^2 H}{\partial E_i \partial S_{kl}} \quad (3.25)$$

wobei

$$e_{ijk} = e_{ikl} \cdot \quad (3.26)$$

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die erste partielle Ableitung der elektrischen Enthalpiendichte nach intensiven Zustandsgrößen physikalische extensive Zustandsgrößen ergibt, und die zweite Ableitung führt zu den gesuchten Materialkonstanten, die die mechanische und elektrische Feldgrößen miteinander verknüpfen.

Aufgrund der Vertauschbarkeit der Reihenfolge bei den partiellen Ableitungen von  $H$  bezüglich der unabhängigen Variablen in Gleichung (3.26) sind die Materialkonstanten sowohl für den direkten als auch den inversen piezoelektrischen Effekt gleich [Mes 04].

Die Materialkonstanten können auch ohne Taylorreihenentwicklung der Gleichungen (3.16) und (3.17) direkt aus der Gleichung (3.20) unter Berücksichtigung seiner homogen quadratischen Form bestimmt werden, siehe [Ike 96].

Neben der angegebenen Form der konstitutiven Gleichungen existieren noch drei weitere gleichwertige Darstellungsmöglichkeiten, wobei jeweils zwei andere Größen als abhängige Variablen auftreten und damit bei den partiellen Ableitungen auch entsprechende Potentialfunktionen als Energieausdrücke wie z.B. Gibbs'sche Funktion verwendet werden müssen [Ike 96].

Die Umformung des Gleichungssystems in die drei anderen Möglichkeiten ergibt die folgenden Gleichungssysteme [IEEE 176]:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (3.27a)$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (3.27b)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^D T_{kl} + g_{kij} D_k \quad (3.28a)$$

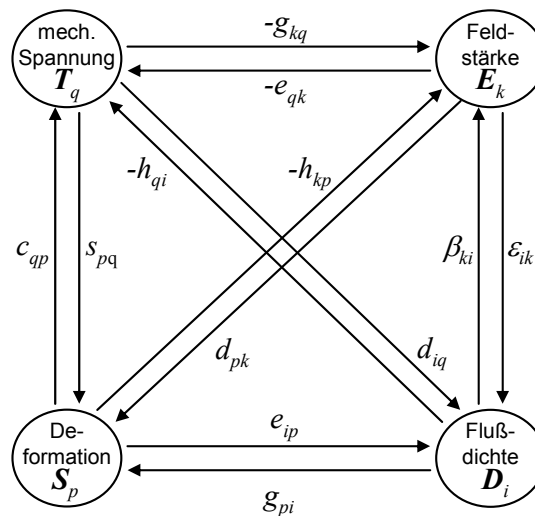
$$E_i = -g_{ikl} T_{kl} + \beta_{ik}^T D_k \quad (3.28b)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^D S_{kl} - h_{kij} D_k \quad (3.29a)$$

$$E_i = -h_{ikl} S_{kl} + \beta_{ik}^S D_k. \quad (3.29b)$$

Dabei sind  $h_{ikl}$ ,  $d_{ikl}$  und  $g_{ikl}$  die piezoelektrischen Konstanten,  $s_{ijkl}^E$  und  $s_{ijkl}^D$  sind die elastischen Nachgiebigkeiten bei konstantem elektrischem Feld bzw. bei konstanter dielektrischer Verschiebung. Mit  $\beta_{ik}^T$  und  $\beta_{ik}^S$  werden die dielektrischen Impermeabilitäten bei konstanter mechanischer Spannung bzw. Dehnung bezeichnet. Diese drei konstitutiven Gleichungspaare beschreiben jeweils den direkten (Gleichungen mit der Bezeichnung „a“) und den inversen piezoelektrischen Effekt (Bezeichnung „b“).

Die elektromechanischen Zusammenhänge des piezoelektrischen Effekts, die mit Hilfe der oben dargestellten konstitutiven Grundgleichungen beschrieben werden, werden in *Bild 3.2* dargestellt.



*Bild 3.2: Lineare elektromechanische Zustandsgleichungen [TicGau 80]*

Die Zustandsgrößen sind hier mit den Pfeilen über entsprechende Materialkonstanten gekoppelt. Die am Pfeil notierte Materialkonstante ist eine partielle Ableitung der Zustandsgröße, zu welcher der Pfeil hinzeigt, nach der Zustandsgröße, von welcher der Pfeil wegzeigt.

In der Praxis wird statt Tensoren häufig eine Matrixschreibweise verwendet. Der Grund hierfür liegt in der Symmetrie des Spannungs- und Dehnungstensors. Darüber hinaus sind

drei- und vierstufige Tensoren unübersichtlich. Hierbei werden die Indizes  $ij$  bzw.  $kl$  durch  $p$  bzw.  $q$  wie folgt ersetzt:

Tabelle 3.1: Zuordnung der Matrixindizes zu den Tensordoppelindizes

$ij$ oder $kl$	$p$ oder $q$
11	1
22	2
33	3
23 oder 32	4
31 oder 13	5
12 oder 21	6

[Wol 00]

Damit werden die konstitutiven Gleichungen (3.27a) und (3.27b) in folgende Matrixschreibweise überführt

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{kp} E_k \tag{3.30a}$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k \tag{3.30b}$$

wobei

$$T_q = T_{ij} \tag{3.31}$$

$$S_p = \begin{cases} S_{ij} & i = j \quad p = 1,2,3 \\ 2S_{ij} & i \neq j \quad p = 4,5,6 \end{cases} \tag{3.32}$$

$$s_{pq}^E = \begin{cases} s_{ijkl}^E & i = j \quad k = l \quad p, q = 1,2,3 \\ 2s_{ijkl}^E & i = j \quad k \neq l \quad p = 1,2,3 \quad q = 4,5,6 \\ 4s_{ijkl}^E & i \neq j \quad k \neq l \quad p, q = 4,5,6 \end{cases} \tag{3.33}$$

$$d_{iq} = \begin{cases} d_{ikl} & k = l \quad q = 1,2,3 \\ 2d_{ikl} & k \neq l \quad q = 4,5,6 \end{cases} \tag{3.34}$$

Die Indizes 1 bis 6 werden verwendet, um die Richtungen im kartesischen Raum zu kennzeichnen. Mit den Ziffern 1, 2 und 3 werden die Achsen des kartesischen Koordinatensystems ( $x$ ,  $y$  bzw.  $z$ ) bezeichnet. Die Ziffern 4, 5 und 6 bezeichnen Scherungen in einer auf der jeweiligen Achse senkrechten Ebene, siehe *Bild 3.3*. Der erste Index bei den Materialkonstanten gibt jeweils die Richtung der unabhängigen, der zweite die Richtung der abhängigen Größen an.

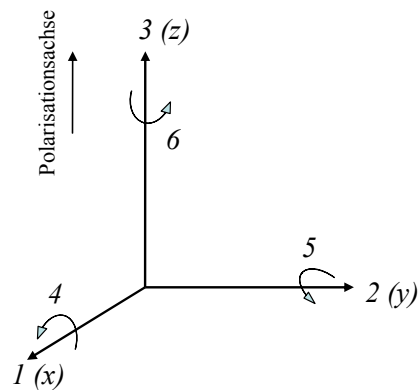


Bild 3.3: Festlegung der Indizes

Als Polarisationsachse bzw. Symmetrieachse wird üblicherweise die 3-Achse gewählt. Der Vorteil der Matrixschreibweise liegt daran, dass sich die Richtungsabhängigkeit des Piezoeffekts aufgrund der anisotropen Natur von Piezoelektrika anschaulicher darstellen lässt. Diese Richtungsabhängigkeit ist besonders in der Aktorik von Bedeutung, weil je nach der Beanspruchung, bezogen auf die Polarisationsachse des piezoelektrischen Kristalls, drei Arten des technisch nutzbaren inversen piezoelektrischen Effektes unterschieden werden können. Sie sind schematisch in folgender Abbildung dargestellt:

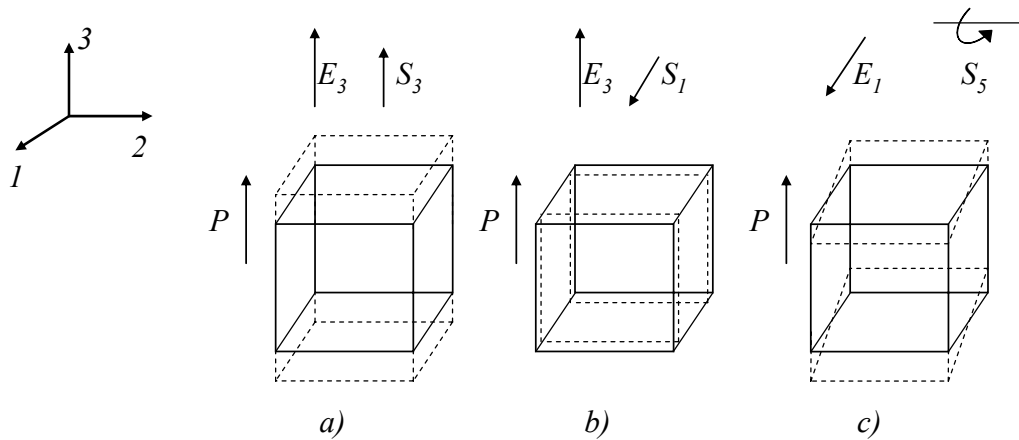


Bild 3.4: Piezoelektrische (richtungsabhängige) Teileffekte: a) Längseffekt ( $d_{33}$ -Effekt); b) Quereffekt ( $d_{31}$ -Effekt); c) Schereffekt ( $d_{15}$ -Effekt)

Neben einer klareren Bezeichnung der oben dargestellten Effekten bringt die Matrixschreibweise auch die effektive Anzahl der unabhängigen Tensorkoordinaten, die sich aus der Tensorsymmetrie ergibt, deutlich zum Ausdruck. Insgesamt ergeben sich im allgemeinen Fall unter Berücksichtigung von Symmetriebedingungen für piezoelektrische Werkstoffe 21 elastische, 18 piezoelektrische und 6 dielektrische Konstanten.

Bei der Beschreibung der Materialeigenschaften piezoelektrischer Werkstoffe ist es üblich, sämtliche Koeffizienten der Gleichungssysteme in einer sogenannten Verkoppelungsmatrix zusammenzufassen. Die Struktur dieser Matrix nimmt für die Gleichungen (3.30a) und (3.30b) folgende Gestalt an:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ \hline D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E & d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E & d_{12} & d_{22} & d_{23} \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E & d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ s_{14}^E & s_{24}^E & s_{34}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E & d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ s_{15}^E & s_{25}^E & s_{35}^E & s_{45}^E & s_{55}^E & s_{56}^E & d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ s_{16}^E & s_{26}^E & s_{36}^E & s_{46}^E & s_{56}^E & s_{66}^E & d_{16} & d_{26} & d_{36} \\ \hline d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & e_{11}^T & e_{12}^T & e_{13}^T \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & e_{12}^T & e_{22}^T & e_{23}^T \\ d_{31} & d_{23} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & e_{13}^T & e_{23}^T & e_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ \hline E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Die Zusammenstellung der elektromechanischen Matrizen sämtlicher möglicher Symmetriegruppen, die piezoelektrische Eigenschaften haben, ist z.B. in [Ike 96] enthalten.

Da die meist technisch bedeutungsvolle Piezoelektrika wie PZT-Keramiken aufgrund der Polarisierung eine Symmetrie eines hexagonalen Kristalls der Kristallklasse  $6mm$  aufweisen, sind dadurch nicht alle Elemente der Verkoppelungsmatrix besetzt. In diesem Fall, bei der angenommenen Z-Achse als Symmetrieachse, lässt sich die oben dargestellte Matrix (3.35) folgendermaßen schreiben:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ \hline D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (s_{11}^E - s_{12}^E) & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & e_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & e_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ \hline E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Das anisotrope piezoelektrische Materialverhalten einer PZT-Keramik wird aufgrund der Kristallsymmetrie durch fünf unabhängige elastische, drei unabhängige piezoelektrische und zwei unabhängige dielektrische Materialkonstanten beschrieben.

Neben den bisher dargestellten Größen ist noch eine Reihe von dimensionslosen Konstanten definiert, die die Fähigkeit des piezoelektrischen Materials zur Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie und umgekehrt beschreibt [BBGHS 76]. Es handelt sich dabei um die sogenannten elektromechanischen Kopplungsfaktoren, die den direkten Vergleich verschiedener piezoelektrischer Materialien hinsichtlich ihrer Energiewandlungsfähigkeit erlaubt.

Als direktes Maß für die Stärke der elektromechanischen Wechselwirkung wird der dimensionslose Kopplungsfaktor  $k_{eff}$  definiert. Er beschreibt die Fähigkeit eines Materials, elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln und umgekehrt [Rus 94]:

$$k_{eff(e)}^2 = \frac{\text{elektrische Energie, die in mechanische transformiert wird}}{\text{gesamte gespeicherte elektrische Energie}} \quad (3.37)$$

$$k_{eff(mech)}^2 = \frac{\text{mechanische Energie, die in elektrische transformiert wird}}{\text{gesamte gespeicherte mechanische Energie}} \quad (3.38)$$

## **4 Eindimensionale Modellierung und Analyse des dynamischen Verhaltens von piezoelektrischen Systemen**

Ein erfolgreicher Einsatz von piezoelektrischen Komponenten setzt ein vertieftes Verständnis des Verhaltens des gesamten Systems voraus. Der Aufbau dieser Systeme kann nicht ohne frühe Modellierung des Systemverhaltens und des Einflusses der Umgebung auf die Systemeigenschaften erfolgen. Dazu werden Modelle benötigt, mit denen das dynamische Verhalten dieser Systeme beschrieben werden kann. Diese Modelle, die auf der Grundlage von mathematisch formulierten, grundlegenden physikalischen Gesetzen entstehen, beschreiben die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems.

Bei der Erstellung der Modelle von piezoelektrischen Komponenten spielen elektromechanische Analogien eine große Bedeutung, die auf Grund der Ähnlichkeit in der Beschreibung des Verhaltens mechanischer und elektrischer Systeme die Möglichkeit einer einheitlichen mathematischen Beschreibung beider Teilsysteme bieten [Kro 99]. Auf diese Weise ist es möglich, die Wechselwirkung zwischen den miteinander gekoppelten elektrischen und mechanischen Größen des piezoelektrischen Systems leichter zu beschreiben.

In diesem Kapitel werden verschiedene vereinfachte Modelle zur Beschreibung des Verhaltens von piezoelektrischen Komponenten zusammengestellt. Gleich zu Beginn wird ein sehr abstraktes nichtparametrisches Modell dargestellt, bei dem das Piezoelement gewissermaßen als eine Art „Black Box“ behandelt wird. Ferner werden eindimensionale Modelle beschrieben: Masson-, Redwood-, KLM (Krimholtz - Leedom - Matthaei) - und BVD (Butterworth - Van Dyke) -Modell. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden andere Darstellungsformen der elektromechanischen Ersatzmodelle vorgestellt, die die Analogie zwischen elektrischen und mechanischen Wechselwirkungen deutlich veranschaulichen.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Modelle können im Gegensatz zu den aufwendigeren Modellen, die auf der Finite-Elemente-Methode basieren, in einfacher Weise in einem übergeordneten Gesamtsystem als Teilkomponente eingesetzt werden. Durch diese Integration ist es möglich die Analyse des Verhaltens des Gesamtmodells auf einer höheren Systemebene durchzuführen.

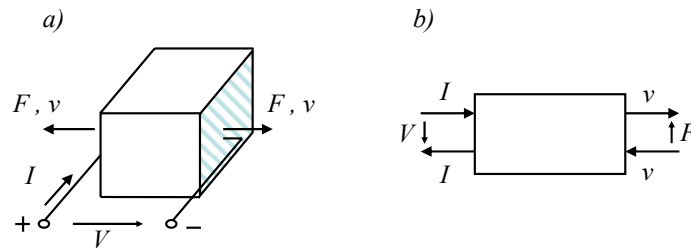
Am Ende des Kapitels wird kurz auf die Parameterbestimmung der Ersatzmodelle mit Hilfe von Messungen eingegangen.

### **4.1 Nichtparametrisches Modell**

Wie schon erwähnt wurde, betrachtet ein nichtparametrisches Modell das Piezoelement als eine Art „Black Box“, indem lediglich der direkte mathematische Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal des zu identifizierenden Piezoelements und dem dabei auftretenden

Ausgangssignal beschrieben wird. Der innere Aufbau und die innere Funktionsweise des Piezosystems wird bei diesem Modell nicht abgebildet und bleibt unbekannt. Dabei wird lineares Verhalten des Systems vorausgesetzt.

Im Hinblick auf die Netzwerk- und Vierpoltheorie der Elektrotechnik werden die piezoelektrischen Elemente als elektromechanische Vierpole dargestellt, siehe *Bild 4.1*.



*Bild 4.1 : a) Piezoelement mit Eingangs- und Ausgangsgrößen; b) Piezoelement als elektromechanischer Vierpol [Hem 01]*

Ein Vierpol besitzt, wie der Name besagt, vier Pole. Diese bilden je zwei Tore, die oft als Klemmen bezeichnet werden. Das Übertragungsverhalten des piezoelektrischen Elements wird durch die Vierpolgleichungen vollständig beschrieben. Diese Vierpolgleichungen verknüpfen die elektrischen Eingangsgrößen des Vierpols, Spannung  $V$  und Strom  $I$ , mit den mechanischen Ausgangsgrößen des Vierpols, Kraft  $F$  und Geschwindigkeit  $v$ , vgl. [Hem 01], [LCW 07].

Das Übertragungsverhalten bei Betrachtung harmonischer Schwingungen wird in der folgenden Leitwertform dargestellt:

$$\begin{bmatrix} \hat{I} \\ \hat{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V} \\ \hat{F} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

wobei  $\hat{I}$ ,  $\hat{V}$ ,  $\hat{F}$  und  $\hat{v}$  komplexe Amplituden beschreiben.

Das Übertragungsverhalten der Vierpole kann sehr gut anschaulich interpretiert werden, indem die einzelnen Variablen der komplexen Leitwertmatrix  $\underline{Y}$  nacheinander auf den Wert null gesetzt werden. Dies führt nach dem Prinzip des Überlagerens zur folgenden Übertragungsfunktionen:

$$\underline{Y}_{11} = \left. \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \right|_{\hat{F}=0} : \text{Kurzschluss-Eingangsadmittanz}, \quad (4.2)$$

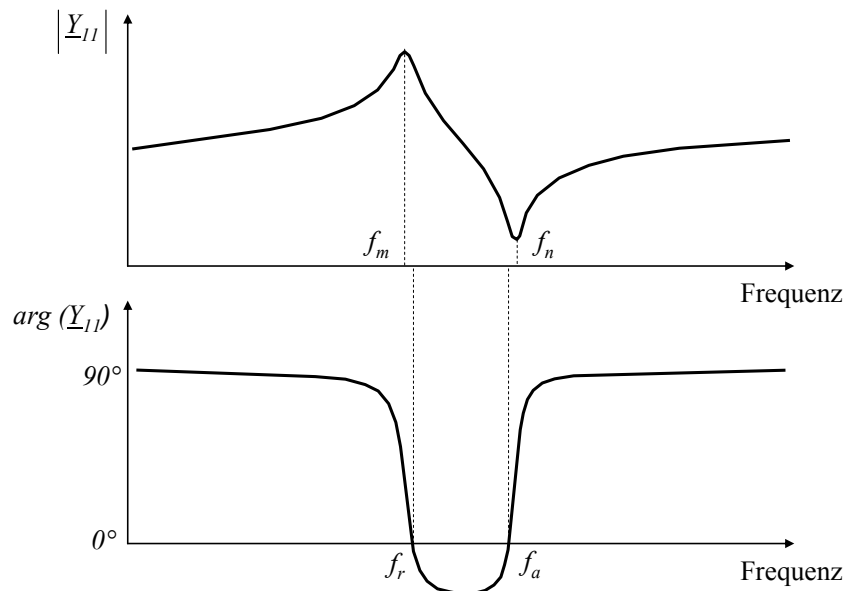


$$\underline{Y}_{12} = \left. \frac{\hat{I}}{\hat{F}} \right|_{\hat{V}=0} : \text{Kurzschluss-Kernadmittanz (rückwärts)}, \quad (4.3)$$

$$\underline{Y}_{21} = \left. \frac{\hat{V}}{\hat{I}} \right|_{\hat{F}=0} : \text{Kurzschluss-Kernadmittanz (vorwärts)}, \quad (4.4)$$

$$\underline{Y}_{22} = \left. \frac{\hat{V}}{\hat{F}} \right|_{\hat{V}=0} : \text{Kurzschluss-Ausgangadmittanz}. \quad (4.5)$$

Das Übertragungsverhalten wird meist in der Form von Frequenzgängen mit Betrag und Phase oder als Ortskurve in der komplexen Ebene graphisch dargestellt, siehe *Bild 4.2* und *Bild 4.3*.



*Bild 4.2: Frequenzgang der Kurzschluss-Eingangadmittanz eines Piezoelementes in der Nähe der Resonanzfrequenz*

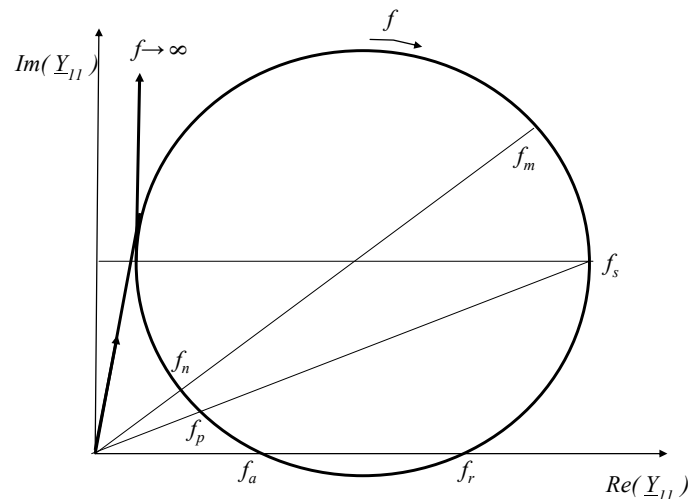


Bild 4.3: Ortskurve der Kurzschluss-Eingangsamittanz eines Piezoelementes in der Nähe der Resonanzfrequenz [Hem 01]

Aus dem hier dargestellten Frequenzverlauf der Kurzschluss-Eingangsamittanz ergeben sich drei Paare charakteristischer Frequenzen: Resonanzfrequenz  $f_r$  und Antiresonanzfrequenz  $f_a$ , Maximaladmittanzfrequenz  $f_m$  und Minimaladmittanzfrequenz  $f_n$  sowie Serienresonanzfrequenz  $f_s$  und Parallelresonanzfrequenz  $f_p$ . Diese charakteristischen Frequenzen werden bei der Identifikation der Modellparameter genauer beschrieben, siehe Kapitel 4.7.

Aus dem Phasenverlauf lässt sich erkennen, dass das System unterhalb der Resonanzfrequenz kapazitives Verhalten zeigt, der Strom eilt der Spannung um  $90^\circ$  voraus. Zwischen Resonanz und Antiresonanz eilt der Strom der Spannung um  $90^\circ$  nach, das System zeigt induktives Verhalten, und oberhalb der Antiresonanz zeigt das System erneut kapazitives Verhalten, vgl. [BCJ 64]

## 4.2 Mason-Modell

Das Ersatzschaltbild nach Mason ist ein weit verbreitetes eindimensionales Modell für die Berechnung des theoretischen Übertragungsverhaltens und der Bandbreite von piezoelektrischen Elementen, die hier als elektromechanischer Wandler betrachtet werden. Die Eindimensionalität ist dem Sinn zu verstehen, dass die laterale Abmessung des Piezoelementes viel größer als seine Dicke ist [JGS 00].

Im Unterschied zum nichtparametrischen Modell stellt das Mason-Modell einen Sechspol mit vier mechanischen und zwei elektrischen Klemmen dar und wird in der Form eines T-Netzwerk dargestellt, in dem die diskrete und verteilte Elemente miteinander vereinigt sind, siehe Bild 4.4.

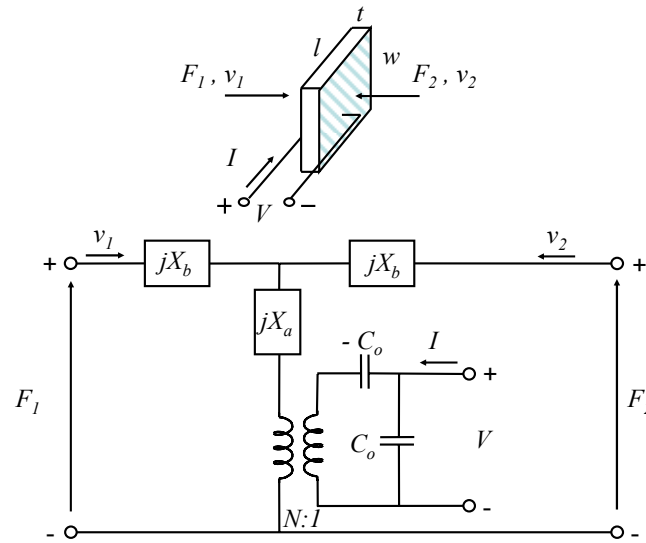


Bild 4.4: Mason-Modell des piezoelektrischen Wandlers für eine Dickenschwingungsmode  
[Mas 48]

Die mechanischen Eingänge entsprechen den Kräften und Geschwindigkeiten an den Elektrodenoberflächen, während der elektrische Eingang durch zwei Kontakte mit diesen gebildet wird. Der piezoelektrische Effekt wird durch einen idealen Transformator repräsentiert, der wiederum die mechanischen Größen in elektrische Größen mit dem Verhältnis  $1:N$  übersetzt. Die Kräfte, die die akustischen Signale repräsentieren, entsprechen elektrischen Spannungen, und die Geschwindigkeiten der Elektrodenflächen elektrischen Strömen [Mas 48]. Die folgenden Konstanten werden für das Ersatzschaltbild angegeben:

$$C_0 = \frac{\epsilon_{33}^S l w}{t} \quad (4.6)$$

$$N = C_0 h_{33} \quad (4.7)$$

$$X_b = Z_0 \tan\left(\frac{t \omega}{2v_t}\right) \quad (4.8)$$

$$X_a = \frac{-Z_0}{\sin\left(\frac{t \omega}{v_t}\right)} \quad (4.9)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} \quad (4.10)$$

$$Z_0 = \rho l w v_t \quad (4.11)$$

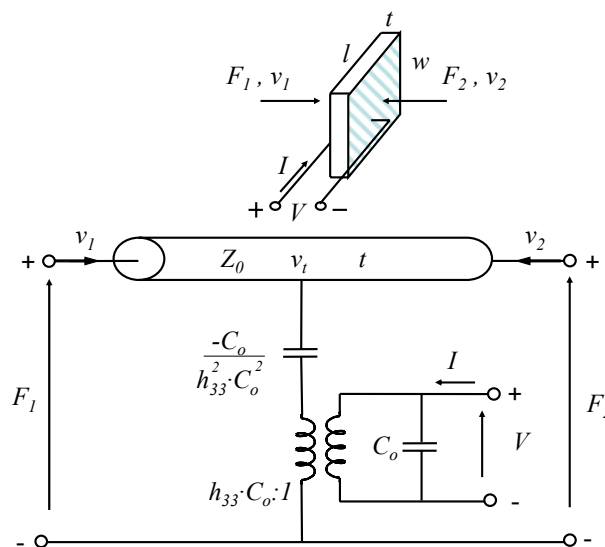
Hier ist  $C_0$  die statische elektrische Kapazität des Kondensators, der durch die Elektroden des Schwingelementes gebildet wird.  $l$ ,  $w$  und  $t$  sind die Abmessungen des Piezoelementes,  $\epsilon_{33}^S$  ist die Dielektrizitätskonstante,  $h_{33}$  ist der piezoelektrische Steifheitskoeffizient,  $c_{33}^D$  ist die elastische Steifigkeit,  $\rho$  ist die Dichte,  $\omega$  ist die Kreisfrequenz der stehenden akustischen Welle,  $Z_0$  ist die charakteristische akustische Impedanz des Piezoelementes und  $v_t$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Welle innerhalb des Piezoelementes. Die negative Kapazität  $-C_0$  repräsentiert den Einfluss des Depolarisationsfeldes im Piezoelement [Ike 96].

Mit Hilfe von Mason-Modellen können Zustände mit und ohne Last betrachtet werden. Eine mechanische Last wird durch zusätzliche Impedanzen an den mechanischen Klemmen abgebildet, siehe [Kos 66].

In bestimmten Fällen, wie z. B. dem unbelasteten Resonator, lässt sich das Mason-Modell in der Nähe der Resonanz bei geringer Belastung und Dämpfung zu einem Ersatzschaltbild vereinfachen, das nur aus diskreten Impedanzelementen besteht. Dabei handelt es sich um das sogenannte BVD-Modell, das in Kapitel 4.5 dargestellt wird. Eine ausführliche Beschreibung der Transformation des Mason-Modells in das BVD-Modell findet man bei [Ros 88].

### 4.3 Redwood-Modell

Das von Redwood vorgeschlagene Modell des piezoelektrischen Schwingers ist eine modifizierte Version des Mason-Modells. Im Vergleich zu dem Mason-Modell wurden in Redwood-Modell die frequenzabhängigen Komponenten des T-Netzwerks durch eine sogenannte Transmission-Line ersetzt, siehe *Bild 4.5*.



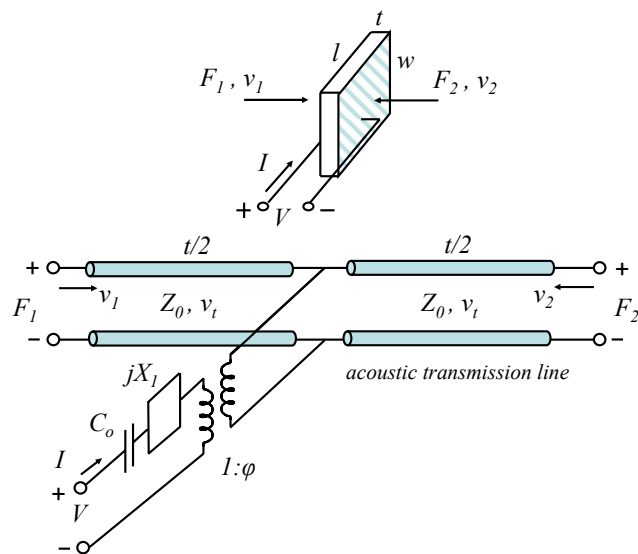
*Bild 4.5: Redwood-Modell für den piezoelektrischen Dickenschwinger [Red 61]*

Das Redwood-Modell enthält genauso wie das Mason-Modell die statische Kapazität  $C_0$  und den idealen Transformator. Die negative Kapazität wird hier zusammen mit der Transmission-Line an der Sekundärseite des Transformators angeschlossen. In der Fachliteratur kann man auch eine andere Darstellungsform des Ersatzschaltbildes nach Redwood finden, in dem sich die negative Kapazität auf der Primärseite des Transformators befindet, siehe [RadMan 04].

#### 4.4 KLM-Modell

Das Modell von Krimholtz, Leedom und Matthaei, kurz das KLM-Modell, ist neben dem Mason-Modell das am meisten verbreitete Ersatzschaltbild, das zur Simulation von schwingenden piezoelektrischen Elementen verwendet werden kann. Dieses Modell wird oft im Bereich der Medizintechnik für die Modellierung und Simulation von Ultraschall-Diagnostik-Geräten benutzt, die auf piezoelektrischen Komponenten basieren [Dij 03].

In diesem Modell sind die charakteristische akustische Impedanz  $Z_0$  und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Welle  $v_t$  in der akustischen Transmission-Line abgebildet, siehe *Bild 4.6*.



*Bild 4.6: KLM-Modell für den piezoelektrischen Dickenschwinger [KLM 70]*

Das Übersetzungsverhältnis  $\varphi$  des Transformators wird mit folgender Funktion angegeben:

$$\varphi = \frac{\omega Z_0}{2 h_{33}} \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{t \omega}{2 v_t}\right)}. \quad (4.12)$$

Die Komponente  $X_I$ , die zusammen mit dem Transformator die Piezoelektrizität im Modell repräsentiert, wird wie folgt definiert:

$$X_I = Z_0 \left( \frac{h_{33}}{\omega Z_0} \right)^2 \sin \left( \frac{t \omega}{v_t} \right) \quad (4.13)$$

Im Unterschied zu den vorher dargestellten Modellen nach Masson bzw. Redwood ist hier keine negative Kapazität vorhanden. Dadurch, dass die akustischen Kräfte nur durch die Transmission-Line fließen, ist die Trennung zwischen elektrischem und mechanischem (akustischem) Verhalten des piezoelektrischen Wandlers besser erkennbar.

Das KLM-Modell lässt sich ähnlich wie das Mason-Modell in der Nähe einer Resonanzfrequenz zu einem BVD-Modell mit konzentrierten Elementen vereinfachen, siehe z. B. [Dij 03].

#### 4.5 BVD-Modell

Wie schon erwähnt, beschreibt das BVD-Modell, benannt nach Butterworth und Van Dyke, das Verhalten des piezoelektrischen Wandlers in der Nähe einer Resonanzfrequenz in Form eines 2-poligen elektrischen Ersatzschaltbildes (Bild 4.7). Dieses Modell wurde schon 1925 von Van Dyke entwickelt und zählt zu den ältesten Modellen zur Simulation von piezoelektrischen Systemen.

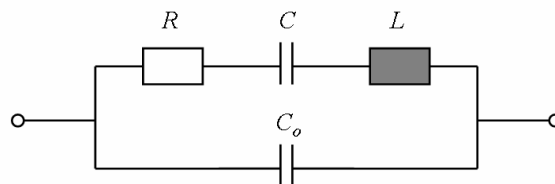
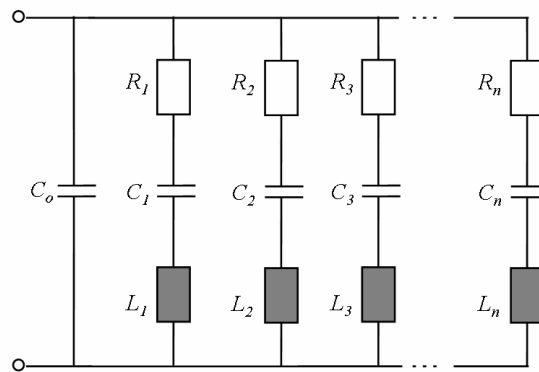


Bild 4.7: Ersatzschaltbild zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens eines Piezowandlers nach Butterworth und Van Dyke [VDy 25]

Das BVD-Ersatzschaltbild stellt die elektrische Wirkung des mechanischen Schwingers in einer Schaltung dar, die durch die Kombination eines seriellen und eines parallelen elektrischen Schwingers gekennzeichnet ist. Der obere Zweig, *motional branch* genannt, beschreibt die mechanischen Eigenschaften des Piezoelementes und wird durch die Kapazität  $C$ , die Induktivität  $L$  und den Widerstand  $R$  repräsentiert. Nach der elektromechanischen Analogie entspricht die Kapazität  $C$  der elastischen Nachgiebigkeit und die Induktivität  $L$  der schwingenden Masse. Der Widerstand  $R$  beschreibt dissipative Einflüsse und repräsentiert die Dämpfung. Im unteren Zweig, *electrical branch* genannt, werden mit der parallelen Kapazität  $C_o$  die dielektrischen Eigenschaften des Piezoelementes zwischen den Elektroden beschrieben, vgl. [JGS 00].

An dieser Stelle muss vermerkt werden, dass die Parallelkapazität  $C_o$  im Allgemeinen frequenzabhängig ist. Sie enthält nicht nur die geklemmte statische Kapazität, sondern auch die Einflüsse höherer Schwingungsmoden, die durch das Anlegen einer elektrischen Wechselspannung angeregt werden [DIN 483], [Ike 96]. Deshalb gibt diese vereinfachte Ersatzschaltung das Verhalten des piezoelektrischen Resonators nur in der Nachbarschaft der Resonanzfrequenz mit genügender Genauigkeit an, wo keine weiteren Resonanzen angeregt werden. Das heißt wenn, die betrachtete Schwingungsform in der Resonanz stark gegenüber den nicht resonant angeregten dominiert.

Durch die Parallelschaltung mehrerer  $RLC$ -Schaltkreise kann das Verhalten des unbelasteten piezoelektrischen Wandlers in verschiedenen mechanischen Schwingungsmoden modelliert werden, siehe *Bild 4.8*.



*Bild 4.8: Ersatzschaltbild eines Piezowandlers in der Nähe seiner ersten bis n-ten Eigenfrequenz*

Jeder einzelne Schwingungsmode wird hier durch einen entsprechenden  $RLC$ -Serienresonanzkreis repräsentiert. Ihre parallele Kopplung mit der Kapazität  $C_o$  ermöglicht die Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Piezowandlers in einem breiten Frequenzbereich.

Die charakteristische Übertragungsfunktion, die das Verhalten des Systems beschreibt und meist in Form einer Kurzschluss-Eingangsadmittanz dargestellt ist, lässt sich durch Anwendung der Kirchhoff'schen Stromverzweigungs-Gesetze bestimmen.

Alle Parameter, die in dem BVD-Modell auftreten, können – im Gegensatz zu Parametern, die in Masson-, Redwood- und KLM-Modellen beinhaltet sind – nur aus der Messung der Admittanz- bzw. Impedanz-Frequenzverläufen ermittelt werden.

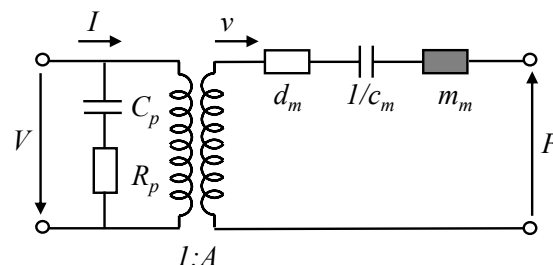
#### 4.6 Äquivalente elektromechanische Ersatzmodelle

Eine andere Möglichkeit, das Verhalten von piezoelektrischen Elementen zu beschreiben und zu modellieren, ohne die Detailkenntnis ihres inneren Aufbaus zu kennen, bieten die elektromechanischen Analogien. Im Folgenden wird die Analogie verwendet, in der die elektrische Spannung  $V$  einer mechanischen Kraft  $F$ , der elektrische Strom  $I$  einer mechanischen Geschwindigkeit  $v$  und die elektrische Ladung  $q$  einer Verschiebung  $x$  entspricht. Bei Betrachtung der Elemente dieser Ersatzschaltbilder werden die gleichen Analogien, die bei dem BVD-Modell schon erwähnt wurden, verwendet. Die piezoelektrische Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Größen wird durch einen idealen Transformator bzw. einen starren, masselosen, reibungsfrei gelagerten Hebel abgebildet, vgl. [HLW 98], [Kro 99], [Wal 00a].

Die Analogien zwischen mechanischen und elektrischen Größen sind in *Tabelle 4.1* angegeben.

*Tabelle 4.1: Elektromechanische Analogien*

Mechanik		Elektrik	
Kraft	$F$	$V$	Spannung
Geschwindigkeit	$v$	$I$	Strom
Verschiebung	$x$	$q$	Ladung
Dämpfung	$d$	$R$	Ohmscher Widerstand
Masse	$m$	$L$	Induktivität
Nachgiebigkeit	$1/c$	$C$	Kapazität



*Bild 4.9: Elektrisches Ersatzmodell eines piezoelektrischen Aktors [Wal 00a]*



Bild 4.9 zeigt ein äquivalentes elektrisches Ersatzmodell eines piezoelektrischen Aktors in der Nähe einer isolierten Resonanzfrequenz. Im Vergleich zum BVD-Modell wird hier ein piezoelektrischer Aktor als Vierpol betrachtet, bei dem die elektrische Seite mit der mechanischen Seite durch einen Transformator gekoppelt ist. Dabei wurde das Modell auch um einen Widerstand  $R_p$  zur Beschreibung der auftretenden dielektrischen Verluste erweitert.

Unter Anwendung der oben dargestellten elektromechanischen Analogien lässt sich das äquivalente elektrische Ersatzmodell leicht in ein äquivalentes mechanisches Ersatzmodell überführen (siehe Bild 4.10).

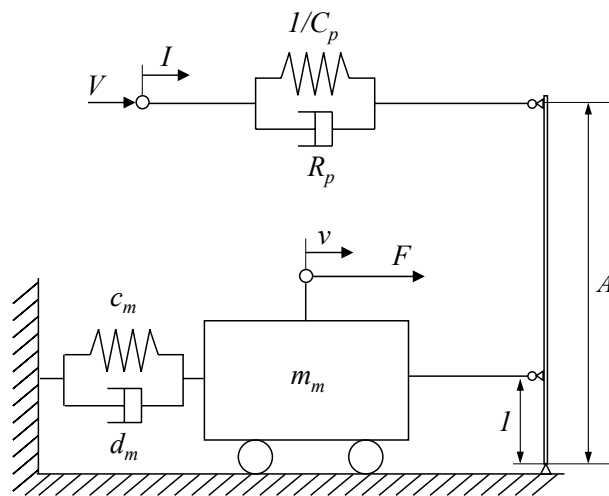


Bild 4.10: Mechanisches Ersatzmodell eines piezoelektrischen Aktors [Wal 00a]

Bei der Beschreibung des Schwingungsverhaltens des piezoelektrischen Aktors haben die Parameter in den beiden oben dargestellten Ersatzmodellen folgende Bedeutung:  $R_p$  beschreibt die dielektrischen Verluste in der Piezokeramik und  $C_p$  deren kapazitives Verhalten. Die Masse  $m_m$  entspricht der effektiv schwingenden modalen Masse,  $d_m$  der modalen mechanischen Dämpfung und  $c_m$  der modalen Steifigkeit bei der entsprechenden Schwingungsform. Die dargestellten Ersatzmodelle beschreiben somit das Schwingverhalten eines Einmassenschwingers in der Nähe seiner Resonanzfrequenz [Hem 01].

Dass die beiden Ersatzmodelle völlig äquivalent zueinander sind, zeigt sich besonders bei der Herleitung der zugehörigen Bewegungsgleichungen, die schließlich auf die dynamische Übertragungsfunktion in Matrix-Schreibweise führt:

$$\begin{bmatrix} \hat{I} \\ \hat{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A^2}{j\Omega \cdot m_m + d_m + \frac{c_m}{j\Omega}} + \frac{l}{R_p + \frac{l}{j\Omega \cdot C_p}} & \frac{A}{j\Omega \cdot m_m + d_m + \frac{c_m}{j\Omega}} \\ \frac{A}{j\Omega \cdot m_m + d_m + \frac{c_m}{j\Omega}} & \frac{l}{j\Omega \cdot m_m + d_m + \frac{c_m}{j\Omega}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V} \\ \hat{F} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Aus den Termen, die in der Leitwertmatrix enthalten sind, lassen sich charakteristische Frequenzgänge ermitteln.

#### 4.7 Parameteridentifikation

Zur vollständigen Modellierung und Durchführung von Berechnungen ist die Kenntnis der jeweiligen Parameter unerlässlich. Die Bestimmung der Materialparameter von piezoelektrischen Keramiken erfolgt anhand von Impedanzmessungen der Resonanz- und Antiresonanzfrequenzen an genau definierten normierten Probenkörpern. In [DIN 483] findet man genaue Beschreibung von Messmethoden zur Ermittlung der Materialkoeffizienten von Piezokeramiken bei geringen Feldstärken im Kleinsignalantrieb. Die Verfahren zur Großsignalcharakterisierung piezoelektrischer Aktoren, die nichtlineare Materialzusammenhänge in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke liefern, wurden in [Sim 96] vorgestellt.

Die Parameteridentifikation für die Ersatzmodelle erfolgt auf die gleiche Weise wie bei der Ermittlung von Materialparametern piezoelektrischer Keramiken. Die Messungen werden hier jedoch nicht an definierten Probenkörpern, sondern direkt an Piezoelementen, die oft schon in einem Gesamtsystem integriert sind, durchgeführt. Dank dieser Messungen werden komplexe Parameter ermittelt, die auch mechanische Einflüsse der anderen Teilsysteme des übergeordneten Gesamtsystems berücksichtigen.

Zur Parameterbestimmung werden charakteristische Punkte der gemessenen Ortskurven verwendet. In [Len 74] ist ein Verfahren zur Parameterbestimmung beschrieben, das nur auf rein elektrischen Messgrößen basiert. Dazu wird ein vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild benutzt, in dem zwecks der Vereinfachung der Parameteridentifikation im Gegensatz zur bisherigen Reihenschaltung von Kondensator  $C_p$  und Widerstand  $R_p$  eine Parallelschaltung verwendet wird, siehe *Bild 4.11*.

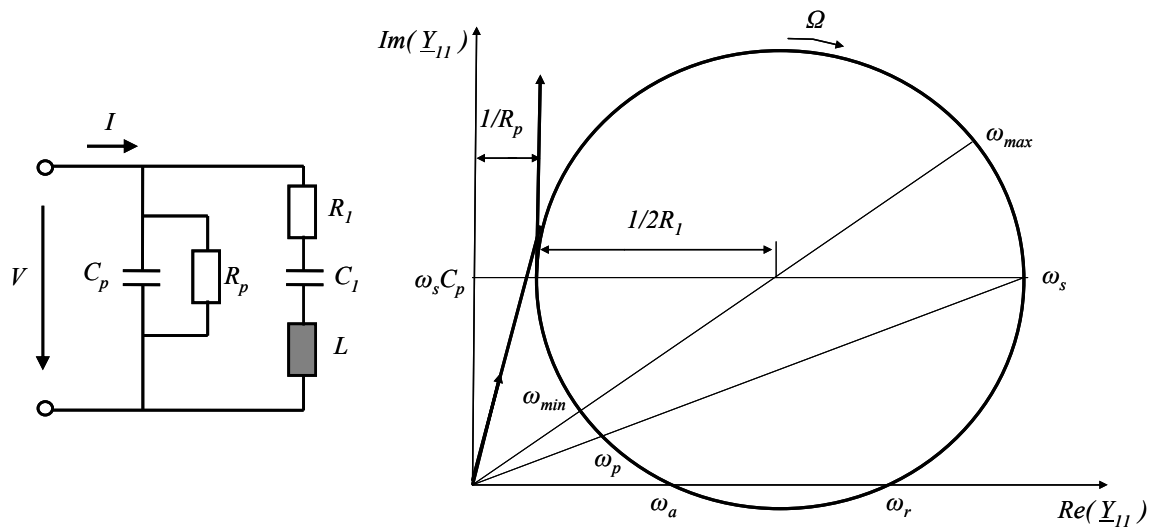


Bild 4.11: Elektrisches Ersatzbild und Ortskurve für verlustbehaftete piezoelektrische Schwinger in Nähe einer Resonanzfrequenz [Len 74]

Die ideale Admittanz des gedämpften Serienresonanzkreises (d.h.  $C_p = 0$  und  $R_p = 0$ ) stellt in der komplexen Ebene einen zur reellen Achse symmetrischen Kreis dar. Der Teil, der über der realen Achse liegt, bildet die kapazitiven Eigenschaften des Serienresonanzkreises ab, während der untere Teil die induktiven Eigenschaften beschreibt. Durch die Parallelschaltung der Kapazität  $C_p$  wird ein kapazitiver Leitwert addiert und der Kreis wird nach oben verschoben. Die Admittanz wird dadurch nur im Gebiet zwischen Resonanzfrequenz  $\omega_r$  und Antiresonanzfrequenz  $\omega_a$  induktiv. Die zusätzliche Parallelschaltung des Widerstandes  $R_p$  verschiebt den Kreis nach rechts in Richtung der positiven reellen Achse.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass in vielen Fällen und besonders bei Leistungsschallwandlern der Widerstand  $R_p$  vernachlässigt werden kann, womit sich das System und vor allem die Parameteridentifikation erheblich vereinfacht, vgl. [RMG 85], [Lit 03].

Die Ersatzparameter  $R_l$ ,  $R_p$  und  $C_p$  des vereinfachten elektrischen Ersatzschaltbildes lassen sich nahezu direkt aus der Ortskurve ablesen. Die übrigen Parameter können durch Auswertung an wenigen Frequenz-Stützstellen ermittelt werden. Von besonderer Bedeutung sind hier zwei Frequenzen:

- Serienresonanzfrequenz, d.h. die Frequenz mit minimaler Impedanz im Serienzweig

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC_1}} \quad (4.15)$$

- Parallelresonanz (Frequenz mit parallel dazu geschalteter Kapazität  $C_p$ )

$$\omega_p = \omega_s \cdot \sqrt{1 + \frac{C_l}{C_p}} = \sqrt{L \frac{C_p C_l}{C_p + C_l}}. \quad (4.16)$$

Bei einem verlustlosen Resonator ( $R_p = 0$ ) fallen die drei Frequenzpaare ( $\omega_{max} = \omega_r = \omega_s$  und  $\omega_{min} = \omega_a = \omega_p$ ) zusammen und entsprechen dem Minimum bzw. Maximum der Impedanz. Für vernachlässigbare Verluste können anstatt  $\omega_s$  und  $\omega_p$  die Frequenzen  $\omega_{max}$  und  $\omega_{min}$  verwendet werden, um die Parameter  $C_l$  und  $L$  zu ermitteln.

Die Bauelemente, die das mechanische Verhalten beschreiben und sich im elektromechanischen Ersatzmodell im rechten Zweig befinden (siehe *Bild 4.9*), werden durch Multiplikation der vorhandenen elektrischen Größen mit dem Übertragungsfaktor  $A$  ermittelt:

$$c_m = \frac{A^2}{C_1} \quad (4.17)$$

$$d_m = A^2 R_l \quad (4.18)$$

$$m_m = A^2 L. \quad (4.19)$$

wobei sich der Übertragungsfaktor  $A$  aus dem Quotient der Kreisradien der Ortskurven der elektrischen Kurzschluss-Eingangsadmittanz und der mechanischen Kurzschluss-Kernadmittanz ergibt, siehe [Lit 03].

Aus den gemessenen mechanischen und elektrischen Signalverläufen und den Amplituden der Signale kann nicht nur auf das Übertragungsverhalten des Systems, sondern auch auf seine Verstärkung und Verluste geschlossen werden.

Der effektive Kopplungsfaktor, der ein Maß für das Verhältnis der gespeicherten mechanischen Energie zu der gesamten aufgenommenen Energie darstellt, lässt sich aus der Serien- und der Parallelresonanzfrequenz bestimmen [Rus 94]:

$$k_{eff}^2 = \frac{\omega_p^2 - \omega_s^2}{\omega_p^2} \quad (4.20)$$

bzw. für vernachlässigbare Verluste aus der Resonanz- und Antiresonanzfrequenz

$$k_{eff}^2 = \frac{\omega_a^2 - \omega_r^2}{\omega_a^2}. \quad (4.21)$$

Durch Messung der 3dB-Bandbreite der Serienresonanz des schwingfähigen Piezosystems kann die mechanische Güte  $Q_m$  bestimmt werden, siehe [BBGHS 76]. Diese Größe bildet ein

Maß für sämtliche Energieverluste in einem piezoelektrischen Resonator und wird durch die inneren Verluste stark beeinflusst.

Das oben beschriebene Identifikationsverfahren ist nur für solche Fälle gut geeignet, in denen die Messung der Frequenzgangkurven mit guter Qualität und feiner Auflösung möglich ist. Schon geringe Ungenauigkeiten bei der Auswertung der charakteristischen Frequenzstützstellen der Ortskurven können zu erheblichen Fehlern bei der Parameterermittlung führen. Deshalb ist es erforderlich, die Messung insbesondere in Nähe der Resonanzstelle mit einer ausreichend hohen Frequenzauflösung durchzuführen. Darüber hinaus muss bei dieser Form der Parameteridentifikation besonders darauf geachtet werden, dass nur solche Stützstellen zur Bestimmung der Ersatzparameter verwendet werden, die von den benachbarten Resonanzen nicht zu stark beeinflusst sind.

Eine weitere Möglichkeit der Parameterbestimmung bietet die Finite-Elemente-Methode, die im nächsten Kapitel dargestellt wird. Diese hat den Vorteil, dass sie nicht auf Messungen angewiesen ist, und deshalb schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden kann, wenn noch keine Prototypen für Messungen verfügbar sind.



## 5 Finite-Elemente-Methode (FEM)

Bei der Berechnung von klassischen Randwertproblemen der Kontinuumsmechanik muss oft ein gekoppeltes System von partiellen Gleichungen bestehend aus den kinematischen Beziehungen, den Gleichgewichtsbedingungen (lokale Impulsbilanz) und dem Materialgesetz unter Berücksichtigung von Randbedingungen gelöst werden. Die analytische Lösung dieser Systeme von Feldgleichungen ist in der Kontinuumsmechanik nur für wenige einfache Randwertprobleme möglich. Für Fälle, bei denen einfache geschlossene Lösungen bei komplexen Geometrien bzw. Belastungsverhältnissen der zu untersuchenden Objekten nicht mehr angewandt werden können, werden rechnergestützte Verfahren verwendet.

Eins der am häufigsten eingesetzten numerischen Verfahren zur Berechnung einer Vielzahl von komplexen technischen und physikalischen Problemstellungen ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Klassische Anwendungen dieser Methode finden sich in der Berechnung der Verformungen von Bauteilen unter Belastung, der Bestimmung der Spannungsverteilung in den belasteten Bauteilen sowie der Untersuchung von Schwingungen von Strukturen. Neben der Berechnung linearer und nichtlinearer Probleme der klassischen Mechanik mittels der Finite-Elemente-Methode können auch Fragestellungen aus der Strömungslehre, Wärmeübertragung, Akustik und elektrischen Feldtheorie behandelt werden.

Ausführliche Einführungen in der Theorie der FEM und ihre Grundlagen sind in vielfältiger Form im umfangreichen Schrifttum dargestellt worden, siehe [Zie 71], [MülGro 06]. Es ist deshalb nicht das Ziel dieses Kapitels, die genaue detaillierte Grundlagen der klassischen FEM und ihre Anwendung in ihren Einzelheiten darzustellen.

Deshalb werden in diesem Kapitel nur die Grundzüge des Vorgehens aufgezeigt. Insbesondere wird die Finite-Elemente-Formulierung für piezoelektrische Elemente dargestellt. Basierend auf den früher dargestellten konstitutiven Gleichungen wird die Finite-Elemente-Formulierung zur Beschreibung piezoelektrischer Elemente hergeleitet. Außerdem werden die Probleme der Strukturmechanik in der FEM sowie der Modellierung von Dämpfung angesprochen.

### 5.1 Einführung in die allgemeine strukturmechanische Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode ist das derzeit wohl am häufigsten eingesetzte numerische Berechnungsverfahren für Aufgabenstellungen der Ingenieurwissenschaften. Obwohl die Vorgeschichte der FEM und ihrer Grundlagen schon im 19. Jahrhundert beginnt, wurde diese Methode hauptsächlich erst in den letzten 50 Jahren für die Bedürfnisse der Flugzeug- und Fahrzeugindustrie entwickelt. Seit dieser Zeit erweitert sich der Anwendungsbereich dieser Methode ständig und ihre Entwicklung ist bis heute noch nicht abgeschlossen.

Die erhebliche Steigerung der Rechenleistung und die Verbesserung der Software in den letzten Jahren haben dazu geführt, dass heutzutage die FEM zu einem unersetzlichen Werkzeug in der Entwicklung und Konstruktion sowie in der Forschung geworden ist.

Die Finite-Elemente-Methode ist ein Nährungsverfahren zur Lösung von physikalischen Problemen, die über partielle Differentialgleichungen beschrieben werden können. Im Gegensatz zu den klassischen analytischen Verfahren, bei denen die betrachtenden Differentialgleichungen von Kontinua in analytischer Form exakt gelöst werden müssen, überführt die FEM ein kontinuierliches Problem in ein diskretes Problem und liefert dabei eine approximative Lösung.

Das grundlegende Vorgehen bei der Finite-Elemente-Methode besteht darin, dass der betrachtete Gesamtkörper in eine endliche Anzahl von abgeschlossenen Teilkörpern (finite Elemente) zerlegt wird. Die Eigenschaften dieser einzelnen Elemente sind durch Parameter definiert, die von der jeweiligen Elementformulierung abhängen. Innerhalb eines Elementes werden dessen Eigenschaften zwischen den Werten der Elementknoten (die Stellen, an denen die Elemente mit ihren Nachbarelementen verbunden sind) mit sogenannten Ansatzfunktionen interpoliert. Diese Funktionen müssen so gewählt werden, dass die geometrischen Rand- und Übergangsbedingungen erfüllt werden. Die Nährungsfunktion für Gesamtstruktur setzt sich also aus den Lösungsansätzen der Teilkörper zusammen. Durch die Verwendung einer größeren Anzahl von finiten Elementen ist zum einen eine genauere Approximation der Geometrie der gegebenen Struktur möglich, zum anderen erreicht man so eine immer genauere numerische Abbildung des gegebenen physikalischen Problems. So lässt sich als Konvergenzfall eine genaue Nährung der FEM-Lösung an die exakte analytische Lösung der Differentialgleichung erreichen.

Der Ausgangspunkt für die Finite-Elemente-Methode bildet nicht die starke Form des klassischen Randwertproblems, sondern die sogenannte Variationsformulierung bzw. schwache Formulierung des Gleichgewichts. Der Terminus „schwach“ weist darauf hin, dass die Erfüllung des gegebenen Gleichgewichts nicht mehr in jeden Punkt des betrachteten Gebietes, sondern nur im integralen Mittel gefordert wird. Das heißt, das Gleichgewicht wird lokal nicht exakt betrachtet, integral jedoch exakt erfüllt [Wit 07].

Die schwache Form des Gleichgewichts, die oft in Form des Prinzips der virtuellen Arbeit dargestellt ist, wird in der verschiebungsbezogenen Finite-Elemente-Formulierung für die Erzeugung von Elementgleichungen verwendet.

Durch Einsetzen der angepassten Ansatzfunktionen können die gesuchten finiten Gleichungen mit den Knotenverschiebungen, den äußeren Lastvektoren und der Elementsteifigkeitsmatrix gewonnen werden. Der Zusammenbau der einzelnen finiten Elemente zu einer Gesamtstruktur (Assemblierung) führt zusammen mit den Anfangs- und Randbedingungen zu einem Gesamtgleichungssystem. Die Lösung dieser Gleichgewichtsbeziehungen für den Elementeverbund



liefert die Verschiebungen der Gesamtstruktur und daher die Knotenverschiebungen. Die Knotenkräfte werden durch Multiplikation der Steifigkeitsmatrizen mit den Knotenverschiebungen berechnet.

Sind alle Knotenverschiebungen und Knotenkräfte bekannt, so lassen sich aus den Einzelelementbeziehungen das Verzerrungs-, Verschiebungs- und Spannungsfeld eines jeden Elementes und somit der Gesamtstruktur bestimmen.

Statt vom Prinzip der virtuellen Arbeit auszugehen, können als Ausgangspunkt für die Herleitung der schwachen Formulierung zahlreiche erweiterte Variationsprinzipien (z.B. Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie, Prinzip von Hamilton) verwendet werden. Dadurch ist es möglich, viele verschiedene Finite-Elemente-Implementationen zu entwickeln.

Für einen vertiefenden Einblick in die Theorie der FEM sei z.B. auf [Bat 82], [Lin 02] verwiesen.

## 5.2 Finite-Elemente-Methode für piezoelektrische Strukturen

In der Literatur gibt es sehr viele Veröffentlichungen zur Thematik der Modellierung von piezoelektrischen Strukturen mittels Finite-Elemente-Methode. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden nur die wichtigsten Publikationen und für die weitere Behandlung des Themas besonders interessanten Arbeiten erwähnt.

Die Geschichte der Finite-Elemente-Formulierung für piezoelektrische Materialien ist mit der Entwicklung von allgemeiner Finite-Elemente-Methode eng verbunden. Die Variationsprinzipien, die den Ausgangspunkt für die Herleitung der schwachen Form für piezoelektrische Kontinua bilden, wurden schon in 60er Jahren formuliert [Tie 68], [EeN 67].

In [Tie 67] wurde das Hamilton-Prinzip zur Aufstellung der Grundgleichung verwendet, wobei im Gegensatz zu dem reinen elastischen Fall anstelle der potentiellen Energie die elektrische Enthalpie verwendet wurde.

Eine der ersten Arbeiten, die sich mit der Finite-Elemente-Formulierung für piezoelektrische Materialien befasste, wurde von Allik und Huges [AllHug 70] vorgestellt. Das hier entwickelte Tetraederelement mit 4 Knoten und 4 Freiheitsgraden pro Knoten (3 translatorische und elektrisches Potential) wurde mit linearen Ansatzfunktionen beschrieben und zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens eines piezoelektrischen Transducer eingesetzt. Die hier dargestellte Formulierung kann genauso gut für die Herleitung von 2-D sowie 1-D Finite Elemente benutzt werden.

In den Arbeiten [MLJS 95], [SBHNC 04] wurden Elementformulierungen für Volumenelemente höherer Ordnung entwickelt. In [TzoTse 90], [Tzo 93] werden z.B. 8-Knoten-

Hexaederelemente für die Modellierung von dünnwandigen piezoelektrischen Sensor/Aktuator-Strukturen vorgestellt. Bei diesen Elementen werden neben acht strukturellen Knoten noch drei zusätzliche interne Knoten eingefügt, um Probleme mit der Steifigkeit in der Dickenrichtung der Elemente zu vermeiden. Darüber hinaus wird hier für die Modellreduktion ein Guyan-Reduktionsverfahren angewandt und es werden Regelungsalgorithmen für aktive piezoelektrische Strukturen vorgestellt.

Aufgrund des rechnerischen Aufwands bei der Analyse dünnwandiger Strukturen, die mit Volumenelementen modelliert sind, ist ein Einsatz von piezoelektrischen Platten- und Schalenelementen vorteilhaft. Diese Elemente, die oft Ansatzfunktionen höherer Ordnung verwenden und auf der klassischen Laminattheorie beruhen, sind in der Literatur zahlreich vertreten, siehe z.B. [YLC 88], [BalNar 01], [KHM 00]. Eine gute Übersicht über die weiteren Entwicklungen auf dem Gebiet der neuartigen Elementformulierungen ist in [Mes 04] zu finden.

In [Ler 90] wurden FEM-Simulationsbeispiele für 2- und 3-dimensionale piezoelektrische Strukturen vorgestellt. Die berechneten Eigenmoden und vor allem die elektrischen und mechanischen Impedanzen wurden mit Messergebnissen verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung. Die durchgeführten Analysen ermöglichten es, ein besseres Verständnis des physikalischen Mechanismus der akustischen Wellenausbreitung in piezoelektrischen Materialien zu gewinnen, und können eine gute Basis für die Design-Optimierung von piezoelektrischen Transducern bilden.

Die FE-Analyse für piezoelektrische Strukturen, die in Anbetracht ihrer Geometrie und Anregung als axialsymmetrisch betrachtet werden können, wurde in [SedHef 05] dargestellt. Die Algorithmen für die numerische Lösung der Eigenwertprobleme bei der FE-Analyse von piezoelektrischen Strukturen sind in [YooYou 96] zu finden. Ein Überblick über die Implementierungsmöglichkeiten der verschiedenen dynamischen Berechnungsmethoden innerhalb der FE-Methode und praktische Anwendungsbeispiele sind in [Ste 02] vorgestellt.

Für die Durchführung von FE-Simulationen piezoelektrischer Strukturen gibt es auf dem kommerziellen Markt eine große Auswahl an FEM-Programmen. Die FE-Formulierungen und Anwendungsbeispiele für das in dieser Arbeit verwendete FEM-Programm ANSYS finden sich z.B. in [LCS 99], [Ben 05], [AGLO 04], [NSA 04], [Bar 03].

In den letzten Jahren entstanden viele Arbeiten, die sich mit der Modellierung sog. aktiver Strukturen mit applizierten bzw. integrierten piezoelektrischen Materialien beschäftigen, siehe z.B. [TzoTse 90], [HCF 90], [[XuKo 02], [YVV 97], [BaiVel 05], [JVV 97], [CasVal 04], [MHES 01], [KekTab 05], [SMGR 04]. Zur Simulation und Optimierung von Strukturkomponenten hat sich die Finite-Elemente-Methode als Standardverfahren etabliert. Die dabei verwendeten FE-Modelle werden in Frequenz- sowie Zeitbereich betrachtet und werden auch zur Reglerauslegung eingesetzt. Die große Anzahl von Freiheitsgraden in vielen komplexen

FE-Modellen führt dazu, dass die numerische Lösung extrem zeitaufwändig ist und dadurch diese Modelle für die Regelung ungeeignet sind. Um dieses Problem zu lösen, muss das FE-Modell auf ein Minimalmodell reduziert werden, welches einerseits das dynamische Systemverhalten entsprechend den regelungstechnischen Anforderungen hinreichend gut abbildet und andererseits minimalen Rechenaufwand für die Simulation gewährleistet. Unter den vielen Reduktionsverfahren haben sich Methoden, die auf einer modalen Entkopplung des Systems basieren, bewährt. Bei diesen Methoden werden FE-Modelle, unter Nutzung der ausgewählten relevanten Eigenmoden, modal reduziert und in den Zustandsraum überführt.

Die theoretischen Zusammenhänge der modalen Modellreduktion für mechanische Strukturen werden u.A. in [Gaw 04], [Mey 03], [Her 03], [May 03], [GasKno 89], [Hat 01], [Zha 03], [DieKno 97] behandelt.

Die modale Betrachtung und Modalzerlegung von FE-Modellen von piezoelektrischen Strukturen wird in [HMH 04] und insbesondere in den Arbeiten [PiePre 00a], [PiePre 00b], [OudBoe 02a], [OudBoe 02b] dargestellt.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen hier die Arbeiten [Pie 01], [Oud 03]. Neben einer sehr guten Übersicht zur FE-Modellierung für piezoelektrische Materialien wird dort auch die Überführung der modal entkoppelten Gleichungen in eine Zustandsraumdarstellung detailliert vorgestellt.

### 5.3 Herleitung der FE-Formulierung für piezoelektrische Materialien

Wie schon erwähnt, bildet die schwache Form der Bewegungsgleichungen die Ausgangsbasis für die Finite-Elemente-Methode. Für piezoelektrische Materialien werden die Bewegungsgleichungen und die zugehörigen Randbedingungen mit Hilfe des Prinzips von Hamilton hergeleitet.

Das Prinzip von Hamilton für piezoelektrische Kontinua in seiner modifizierten Form lautet

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0, \quad (5.1)$$

wobei hier vorausgesetzt wird, dass die Variationen zu den jeweiligen Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  verschwinden, siehe [Tie 67].

In der obigen Gleichung ist  $L$  die Lagrangefunktion, die sich aus der kinetischen mechanischen Energie  $T$  und der elektrischen Enthalpiedichte  $H$  zusammensetzt:

$$L = \int_V (T - H) dV, \quad (5.2)$$

und  $W$  die virtuelle Arbeit aller auf der Oberfläche auftretenden Kräfte und elektrischen Ladungen

$$\delta W = \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_b dV + \int_{\Omega_1} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_s d\Omega_1 - \int_{\Omega_2} \delta \varphi q_s d\Omega_2 + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_p - \delta \varphi \mathbf{Q}_p. \quad (5.3)$$

Darin sind  $\mathbf{F}_b$  die Volumenkraft,  $\mathbf{F}_s$  die Oberflächenkraft (auf der Fläche  $\Omega_1$ ),  $\mathbf{F}_p$  die Einzelkraft,  $q_s$  die elektrische Oberflächenladung (auf der Fläche  $\Omega_2$ ),  $\mathbf{Q}_p$  die konzentrierte Ladung,  $\varphi$  das elektrische Potential und  $\mathbf{u}$  die Verschiebung [AllHug 70].

Die kinetische Energie in der Gleichung (5.2) wird mit der Dichte  $\rho$  in der folgenden Form angegeben:

$$T = \frac{1}{2} \rho \dot{\mathbf{u}}^T \dot{\mathbf{u}}. \quad (5.4)$$

Werden die Verzerrungen  $S$  und das elektrische Feld  $E$  als unabhängige Variable betrachtet, dann kann die elektrische Enthalpiedichte  $H$ , die die innere Energie in der Lagrangefunktion ersetzt, in der bekannten Form (siehe Gleichung 3.20) beschrieben werden

$$H = \frac{1}{2} c_{ijkl}^E S_{ij} S_{kl} - e_{ijk} E_i S_{jk} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^S E_i E_j. \quad (5.5)$$

Setzt man obige Gleichungen in die Gleichung (5.1) ein so ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \left[ \delta \int_V \left( \frac{1}{2} \rho \dot{\mathbf{u}}^T \dot{\mathbf{u}} - \frac{1}{2} c_{ijkl}^E S_{ij} S_{kl} + e_{ijk} E_i S_{jk} + \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^S E_i E_j \right) dV \right] dt + \\ & + \int_{t_1}^{t_2} \left( \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_b dV + \int_{\Omega_1} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_s d\Omega_1 - \int_{\Omega_2} \delta \varphi q_s d\Omega_2 + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_p - \delta \varphi \mathbf{Q}_p \right) dt = 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Der Ausdruck für die kinetische Energie lässt sich unter Verwendung der partiellen Integration respektive der Integrationsgrenzen  $t_1$  und  $t_2$  und unter Voraussetzung, dass die Funktion an den Endpunkten nicht variiert wird, umschreiben und vereinfacht sich zu:

$$\int_{t_1}^{t_2} \rho \delta \dot{\mathbf{u}}^T \dot{\mathbf{u}} dt = \left[ \rho \delta \mathbf{u}^T \dot{\mathbf{u}} \right]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \rho \delta \dot{\mathbf{u}}^T \ddot{\mathbf{u}} dt = - \int_{t_1}^{t_2} \rho \delta \dot{\mathbf{u}}^T \ddot{\mathbf{u}} dt. \quad (5.7)$$

Die aus dem Prinzip von Hamilton abgeleitete schwache Formulierung lässt sich letztendlich in folgender Matrixschreibweise darstellen:

$$\begin{aligned} & - \int_V \left[ \rho \delta \mathbf{u}^T \ddot{\mathbf{u}} - \delta \mathbf{S}^T \mathbf{c}^E \mathbf{S} + \delta \mathbf{S}^T \mathbf{e}^T \mathbf{E} + \delta \mathbf{E}^T \mathbf{e} \mathbf{S} + \delta \mathbf{E}^T \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_b \right] dV + \\ & + \int_{\Omega_1} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_s d\Omega_1 - \int_{\Omega_2} \delta \varphi q_s d\Omega_2 + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_p - \delta \varphi \mathbf{Q}_p = 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

Hier ist zu beachten, dass die oben vorgestellte Form des Prinzips von Hamilton ihre Gültigkeit für die Wahl von  $\mathbf{u}$  und  $\varphi$  als unabhängigen Variablen besitzt. Aus dieser Form werden im weiteren Verlauf die Elementformulierungen und Bewegungsgleichung hergeleitet, vgl. [AllHug 70], [Pie 01].

Für die Approximation der mechanischen und elektrischen Variablen innerhalb eines Elementes werden die Ansatzfunktionen für die Verschiebung  $N_u$  und das elektrische Potential  $N_\varphi$  verwendet:

$$\mathbf{u} = N_u \mathbf{u}_i \quad (5.9)$$

$$\varphi = N_\varphi \varphi_i \quad (5.10)$$

Unter Verwendung der Differentialoperatormatrix  $\mathbf{B}$  lassen sich die Ausdrücke für das elektrische Feld und die mechanischen Verzerrungen als Funktion der Knotenverschiebungen  $\mathbf{u}_i$  und des zugehörigen elektrischen Potentials  $\varphi_i$  ausdrücken:

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}_u \mathbf{u}_i \quad (5.11)$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{B}_\varphi \varphi_i \quad (5.12)$$

Das Einsetzen der genannten Approximationen in Gleichung (5.6) liefert

$$\begin{aligned} & -\delta \mathbf{u}_i^T \int_V \rho N_u^T N_u dV \ddot{\mathbf{u}}_i - \delta \mathbf{u}_i^T \int_V \mathbf{B}_u^T \mathbf{c}^E \mathbf{B}_u dV \mathbf{u}_i - \delta \mathbf{u}_i^T \int_V \mathbf{B}_u^T \mathbf{e} \mathbf{B}_\varphi dV \varphi_i \\ & - \delta \varphi_i^T \int_V \mathbf{B}_\varphi^T \mathbf{e}^T \mathbf{B}_u dV \mathbf{u}_i + \delta \varphi_i^T \int_V \mathbf{B}_\varphi^T \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{B}_\varphi dV \varphi_i + \delta \mathbf{u}_i^T \int_V N_u^T \mathbf{F}_b dV \\ & + \delta \mathbf{u}_i^T \int_{\Omega_1} N_u^T \mathbf{F}_s d\Omega - \delta \varphi_i^T \int_{\Omega_2} N_\varphi^T q_s d\Omega + \delta \mathbf{u}_i^T N_u^T \mathbf{F}_p - \delta \varphi_i^T N_\varphi^T \mathbf{Q}_p = 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

und daraus ergibt sich das Differentialgleichungssystem für das piezoelektrische Element

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{k}_{uu} \mathbf{u}_i + \mathbf{k}_{u\varphi} \varphi_i = \mathbf{f}_i \quad (5.14)$$

$$\mathbf{k}_{\varphi u} \mathbf{u}_i + \mathbf{k}_{\varphi\varphi} \varphi_i = \mathbf{q}_i \quad (5.15)$$

bzw.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_i \\ \ddot{\varphi}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{uu} & \mathbf{k}_{u\varphi} \\ \mathbf{k}_{\varphi u} & \mathbf{k}_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \varphi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \mathbf{q}_i \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

Die mechanischen und elektrischen Größen werden miteinander in einem Gleichungssystem durch die Elementsteifigkeitsmatrix gekoppelt. Die Elementsteifigkeitsmatrix setzt sich aus den folgenden Submatrizen zusammen:

$$\text{mechanische Steifigkeitsmatrix: } \mathbf{k}_{uu} = \int_V \mathbf{B}_u^T \mathbf{c}^E \mathbf{B}_u dV \quad (5.17)$$

$$\text{dielektrische Steifigkeitsmatrix: } \mathbf{k}_{\phi\phi} = - \int_V \mathbf{B}_\phi^T \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{B}_\phi dV \quad (5.18)$$

$$\text{piezoelektrische Kopplungsmatrix: } \mathbf{k}_{u\phi} = \int_V \mathbf{B}_u^T \mathbf{e} \mathbf{B}_\phi dV \quad (5.19)$$

$$\mathbf{k}_{\phi u} = \int_V \mathbf{B}_\phi^T \mathbf{e}^T \mathbf{B}_u dV = \mathbf{k}_{u\phi}^T \quad (5.20)$$

Die Einträge für die Massenmatrix sowie im Lastvektor lassen sich in folgender Weise berechnen:

$$\mathbf{m} = \int_V \rho \mathbf{N}_u^T \mathbf{N}_u dV \quad (5.21)$$

$$\mathbf{f}_i = \int_V \mathbf{N}_u^T \mathbf{F}_b dV + \int_{\Omega_1} \mathbf{N}_u^T \mathbf{F}_s d\Omega + \mathbf{N}_u^T \mathbf{F}_p \quad (5.22)$$

$$\mathbf{q}_i = - \int_{\Omega_2} \mathbf{N}_\phi^T q_s d\Omega - \mathbf{N}_\phi^T \mathbf{Q}_p \quad (5.23)$$

Die mechanische Spannung und dielektrische Verschiebung innerhalb eines finiten Elementes ergeben sich aus den konstitutiven Gleichungen:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e} \mathbf{E} = \mathbf{c}^E \mathbf{B}_u \mathbf{u}_i + \mathbf{e} \mathbf{B}_\phi \phi_i \quad (5.24)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^T \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} = \mathbf{e}^T \mathbf{B}_u \mathbf{u}_i - \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{B}_\phi \phi_i \quad (5.25)$$

Um das Gleichungssystem (5.16) für die Gesamtstruktur zu erhalten, wird über alle finiten Elemente assembliert, was letztendlich zu folgendem Gesamtsystem führt:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\Phi} \\ \mathbf{K}_{\Phi U} & \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix}. \quad (5.26)$$

Wird die Gleichung um die Dämpfungsmatrix erweitert, so ergibt sich das allgemeine Bewegungsgleichungssystem für die piezoelektrische Struktur

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{UU} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\Phi} \\ \mathbf{K}_{\Phi U} & \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

wobei  $D_{uu}$  die strukturelle Dämpfungsmatrix beschreibt, auf die im späteren Verlauf der Arbeit genauer eingegangen wird.

#### 5.4 Kondensierte Darstellungsform

In der Literatur wird oft eine kondensierte Darstellungsform des oben beschriebenen Bewegungsgleichungssystems verwendet, in der, aufgrund der angenommenen Randbedingungen, die Matrizen und Vektoren anders angeordnet sind.

Dabei werden die Knoten in zwei Gruppen unterteilt [Oud 03]:

1. Knoten mit extern vorgegebenem Potential  $\Phi_A$  - kurzgeschlossene aktive Elektroden,
2. Knoten mit induziertem (freiem) Potential  $\Phi_S$  - offene Elektroden bzw. Sensorelektroden und restliche innere Knoten. Als Sensorelektroden werden dabei auch Elektroden mit extern vorgegebener elektrischer Ladung betrachtet.

Entsprechend werden auch die Steifigkeitsmatrizen und die Ladung verteilt. Die Gleichung (5.27) unter Vernachlässigung der Dämpfung lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\Phi}_S \\ \ddot{\Phi}_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\Phi_S} & \mathbf{K}_{U\Phi_A} \\ \mathbf{K}_{\Phi_S U} & \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_S} & \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_A} \\ \mathbf{K}_{\Phi_A U} & \mathbf{K}_{\Phi_A \Phi_S} & \mathbf{K}_{\Phi_A \Phi_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi_S \\ \Phi_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q}_S \\ \mathbf{Q}_A \end{bmatrix}. \quad (5.28)$$

Löst man die zweite Gleichung von (5.28)

$$\mathbf{K}_{\Phi_S U} \mathbf{U} + \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_S} \Phi_S + \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_A} \Phi_A = \mathbf{Q}_S \quad (5.29)$$

nach  $\Phi_S$  auf, ergibt sich:

$$\Phi_S = \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_S}^{-1} \left( \mathbf{Q}_S - \mathbf{K}_{\Phi_S U} \mathbf{U} - \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_A} \Phi_A \right) \quad (5.30)$$

Einsetzen von (5.30) in die erste und in die dritte Gleichung von (5.28) liefert:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{UU} \mathbf{U} + \mathbf{K}_{U\Phi_S} \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_S}^{-1} \left( \mathbf{Q}_S - \mathbf{K}_{\Phi_S U} \mathbf{U} - \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_A} \Phi_A \right) + \mathbf{K}_{U\Phi_A} \Phi_A = \mathbf{F} \quad (5.31)$$

$$\mathbf{K}_{\Phi_A U} \mathbf{U} + \mathbf{K}_{\Phi_A \Phi_S} \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_S}^{-1} \left( \mathbf{Q}_S - \mathbf{K}_{\Phi_S U} \mathbf{U} - \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_A} \Phi_A \right) + \mathbf{K}_{\Phi_A \Phi_A} \Phi_A = \mathbf{Q}_A \quad (5.32)$$

Die so erhaltenen Gleichungen lassen sich zu einer kondensierten Form vereinfachen:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{UU}^* \mathbf{U} = \mathbf{F} - \mathbf{K}_{U\Phi_A}^* \Phi_A - \mathbf{K}_{U\Phi_S} \mathbf{K}_{\Phi_S \Phi_S}^{-1} \mathbf{Q}_S \quad (5.33)$$

$$\mathbf{K}_{\phi_A U}^* \mathbf{U} + \mathbf{K}_{\phi_A \phi_A}^* \boldsymbol{\Phi}_A + \mathbf{K}_{\phi_A \phi_S} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_S}^{-1} \mathbf{Q}_S = \mathbf{Q}_A \quad (5.34)$$

Die äquivalenten Steifigkeitsmatrizen werden wie folgt berechnet:

$$\mathbf{K}_{UU}^* = \mathbf{K}_{UU} - \mathbf{K}_{U\phi_S} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_S}^{-1} \mathbf{K}_{\phi_S U} \quad (5.35)$$

$$\mathbf{K}_{\phi_A U}^* = \mathbf{K}_{\phi_A U} - \mathbf{K}_{\phi_A \phi_S} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_S}^{-1} \mathbf{K}_{\phi_S U} \quad (5.36)$$

$$\mathbf{K}_{U\phi_A}^* = \mathbf{K}_{U\phi_A} - \mathbf{K}_{U\phi_S} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_S}^{-1} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_A} \quad (5.37)$$

$$\mathbf{K}_{\phi_A \phi_A}^* = \mathbf{K}_{\phi_A \phi_A} - \mathbf{K}_{\phi_A \phi_S} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_S}^{-1} \mathbf{K}_{\phi_S \phi_A} \quad (5.38)$$

Die oben dargestellte Form des Gleichungssystems mit kondensierten Matrizen wird in der Literatur oft als *H-Form* bezeichnet, siehe [Koc 00], [NCB 83], [Ler 90], [BLM 81].

## 5.5 FE-Analyse von piezoelektrischen Materialien

Das Verhalten von piezoelektrischen Strukturen kann durch Simulation des elektrischen Verhaltens sowie des mechanischen Verhaltens berechnet werden. Die Berechnung kann durch einen sequentiellen Algorithmus erfolgen oder simultan, durch eine direkte Kopplung mit hierfür geeigneten Elementen.

Bei der sequenziellen Methode werden die Berechnungen innerhalb der elektrischen Struktur sowie der mechanischen Struktur zunächst getrennt voneinander ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden anschließend als Lasten für die nachfolgende Simulation angenommen.

Bei der direkten Methode wird eine Gesamtanalyse geführt. Hierfür werden Elemente genutzt, die sowohl die erforderlichen mechanischen als auch die elektrischen Freiheitsgrade besitzen. Dabei kann die Feldkopplung durch Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrix und Berechnung des entsprechenden Elementlastvektors erfolgen.

Da die direkte Methode effizienter als sequenzielle Methode ist und viele kommerzielle FEM-Programme in ihren Elementbibliotheken geeignete Elemente für die Kopplung mehreren physikalischen Feldern besitzen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit nur die direkte Methode verfolgt.



### 5.5.1 Statische Finite-Elemente-Analyse

Im statischen Fall reduziert sich das Gleichungssystem (5.27) auf

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi U} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

Dabei können die Kräfte als konzentrierte Punktkräfte in den Knoten und als verteilte Oberflächenkräfte oder Volumenkräfte aufgebracht werden und die Verschiebungen der Knotenpunkte als mechanische Randbedingungen definiert werden. Das elektrische Potential der Knotenpunkte und die Ladungsverteilung an den Oberflächen können als elektrische Randbedingungen vorgegeben werden. Die Elektroden werden durch die Kopplung der elektrischen Potentiale der Knoten an den Elektrodenflächen des Piezokeramik abgebildet. So wird gewährleistet, dass die Potentiale aller Knoten eines Elektroden systems denselben Wert annehmen [Kro 99].

Die statische FE-Analyse von piezoelektrischen Strukturen wird sowohl für die Berechnung von mechanischen Größen als auch für die Berechnung von elektrostatischen Kenngrößen, wie z.B. Potential, Elektrodenladung, Kapazität, angewendet.

### 5.5.2 Modalanalyse

Die Modalanalyse wird genutzt, um die Eigenfrequenzen und die dazugehörigen Eigenschwingungsformen (Eigenmoden) einer Struktur zu berechnen und damit Aussagen über das Schwingungsverhalten treffen zu können. Dabei können die Eigenwerte des ungedämpften sowie des gedämpften Systems ermittelt werden. Alle möglicherweise vorhandenen Nichtlinearitäten, wie z. B. plastisches Materialverhalten werden dabei vernachlässigt. Die Modalanalyse stellt eine der weniger aufwendigen Verfahren bei der Berechnung der Dynamik des Systems dar und dient meist als Ausgangspunkt für weitere Simulationen oder zur Evaluierung der Simulationsmodelle (bzw. der einfachen analytischen Modelle).

Die Eigenfrequenzen und Eigenmoden des ungedämpften Systems ergeben sich als Lösung des Eigenwertproblems des Gleichungssystems (5.26)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi U} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

wobei die Matrizen in der ursprünglichen oder in der reduzierten kondensierten Form verwendet werden können.

Das Schwingungsverhalten von piezoelektrischen Strukturen hängt dabei auch von der Art der elektrischen Randbedingungen ab. Je nach der elektrischen Beschaltung der Elektroden

ergeben sich als Lösung des Eigenwertproblems entweder die Resonanzfrequenz oder die Antiresonanzfrequenz. Zur Berechnung der Resonanzfrequenzen wird das Potential auf den Elektroden zu Null gesetzt, so dass der elektrische Kurzschluss abgebildet ist. Die zu lösende Gleichung nimmt in diesem Fall die Form

$$\left(\mathbf{K}_{UU} - \omega_R^2 \mathbf{M}\right) \mathbf{U}_R = \mathbf{0}. \quad (5.41)$$

an. In dieser Gleichung ist deutlich zu sehen, dass die Resonanzfrequenz  $\omega_R$  und die zugehörige Eigenschwingungsform  $\mathbf{U}_R$  unabhängig von der elektromechanischen Kopplung sind.

Bei der Berechnung der Antiresonanzfrequenzen wird die elektrische Ladung auf den Elektroden zu Null gesetzt, so dass isolierte Elektroden abgebildet werden. Wenn das Potential der Massenelektrode auf 0 Volt gelegt wird, kann die dazu gehörende Potentialdifferenz aller anderen Elektroden berechnet werden.

Die Antiresonanzfrequenzen und dazugehörigen Schwingungsformen werden aus der folgenden Gleichung bestimmt

$$\left(\left(\mathbf{K}_{UU} - \mathbf{K}_{U\phi} \mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1} \mathbf{K}_{\phi U}\right) - \omega_{AR}^2 \mathbf{M}\right) \mathbf{U}_{AR} = \mathbf{0}. \quad (5.42)$$

Da die dielektrische Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}_{\phi\phi}$  mit negativen Vorzeichen versehen ist (siehe Gleichung (5.18)), ist die gesamte Steifigkeit des Piezokeramik mit offenen Elektroden größer als mit kurzgeschlossenen Elektroden. Dadurch sind die Antiresonanzfrequenzen höher als die Resonanzfrequenzen.

Die Modalanalyse ermöglicht es nicht nur, Aussagen über das allgemeine Schwingungsverhalten des freien Systems zu machen. Aus der Resonanz- und Antiresonanzfrequenz kann für jede einzelne Mode der dazu gehörige effektive Kopplungsfaktor bestimmt werden, siehe Gleichung (4.21). Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die in der Modalanalyse berechneten Eigenschwingformen überdies genutzt, um das System auf modale Koordinaten zu transformieren und dadurch die Bewegungsgleichungen zu entkoppeln.

Aufgrund der meist größeren Dimensionen der Matrizen ist der direkte Weg zur Lösung des Eigenwertproblems über die Ermittlung der Nullstellen des charakteristischen Polynoms des Eigenwertproblems

$$\mathbf{P}(\lambda) = \det(\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}) = 0 \quad (5.43)$$

nicht praktikabel. Zur Lösung des Eigenwertproblems müssen numerische Methoden angewendet werden, mit denen die Lösung iterativ angenähert werden kann. Die Ermittlung von Eigenwerten und Eigenvektoren ist deshalb wesentlich aufwendiger als die Lösung eines linearen Gleichungssystems für eine statische Berechnung. In den letzten Jahren wurden

zahlreiche effektive numerische Methoden entwickelt, um Näherungslösungen für die Eigenwertprobleme zu bestimmen. Ein sehr guter Überblick über die wichtigsten Methoden findet sich in [Bat 82].

Die Berechnung von Eigenformen und Eigenfrequenzen großer Strukturen ist meist äußerst zeit- und rechenaufwendig. Man nimmt deshalb oft eine Ordnungsreduktion des Gesamtgleichungssystems vor. Die Reduktion kann entweder durch Eliminierung von bestimmten Freiheitsgraden des Gesamtssystem (Kondensation von Freiheitsgraden) bzw. durch die Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme (Substruktur-Modalsynthese) durchgeführt werden.

Bei der Ordnungsreduktion werden die Freiheitsgrade in Hauptfreiheitsgrade (sog. Masterfreiheitsgrade) und Nebenfreiheitsgrade (sog. Slavefreiheitsgrade) unterschieden, und das Gesamtsystems auf die Dimension der Hauptfreiheitsgrade kondensiert. Die Kondensation erfolgt auf die gleiche Weise wie mit der in Kapitel 4 bereits erwähnten kondensierten Darstellungsform, wobei die Aufteilung der Matrizen anhand von Trägheitskräften und äußeren Lasten erfolgt. Bei dieser Kondensation wird angenommen, dass die Masse der Struktur näherungsweise in den Masterfreiheitsgraden konzentriert werden kann, ohne dass damit die Genauigkeit der interessierenden Eigenformen und entsprechenden Eigenfrequenzen bedeutend beeinflusst wird. Die Nebenfreiheitsgrade, in denen keine äußeren Kräfte wirken, werden eliminiert, vgl. [DieKno 97], [Ben 07], [Hat 01].

Das allgemeine Eigenwertproblem (5.43) kann durch Unterteilung der Matrizen in der partitionierten Form

$$\left( \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{U}_m \\ \mathbf{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

geschrieben werden, wobei der Index  $m$  die beibehaltenen Masterfreiheitsgrade kennzeichnet. Der Index  $s$  kennzeichnet die zu eliminierenden Slavefreiheitsgrade, deren Masse vernachlässigt wird. Um eine gute Näherungslösung zu bekommen, empfiehlt es sich, auch die Verschiebungen in den Knoten mit Potentialfreiheitsgraden als Masterfreiheitsgrade zu wählen.

Löst man die untere Zeile der Gleichung (5.44) nach  $\mathbf{U}_s$  und setzt diesen Ausdruck in die erste Zeile ein, so ergibt sich das kondensierte Eigenwertproblem

$$\left( \mathbf{K}^m - \lambda \mathbf{M}_{mm} \right) \mathbf{U}_m = \mathbf{0} \quad (5.45)$$

mit

$$\mathbf{K}^m = \mathbf{K}_{mm} - \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \quad (5.46)$$

Den Zusammenhang zwischen den Masterfreiheitsgraden und Slavefreiheitsgraden erhält man anschließend aus der Lösung der unteren Zeile von Gleichung (5.44)

$$U_s = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} U_m. \quad (5.47)$$

Die geschickte Wahl der Masterfreiheitsgrade ist dabei sehr wesentlich für das Erreichen einer guten Näherung und wird in der Regel durch Erfahrungen und gewisse Vorkenntnisse bestimmt. Die Kondensation führt immer zu einer Verkürzung des berechenbaren Frequenzspektrums. Mit zunehmender Ordnung der berechneten Moden wächst auch der Fehler. Deshalb können nur die unteren Eigenfrequenzen mit einer guten Näherung berechnet werden. Außerdem kann die Kondensation der Gesamtstruktur für sehr große FE-Modelle sehr aufwendig werden.

Eine andere Möglichkeit, die Ordnung des Systems zu reduzieren, ist die Substruktur-Modalsynthese. Bei diesem Reduktionsverfahren geht man davon aus, dass das Gesamtsystem aus mehreren Teilsystemen besteht, deren jeweiliges Schwingungsverhalten separat betrachtet werden kann. Diese Vorgehensweise ist besonders dann sinnvoll, wenn große Strukturen aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung in einfach zu behandelnde Substrukturen zerlegt werden können. Für jede Substruktur kann das entsprechende Eigenwertproblem aufgestellt und gelöst werden, wobei bezüglich der Freiheitsgrade in den Verbindungsknoten zu einer Nachbarstruktur bestimmte Annahmen (z.B. gefesselte oder freie Koppelstellen) getroffen werden müssen [StePos 95].

Bei der Festlegung der Substrukturen ist darauf zu achten, dass sich wichtige Eigenschaften der Matrizen (Symmetrie- und Bandstruktureigenschaften) ausnutzen lassen. Für jede Substruktur werden dann die unteren Eigenmoden berechnet. Dabei kann man bei sehr großen Substrukturen zur Reduktion der Zahl der Freiheitsgrade auf Substrukturebene auch die Kondensationsmethode einsetzen. Die Modalsynthese besteht nun darin, unter Verwendung eines Teils der berechneten Eigenmoden und Eigenfrequenzen der Substrukturen, die unteren Schwingformen und Eigenfrequenzen der Gesamtstruktur näherungsweise zu ermitteln.

Auf der Zerlegung der großen Strukturmodellen in vielen Substrukturen basiert auch die Methode "*Tool Wave Based Substructuring*" (WBS). Im Vergleich zur normalen Substruktur-Modalsynthese wird das dynamische Verhalten der Verbindungsschnittstellen zwischen den benachbarten Substrukturen nicht durch alle Knoten der Koppelstellen beschrieben sondern in Form von linearen Basisfunktionen, die als Wellen bezeichnet werden, definiert [DHCBD 05]. Da die Anzahl von diesen Basisfunktionen viel kleiner als die Anzahl der Knoten an den Koppelungsschnittstellen ist, ist die Berechnungsaufwand erheblich geringer. Die numerische Effizienz dieser Methode wird besonders bei der Optimierung der großen Strukturen und in der Vibroakustik verwendet.

Bezüglich weiterer Einzelheiten und Details zu den effektiven Reduktionsmethoden für die Eigenschwingungsberechnung sei auf die Literatur [GasKno 89], [Lin 89], [Ben 05] verwiesen.

### 5.5.3 Harmonische Analyse

Bei der harmonischen Analyse wird die Antwort des Systems auf eine aufgebrachte sinusförmige Anregung berechnet, so dass man einen Frequenzgang (Übertragungsfunktion) der gewünschten Ausgangsgröße erhält. Die harmonische Anregung wird dabei mit bekannter (konstanter) Amplitude schrittweise im betrachteten Frequenzbereich von einer Anfangs- bis zu einer Endfrequenz variiert. Dabei können auch verschiedene Anregungen mit unterschiedlichen Phasenwinkeln gleichzeitig berücksichtigt werden. Bei den Systemen mit piezoelektrischen Komponenten, die durch ein auf die Elektroden angebrachtes Potential angeregt werden, sind besonders Kurzschluss-Kernadmittanz und Kurzschluss-Eingangsadmittanz von Bedeutung. Die beiden Admittanzen liefern genaue Informationen über die maximale mechanische Geschwindigkeit und den maximalen fließenden Strom in Abhängigkeit von der Frequenz.

Den Ausgangspunkt für die numerische Berechnung stellt die allgemeine Bewegungsgleichung für ein gedämpftes System dar

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{UU} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\Phi} \\ \mathbf{K}_{\Phi U} & \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix}. \quad (5.48)$$

Als Reaktion auf eine angebrachte periodische Anregung schwingen alle Knoten in der Struktur mit derselben Frequenz, allerdings nicht unbedingt in gleicher Phase. Durch den Dämpfungseinfluss wird die Phase zwischen Anregungs- und Antwortsignal verschoben. Die Verschiebung eines Knotens und das Potential können daher wie folgt beschrieben werden

$$\underline{\mathbf{U}}(t) = \hat{\underline{\mathbf{U}}} e^{j\Omega t} \quad (5.49)$$

$$\underline{\boldsymbol{\Phi}}(t) = \hat{\underline{\boldsymbol{\Phi}}} e^{j\Omega t} \quad (5.50)$$

bzw. in der anderen Schreibweise

$$\underline{\mathbf{U}}(t) = \hat{\underline{\mathbf{U}}} (\cos \Omega t + j \sin \Omega t) \quad (5.51)$$

$$\underline{\boldsymbol{\Phi}}(t) = \hat{\underline{\boldsymbol{\Phi}}} (\cos \Omega t + j \sin \Omega t) \quad (5.52)$$

Hier ist  $\Omega$  die Kreisfrequenz der Anregung,  $j$  die imaginäre Einheit und  $t$  die Zeit. Das gleiche gilt auch für Kraft  $\mathbf{F}$  und die Ladung  $\mathbf{Q}$ , wobei die komplexe Amplitude der Ladung mit der Amplitude des Stroms  $\mathbf{I}$  wie folgt zusammenhängt:

$$\underline{\hat{Q}} = \frac{1}{j\Omega} \underline{\hat{I}}. \quad (5.53)$$

Setzt man Gleichungen (5.51) und (5.52) in die Bewegungsgleichung (5.48) ein, so erhält man ein lineares komplexes Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} + j\Omega \mathbf{D}_{UU} - \Omega^2 \mathbf{M} & \mathbf{K}_{U\Phi} \\ \mathbf{K}_{\Phi U} & \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\hat{U}} \\ \underline{\hat{\Phi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\hat{F}} \\ \frac{1}{j\Omega} \underline{\hat{I}} \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems entspricht im Grunde einer statischen Berechnung. Der Unterschied besteht darin, dass in dieser Gleichung aufgrund von Dämpfung imaginäre Terme enthalten, und das Gleichungssystem, aufgrund der Terme mit der Massenträgheit, eine Funktion von  $\Omega$  ist. Dementsprechend muss die Gleichung für jede Frequenz neu berechnet werden, was bei der großen Anzahl der zu berechnenden Frequenzpunkte zu sehr langen Rechenzeiten führt.

#### 5.5.4 Dämpfung

Bei vielen mechanischen Strukturen hat die Dämpfung einen maßgeblichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten und auch auf die Stabilität des Gesamtsystems. Sie kann deshalb bei einer Modellierung des dynamischen Verhaltens des Systems nicht vernachlässigt werden. Die Dämpfung führt zu einem Verlust von mechanischer Energie, die dem betrachteten System durch eine irreversible Umwandlung in andere Energieformen (meist in Form thermischer Energie) entzogen wird. Auch die piezoelektrische Energiewandlung kann zu Dämpfung führen, wenn die umgewandelte Energie anschließend dem mechanischen System nicht wieder zugeführt wird. Die Dämpfungseffekte führen vor allem zum Abklingen einer freien Schwingung und zur Phasenverschiebung zwischen Anregung und Antwortsignal. [VDI 3830].

Allgemein kann zwischen innerer und äußerer Dämpfung unterschieden werden. Die Ursachen der äußeren Dämpfungseffekte sind im Wesentlichen in der Reibung der Strukturoberfläche mit einem umgebenden Medium oder in diskreten Dämpferelementen (z. B. Stoßdämpfer) zu suchen. Innere Dämpfungseffekte entstehen hauptsächlich durch Energiedissipation des verformungsfähigen Materials infolge innerer Reibung oder Hystereseschleifen bei Belastung und Entlastung der nichtelastischen Materialien. Es gibt eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit der Beschreibung und Modellierung der Dämpfung beschäftigen, siehe z.B. [Lan 03], [Hol 02], [Piet 92].

Die Dämpfung wird in den allermeisten FE-Anwendungsfällen als dimensionsloser Dämpfungsgrad  $\xi$  (sog. Lehr'sches Dämpfungsmaß oder allgemeine modale Dämpfung) definiert, die als Quotient der wirklichen und der kritischen Dämpfung gebildet wird.

$$\xi_i = \frac{d_i}{(d_{kr})_i} = \frac{d_i}{2\sqrt{m_i c_i}} \quad (5.55)$$

In der Gleichung ist  $d$  der Dämpfungskoeffizient,  $m$  die Masse und  $c$  die Steifigkeit.

Dieses Dämpfungsmaß beinhaltet zugleich innere und äußere Dämpfungseffekte und kann sehr leicht messtechnisch im Ausschwingversuch für jede einzelne Schwingungsmode ermittelt werden. [MülGro 02] gibt eine umfangreiche Sammlung von Dämpfungsgraden für die verschiedensten Werkstoffen und Konstruktionsarten an.

Mit dem Dämpfungsgrad kann der Energieverlust des Systems näherungsweise beschrieben werden. Ein wichtiger Vorteil bei der Anwendung des Dämpfungsgrad für die Beschreibung der Dämpfungseffekte im System ist darin zu sehen, dass für die numerische Lösung des FE-Bewegungsgleichungssystems mit Hilfe der entkoppelten äquivalenten Einmassenschwingergleichungen nur die Massen- und Steifigkeitsmatrix berechnet werden müssen, so dass der Aufbau einer allgemeinen viskosen Systemdämpfungsmatrix nicht erforderlich wird. Verschiedene Eigenformen können darüber hinaus leicht mit unterschiedlichen modalen Dämpfungsgraden behaftet werden.

Eine andere Form der Dämpfung, die oft in FE-Berechnungen verwendet wird, ist die sogenannte Rayleigh-Dämpfung. Der Dämpfungsansatz nach Rayleigh stellt die Dämpfungsmatrix als Linearkombination aus Massenmatrix und Steifigkeitsmatrix dar

$$\mathbf{D} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}, \quad (5.56)$$

wobei die proportionale Dämpfungsfaktoren  $\alpha$  und  $\beta$  aus zwei gegebenen Dämpfungsgraden unter Beachtung von Gleichung

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (5.57)$$

berechnet werden können [ANS 9.0]. Dabei wird angenommen, dass die Summe der beiden Dämpfungsterme über einen bestimmten Frequenzbereich näherungsweise konstant ist.

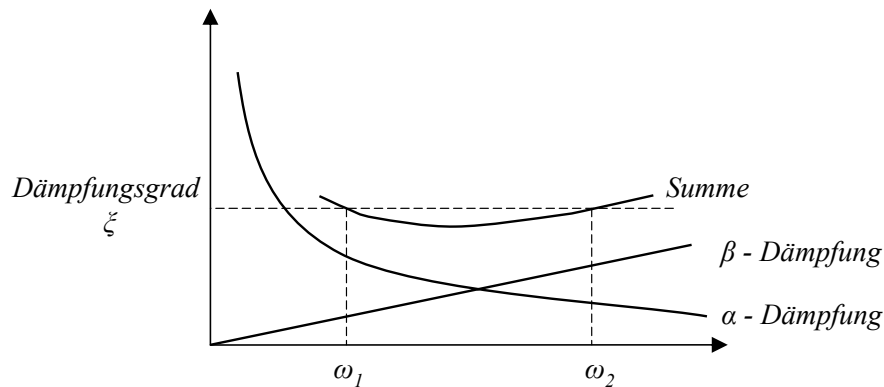


Bild 5.1: Verknüpfung von Dämpfungsgrad und zugeordneten Frequenzen bei Rayleigh-Dämpfung [ANS 9.0]

Die massenproportionale Dämpfung  $\alpha$  wirkt besonders intensiv auf die unteren Eigenfrequenzen, so dass auch die Starrkörpermoden beeinflusst werden. Physikalisch entspricht dieser Term einer äußeren viskosen Dämpfung. Die steifigkeitsproportionale Dämpfung  $\beta$  hat vor allem großen Einfluss auf die höheren Moden und kann physikalisch als innere viskoelastische Dämpfung interpretiert werden [Bat 82]. Für die meisten Probleme der Strukturmechanik kann die Proportionalität zur Massenmatrix  $\alpha$  vernachlässigt werden, so dass der Dämpfungsfaktor  $\beta$  direkt aus Gleichung (5.57) bestimmt werden kann. Die Dämpfung steigt damit linear mit der Frequenz, was dazu führen kann, dass die höheren Moden beträchtlich stärker gedämpft werden als die tieferen Moden, für die die Rayleigh'schen Konstanten bestimmt worden sind. Deshalb wird das tatsächliche Dämpfungsverhalten einer Struktur nur im Bereich der für die Anpassung verwendeten Eigenfrequenzen realistisch wiedergegeben [Kro 99].

Bei piezoelektrischen Resonatoren werden die inneren Verluste und somit die tatsächlichen Dämpfungseigenschaften eines Piezoschwingers mit Hilfe der mechanischen Schwingungsgüte  $Q_m$  bestimmt. Der Zusammenhang zwischen der Schwingungsgüte und dem modalen Dämpfungsgrad ist durch

$$Q_m = \frac{1}{2\xi} \quad (5.58)$$

gegeben.



## 6 Modale Beschreibung des Systems

Wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt wurde, führt eine detaillierte Modellierung mit FEM zu Modellen von großer Dimension mit vielen Freiheitsgraden, deren numerische Lösung hohe Anforderungen stellt, und meist großen Rechenaufwand erfordert. Das kann man deutlich bei harmonischen oder transienten Analysen sehen, deren Genauigkeit nicht nur vom Detaillierungsgrad des Modells, sondern auch von der Anzahl der Berechnungsschritte abhängig ist. Eine Modellreduktion führt zu einer Einsparung von Rechenzeit und -aufwand. Für eine Modellreduktion spricht außerdem, dass in vielen Fällen die FE-Simulationen nur durchgeführt werden, um die Systemantwort auf eine definierte Anregung eines Teilsystems zu berechnen. Darüber hinaus wird das dynamische Systemverhalten bei den meisten FE-Simulationen nur in einem engen Frequenzbereich untersucht, bei dem nicht alle Moden angeregt werden, so dass nichtrelevante Moden (meistens höhere Eigenfrequenzen) vernachlässigt werden können, ohne die Genauigkeit der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Bei den bisher dargestellten Methoden wurde die Ordnungsreduktion von FE-Modellen auf der Element-Ebene bzw. auf der Struktur-Ebene durchgeführt. Eine andere Möglichkeit, die Ordnung von linearen Systemen zu reduzieren, ist die modale Zerlegung, bei der das System in die modale Basis projiziert wird. Bei dieser Methode wird ausgenutzt, dass das dynamische Bewegungsverhalten eines Systems durch Überlagerung seiner Schwingungsmoden exakt beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu den vorher gezeigten Kondensationsmethoden werden hier als reduzierte Freiheitsgrade nicht die Verschiebungen ausgewählter Knoten gewählt. Stattdessen werden die modalen Amplituden als Basisfunktionen eingeführt. Dieses Verfahren, bekannt als modale Superpositionsmethode, gehört heutzutage zu den Standardmethoden der Finite-Elemente-Methode und wird in vielen FEM-Programmen als effektives Werkzeug zur Berechnung von Frequenzgängen und transienten Vorgängen bei linearen mechanischen Systemen verwendet. In vielen FEM-Programmen zur Berechnung von piezoelektrischen Modellen gibt es leider keine Möglichkeit, die harmonische Analyse mittels modaler Superposition direkt durchzuführen. In diesen Fällen muss man entweder die volle harmonische Analyse mit der direkten Integrationsmethode verwenden, was sowohl aufgrund der Speicheranforderungen als auch aufgrund der benötigten Rechenzeit sehr aufwendig sein kann, oder sich nur auf eine Modalanalyse beschränken.

Im Folgenden wird zunächst das Vorgehen der Modellreduktionen durch die modale Superposition beschrieben. Daran anschließend wird diese Methode auf piezoelektrische Systeme angewendet. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird die Zustandsraumformulierung des piezoelektrischen Systemverhaltens vorgestellt. Anschließend wird die mittels modaler Superposition abgeleitete Beschreibung des Systems verwendet, um ein reduziertes Ersatzmodell des piezoelektrischen Systems zu bilden und die dazugehörigen Ersatzparameter zu bestimmen. Im Gegensatz zu dem klassischen Ersatzschaltbild mit einem mechanischen Freiheitsgrad sind die hier vorgestellten Modelle nicht nur auf einen Frequenzbereich in der

Nähe einer Resonanzstelle beschränkt, sondern sind in der Lage, das Systemverhalten in einem breiten Frequenzbereich abzubilden.

### 6.1 Modale Beschreibung und modale Superpositionsmethode für mechanische Systeme

Wie schon erwähnt wurde, liegt die Grundidee der modalen Superpositionsmethode darin, dass die Beschreibung der Auslenkung des Systems von der Basis der physikalischen Knoten-Verschiebungen in eine geeignete modale Basis transformiert wird, deren Dimension kleiner als die Dimension der ursprünglichen Basis gewählt werden kann. Die dazu erforderliche Transformationsmatrix wird aus den Eigenvektoren des ungedämpften Systems aufgebaut, die vorab berechnet werden müssen. Der Deformationszustand der betrachteten Struktur wird dann also nicht durch die Knotenverschiebungen des FE-Modells beschrieben, sondern durch die lineare Superposition von Eigenvektoren. Die Genauigkeit der Ergebnisse wird entscheidend durch die Wahl und die Anzahl der berücksichtigten Eigenvektoren beeinflusst.

In diesem Abschnitt werden als Vorbetrachtung zunächst die theoretischen Grundlagen der modalen Superpositionsmethode für allgemeine mechanische Systeme dargelegt. Das dynamische Verhalten der FE-Struktur lässt sich durch ein System gekoppelter linearer Differentialgleichungen zweiter Ordnung

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (6.1)$$

beschreiben.  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}$  und  $\mathbf{K}$  stellen darin die Massenmatrix, die Dämpfungsmatrix bzw. die Steifigkeitsmatrix dar, deren Elemente sich aus der Diskretisierung der mechanischen Struktur ergeben. Der Verschiebungsvektor  $\mathbf{U}$  beschreibt die Auslenkungen an den Knoten. Der Vektor  $\mathbf{F}$  umfasst die von außen auf das System wirkenden Kräften. Es wird angenommen, dass sich die Verschiebungen in der obigen Gleichung (6.1) durch den linearen Produktansatz

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\Psi}\mathbf{q} = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\psi}_i q_i \quad (6.2)$$

ausdrücken lassen. Dabei sind im Vektor  $\mathbf{q}$  die generalisierten Koordinaten (modale Amplituden) zusammengefasst. Die Modalmatrix  $\boldsymbol{\Psi}$  beinhaltet die Eigenvektoren des ungedämpften Systems, die aus dem generalisierten Eigenwertproblem bestimmt werden:

$$(\mathbf{K} - \omega_0^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{0} \quad (6.3)$$

Mit der Transformation (6.2) werden die physikalischen Koordinaten mit Hilfe der Modalmatrix auf das modale Koordinatensystem abgebildet.

Es wird vorausgesetzt, dass die Eigenvektoren bezüglich der Masse normiert wurden. Dann lauten die Orthogonalitätsbedingungen

$$\Psi^T M \Psi = I \quad (6.4)$$

$$\Psi^T K \Psi = \text{diag}(\omega_{0i}^2). \quad (6.5)$$

Dabei ist  $I$  die Einheitsmatrix und  $\omega_{0i}$  stellt die Eigenkreisfrequenz der  $i$ -ten Eigenmode dar.

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Dämpfung proportional ist, was auf

$$\Psi^T D \Psi = \text{diag}(2 \zeta_i \omega_{0i}) \quad (6.6)$$

führt. Statt der modalen Dämpfungsgrade  $\zeta_i$  kann auch die Rayleigh'sche Dämpfung (5.56) zur Beschreibung der Dissipation verwendet werden.

Das Einsetzen von Gleichung (6.2) in Gleichung (6.1) und eine anschließende Multiplikation von links mit der transponierten Modalmatrix liefert:

$$\Psi^T M \Psi \ddot{q} + \Psi^T D \Psi \dot{q} + \Psi^T K \Psi q = \Psi^T F. \quad (6.7)$$

Aufgrund der Orthogonalitätsbeziehungen der Eigenvektoren lässt sich die obige Gleichung in die folgende Form überführen:

$$\ddot{q} + 2 \zeta \Lambda \dot{q} + \Lambda^2 q = \Psi^T F \quad (6.8)$$

mit

$$\zeta = \text{diag}(\zeta_i), \quad (6.9)$$

$$\Lambda = \text{diag}(\omega_{0i}). \quad (6.10)$$

Da in Gleichung (6.8) auf der linken Seite nur Diagonalmatrizen stehen, zerfällt die obige Gleichung in ein System mit  $n$  modal entkoppelten, unabhängigen linearen Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Jede einzelne Gleichung kann genauso behandelt werden, wie eine Differentialgleichung eines Systems mit einem Freiheitsgrad. In vollkommener Analogie zum Einmassenschwinger lässt sich die modale Amplitude infolge harmonischer Anregung wie folgt darstellen:

$$\hat{q} = \text{diag} \left( \frac{1}{-\Omega^2 + 2 j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} \right) \Psi^T \hat{F} \quad (6.11)$$

mit

$$\underline{\mathbf{q}} = \underline{\hat{\mathbf{q}}} e^{j\Omega t}, \quad (6.12)$$

$$\underline{\mathbf{F}} = \underline{\hat{\mathbf{F}}} e^{j\Omega t}. \quad (6.13)$$

Die modale Rücktransformation auf die Knotenverschiebungen erfolgt durch Anwendung der Gleichung (6.2) und führt auf:

$$\underline{\hat{\mathbf{U}}} = \sum_{i=1}^n \frac{\underline{\boldsymbol{\psi}}_i \underline{\boldsymbol{\psi}}_i^T \underline{\hat{\mathbf{F}}}}{-\Omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} \quad (6.14)$$

Daraus lässt sich leicht der Frequenzgang ableiten:

$$\underline{\mathbf{G}}(\Omega) = \begin{pmatrix} \underline{\hat{\mathbf{U}}} \\ \underline{\hat{\mathbf{F}}} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{\underline{\boldsymbol{\psi}}_i \underline{\boldsymbol{\psi}}_i^T}{-\Omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2}. \quad (6.15)$$

Diese Übertragungsmatrix setzt sich aus der Superposition von Frequenzgängen einzelner Einmassenschwinger zusammen. Das Matrixelement  $G_{kl}(\Omega)$  der Übertragungsmatrix  $\mathbf{G}(\Omega)$  enthält die Frequenzgangfunktion zwischen der am Knoten  $k$  wirkenden Kraft und der Auslenkung an Knoten  $l$

$$\underline{G}_{kl}(\Omega) = \sum_{i=1}^n \frac{\underline{\boldsymbol{\psi}}_{li} \underline{\boldsymbol{\psi}}_{ki}^T}{-\omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} \quad (6.16)$$

Der größte Vorteil der modalen Transformation liegt in der Möglichkeit der modalen Reduktion. Meist ist es ausreichend, nur einen Teil der Moden zu berücksichtigen, um eine sehr gute Näherungslösung zu erhalten. In vielen Fällen genügt es, nur die ersten  $p$  Bewegungsgleichungen zu betrachten. Das bedeutet, dass bei der Modalanalyse nur die  $p$  niedrigsten Moden ermittelt werden müssen und sich die Übertragungsfunktion dann aus der Überlagerung ersten  $p$  Moden ergibt. Dabei ist zu beachten, dass die Genauigkeit der mit Hilfe der modalen Transformation berechneten Übertragungsfunktionen ganz entscheidend von der Anzahl und der Auswahl der für die Modenüberlagerung verwendeten Eigenmoden abhängt. Die Moden und ihre Anzahl müssen so gewählt werden, dass der Fehler, welcher aus der Nichtberücksichtigung der restlichen Eigenformen resultiert, unterhalb eines zu definierenden Grenzwertes liegt. Ist das nicht der Fall, so müssen mehr Moden bei der modalen Superposition verwendet werden, siehe [Mey 03].

Bei der modalen Entwicklung werden also in der Regel viele Moden nicht berücksichtigt. Eine Möglichkeit, um den Einfluss der nicht berücksichtigten Eigenformen zu erfassen und den Fehler zu minimieren, ist die Durchführung einer Residualkorrektur. Dabei wird angenommen, dass die dynamische Antwort eines Systems mit mehreren Freiheitsgraden in den Moden mit Eigenfrequenzen, die viel höher als die höchste Erregerfrequenz sind, durch die

statischen Anteile der jeweiligen Übertragungsfunktionen bereits hinreichend genau abgebildet werden. Damit lässt sich eine Näherungslösung für die Übertragungsfunktion unter Berücksichtigung der ersten  $p$  Eigenmoden wie folgt

$$\underline{G}(\Omega) \approx \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{-\Omega^2 + 2j\zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \sum_{i=p+1}^n \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{\omega_{0i}^2} \quad (6.17)$$

darstellen, wobei  $p \ll n$  angenommen wird. Der erste Term der Gleichung erfasst die dynamische Antwort der Eigenmoden ( $i \leq p$ ) mit den niedrigen Eigenfrequenzen, während der zweite frequenzunabhängige Term den statischen Anteil der vernachlässigten ( $i > p$ ) Eigenmoden mit hohen Eigenfrequenzen beschreibt. Da bei der Lösung des Eigenwertproblems nur die  $p$  niedrigsten Eigenwerte und zugehörigen Eigenvektoren ermittelt werden, wäre es vorteilhaft, nur diese Moden in Gleichung (6.17) einzubeziehen. Dies geschieht durch die folgende Umformung:

$$\sum_{i=p+1}^n \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{\omega_{0i}^2} = \sum_{i=1}^n \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{\omega_{0i}^2} - \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{\omega_{0i}^2} = \mathbf{K}^{-1} - \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{\omega_{0i}^2}. \quad (6.18)$$

Dabei stellt  $\mathbf{K}^{-1}$  die sogenannte statische Nachgiebigkeit dar, die – vorausgesetzt, dass die Struktur keine Starkkörpereigenformen hat – aus Gleichung (6.15) mit  $\omega=0$  ermittelt werden kann [Pre 97].

Setzt man die Gleichung (6.18) in (6.17) ein, so ergibt sich eine Lösung für die Übertragungsfunktion, die den Einfluss der außerhalb des betrachteten Frequenzbereiches liegenden Eigenwerte auf den Frequenzgang innerhalb dieses Bereiches näherungsweise berücksichtigt wird:

$$\underline{G}(\Omega) \approx \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{-\Omega^2 + 2j\zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \mathbf{K}^{-1} - \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T}{\omega_{0i}^2} \quad (6.19)$$

Die Näherungslösung für den gesuchten Vektor der Knotenverschiebungen lässt sich leicht durch Multiplikation der Übertragungsfunktion mit dem Kraftvektor ermitteln

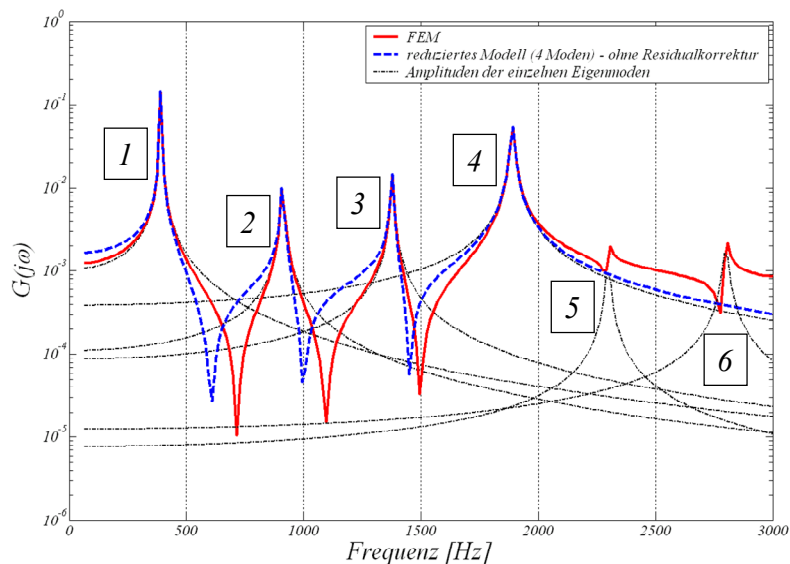
$$\hat{\underline{U}} \approx \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T \hat{\underline{F}}}{-\Omega^2 + 2j\zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \mathbf{U}_0 - \sum_{i=1}^p \frac{\boldsymbol{\psi}_i \boldsymbol{\psi}_i^T \hat{\underline{F}}}{\omega_{0i}^2}, \quad (6.20)$$

wobei

$$\mathbf{U}_0 = \mathbf{K}^{-1} \hat{\underline{F}} \quad (6.21)$$

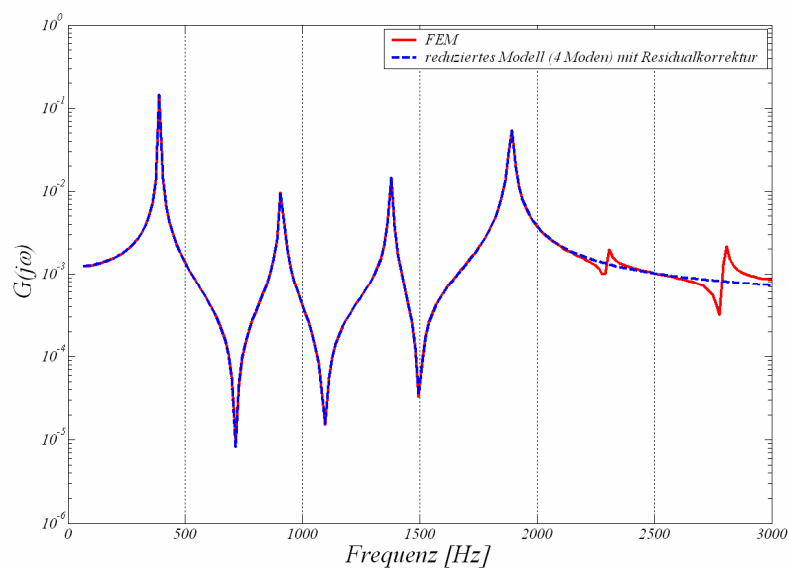
die statische Verschiebung beschreibt. Die modale Superposition mit Residualkorrektur erfordert also die Durchführung einer statischen Analyse.

Die bisherigen Überlegungen zur modalen Reduktion und zum Einfluss der vernachlässigten Eigenmoden lassen sich sehr anschaulich darstellen. In *Bild 6.1* sind Frequenzgänge eines mechanischen Systems mit 6 Eigenmoden im Bereich 0-3000 Hz dargestellt.



*Bild 6.1: Übertragungsverhalten eines mechanischen Systems*

Die durchgezogene Linie wurde mittels einer direkten harmonischen Analyse eines FE-Modells ermittelt. Die gestrichelte Linie stellt den Frequenzgang des auf die vier ersten Eigenmoden reduzierten Modells ohne Residualkorrektur dar. Die Amplituden der einzelnen Moden sind als punkt-gestrichelte Linien angezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Moden mit hohen Frequenzen nur einen geringen Einfluss auf die Übertragungsfunktion bei niedrigen Frequenzen besitzen. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Amplituden an den Resonanzstellen auch ohne Residualkorrektur sehr gut abgebildet werden. Außerhalb der Resonanzstellen sind jedoch deutliche Abweichungen zu sehen. Diese Abweichungen sind besonders an den Nullstellen (Antiresonanzen) stark ausgeprägt.



*Bild 6.2: Übertragungsverhalten des reduzierten Modells nach der Residualkorrektur*

In *Bild 6.2* ist der Frequenzgang des oben gezeigten reduzierten Modells nach der Residualkorrektur dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach der Korrektur (siehe Gl. 6.19) die Approximation durch 4 Moden mit Residualkorrektur und der tatsächliche Frequenzgang in dem Frequenzbereich bis 2100 Hz sehr gut übereinstimmen.

## 6.2 Modale Beschreibung und modale Superpositionsmethode für piezoelektrische FE-Modelle

In diesem Abschnitt wird die Methode der modalen Superposition auf FE-Modelle mit piezoelektrischen Komponenten übertragen. Dabei erfolgt wieder die Transformation der Koordinaten des lokalen FE-Modells in generalisierte modale Koordinaten, die sich durch eine kleinere Dimension der orthogonalen Basis auszeichnen. Die orthogonale Basis enthält nun neben den modalen Auslenkungen auch modale Amplituden der elektrischen Größen. Die modale Reduktion führt zu reduzierten Systemmatrizen, so dass der Berechnungsaufwand je nach Anzahl der zu berücksichtigenden Moden deutlich kleiner ist als im Ausgangssystem. Die reduzierten Modelle können besonders vorteilhaft für den Entwurf und die Simulation aktiver Strukturen eingesetzt werden. Dabei ist es wichtig, neben den dynamischen Eigenschaften der mechanischen Grundstruktur auch das Verhalten von Aktoren und Sensoren im modal reduzierten Modell korrekt abzubilden.

Zur Herleitung der modalen Darstellungsform des piezoelektrischen FE-Modells wird das Gleichungssystem (5.33) verwendet:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}_{UU}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{UU}^*\mathbf{U} = \mathbf{F}^* \quad (6.22)$$

mit

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{F} - \mathbf{K}_{U\Phi_A}^{*(a)}\Phi_A^{(a)} - \mathbf{K}_{U\Phi_S}\mathbf{K}_{\Phi_S\Phi_S}^{-1}\mathbf{Q}_S. \quad (6.23)$$

Im Folgenden wird der Fall betrachtet, in dem die Anregung des Systems durch ein an den Knoten der aktiven Elektroden der Piezoaktoren angebrachtes Potential  $\Phi_A^{(a)}$  erfolgt und als Antwort die Ladung  $\mathbf{Q}_A^{(m)}$  an den Knoten der Massen-Elektroden der Piezoaktoren ermittelt wird. Es wird dabei angenommen, dass die Sensorelektroden offen gelassen sind, so dass die Ladung  $\mathbf{Q}_S$  gleich Null ist. Dabei werden ausschließlich die elektrische Ladung und das Potential der Knoten, die an der Elektrodenflächen liegen, betrachtet. Die inneren Knoten werden nicht berücksichtigt. Die modale Transformation und anschließende Entkopplung des gesamten Bewegungsgleichungssystems erfolgt in der gleichen Weise wie bei den rein mechanischen Modellen. Die Eigenfrequenzen und die dazu gehörigen Eigenformen ergeben sich aus der Lösung des Eigenwertproblems des ungedämpften Systems. Dabei werden alle Elektroden der Piezoaktoren kurzgeschlossen. Die ermittelten strukturellen Eigenformen, die ebenfalls die Orthogonalitätsbedingungen erfüllen, werden in einer Modalmatrix  $\Psi$  zusammengefasst.

Unter der Annahme, dass das Potential  $\Phi_A^{(m)}$  an den Knoten der Massen-Elektroden und die Ladung  $\mathbf{Q}_S$  an den Knoten der Sensorelektroden gleich Null ist, ergibt sich aus der Gleichung (5.34) folgende Beziehung:

$$\mathbf{Q}_A^{(m)} = \mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)}\mathbf{U} \quad (6.24)$$

bzw. in modaler Form

$$\mathbf{Q}_A^{(m)} = \mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)}\Psi\mathbf{q}. \quad (6.25)$$

Die Anregung erfolgt durch Anlegen eines elektrischen Potentials an den aktiven Aktorelektroden. Dementsprechend hat der Lastvektor  $\mathbf{F}^*$  aus Gleichung (6.23) die Darstellung

$$\mathbf{F}^* = -\mathbf{K}_{U\Phi_A}^{*(a)}\Phi_A^{(a)}. \quad (6.26)$$

Wird in Gleichung (6.22) zunächst die obige Gleichung (6.26) zusammen mit Gleichung (6.2) eingesetzt und anschließend von links mit der transponierten Modalmatrix  $\Psi^T$  multipliziert, so entsteht einer Gleichung der Form

$$\ddot{\mathbf{q}} + 2\xi\Omega\dot{\mathbf{q}} + \Omega^2\mathbf{q} = -\Psi^T\mathbf{K}_{U\Phi_A}^{*(a)}\Phi_A^{(a)}, \quad (6.27)$$



wobei auf der linken Seite die Orthogonalitätsbeziehungen schon berücksichtigt wurden. Analog zur Gleichung (6.11) lässt sich die gesuchte modale Amplitude in komplexer Form im Frequenzbereich wie folgt ermitteln:

$$\underline{\hat{q}} = \text{diag} \left( \frac{I}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} \right) \left( -\Psi^T \mathbf{K}_{U\Phi_A}^{*(a)} \underline{\hat{\Phi}}_A^{(a)} \right). \quad (6.28)$$

Die modale Rücktransformation mittels Gleichung (6.25) ergibt anschließend die gesuchte induzierte Ladung an den Elektroden

$$\underline{\hat{Q}}_A^{(m)} = \mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \Psi \underline{\hat{q}} = \sum_{i=1}^n \frac{-(\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \psi_i) (\psi_i^T \mathbf{K}_{U\Phi_A}^{*(a)}) \underline{\hat{\Phi}}_A^{(a)}}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} = \sum_{i=1}^n \frac{-(\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \psi_i) (\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(a)} \psi_i)^T \underline{\hat{\Phi}}_A^{(a)}}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2}. \quad (6.29)$$

In gleicher Weise wie im vorhergehenden Abschnitt lässt sich die Näherungslösung unter Berücksichtigung der ersten  $p$  Eigenmoden berechnen

$$\underline{\hat{Q}}_A^{(m)} \approx \sum_{i=1}^p \frac{-(\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \psi_i) (\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(a)} \psi_i)^T \underline{\hat{\Phi}}_A^{(a)}}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \underline{Q}_{A(0)}^{(m)} - \sum_{i=1}^p \frac{-(\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \psi_i) (\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(a)} \psi_i)^T \underline{\hat{\Phi}}_A^{(a)}}{\omega_{0i}^2}. \quad (6.30)$$

wobei der Vektor  $\underline{Q}_{A(0)}^{(m)}$  statische Ladungen an den Knoten der Massen-Elektroden enthält.

Aus der obigen Gleichung lässt sich nun die Übertragungsfunktion herleiten

$$\underline{H}(\Omega) = \frac{\underline{\hat{Q}}_A^{(m)}}{\underline{\hat{\Phi}}_A^{(a)}} \approx \sum_{i=1}^p \frac{-(\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \psi_i) (\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(a)} \psi_i)^T}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \underline{\mathcal{G}}_{Q(0)} + \sum_{i=1}^p \frac{(\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \psi_i) (\mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(a)} \psi_i)^T}{\omega_{0i}^2}. \quad (6.31)$$

Der erste Term auf der rechten Seite der Übertragungsfunktion (6.31) beschreibt das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der induzierten elektrischen Ladungen an den Massen-Elektroden der Piezoaktoren, die infolge der angelegten elektrischen Potentiale erzeugt werden. Die beiden letzten Terme stellen den Einfluss der nicht berücksichtigten Eigenmoden im Sinne einer Residualkorrektur dar. Die Elemente der Matrix  $\underline{\mathcal{G}}_{Q(0)}$  beschreiben die statische Antwort des vollständigen Systems, die direkt mittels statischer Analyse berechnet werden kann. Der dritte Teil wird als die statische Antwort der Eigenmoden (bei einer Frequenzanregung mit 0 Hz) des reduzierten Systems bezeichnet [Pie 01].

Da die Übertragungsfunktion laut Definition das Verhältnis von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße beschreibt, hängt ihre Form stark von der Wahl dieser Größen ab. Ausgehend von dem Gleichungssystem (5.28) lassen sich die Zusammenhänge innerhalb der betrachteten Größen ableiten, die anschließend für die Herleitung der gesuchten Übertragungsfunktion verwendet

werden. In [Oud 03], [OudBoe 02b] wurde die modale Darstellung des Übertragungsverhaltens des piezoelektrischen FE-Modells für den Fall dargestellt, bei dem die angebrachte elektrische Ladung als Anregung und das freie Potential des Sensor als Antwortsignal verwendet wurde.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nur das elektrische Potential als Anregung betrachtet. Des Weiteren ist es wegen des aufwändigen Zugriffs auf die internen Steifigkeitsmatrizen des FE-Modells sinnvoll in Gleichung (6.31) die Parameter zu verwenden, die direkt aus den FE-Simulationen ausgegeben werden können. Die Elektroden des FE-Modells werden dabei durch die Kopplung der elektrischen Spannungsfreiheitsgrade aller Knoten der entsprechenden Elektrodenflächen gebildet. Dadurch bekommen alle Knoten der miteinander gekoppelten Elektrodenflächen ein einheitliches Potential, das nur über einen Knoten (der Knoten mit der kleinsten Nummer) gesteuert wird. Über diesen Knoten wird ebenfalls die auftretende elektrische Reaktionsladung als die Summe der Ladungen von allen Knoten der gekoppelten Elektrodenflächen ausgegeben. Da die Massen-Elektroden durch ein Nullpotential geerdet sind und die aktiven Elektroden das Potential  $\Phi_A^{(a)}$  besitzen, wird die Spannung  $V_A$  anstatt des Potentials  $\Phi_A^{(a)}$  für die Bezeichnung der Anregung eingeführt.

Unter diesen Annahmen lässt sich Gleichung (6.31) wie folgt darstellen:

$$\frac{\hat{Q}_A}{\hat{V}_A} \approx \sum_{i=1}^p \frac{-(L_A^{(m)})_i (L_A^{(a)})_i}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \mathcal{G}_{Q^{(0)}} + \sum_{i=1}^p \frac{(L_A^{(m)})_i (L_A^{(a)})_i}{\omega_{0i}^2} \quad (6.32)$$

mit

$(L_A^{(a)})_i = \mathbf{I}_{(a)}^T \mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(a)} \boldsymbol{\psi}_i$  – induzierte modale Ladungsamplitude an der aktiven Elektrode des Piezoaktors,

$(L_A^{(m)})_i = \mathbf{I}_{(m)}^T \mathbf{K}_{\Phi_A U}^{*(m)} \boldsymbol{\psi}_i$  – induzierte modale Ladungsamplitude an der Masselektrode des Piezoaktors,

wobei

$$L_A^{(a)} = -L_A^{(m)}. \quad (6.33)$$

Die für die Summation von Ladungen verwendete Vektoren  $\mathbf{I}_{(a)}$  und  $\mathbf{I}_{(m)}$  enthalten nur Einsen als Einträge und ihre Längen entsprechen jeweils der Anzahl der Knoten der entsprechenden Elektrodenflächen.

Da die beiden Ladungen  $L_A^{(a)}$  und  $L_A^{(m)}$  in Beziehung zueinander stehen, kann als Antwortgröße für die Herleitung der dargestellten Übertragungsfunktion auch  $L_A^{(a)}$  direkt verwendet werden, so dass die Anregung und die Erfassung des Antwortsignals an der gleichen Elektrode stattfindet.

In gleicher Weise kann statt der elektrischen Ladung auch die mechanische Verschiebung  $U$  sowie elektrische Spannung  $V_S$  an der offenen Sensorelektrode als Ausgangsgröße für die Herleitung der Übertragungsfunktion verwendet werden. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich folgende Gleichungen

$$\frac{\hat{U}}{\hat{V}_A} \approx \sum_{i=1}^p \frac{-(\psi_U)_i (L_A^{(a)})_i}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \mathcal{G}_{U(0)} + \sum_{i=1}^p \frac{(\psi_U)_i (L_A^{(a)})_i}{\omega_{0i}^2} \quad (6.34)$$

$$\frac{\hat{V}_S}{\hat{V}_A} \approx \sum_{i=1}^p \frac{-(\psi_{\phi_s})_i (L_A^{(a)})_i}{-\Omega^2 + 2j\xi_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} + \mathcal{G}_{\phi_s(0)} + \sum_{i=1}^p \frac{(\psi_{\phi_s})_i (L_A^{(a)})_i}{\omega_{0i}^2} \quad (6.35)$$

mit

$\psi_U$  – modale Amplitude der mechanischen Verschiebung eines Knotens,

$\psi_{\phi_s}$  – modale Amplitude der elektrischen Spannung an der Sensorelektrode.

Die Größen  $\mathcal{G}_{U(0)}$  und  $\mathcal{G}_{\phi_s(0)}$  beschreiben die statische Verschiebung bzw. die elektrische Spannung an der Sensorelektrode, die direkt bei der statische Analyse ermittelt werden.

### 6.3 Einfluss der Residualkorrekturen auf die Frequenzgänge von piezoelektrischen Modellen

Die im vorangehenden Kapitel dargestellten Übertragungsfunktionen (Gleichung 6.32, 6.34 und 6.35) setzen sich jeweils aus drei Anteilen zusammen. Die erste Gruppe von Termen erfasst die dynamischen Antworten der betrachteten Eigenmoden, während die zweite Gruppe frequenzunabhängigen Summanden die statischen Einflüsse der ansonsten vernachlässigten höheren Eigenmoden beschreiben und für die Durchführung der Residualkorrekturen verwendet wird.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Residualkorrekturen auf die Frequenzgänge der oben erwähnten Übertragungsfunktionen analysiert. Als Anwendungsbeispiel wird ein einfaches piezoelektrisches System mit integriertem Aktor und Sensor (siehe *Bild 6.3*) betrachtet. Dabei werden sowohl das elektrische als auch das mechanische Verhalten des Systems untersucht.

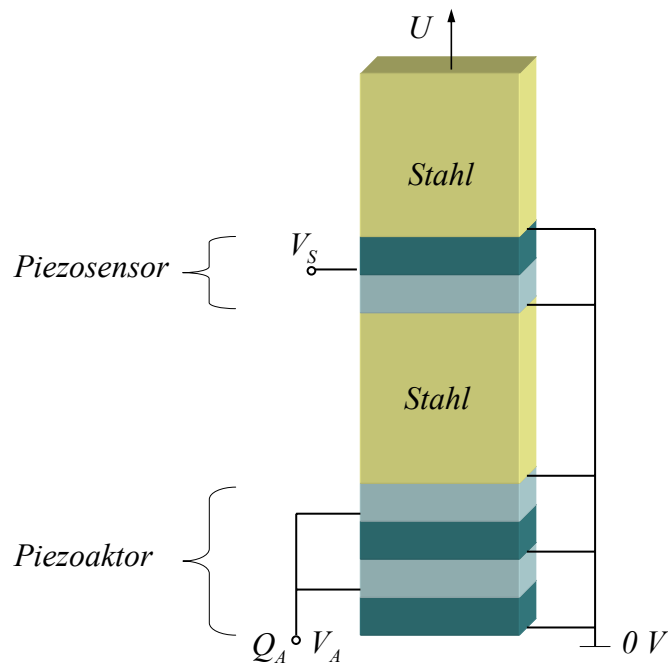


Bild 6.3: Untersuchtes piezoelektrisches System

Zur Simulation des oben dargestellten Systems wird ein FE-Modell erstellt. Die Anregung des Modells erfolgt durch Anlegung einer elektrischen Spannung  $V_A$  an den aktiven Piezoelektroden. Als Antwort werden die auftretende Reaktionsladung  $Q_A$  an den aktiven Elektroden, die elektrische Spannung  $V_S$  an der offenen Sensorelektrode und die Verschiebung  $U$  eines Knotens an der oberen Spitze des Bauteils betrachtet. An diesem Modell werden eine statische, eine modale und eine harmonische Analyse durchgeführt. Die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Einträge der Eigenvektoren aus der Modalanalyse werden zusammen mit Ergebnissen der statischen Analyse zur Erstellung von Übertragungsfunktionen verwendet.

Die ermittelten Frequenzgänge der Übertragungsfunktionen  $\frac{\hat{Q}_A}{\hat{V}_A}$ ,  $\frac{\hat{U}}{\hat{V}_A}$  und  $\frac{\hat{V}_S}{\hat{V}_A}$  werden mit

den Ergebnissen der harmonischen FE-Analyse verglichen. Um die Einfluss der Residualkorrekturen auf das dynamische Verhalten FE-Modells vom piezoelektrischen System zu untersuchen, wurden die Frequenzgänge jeweils mit und ohne Residualkorrekturen berechnet.

Der Vergleich der Frequenzgänge von berechneten Übertragungsfunktionen mit und ohne Residualkorrekturen ist in *Bild 6.4*, *Bild 6.5* und *Bild 6.6* dargestellt.

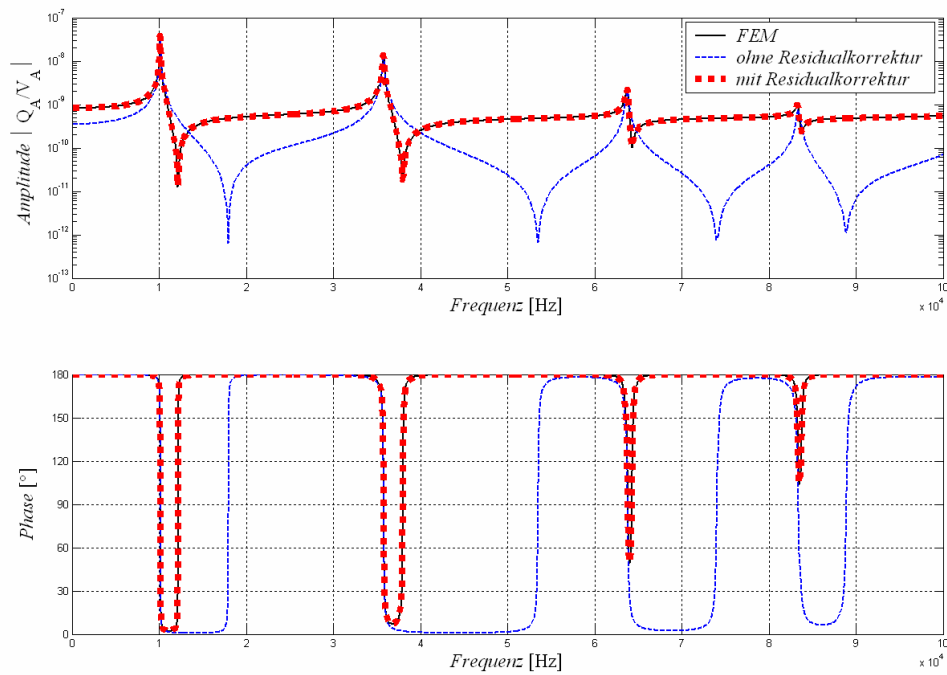


Bild 6.4: Frequenzgänge der Übertragungsfunktion  $\frac{\hat{Q}_A}{\hat{V}_A}$  mit und ohne Residualkorrektur

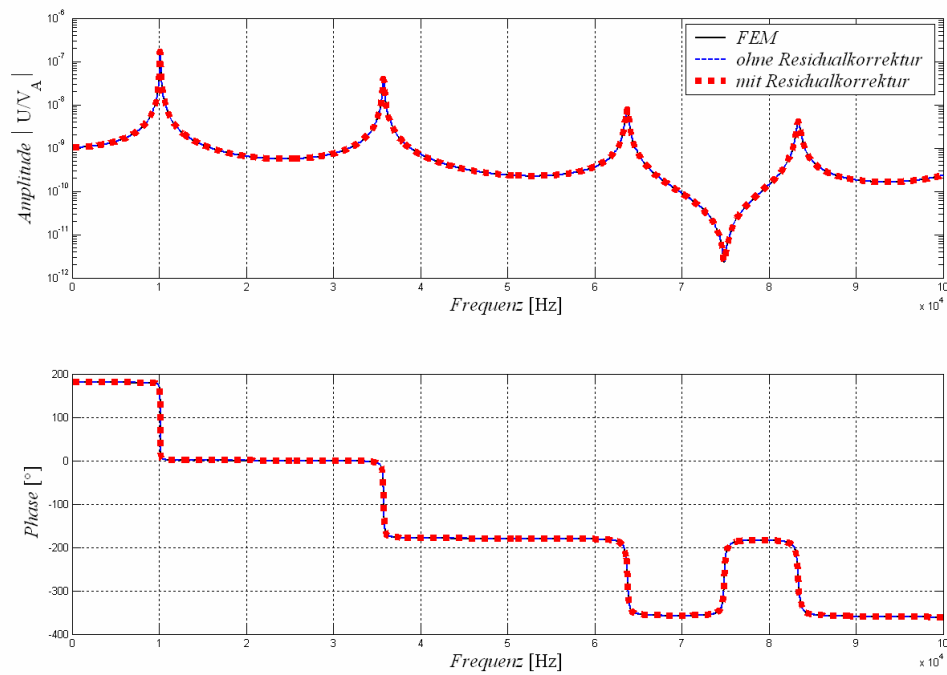


Bild 6.5: Frequenzgänge der Übertragungsfunktion  $\frac{\hat{U}}{\hat{V}_A}$  mit und ohne Residualkorrektur

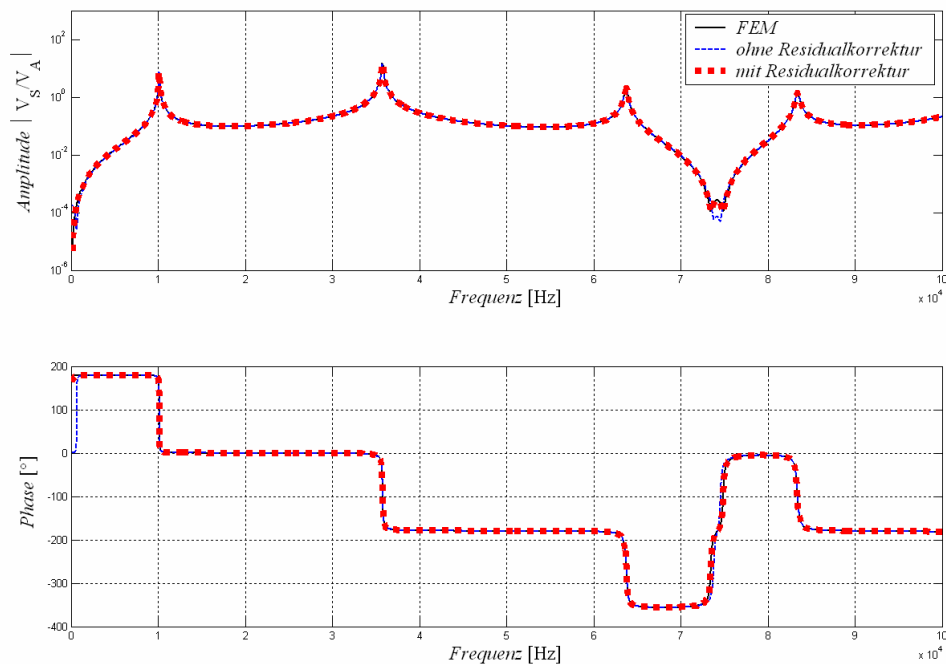


Bild 6.6: Frequenzgänge der Übertragungsfunktion  $\frac{\hat{V}_S}{\hat{V}_A}$  mit und ohne Residualkorrektur

Die oben dargestellten Bilder zeigen, dass sich alle betrachteten Frequenzgänge nach den Residualkorrekturen nicht von den Ergebnissen der durchgeführten harmonischen FE-Analyse unterscheiden. Die größten Unterschiede zwischen den berechneten Frequenzgängen mit und ohne durchgeführte Residualkorrekturen weist die Übertragungsfunktion  $\frac{\hat{Q}_A}{\hat{V}_A}$  auf, siehe

Bild 6.4. Die Abweichungen und somit die Einflüsse der Korrekturen auf den Frequenzgang sind außerhalb der Resonanzstellen besonders deutlich. Durch die Residualkorrektur werden die Antiresonanzen in Richtung der vorhergehenden Resonanzen stark verschoben. Bei den in Bild 6.5 dargestellten mechanischen Frequenzgängen  $\frac{\hat{U}}{\hat{V}_A}$  tritt nur eine Antiresonanz zwi-

schen dritten und vierten Resonanzen auf. Die Frequenzgänge mit und ohne Residualkorrektur stimmen in beiden Fällen gut mit der harmonischen Analyse überein. In diesem Fall ist die Durchführung einer Residualkorrektur nicht notwendig, um eine gute Abbildung der Übertragungsfunktion zu erhalten. Somit muss bei der Berechnung der Übertragungsfunktion nur der erste Term aus Gleichung (6.34) berechnet werden. Bei den in Bild 6.6 dargestellten Frequenzgängen der Übertragungsfunktion  $\frac{\hat{V}_S}{\hat{V}_A}$  sind nur geringe Unterschiede im Bereich der

Antiresonanz und unterhalb der ersten Eigenfrequenz festzustellen. Auch in diesem Fall muss

nicht unbedingt eine Residualkorrektur durchgeführt werden, um ausreichend gute Ergebnisse zu bekommen.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht bei allen Übertragungsfunktionen der Fehler, der durch die modale Reduktion des piezoelektrischen Systems entsteht, einen signifikanten Einfluss auf den Frequenzgang hat. Nur bei der Übertragungsfunktion  $\frac{\hat{Q}_A}{\hat{V}_A}$ , wo die Frequenzgang stark durch die Antiresonanzen ausgeprägt ist, muss eine Residualkorrektur durchgeführt werden. Bei den anderen Übertragungsfunktionen – d.h.  $\frac{\hat{U}}{\hat{V}_A}$  und  $\frac{\hat{V}_S}{\hat{V}_A}$  – ist der Einfluss dieses Fehlers so gering, dass die Residualkorrekturen vernachlässigt werden können. Diese gewonnenen Erkenntnisse werden im späteren Verlauf der Arbeit bei der Ermittlung der Ersatzparameter verwendet.

#### 6.4 Ableitung der Zustandsraumdarstellung aus der modalen Beschreibung

Eine andere Möglichkeit zur Darstellung des Systemverhaltens bietet neben der bereits dargestellten Übertragungsfunktion die Zustandsraumdarstellung. Diese Form der Darstellung des Systems hat sich besonders in der Regelungstechnik für den Entwurf und die Simulationen von aktiven Systemen bewährt. Die Zustandsraumformulierung beschreibt das System im Zeitbereich. Es können dabei Systeme mit einem Ein- und Ausgang (SISO-Systeme) sowie mit mehreren Ein- und Ausgängen (MIMO-Systeme) in kompakter Form behandelt werden. Außerdem gibt diese Darstellung einen guten Einblick in das „innere“ Systemverhalten. So lassen sich allgemeine Systemeigenschaften wie die Steuerbarkeit oder Beobachtbarkeit des Systems mit dieser Darstellungsform definieren und überprüfen.

Die Darstellung dynamischer Systeme im Zustandsraum entspricht der Umwandlung einer Differentialgleichung  $n$ -ter Ordnung in ein System von  $n$  Differentialgleichungen erster Ordnung [Nor 05]. Die allgemeine Form der Zustandsraumdarstellung für lineare, dynamische Systeme besitzt die Gestalt:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \tag{6.36}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{u} \tag{6.37}$$

Die Zustandsraumdarstellung lässt sich mit dem Blockschaltbild in *Bild 6.7* darstellen.

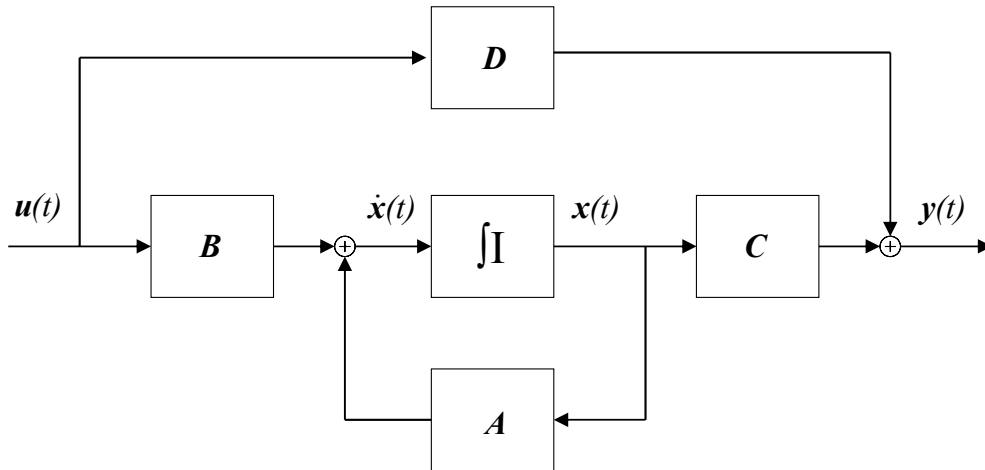


Bild 6.7: Blockschaltbild des Zustandsraumdarstellung

Die Zustandsgrößen (Auslenkungen und Geschwindigkeiten) des betrachteten Systems liefern Informationen über die potentielle und kinetische Energie. Die Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen bilden Schnittstellen zu anderen Teilen des übergeordneten Systems. Die Systemmatrix  $A$  beschreibt die Eigendynamik des Systems und gibt Auskunft über die Stabilität. Die Eingangsmatrix  $B$  stellt den Zusammenhang bezüglich der Kopplung von Eingangsgrößen und Zustandsvariablen her. Die Ausgangsmatrix  $C$  verknüpft die Ausgangsgrößen mit den Zustandsgrößen. Der direkte Einfluss der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen wird durch die Durchgangsmatrix  $D$  beschrieben [Nor 05].

Die im vorherigen Abschnitt hergeleiteten, modal entkoppelten Gleichungen (6.27) und (6.30) können leicht unter Berücksichtigung der angegebenen Beziehungen in den Gleichungen (6.32) und (6.25) in die Zustandsraumdarstellung überführt werden:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \dot{\hat{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{A}^2 & -2\xi\mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \dot{\hat{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{L}_A^{(a)} \end{bmatrix} \hat{V}_A \quad (6.38)$$

$$\hat{Q}_A^{(m)} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_A^{(m)} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q} \\ \dot{\hat{q}} \end{bmatrix} + [D_{HF}] \hat{V}_A \quad (6.39)$$

mit

$$D_{HF} = \mathcal{G}_{Q(0)} + \sum_{i=1}^p \frac{(\mathbf{L}_A^{(m)})_i (\mathbf{L}_A^{(a)})_i^T}{\omega_{0i}^2} \quad (6.40)$$



In der Fachliteratur wird Gleichung (6.38) als Aktorgleichung und Gleichung (6.39) als Sensorgleichung bezeichnet [SCR 94]. Dabei werden die Auslenkungen und Geschwindigkeiten der modalen Koordinaten als Zustandsvariable betrachtet. Die elektrische Ladung und die elektrische Spannung, die die Ein- und Ausgangsvektoren beschreiben, sind in physikalischen Koordinaten formuliert, während die Systemmatrix in modaler Schreibweise vorliegt, womit eine effiziente numerische Behandlung des Systems möglich ist. Mit der Durchgangsmatrix  $D_{HF}$  wird die Residualkorrektur durchgeführt, welche durch das Vernachlässigen höherer Moden notwendig wird.

Die oben dargestellten Gleichungen lassen sich anschaulich in Form eines Blockschaltbildes zusammenfassen:

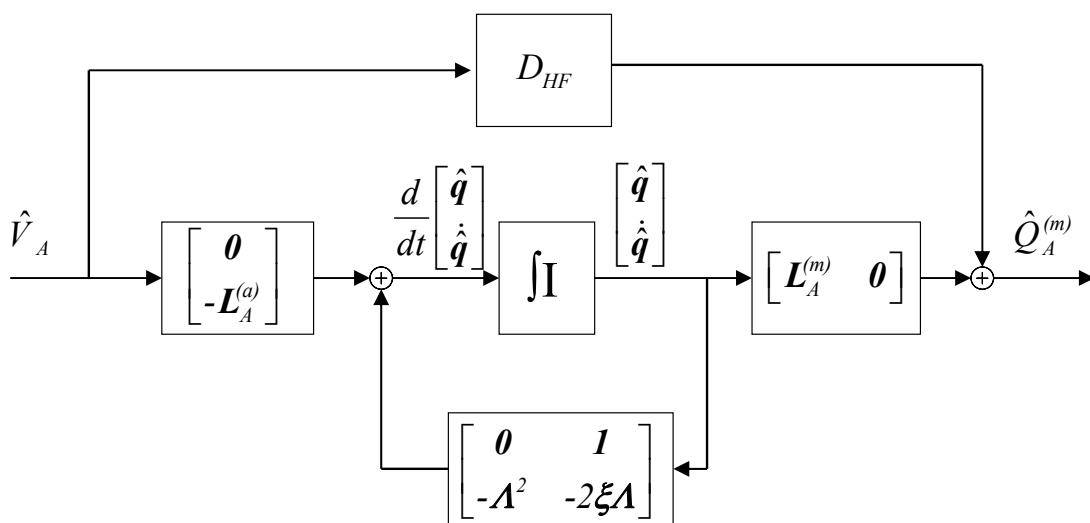


Bild 6.8: Blockschaltbild eines linearen piezoelektrischen Systems [KMR 05]

In gleicher Weise können die Übertragungsfunktionen  $\frac{\hat{U}}{\hat{V}_A}$  und  $\frac{\hat{V}_S}{\hat{V}_A}$  in die Zustandsraumdarstellung überführt werden. Dabei ändert sich nur die Steuermatrix. Die Systemmatrix und Ausgangsmatrix bleiben unverändert. Basierend auf den in dem vorigen Kapitel durchgeführten Untersuchungen, kann die Durchgangsmatrix gleich Null angenommen werden.

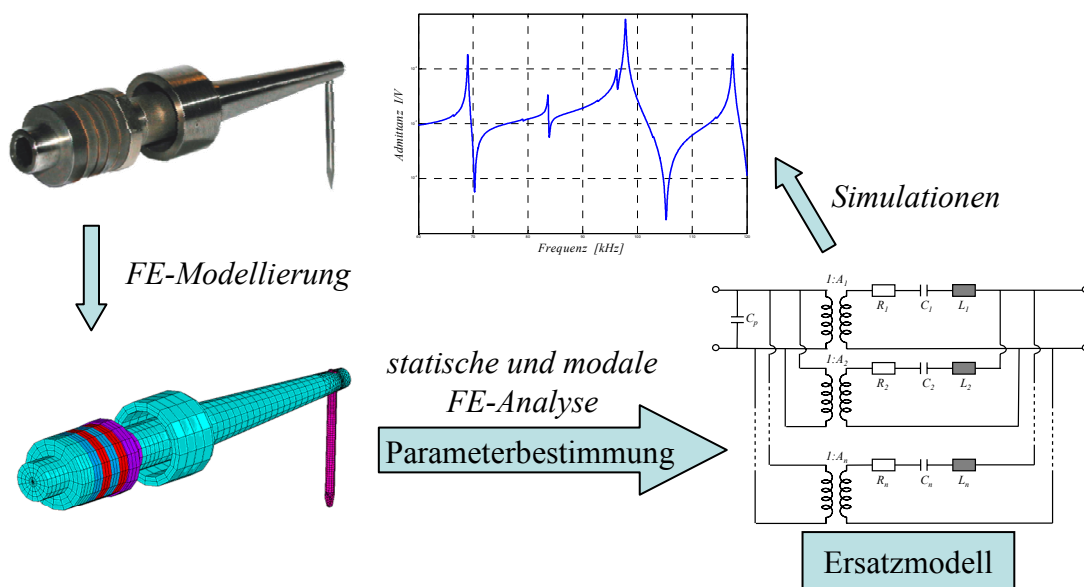
Der dargestellte Zustandsraum wird im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet um das transiente Verhalten des piezoelektrischen Systems zu untersuchen. Dabei werden die zeitlichen Vorgänge des Systems sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand betrachtet, siehe Abschnitt 8.3.4.



## 7 Parameterbestimmung für die Ersatzmodelle

Wie schon in Kapitel 3 gezeigt wurde, kann das dynamische Verhalten eines piezoelektrischen Systems durch ein reduziertes Ersatzmodell mit wenigen Freiheitsgraden abgebildet werden. Dieses Modell besitzt seine Gültigkeit nur in Resonanznähe, so dass die eingesetzten Parameter – Masse, Steifigkeit und Dämpfung – den modalen Größen entsprechen. Üblicherweise werden die Parameter des diskreten Ersatzmodells experimentell durch Messung der entsprechenden Admittanzen bestimmt. Dabei werden charakteristische Stützstellen wie Resonanz und Antiresonanz betrachtet und anschließend die Parameter analytisch berechnet, siehe [Lit 03], [Ike 96].

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie man die Parameter für die Beschreibung des Ersatzmodells für die Abbildung des Systemverhaltens in einem breiten Frequenzbereich (mit mehreren Resonanzstellen) direkt aus den durchgeführten FE-Analysen gewinnen kann. Dabei werden vor allem die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Kapitel verwendet. Im Gegensatz zu der klassischen Methode für die Parameterermittlung werden nicht die charakteristischen Stützstellen der Frequenzgänge, sondern die Ergebnisse aus den modalen und statischen Analysen verwendet. Die so ermittelten Parameter werden verwendet, um ein kompaktes Ersatzmodell des piezoelektrischen Systems zu bilden. Der schematische Ablauf dieser Methode ist in *Bild 7.1* dargestellt



7.1: Ablaufschema der Modellbildung des piezoelektrischen Systems

### 7.1 Parameterbestimmung eines rein mechanischen Modells

Im Folgenden werden zunächst nur mechanische Systeme betrachtet, deren Schwingungen mit Hilfe der FE-Analysen beschrieben werden. Hierbei wird ausgenutzt, dass die Ergebnisse der FE-Modalanalyse vorliegen und die Übertragungsfunktion zwischen der im Freiheitsgrad  $k$  anregenden Kraft und der Auslenkung am Freiheitsgrad  $l$  für eine betrachtete  $i$ -te Mode in folgender Form gegeben ist:

$$\underline{G}_{kl}(\Omega) = \begin{pmatrix} \hat{U}_l \\ \hat{F}_k \end{pmatrix}_i = \frac{\psi_{li} \psi_{ki}^T}{-\Omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} \quad (7.1)$$

Vergleicht man die obige Gleichung mit der Standardbeschreibung der Übertragungsfunktion für einen Einmassenschwinger

$$\begin{pmatrix} \hat{U} \\ \hat{F} \end{pmatrix}_i = \frac{I}{-\Omega^2 m_i + j \omega d_i + c_i} = \frac{I/m_i}{-\Omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} \quad (7.2)$$

so lassen sich die modalen Parameter anhand der folgenden Zusammenhänge berechnen:

$$m_i = \frac{I}{\psi_{li} \psi_{ki}^T}, \quad (7.3)$$

$$d_i = 2 \zeta_i \omega_{0i} m_i = \frac{2 \zeta_i \omega_{0i}}{\psi_{li} \psi_{ki}^T}, \quad (7.4)$$

$$c_i = \omega_{0i}^2 m_i = \frac{\omega_{0i}^2}{\psi_{li} \psi_{ki}^T}. \quad (7.5)$$

Es ist zu beachten, dass die verwendeten Eigenvektoren orthogonal und bezüglich der Masse normiert sein müssen. Die ermittelten Parameter können direkt in der Standardgleichung des Einmassenschwingers (Gleichung (7.2)) eingesetzt werden, um die betrachtete Übertragungsfunktion zwischen Ein- und Ausgang des Systems im Bereich einer Resonanzfrequenz abzubilden.

### 7.2 Parameterbestimmung eines piezoelektrischen Ersatzmodells

In gleicher Weise, wie oben beschrieben, können die Parameter der Ersatzmodelle für die Beschreibung des Übertragungsverhaltens zwischen der mechanischen Auslenkung am Freiheitsgrad  $l$  und der angelegten elektrischen Spannung

$$\left( \frac{\hat{U}}{\hat{V}_A} \right)_i = \frac{-\psi_{li} \left( L_A^{(a)} \right)_i}{-\Omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} = \frac{I}{-\Omega^2 m_i^* + j\Omega d_i^* + c_i^*} \quad (7.6)$$

mit

$$m_i^* = \frac{I}{-\psi_{li} \left( L_A^{(a)} \right)_i}, \quad d_i^* = \frac{2\zeta_i \omega_{0i}}{-\psi_{li} \left( L_A^{(a)} \right)_i}, \quad c_i^* = \frac{\omega_{0i}^2}{-\psi_{li} \left( L_A^{(a)} \right)_i} \quad (7.7)$$

bzw. induzierte elektrische Ladung aufgrund einer Spannungsanregung

$$\left( \frac{\hat{Q}_A^{(m)}}{\hat{V}_A} \right)_i = \frac{-\left( L_A^{(m)} \right)_i \left( L_A^{(a)} \right)_i}{-\Omega^2 + 2j \zeta_i \Omega \omega_{0i} + \omega_{0i}^2} = \frac{I}{-\Omega^2 m_i^{**} + j\Omega d_i^{**} + c_i^{**}} \quad (7.8)$$

mit

$$m_i^{**} = \frac{I}{-\left( L_A^{(m)} \right)_i \left( L_A^{(a)} \right)_i}, \quad d_i^{**} = \frac{2\zeta_i \omega_{0i}}{-\left( L_A^{(m)} \right)_i \left( L_A^{(a)} \right)_i}, \quad c_i^{**} = \frac{\omega_{0i}^2}{-\left( L_A^{(m)} \right)_i \left( L_A^{(a)} \right)_i} \quad (7.9)$$

bestimmt werden.

Als Ausgangsbasis für die weiteren Überlegungen werden die elektrische Ladung und die Auslenkung mit  $j\Omega$  multipliziert, was im Zeitbereich einer zeitlichen Differentiation entspricht. Damit lassen sich anschließend die charakteristischen Admittanzen berechnen:

$$\left( \frac{\hat{U} \cdot j\Omega}{\hat{F}} \right)_i = \left( \frac{\hat{v}}{\hat{F}} \right)_i = \frac{j\Omega}{-\Omega^2 m_i + j\Omega d_i + c_i} = \frac{I}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} \quad (7.10)$$

$$\left( \frac{\hat{U} \cdot j\Omega}{\hat{V}} \right)_i = \left( \frac{\hat{v}}{\hat{V}} \right)_i = \frac{j\Omega}{-\Omega^2 m_i^* + j\Omega d_i^* + c_i^*} = \frac{I}{j\Omega m_i^* + d_i^* + \frac{c_i^*}{j\Omega}} \quad (7.11)$$

$$\left( \frac{\hat{Q} \cdot j\Omega}{\hat{V}} \right)_i = \left( \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \right)_i = \frac{j\Omega}{-\Omega^2 m_i^{**} + j\Omega d_i^{**} + c_i^{**}} = \frac{I}{j\Omega m_i^{**} + d_i^{**} + \frac{c_i^{**}}{j\Omega}} \quad (7.12)$$

Werden diese Admittanzen mit den entsprechenden Gleichungen aus der Leitwertmatrix

$$\begin{bmatrix} \underline{\hat{I}} \\ \underline{\hat{V}} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \frac{A_i^2}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} + \frac{1}{R_p + \frac{1}{j\Omega C_p}} & \frac{A_i}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} \\ \frac{A_i}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} & \frac{1}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\hat{V}} \\ \underline{\hat{F}} \end{bmatrix}_i \quad (7.13)$$

verglichen, so lassen sich die noch unbestimmten Parameter ermitteln. Der Übertragungsfaktor  $A$  ergibt sich als Quotient aus Kurzschluss-Kernadmittanz (rückwärts)  $\frac{\hat{I}}{\hat{F}}$  und Kurzschluss-Ausgangsadmittanz  $\frac{\hat{V}}{\hat{F}}$

$$A_i = \frac{\left( \frac{\hat{I}}{\hat{F}} \right)_i}{\left( \frac{\hat{V}}{\hat{F}} \right)_i} = \frac{\left( \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \right)_i}{\left( \frac{\hat{V}}{\hat{F}} \right)_i} = \frac{\left( L_A^{(m)} \right)_i \psi_{ki}}{\psi_{li} \psi_{ki}^T} = \frac{\left( L_A^{(m)} \right)_i}{\psi_{li}}. \quad (7.14)$$

Die dabei verwendete Kurzschluss-Kernadmittanz (rückwärts) wurde ähnlich wie andere Admittanzen aus entsprechenden modalen Amplituden  $L_A^{(m)}$  und  $\psi_{ki}$  gebildet. Der Übertragungsfaktor lässt sich somit für jede Mode  $i$  direkt als Quotient der beiden Amplituden  $\left( L_A^{(m)} \right)_i$  und  $\psi_{li}$  berechnet. Damit stehen die Parameter der Ersatzmodelle in folgenden Beziehungen zueinander:

$$A_i = \frac{m_i}{m_i^*} = \frac{d_i}{d_i^*} = \frac{c_i}{c_i^*} \quad \text{bzw.} \quad A_i = \frac{m_i^*}{m_i^{**}} = \frac{d_i^*}{d_i^{**}} = \frac{c_i^*}{c_i^{**}}. \quad (7.15)$$

Im zweiten Term der Kurzschluss-Eingangsadmittanz sind die Einflüsse der statischen Kapazität  $C_p$  des Piezos und des Parallelwiderstandes  $R_p$  enthalten. Da bei den meisten Piezoschwinger der Einfluss des Widerstandes  $R_p$  gering ist, kann der Parallelwiderstand häufig vernachlässigt werden, siehe [Lit 03]. Somit vereinfacht sich die Gleichung der Kurzschluss-Eingangsadmittanz in der Leitwertmatrix zu

$$\left( \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \right)_i = \frac{A_i^2}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} + j\Omega C_p. \quad (7.16)$$

Die gesuchte Kapazität  $C_p$  ergibt sich aus dem Vergleich der obigen Gleichung mit dem Ausdruck für die elektrische Admittanz (Gleichung (7.12)). Da die ermittelten Parameter der

Admittanz auf Einträgen der Eigenvektoren basieren, muss eine Residualkorrektur durchgeführt werden. Die Terme der Residualkorrektur müssen dabei genauso wie in Gleichung (7.12) mit  $j\Omega$  multipliziert werden. Aus der Gegenüberstellung der beiden Admittanzen ergibt sich anschließend die Kapazität zu

$$C_p = \mathcal{G}_{Q(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{\left(L_A^{(m)}\right)_i \left(L_A^{(a)}\right)_i}{\omega_{0i}^2}. \quad (7.17)$$

Voraussetzung für eine entsprechend genaue Erfassung der Kapazität ist, dass der zweite Summand möglichst viele Eigenmoden berücksichtigen soll. Die Kapazität  $C_p$  ist unabhängig von der betrachteten Mode und damit konstant. Sie bildet den Durchgangsanteil in der Zustandsraumdarstellung (vgl. Gleichung (6.40)).

Auf die gerade beschriebene Weise gelingt es, das piezoelektrische FE-Modell, das eine große Anzahl an Freiheitsgraden hat, auf ein Ersatzmodell mit wenigen Freiheitsgraden und Parametern zu reduzieren. Die geometrischen und materiellen Einflüsse, die im ursprünglichen FE-Modell abgebildet sind, werden dabei beibehalten. Wird ein lineares Verhalten des Systems vorausgesetzt, kann das Ersatzmodell durch Superposition der einzelnen Moden einen breiten Frequenzbereich abdecken, wobei, wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, seine Genauigkeit von den gewählten Eigenmoden abhängig ist. Der Fehler, der durch die Vernachlässigung von höheren Eigenmoden verursacht wird, kann in gewissem Maße durch Einbeziehung der Ergebnisse der statischen Analyse in der Kapazität  $C_p$  kompensiert werden. Der zusätzliche rechnerische Aufwand für die statische Berechnung ist letztendlich viel geringer als für die Berechnung des ursprünglichen FE-Modells mit harmonischer Analyse, siehe [KrWa 05], [KWB 06].

Das dynamische Verhalten des piezoelektrischen Systems über einen breiten Frequenzbereich lässt sich in der Form eines elektrischen Ersatzschaltbildes anschaulich darstellen. Durch die Parallelschaltung mehrerer  $RLC$ -Schaltkreise kann eine große Anzahl von Schwingungsmoden über einen breiten Frequenzbereich abgebildet werden, siehe *Bild 7.2*.

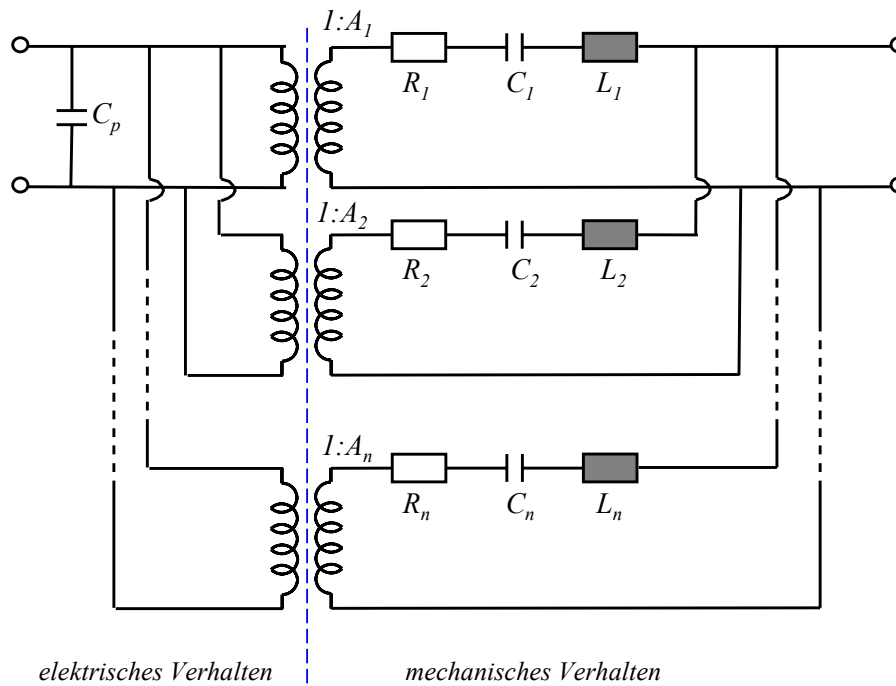


Bild 7.2: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Piezowandlers

Für die hier verwendeten elektrischen Parameter gelten gemäß den elektromechanischen Analogien folgende Zusammenhänge:

$$C_i = \frac{I}{c_i} \quad (7.18)$$

$$R_i = d_i \quad (7.19)$$

$$L_i = m_i. \quad (7.20)$$

Jeder einzelne  $RLC$ -Serienresonanzkreis beschreibt die entsprechende mechanische Schwingungsmoden des betrachteten Systems. Ihre Ankopplung an die parallele Kapazität  $C_p$  liefert die Kurzschluss-Eingangsadmittanz.

Da bei der Erstellung des Ersatzmodells die Eigenmoden aus der FE-Modalanalyse verwendet wurden, werden diese Moden hier wiederum entsprechend der FE-Berechnung exakt abgebildet. Außerdem werden dadurch, dass manche Einträge der Eigenvektoren (modale Amplituden) negative Vorzeichen besitzen können, die aus diesen Werten ermittelten Ersatzparameter im  $RLC$ -Serienresonanzkreis negativ, wobei nur die Parameter mit einem positiven Wert physikalisch sinnvoll sind. Bei der Abbildung des Systemverhaltens über einen breiten Frequenzbereich mit vielen Eigenmoden werden die negativen Werte der Parameter aus mathematischer Sicht genauso wie positive Werte betrachtet und während der Summation der



einzelnen Eigenmoden unverändert bleiben müssen. Wenn man sich jedoch bei der Betrachtung nur auf eine einzelne Eigenmode beschränkt, d.h. für die Beschreibung des Systemverhaltens nur ein einzelnen RLC-Schaltkreis benötigt wird, können negative Parameter einfach positiv gesetzt werden.

Anhand des hier dargestellten Ersatzmodells lassen sich die charakteristischen Frequenzen (wie z. B. Resonanz- und Antiresonanzfrequenzen) sowie die charakteristischen Admittanzen effektiv berechnen. Somit kann man das Systemverhalten mit einem geringen rechnerischen Aufwand in einem breiten Frequenzspektrum simulieren.



## 8 Anwendungsbeispiel

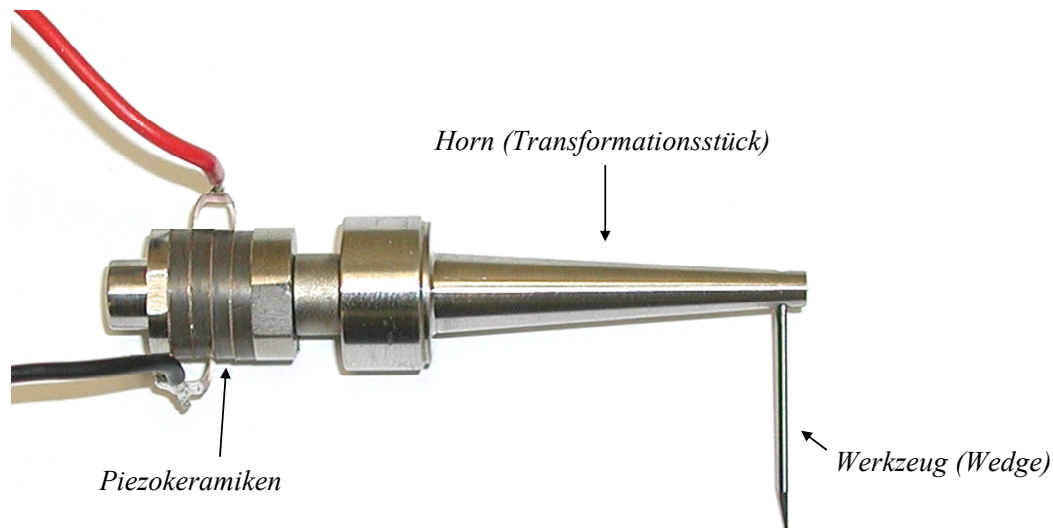
Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, wie ausgehend von einem detaillierten FE-Modell der piezoelektrischen Struktur eine einfache Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Struktur mittels Modalanalyse abgeleitet werden kann. Im Folgenden wird die vorgestellte Reduktionsmethode an einem praktischen Beispiel angewendet. Es handelt sich um einen piezoelektrischen Ultraschall-Transducer, der in einer Draht-Bondmaschine eingesetzt wird. Hierzu werden zunächst die Grundlagen des Ultraschall-Drahtbondens kurz dargestellt. Anschließend wird die Modellbildung des Ultraschall-Transducers basierend auf einer Modellreduktion beschrieben und bewertet.

### 8.1 Ultraschall-Drahtbonden

Das Ultraschall-Drahtbonden (US-Bonden) ist eine in der Halbleiter-Fertigungstechnik etablierte Technologie, bei der die elektrische Kontaktierung von Draht und Chip, bzw. Draht und Leiterbahn durch einen Ultraschall-Reibschweißprozess durchgeführt wird. Beim Drahtbonden entsteht eine Verbindung (Drahtbrücke), die an ihren Enden mit den Anschlussflächen des Chips und seines Trägers verschweißt wird. Da der Bondvorgang ohne schmelzflüssige Phase abläuft, wird das Ultraschall-Drahtbonden zu den Kaltpressschweißverfahren gerechnet [Rei 98]. Das Ultraschall-Bonden ist ein sehr komplexer Prozess, während dessen Ablauf verschiedene Teilprozesse gleichzeitig stattfinden, wie zum Beispiel chemische und physikalische Bindungsprozesse, Diffusions- und Rekristallisationsvorgänge sowie mechanische und tribomechanische Reibungsvorgänge im Werkstoff und zwischen den Kontaktflächen.

Da dieses Verfahren im Gegensatz zu anderen Verbindungsverfahren bei Raumtemperatur durchgeführt wird, können temperaturempfindliche Baukomponenten ohne thermische Belastung kontaktiert werden. Die hohe Zuverlässigkeit des Bondprozesses ist der ausschlaggebende Grund für den Einsatz dieses Verbindungsverfahrens bei den Komponenten in der Automobiltechnik, der Medizintechnik sowie in der Raumfahrttechnik. [BWH 03]

Die wichtigsten Komponenten eines Ultraschallbondsystems sind die in *Bild 8.1* gezeigten Komponenten.



*Bild 8.1: Ultraschall-Transducer mit Wedge*

Der Ultraschall-Transducer wird durch einen von einem Ultraschallgenerator angeregten Piezo-Aktor in Schwingungen versetzt. Die kleinen Schwingungsamplituden der Piezo-Aktoren werden über den Transducer aufgrund seiner Geometrie verstärkt. Durch eine entsprechende Regelung des Generators wird das System in seiner Resonanzfrequenz gehalten. Die erzeugten Ultraschallschwingungen werden vom Transducer zum Wedge und schließlich an die Verbindungsstelle geleitet, wo der Verbindungsprozess erfolgt. Den Ablauf der einzelnen Bondphasen zeigt *Bild 8.2*.

Zur Herstellung der Bondverbindung wird der zugeführte Draht durch das schwingende Werkzeug auf die Kontaktfläche gepresst. Unter dem Einfluss der Ultraschallschwingungen und der Normalkraft verformt sich der Draht und verbindet sich mit der Anschlussfläche. Anschließend wird das Wedge zum zweiten Kontaktierungsort bewegt, wobei der Bonddraht durch die Bohrung in der Wedgespitze geführt wird. Dort wird er ebenfalls angepresst und verschweißt. Der Bondvorgang wird durch Entfernen des Wedges abgeschlossen, wobei der Bonddraht abgetrennt und vor Beginn der nächsten Bondverbindung nachgeführt wird.

Die Frequenz der Anregung, die Amplitude der sich einstellenden Schwingungen und andere Größen müssen beim Drahtbonds präzise auf die Eigenschaften des Werkzeugs und des Bonddrahtes abgestimmt sein. Auch Umgebungseinflüsse wie z.B. Temperatur müssen dabei berücksichtigt werden. Nur bei optimaler Abstimmung des Systems können befriedigende Ergebnisse erzielt werden.

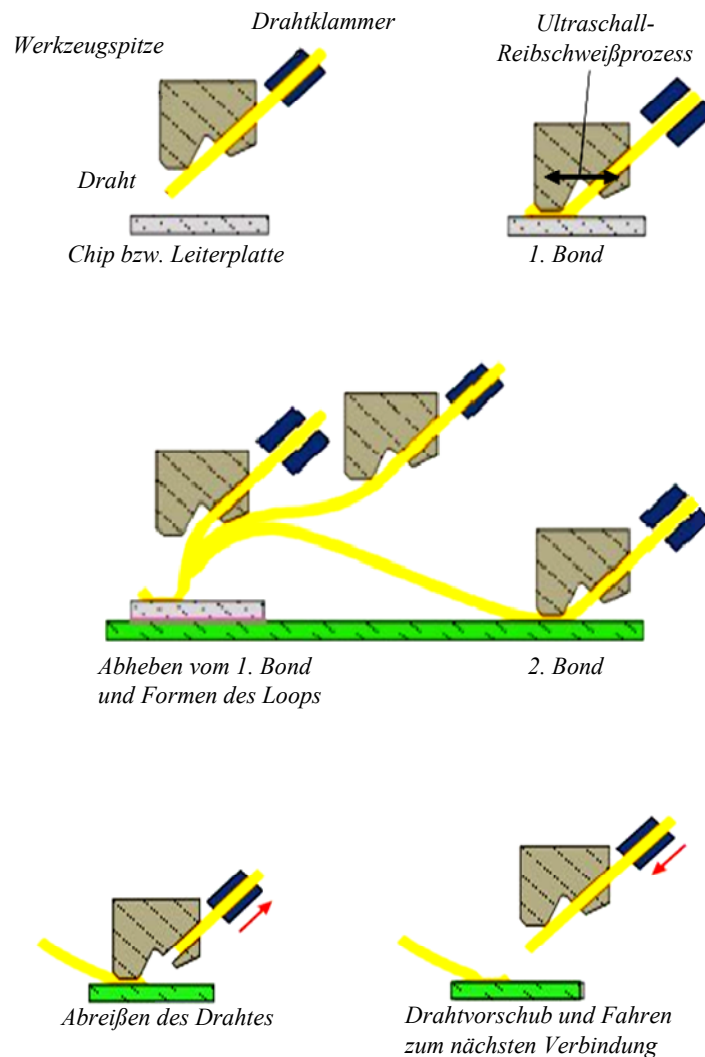


Bild 8.2: Verfahrensschritte beim Ultraschall-Bonding [BWH 03]

Beim Ultraschall-Drahtbonding sind ähnlich wie bei anderen Verbindungstechniken die Verbindungsqualität, die Zuverlässigkeit und die Reproduzierbarkeit sehr wichtig. Wenn nur eine einzige Bondverbindung beim Mikrochip defekt ist, so ist in der Regel die gesamte Halbleiterplatine nicht funktionstüchtig. Aus diesem Grund sollte die Qualität des Bonds schon während des Bondvorgangs überwacht und beeinflusst werden. Verschiedene Prinzipien und Methoden zur Online-Qualitätsüberwachung des Bondprozesses wurden in [Brö 08] untersucht.

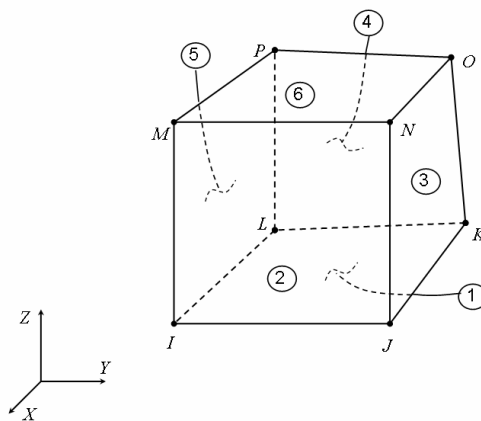
Aus den dargestellten Gründen ist es deshalb für das Drahtbonding mit Ultraschall erforderlich, das Schwingungsverhalten des Systems zu analysieren, um grundlegende Erkenntnisse zur Verbindungsbildung und daraus abzuleitender Qualitätskriterien zu gewinnen und um ein effektives und präzises Prozessregelsystem aufbauen zu können. Die Modellbildung ist dabei ein wichtiges Werkzeug, um ein tieferes Systemverständnis zu schaffen. Des Weiteren bietet

die Modellanalyse eine Möglichkeit, verschiedene Baumformen des Systems und ihre Einflüsse auf das Übertragungsverhalten des Gesamtsystems zu untersuchen ohne dazu aufwändige Versuche durchführen zu müssen.

## 8.2 Erstellung des FE-Modells

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das FEM-Programmpaket ANSYS in der Version 9.0 verwendet. Mit dem „Multiphysik Paket“ können neben rein strukturellen Problemen auch Probleme mit gekoppelten physikalischen Feldern betrachtet werden. Dazu stellt ANSYS die Elementtypen PLANE13, SOLID5, SOLID62 und SOLID98 zur Verfügung.

Zur Abbildung des piezoelektrischen Materialverhaltens der Piezo-Aktoren wird hier das SOLID5-Element verwendet (*Bild 8.3*).

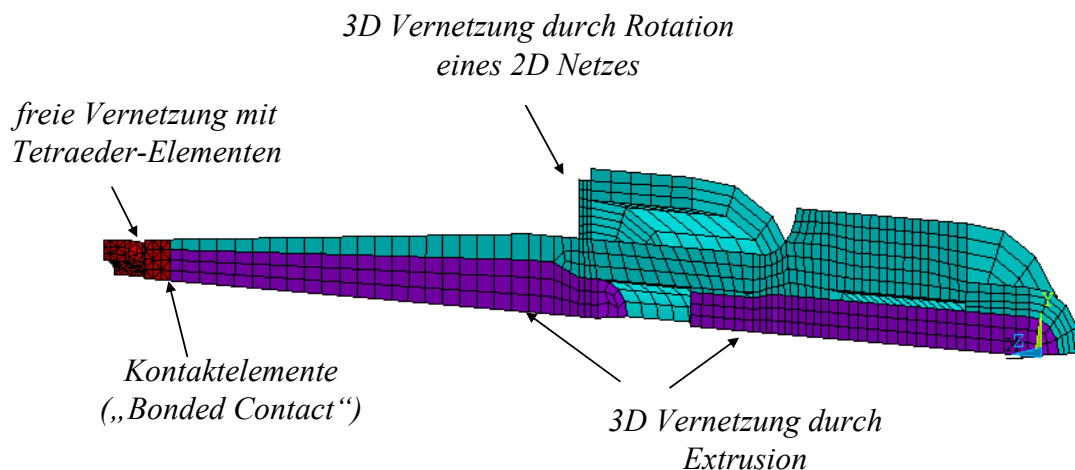


*Bild 8.3: SOLID5 [ANS 9.0]*

Dieses Element kann dreidimensionale magnetische, thermische, elektrische, piezoelektrische und strukturelle Felder mit begrenzter Kopplung zwischen den Feldern beschreiben. Es ist definiert durch acht Knoten mit bis zu sechs Freiheitsgraden pro Knoten. SOLID5 basiert auf linearen Elementansätzen, so dass die mechanische Dehnung und das elektrische Feld innerhalb des einzelnen Elements konstant sind. Für eine zielgerichtete Verwendung dieses Elementes ist darauf zu achten, dass das elektrische Potential als Freiheitsgrad aktiviert wird indem KEYOPT(1)=3 eingestellt wird. Mit dieser Einstellung werden nur elektrische und mechanische Freiheitsgrade über die Elementmatrix miteinander gekoppelt. Die thermischen und magnetischen Effekte werden dabei nicht berücksichtigt.

Zur FE-Modellierung der restlichen mechanischen Komponenten wurde das Element SOLID185 verwendet. Das Element wird wie SOLID5 durch acht Knoten definiert, aber pro Knoten existieren nur drei Freiheitsgrade (Translation in X-, Y- und Z-Richtung).

Zur Erzeugung der Bauteilgeometrien, Zuweisung der Materialdaten und anschließenden Vernetzung wurde das in ANSYS integrierte Preprocessing-Modul verwendet. Die Dimensionen der Komponenten des Ultraschall-Transducer wurden aus den dem Aufbau zugrunde liegenden technischen Zeichnungen entnommen. Bei der Modellierung des Transducer wurde die Rotationssymmetrie ausgenutzt. Dabei wurden zuerst Flächen erzeugt, die teilweise mit Flächenelementen vernetzt wurden. Im nächsten Schritt wurden alle Flächen und das vorhandene Element-Netz durch 90-Grad-Rotation um die Rotationsachse (Längsachse) des Transducer zu einem Volumen erweitert, siehe *Bild 8.4*.

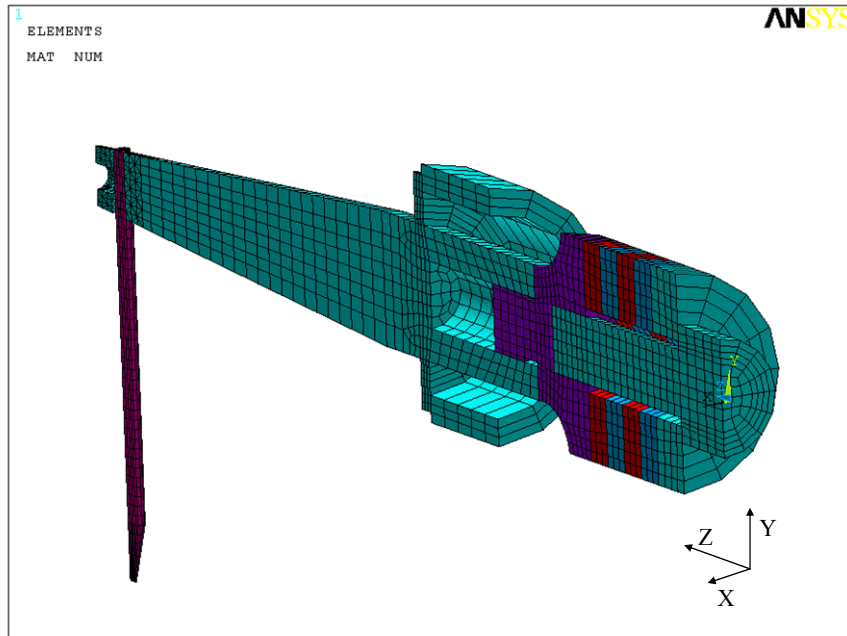


*Bild 8.4: Aufbau des FE-Netzes (1/4 Modell)*

Bei den nicht vernetzten Volumen (d.h. Volumen, deren Kanten die Rotationsachse bilden) wurden zunächst die Flächen, die senkrecht zur Rotationsachse liegen, mit Flächenelementen vernetzt und anschließend durch Extrusion entlang der Rotationsachse mit entsprechender Längsaufteilung 3-D Elemente generiert. Dank dieser Vorgehensweise konnte ein Netz erzeugt werden, das frei von prismatischen Elementen entlang der Rotationsachse ist. Mit Hilfe von Boole'schen Operationen wie z.B. Subtraktion wurde aus dem Endstück der Sonotrode eine Bohrung für die Klemmung des Wedge modelliert. Dieses Volumen konnte nur mit Tetraeder-Elementen frei vernetzt werden.

Abschließend wurden alle vorhandenen Volumen mitsamt den entstandenen Netzen an der XY- Ebene und XZ- Ebene des globalen kartesischen Koordinatensystems gespiegelt, so dass das vollständige FE-Modell des Ultraschall-Transducers erzeugt wurde. Mit der Funktion „Merge Items“ wurden alle koinzidente Knoten zusammen verschmolzen. Das FE-Netz des Wedges wurde durch Extrusion generiert und mit Hilfe der Kontaktelemente – CONTA174 und TARGE170 als „Bonded Contact“ – mit der Sonotrode fest verbunden. Das frei vernetzte Endstück der Sonotrode wurde ebenfalls mit Hilfe „Bonded Contact“ mit dem restlichen Teil der Sonotrode fest verbunden. Die Diskretisierung des gesamten Modells ergab ein Netz mit 11.544 Elementen und 13.412 Knoten.

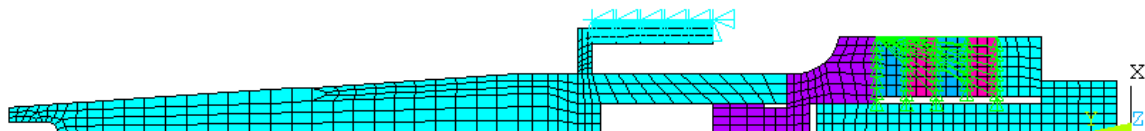
Um die Anzahl der Elemente und Knoten und dadurch auch den Rechenaufwand zu reduzieren, ist es wegen der Symmetrie ausreichend, nur eine Hälfte des Modells zu betrachten, siehe *Bild 8.5*.



*Bild 8.5: Halbes FE-Modell*

Der einzige Nachteil bei dieser Betrachtung ist, dass die Biegemoden und Biegemomente, die normal zur Symmetrieebene (YZ-Ebene) sind, nicht richtig wiedergegeben werden und dadurch nicht alle Schwingungsmoden normal zu dieser Ebene mit diesem Modell bei der Modalanalyse erfasst werden.

Eine weitere Vereinfachung des Modells besteht in der Anwendung von axialsymmetrischen 2D-Elementen, siehe *Bild 8.6*.



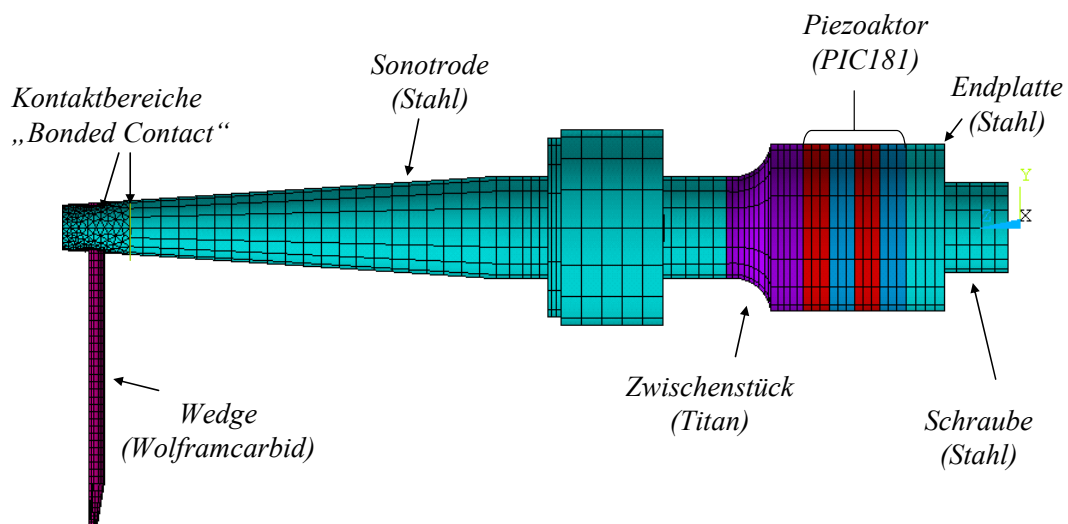
*Bild 8.6: Axialsymmetrisches Modell des Ultraschall-Transducers*



Dabei wird angenommen, dass die Struktur und die einwirkende Belastung rotationssymmetrisch bezüglich der Längsachse sind, wodurch zur Abbildung nur ein Querschnitt des Bauteils genügt. Diese Art der Modellierung erlaubt es aber nicht, das Wedge und unsymmetrische Lasten abzubilden.

Da das Ziel der hier dargestellten FE-Modellierung eine möglichst genaue Abbildung des Systemverhaltens von Ultraschall-Transducer und Wedge ist, wird im weiteren Verlauf das vollständige FE-Modell verwendet.

Neben der Vernetzung ist es für die FE-Simulation auch wichtig, die Eigenschaften der Werkstoffe sowie die Randbedingungen korrekt zu beschreiben. *Bild 8.7* zeigt das FE-Gesamtmodell des Ultraschall-Transducers mit Wedge. Die Materialeigenschaften der Keramik PIC-181 wurden für die FE-Berechnungen aus einem Datenblatt des Herstellers entnommen, siehe Anhang 1. Die hier verwendeten vier Piezokeramikringe sind in Z-Richtung und damit senkrecht zur Querschnittsebene gepolt.



*Bild 8.7: FE-Gesamtmodell des Ultraschall-Transducers mit zugewiesenen Werkstoffen*

Zur Abbildung der Elektroden an der Piezokeramik werden gekoppelte elektrische Freiheitsgrade definiert, so dass das elektrische Potential mehrerer Knoten immer denselben Wert annimmt.

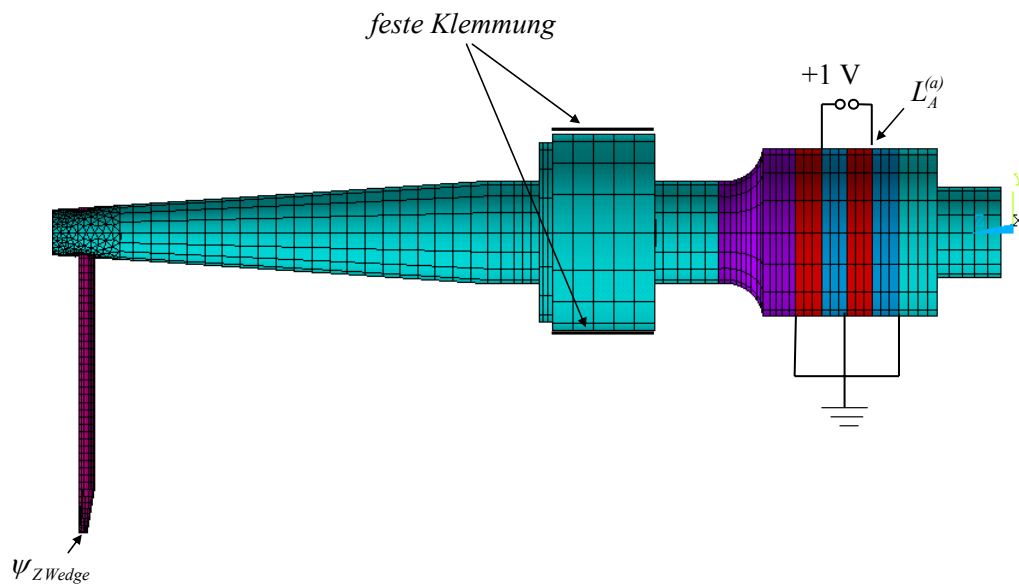


Bild 8.8: Randbedingungen mit Auswertungspunkten

Die Randbedingungen und die gewählten Auswertungsgrößen sind in *Bild 8.8* zu sehen. Der Ultraschall-Transducer ist auf der Zylinderfläche der Klemmung fest eingespannt. Als Last wird an den zwei Elektroden ein elektrisches Potential von  $1\text{ V}$  vorgegeben. Die drei restlichen Elektroden wurden mit einem Null-Potential belegt, so dass sich zwischen den Elektroden entsprechendes elektrisches Feld anliegt.

Mit dem oben dargestellten FE-Modell von Transducer und Wedge und mit den definierten Randbedingungen und Lasten werden eine statische Analyse, eine Modalanalyse sowie eine harmonische Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden ersten Analysen werden verwendet, um ein reduziertes Modell für das Gesamtsystem zu generieren. Die berechneten charakteristischen Übertragungsfunktionen des reduzierten Modells werden anschließend mit den Ergebnissen der harmonischen FE-Analyse verglichen. Die Dämpfung wird als konstante modale Dämpfung mit  $\xi = 0,001$  angenommen.

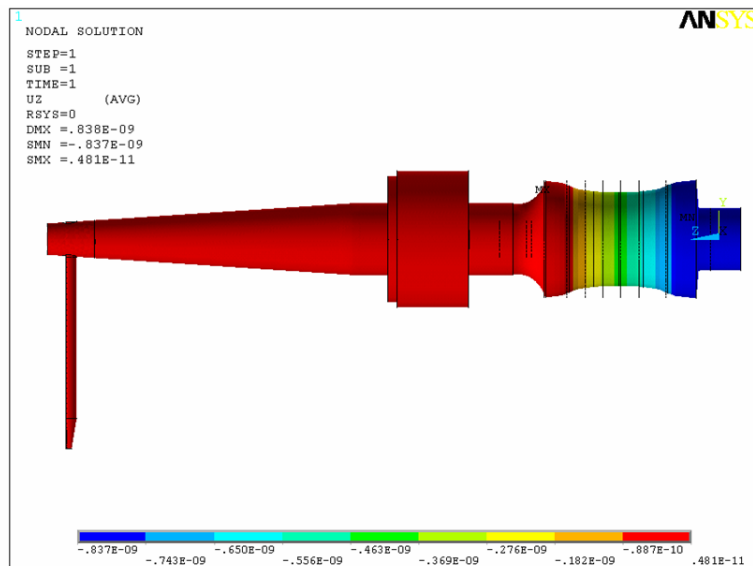
Eine andere Möglichkeit, die Dämpfung in ANSYS zu definieren, besteht in der Verwendung des Modells der Materialdämpfung. Dabei werden jedem Werkstoff entsprechende Dämpfungswerte zugewiesen. Da für die Erstellung des reduzierten Modells eine konstante modale Dämpfung für das Gesamtsystem verwendet wird, muss hier anstelle einer klassischen Modalanalyse eine „*QR DAMP*“ Modalanalyse durchgeführt werden. Dadurch bekommt man für jede Mode neben der ungedämpften Eigenfrequenz und Eigenmode auch das modale Dämpfungsmaß.

### 8.3 Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse der FE-Berechnungen dargestellt. Alle Berechnungen sind mit dem gleichen, in *Bild 8.8* dargestellten FE-Modell und mit gleichen Randbedingungen und Lasten durchgeführt worden.

#### 8.3.1 Statische Analyse

Durch die entgegengesetzte Polarisierung der benachbarten Piezokeramiken wird eine Ausdehnung des Piezoaktors infolge des aufgebrachtten statischen Potentials von  $1\text{ V}$  erzeugt. Die Verformung des Gesamtmodells ist in *Bild 8.9* dargestellt. In *Tabelle 8.1* sind die ermittelte Verschiebung in Z-Richtung an der Wedgespitze und die aufgebaute elektrische Ladung auf der aktiven Elektrode des Piezoaktors aufgelistet.



*Bild 8.9: Statische Verformung des FE-Modells*

*Tabelle 8.1 : Statische Verschiebung an der Wedgespitze und aufgebaute elektrische Ladung bei statischer Anregung mit  $1\text{ V}$  Potentialdifferenz an den Elektroden*

induzierte Ladung [C]	Verschiebung an der Wedgespitze [m]
0,202193E-08	0,103615E-14

### 8.3.2 Modalanalyse und Ermittlung der Ersatzparameter

Bei den hier angenommenen Randbedingungen wurden die Elektroden als elektrisch kurzgeschlossen modelliert, so dass die berechneten Eigenfrequenzen den Resonanzfrequenzen des Gesamtsystems entsprechen. In *Tabelle 8.2* sind die betrachteten modalen Amplituden aus dem Frequenzbereich von 0 bis 120 kHz aufgelistet.

*Tabelle 8.2: Berechnete modale Amplituden (Frequenzbereich 0-120 kHz)*

$i$	Eigenfrequenz $f_r$ [Hz]	modale Auslenkung $\Psi_{ZWedge}$	modale Ladungsamplitude $L_A^{(a)}$
1.	4880,9	-7,55E-11	-3,54E-05
2.	13002	-0,288124	18,1969
3.	14512	-5,87E-02	-70,3028
4.	15466	-1,23E-08	4,53E-09
5.	17041	-5,53E-02	-102,224
6.	19753	-1,32E-02	-26,864
7.	21052	-2,58E-08	-1,49E-04
8.	34101	-1,39574	27,4056
9.	36221	-1,34E-07	2,55E-05
10.	37657	-0,220415	-49,1504
11.	39128	-1,78E-06	-6,94E-05
12.	45280	-0,372454	-141,308
13.	47832	-2,54E-07	-4,36E-04
14.	53190	-8,12E-03	-4,03699
15.	53596	-1,04E-06	3,50E-04
16.	66425	-0,315377	42,1891
17.	66771	-4,36E-07	-4,08E-04
18.	67598	-9,19E-05	9,27E-04
19.	68993	-3,961	33,0723
20.	72316	-1,12E-05	1,32E-04
21.	74868	-5,10E-02	-4,12761
22.	74877	-3,65E-06	-1,42E-05
23.	79087	-0,320257	-30,9367
24.	79319	-1,34E-05	-1,32E-04
25.	83680	-1,70791	-164,365
26.	87930	1,66E-05	1,59E-03
27.	89695	-7,05E-12	-7,55E-10
28.	89695	3,02E-06	-2,37E-06
29.	92811	0,431424	8,98005
30.	94465	1,29E-04	-4,77E-04
31.	96233	2,71811	42,9162
32.	97622	2,76E-03	-8,67E-03
33.	97820	-9,94017	42,8265
34.	102390	-1,57E-04	-2,72E-04
35.	102900	-0,272742	46,5208
36.	114420	0,407924	33,1844
37.	114440	5,42E-04	2,93E-02
38.	114800	1,33E-04	5,62E-03
39.	117400	5,23882	29,9756

Anhand der Ergebnisse in der obigen Tabelle ist deutlich zu erkennen, dass bei einigen Resonanzfrequenzen die Amplituden der dazugehörigen Eigenvektoren viel kleiner sind als im Vergleich zu Amplituden bei anderen Frequenzen. Wie sich im nächsten Abschnitt zeigen wird, sind für diese kleinen Amplituden keine sichtbaren Resonanz-Überhöhungen in den Admittanzverläufen zu sehen.

Im vorhergehenden Kapitel wurde schon darauf hingewiesen, dass nur einige relevante Moden für die Beschreibung des Systemverhaltens von Bedeutung sind. Um eine effektive Aussage bezüglich der Relevanz der Eigenmoden zu gewährleisten, wird an dieser Stelle

der sogenannte „*dc gain*“ eingeführt [Hat 01]. Mit *dc gain* lässt sich die Höhe des Resonanzpeaks der Transferfunktion zwischen Eingangssignalen des Systems abschätzen.

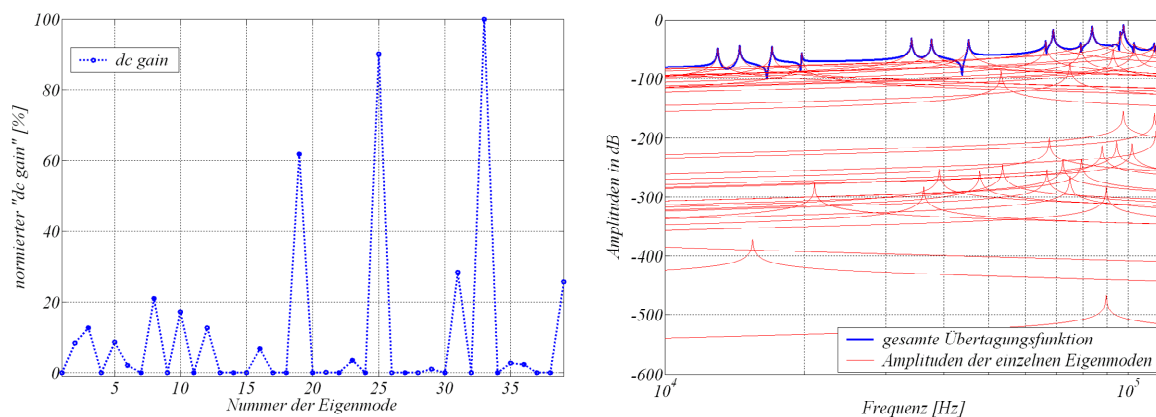
Als *dc gain* wird hier das Verhältnis

$$(dc\ gain)_i = \frac{(\psi_{Z\ Wedge})_i (L_A^{(a)})_i}{\omega_{0i}^2} \quad (8.1)$$

definiert. Anschließend wird der *dc gain* für jede Eigenfrequenz auf den Maximalwert aller erhaltenen Werte des *dc gain* normiert:

$$(dc\ gain)_i^* = \frac{|(dc\ gain)_i|}{\max|(dc\ gain)|} \quad (8.2)$$

Der Grund für diese Normierung ist, dass sich der Einfluss der einzelnen Moden besser darstellen lässt, siehe *Bild 8.10*.



8.10: Einfluss der einzelnen Moden auf den gesamten Admittanzverlauf

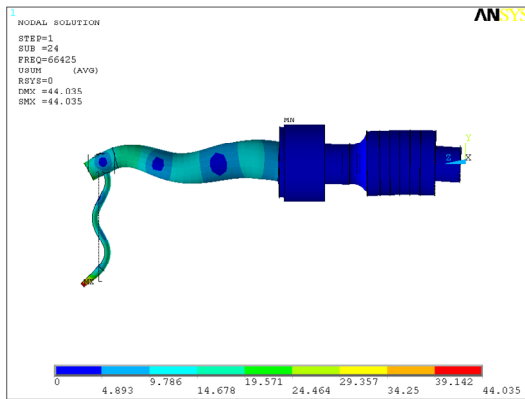
Für die Erstellung des Ersatzmodells werden im Folgenden nur die Moden mit einem Gewicht größer als 1 % berücksichtigt. Die zehn relevanten Moden mit den berechneten Ersatzparametern sind in *Tabelle 8.3* dargestellt.

Tabelle 8.3: Ersatzparameter für die Beschreibung des Systemverhaltens von Ultraschall-Transducer im Frequenzbereich von 60 bis 120 kHz

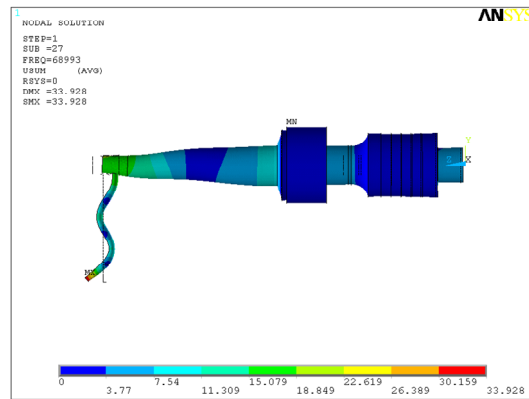
$i$	Eigenfrequenz [Hz]	$m$ [g]	$c$ [N/ $\mu\text{m}$ ]	$d$ [Ns/m]	$A$ [Am/s]
1.	13002	207,200	1382,8	33,853	-1,312E-01
2.	14512	2,426	20,2	0,442	2,891E-03
3.	17041	2,445	28,0	0,524	2,734E-03
4.	19753	1,386	21,3	0,344	4,914E-04
5.	34101	1,331	61,1	0,571	-1,444E-02
6.	37657	0,414	23,2	0,196	4,485E-03
7.	45280	1,020	82,6	0,581	1,190E-02
8.	66425	0,562	97,9	0,469	-7,475E-03
9.	68993	0,914	171,8	0,793	-1,198E-01
10.	79087	1,045	258,0	1,038	1,035E-02
11.	83680	0,037	10,2	0,039	1,039E-02
12.	92811	12,401	4217,0	14,463	4,804E-02
13.	96233	0,543	198,5	0,657	6,334E-02
14.	97820	0,545	206,0	0,670	-2,321E-01
15.	102904	0,462	193,5	0,598	-5,863E-03
16.	114423	0,908	465,9	1,301	1,229E-02
17.	117396	1,113	601,4	1,636	1,748E-01

Die Parameterbestimmung wurde für den Ultraschall-Transducer mit der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Zur Bestimmung der statischen Kapazität wurden die statische Ladung und die statische Antwort der ausgewählten 17 relevanten Eigenmoden benutzt. Somit ergibt sich eine statische Kapazität entsprechend der Gleichung (7.17) von  $C_p=1,5939$  nF.

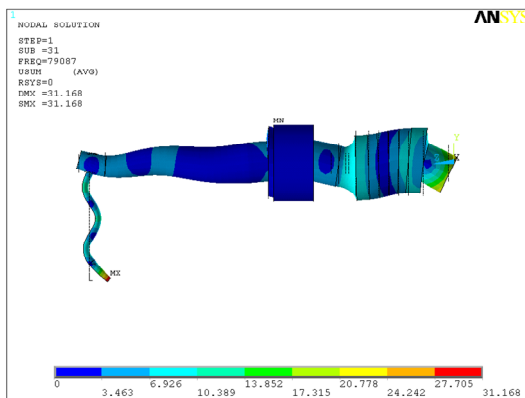
Bild 8.11 und Bild 8.12 zeigen die zehn ausgewählten relevanten Eigenmoden des Ultraschall-Transducers aus dem Frequenzbereich von 60 bis 120 kHz.



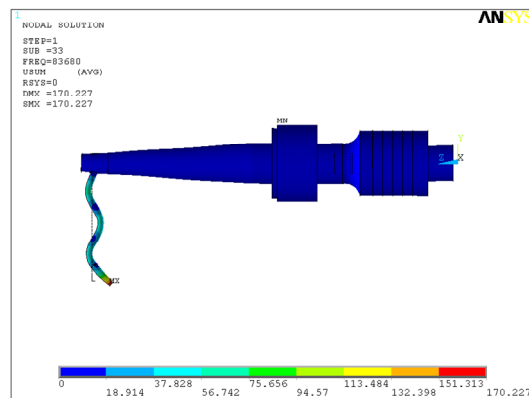
$$f_r = 66,425 \text{ kHz}$$



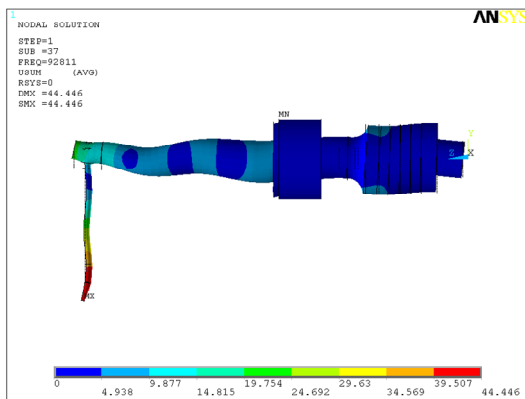
$$f_r = 68,993 \text{ kHz}$$



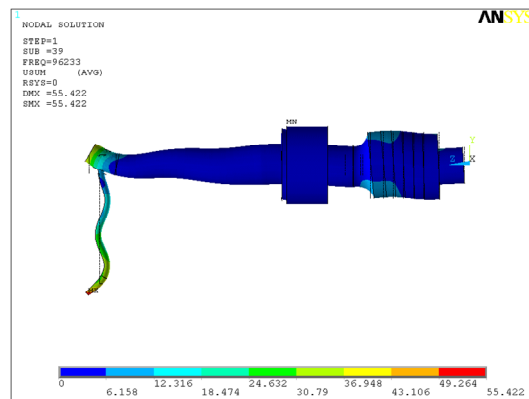
$$f_r = 79,087 \text{ kHz}$$



$$f_r = 83,680 \text{ kHz}$$



$$f_r = 92,811 \text{ kHz}$$



$$f_r = 96,233 \text{ kHz}$$

Bild 8.11: Berechnete Eigenmoden des Ultraschall-Transducers (1 bis 6)

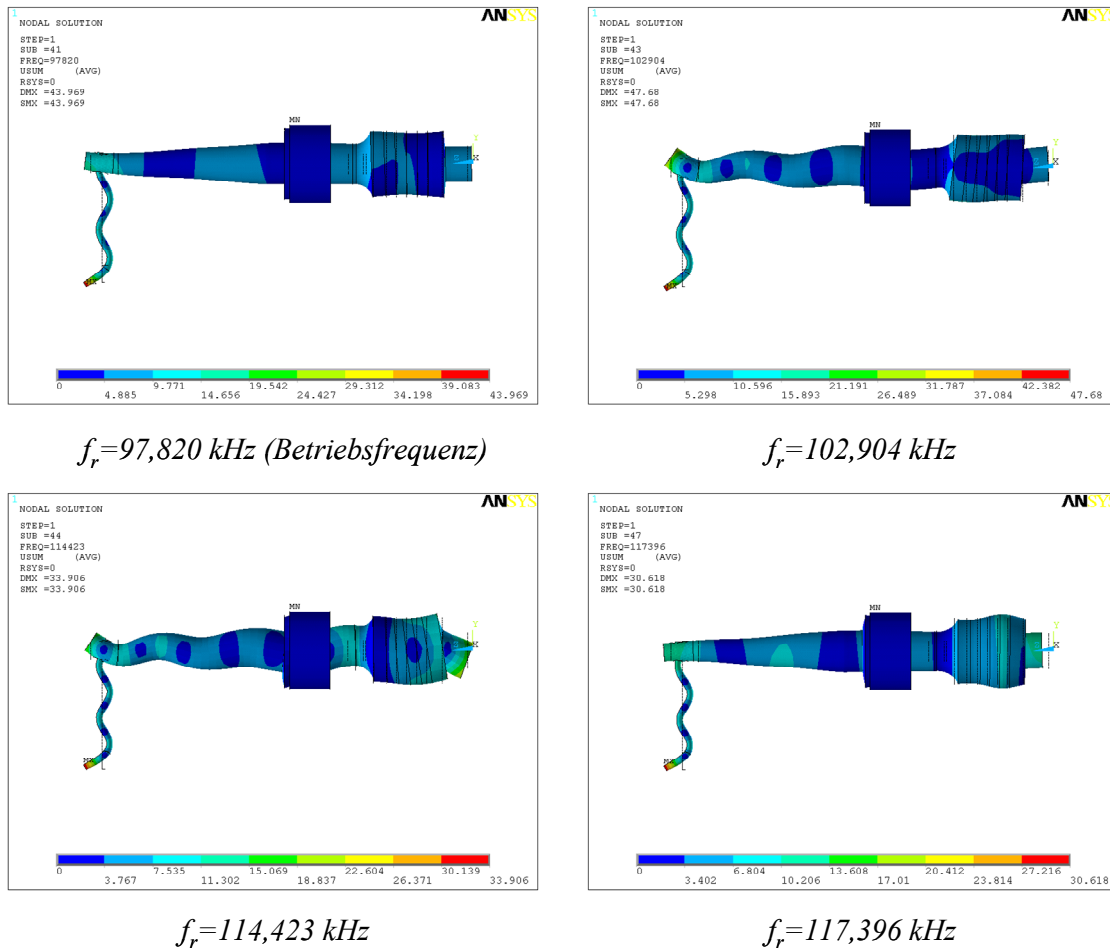


Bild 8.12: Berechnete Eigenmoden des Ultraschall-Transducers (7 bis 10)

### 8.3.3 Harmonische Analyse

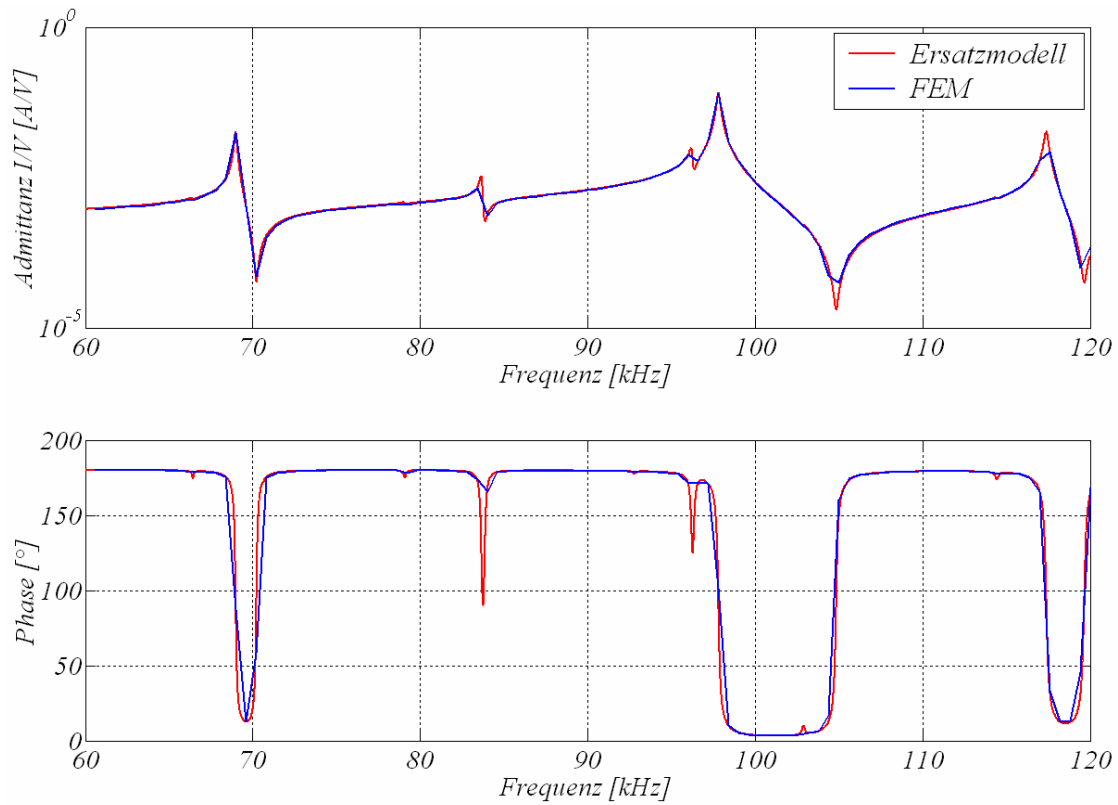
Bei dieser Analyse wird die Antwort des FE-Modells bei einer sinusförmigen Erregerspannung mit konstanter Amplitude im Frequenzbereich von 60 bis 120 kHz berechnet, so dass man einen Frequenzgang der gewünschten Ausgangsgröße erhält. Es handelt sich dabei um die Kurzschluss-Eingangsadmittanz  $\underline{Y}_{11} = \frac{\hat{I}}{\hat{V}}$  und die Kurzschluss-Kernadmittanz  $\underline{Y}_{21} = \frac{\hat{v}}{\hat{V}}$ , wobei die Geschwindigkeit an der Wedgespitze als Referenz betrachtet wurde. Die beiden mit ANSYS berechneten Admittanzverläufe werden mit Übertragungsfunktionen des Ersatzmodells

$$\underline{Y}_{11} = \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = \sum_{i=1}^{17} \frac{A_i^2}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} + j\Omega C_p \quad (8.3)$$



$$\underline{Y}_{21} = \frac{\hat{v}}{\hat{V}} = \sum_{i=1}^{17} \frac{A_i}{j\Omega m_i + d_i + \frac{c_i}{j\Omega}} \quad (8.4)$$

verglichen (siehe *Bilder 8.13* und *8.14*). Die Berechnung der Übertragungsfunktionen (8.3), (8.4) und der Vergleich von beiden Berechnungen wurde mit MATLAB durchgeführt.



*Bild 8.13: Betrag und Phase der Kurzschluss-Eingangsadmittanz des Ultraschall-Transducers*

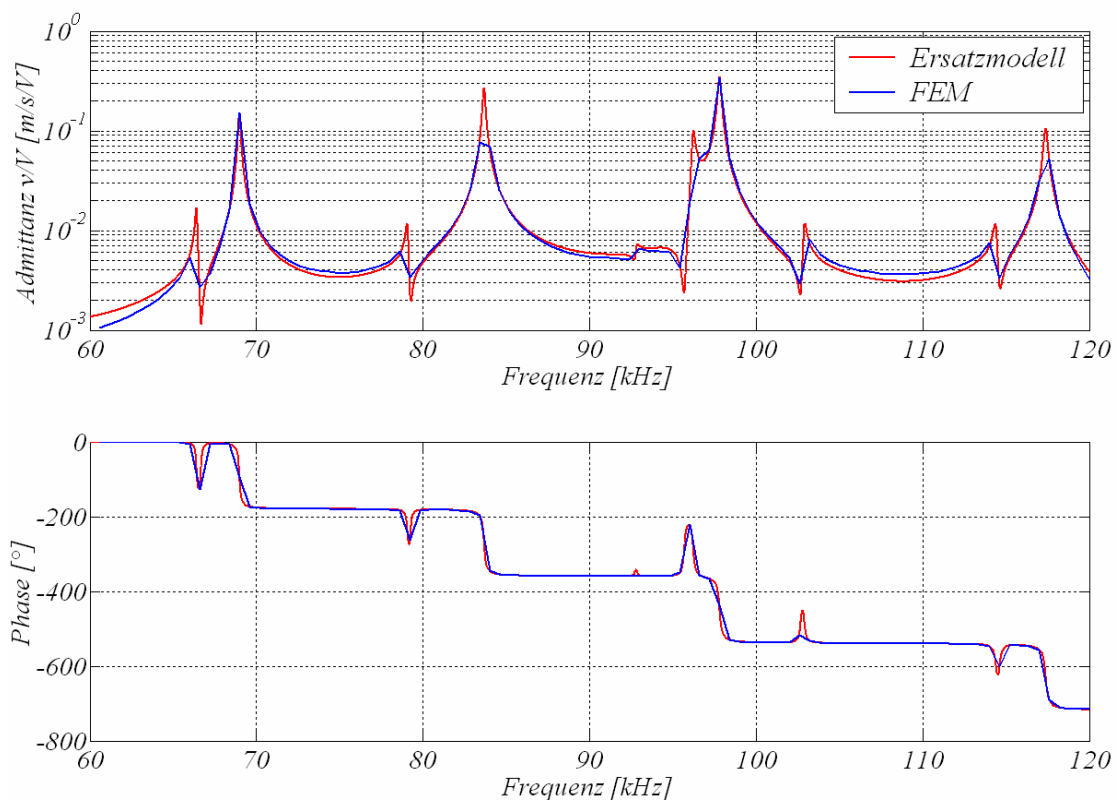


Bild 8.14: Betrag und Phase der Kurzschluss-Kernadmittanz des Ultraschall-Transducers

Wie man erkennt ergibt sich für den untersuchten Ultraschall-Transducer eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der harmonischen FE-Analyse in ANSYS und den berechneten Übertragungsfunktionen des reduzierten Ersatzmodells. Sowohl der Verlauf der Kurzschluss-Eingangsadmittanz als auch der Verlauf der Kurzschluss-Kernadmittanz werden in Betrag und Phase sehr gut angenähert. Die geringen Abweichungen an Resonanz- und Antiresonanzstellen lassen sich damit erklären, dass bei der Berechnung des Ersatzmodells viel mehr Stützpunkte betrachtet wurden. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Modellierung dieser Ultraschall-Transducer durch das auf wenige Freiheitsgrade reduzierte Ersatzmodell zulässig ist.

Der größte Vorteil der Berechnung der Übertragungsfunktionen mit Hilfe des Ersatzmodells gegenüber einer klassischen harmonischen FE-Analyse ist der reduzierte Rechenaufwand. Für die oben dargestellte harmonische Analyse – 100 Berechnungsschritte – benötigt ANSYS ungefähr 2 Stunden. Die Parameterbestimmung des Ersatzmodells (Durchführung der statischen und modalen Analyse mit ANSYS) und die anschließende Berechnung der Übertragungsfunktion mit MATLAB benötigt insgesamt weniger als 3 Minuten. Bei einer größeren Anzahl von Berechnungsschritten wird dieser Unterschied noch deutlicher.

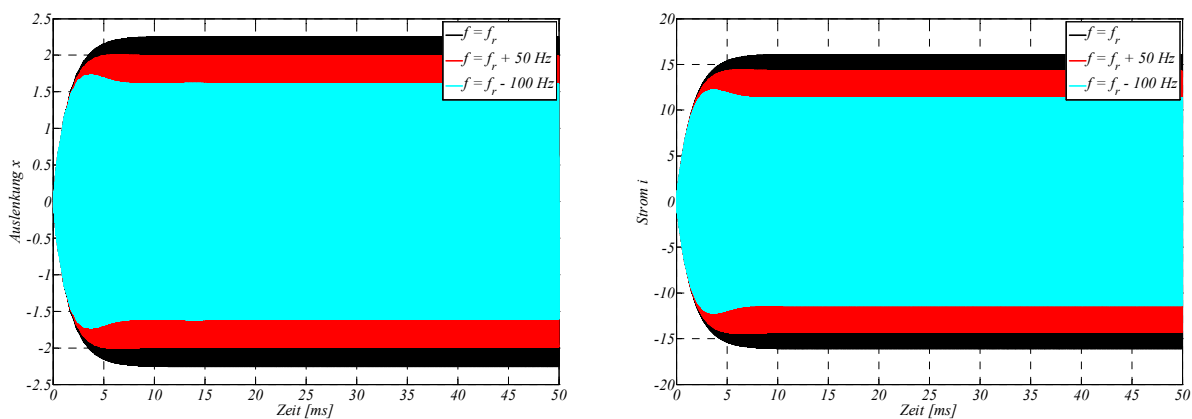
### 8.3.4 Transiente Analyse

Die transiente Analyse wird zur Untersuchung des Verhaltens von Systemen bei zeitabhängigen nichtharmonischen Anregungssignalen verwendet. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist die Berechnung von Einschwingvorgängen, die für die Ermittlung von Verzögerungszeiten zwischen Anregungs- und Antwortsignalen verwendet wird. Die transiente Analyse wurde oft benutzt, um die äußeren Einflüsse der Umgebung auf das Systemverhalten zu simulieren.

Eine Simulation zur Berechnung des transienten Verhaltens des Ultraschall-Transducers beim Einschwingen wurde in MATLAB/SIMULINK durchgeführt. Dabei wurde das FE-Modell nach der in Kapitel 6.4 vorgestellten Methode in die Zustandsraumdarstellung überführt. Um die beiden Antwortsignale – Auslenkung an der Wedgespitze und vom Transducer aufgenommener elektrischer Strom – gleichzeitig betrachten zu können, wurden die Ausgangsmatrix  $\mathbf{C}$  und die Durchgangsmatrix  $\mathbf{D}$  entsprechend erweitert:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} (L_A^{(a)})_1 & 0 & \cdots & (L_A^{(a)})_n & 0 \\ (\psi_{Z\ Wedge})_1 & 0 & \cdots & (\psi_{Z\ Wedge})_n & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} C_p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8.5)$$

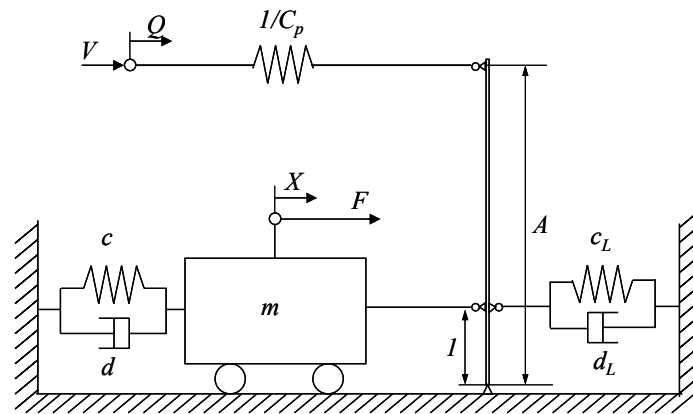
Bild 8.15 zeigt die Simulation des Einschwingvorgangs für verschiedene Anregungsfrequenzen im engen Bereich um die im Betrieb genutzte Resonanzfrequenz 97820 Hz. Es ist deutlich zu sehen, dass kleine Abweichungen der Anregungsfrequenz von der Resonanzfrequenz große Auswirkungen auf die Schwingungsamplitude der Wedgespitze und auf den Strom haben.



8.15: Simulation des Einschwingvorgangs des Ultraschall-Transducers im Bereich seiner Resonanzfrequenz (links – Auslenkung der Wedgespitze; rechts – elektrischer Strom)

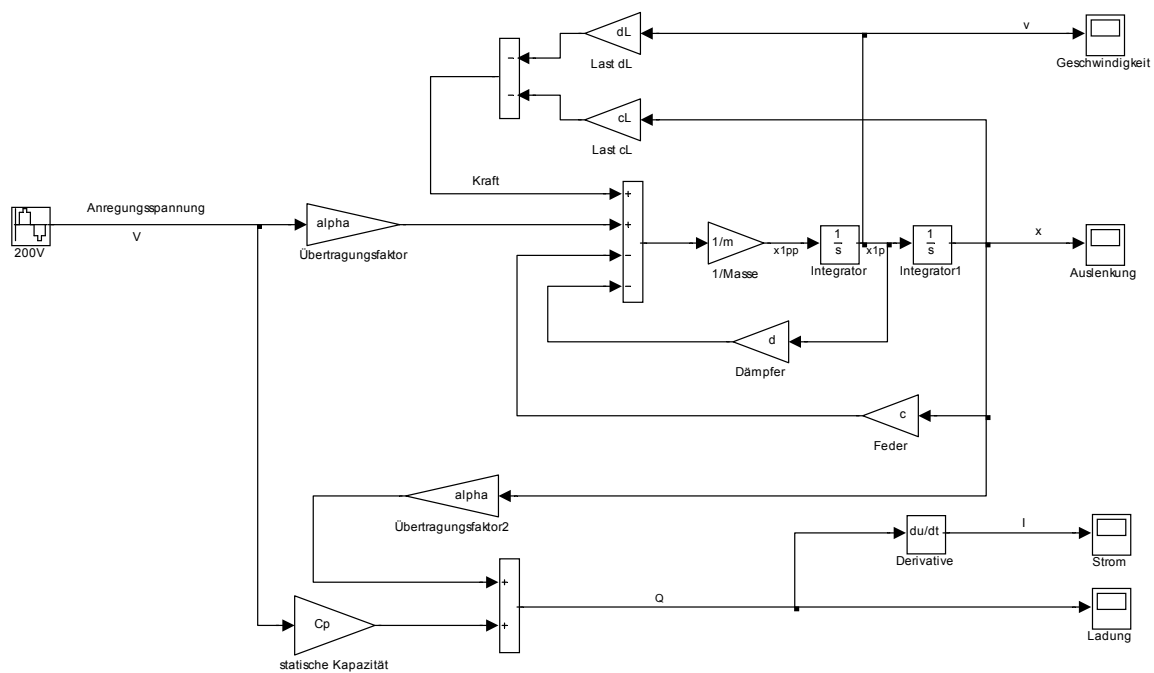
Bild 8.15 zeigt die Simulation des Einschwingvorgangs für verschiedene Anregungsfrequenzen im engen Bereich um die im Betrieb genutzte Resonanzfrequenz 97820 Hz. Es ist deutlich zu sehen, dass kleine Abweichungen der Anregungsfrequenz von der Resonanzfrequenz große Auswirkungen auf die Schwingungsamplitude der Wedgespitze und auf den Strom haben.

Die bisherige Modellierung betrachtet den Transducer im freischwingenden, unbelasteten Zustand. Im belasteten Fall ist die Kraft auf der mechanischen Seite des Ersatzmodells nicht null, sondern sie repräsentiert die Wechselwirkung zwischen der Wedgespitze und dem Draht während des Bondprozesses. Die Last lässt sich im einfachsten Fall als eine Kombination von Feder- und Dämpferelementen abbilden, siehe *Bild 8.16*.



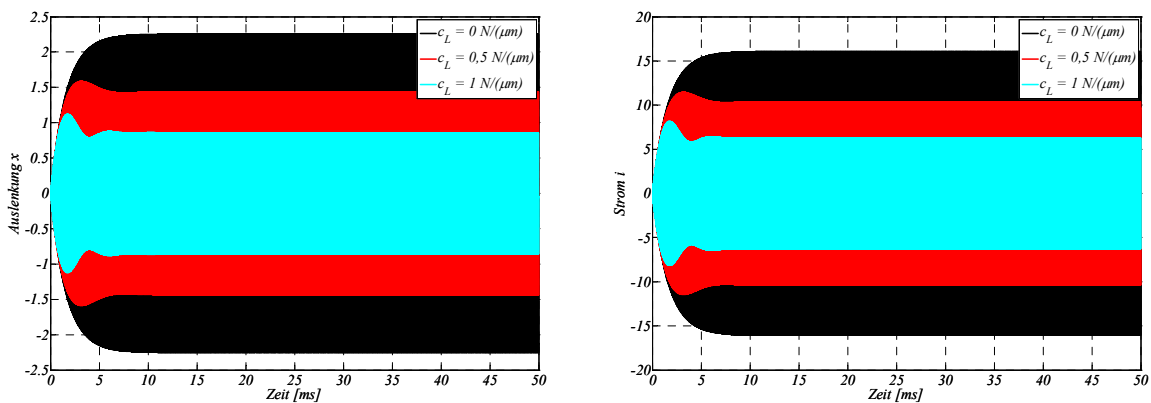
8.16: Ersatzmodell für einen Ultraschall-Transducer im Bereich der Resonanzfrequenz mit einer als Feder und Dämpfer modellierten Belastung während des Bondprozesses

Die viskose Dämpfung des Dämpferelements modelliert die durch Reibung verursachte Dissipation der Energie, die während des Schweißprozesses dem System entzogen wird. Mit der Steifigkeit des Federelementes wird die Änderung der Steifigkeit aufgrund der Ankopplung der Wedgespitze an den Untergrund abgebildet [Brö 06].

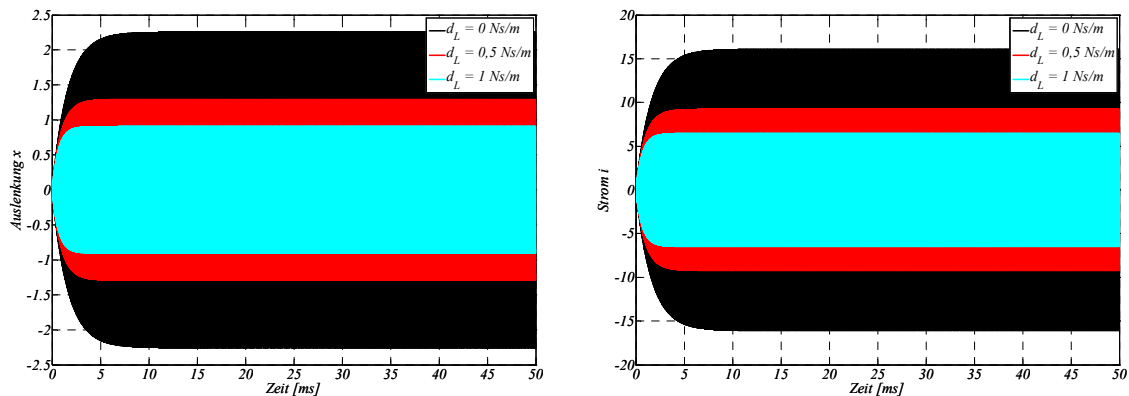


8.17: Simulinkmodell des Ultraschall-Transducers im Bereich der Resonanzfrequenz im belasteten Zustand

Zur Simulation des belasteten Ultraschall-Transducers wurde ein Simulinkmodell (Bild 8.17) für das in Bild 8.16 dargestellte Ersatzmodell aufgebaut. Die Parameter des Modells zur Beschreibung des Systemverhaltens im Bereich der Resonanzfrequenz 97820 Hz wurden aus Kapitel 8.3.2 entnommen. Das untersuchte Modell wurde mit einer Spannungsamplitude von 200V resonant angeregt.



8.18: Einfluss der Steifigkeit  $c_L$  auf die Schwingungsamplituden des Ultraschall-Transducers (links – Auslenkung der Wedgespitze; rechts – elektrischer Strom)



8.19: Einfluss der Dämpfung  $d_L$  auf die Schwingungsamplituden des Ultraschall-Transducers (links – Auslenkung der Wedgespitze; rechts – elektrischer Strom)

Bild 8.18 und Bild 8.19 zeigen die Einflüsse der Steifigkeit  $c_L$  und der Dämpfung  $d_L$  auf die Schwingungsamplituden der Wedgespitze und auf den Strom. Mit zunehmender Belastung nehmen die betrachteten Amplituden in beiden Fällen ab. Anhand dieser Bilder ist deutlich zu erkennen, dass eine durch den Bondprozess hervorgerufene Änderung der mechanischen Dämpfung und Steifigkeit zu einer veränderten Belastung des Systems führt und in Strom erkennbar ist.

Die hier verwendeten Lastparameter dienen lediglich der Veranschaulichung des Einflusses und zum qualitativen Nachweis des Einflusses auf das Systemverhalten.

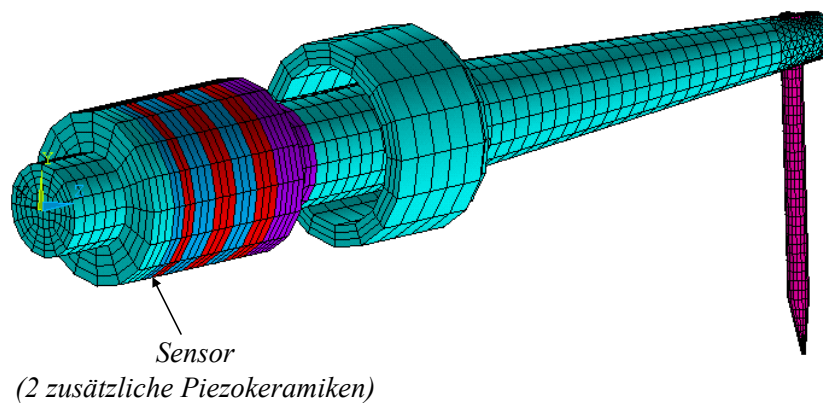
#### 8.4 Experimentelle Validierung

Da das Ersatzmodell direkt aus den Ergebnissen der FE-Berechnungen abgeleitet wird, hängt seine Qualität maßgeblich von der Qualität des FE-Modells ab. Um eine Überprüfung der Modell-Güte durchzuführen, werden die Simulationsergebnisse dieser FE-Modelle mit experimentellen Ergebnissen verglichen, wodurch die Modelle validiert werden können. Ergibt sich in der Validierung eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen, dann kann angenommen werden, dass die weiteren Berechnungen mit den Simulationsmodellen zu Ergebnissen mit guter Zuverlässigkeit führen werden. Mit einem hinreichend gut validierten Modell lassen sich so Aussagen über Eigenschaften und Einflüsse einzelner Systemkomponenten treffen, ohne dass dazu aufwändige Messungen durchgeführt werden müssen.

Wenn keine gute Übereinstimmung vorliegt, muss eine Anpassung des FE-Modells (sog. *Model Updating*) vorgenommen werden. Die Anpassung der FE-Modelle ist ein sehr komplexer Optimierungsprozess, bei dem die vorgenommenen Korrekturen - vor allem die Anpassung der Materialparameter des FE-Modells – einen Einfluss auf das gesamte Systemverhalten

ten im gesamten Frequenzspektrum haben können. Bei dem in dieser Arbeit abgeleiteten reduzierten Ersatzmodell kann man die Modell-Anpassung gezielt durchführen, so dass jede einzelne Eigenmode (Resonanzspitze) getrennt von den anderen Eigenmoden betrachtet und geändert werden kann.

Im Folgenden erfolgt ein Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Verläufen der Kurzschluss-Eingangsadmittanzen. Dabei wird das FE-Modell eines überarbeiteten Ultraschall-Transducers mit zwei dünnen zusätzlichen Piezokeramiken, die als Sensor dienen, betrachtet, siehe *Bild 8.20*.



*Bild 8.20: FE-Modell des Ultraschalltransducers mit integriertem Sensor*

Die Elektrode zwischen diesen zwei Piezokeramiken wird offen gelassen, um die induzierte Spannung als Sensorsignal zur Überwachung des Ultraschall-Bondprozesses verwenden zu können [BWH 03], [BKWH 04]. Die Randbedingungen und die Anregung sind identisch wie beim FE-Modell ohne Sensor.

*Bild 8.21* zeigt den Vergleich zwischen der Messung und den Modellrechnungen für die Eingangsadmittanz zwischen Strom und elektrischer Spannung der aktiven Piezokeramiken.

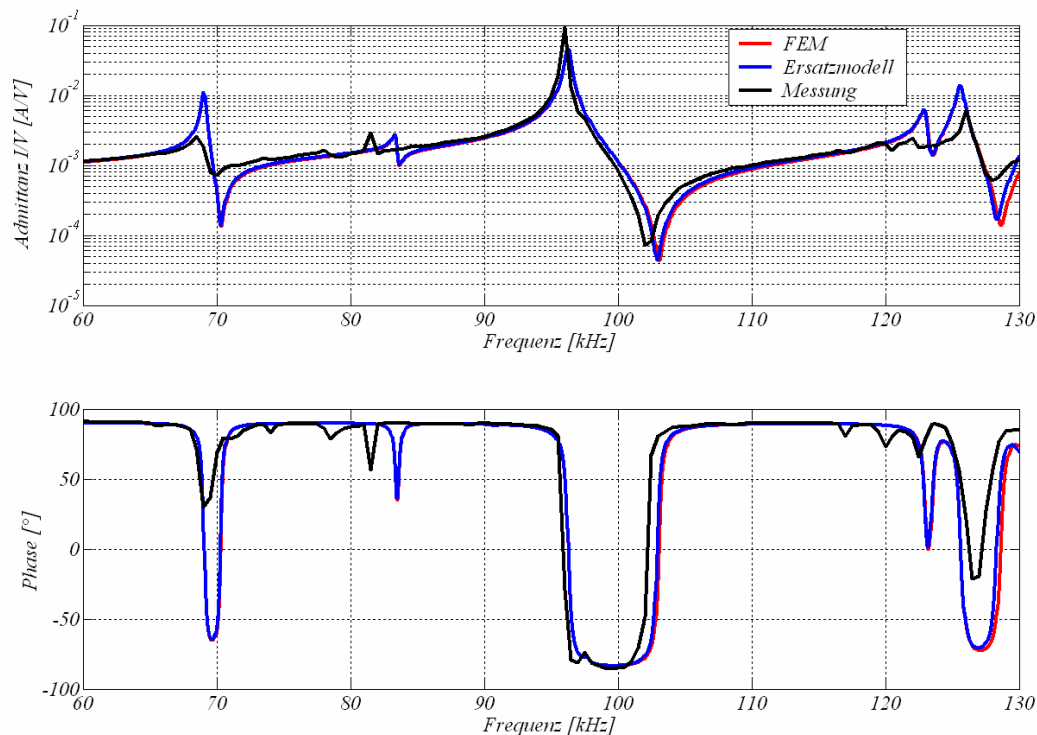


Bild 8.21: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten elektrischen Eingangsadmittanzen des Ultraschall-Transducers mit integriertem Sensor [KrWa 05], [KWB 06]

Wie in Bild 8.21 exemplarisch dargestellt, ergeben sich für die Berechnungsmodelle auch ohne Anpassung nur geringe Abweichungen gegenüber den Messergebnissen. Um diese Abweichungen bei einem Vergleich mit der Messung des realen Ultraschall-Transducers besser zu verstehen, ist folgendes zu berücksichtigen:

- Im FE-Modell wurden die Elektrodenbleche (Messingringe) zwischen den Piezokeramiken nicht berücksichtigt.
- Die Materialparameter stammen aus Herstellerdatenblättern und unterliegen einer gewissen Ungenauigkeit.
- Als Randbedingung wurde eine starre Lagerung des Transducers angenommen. Dies ist nur eine grobe Näherung der wirklichen Randbedingungen an der Einspannstelle.
- Die Vorspannung der Piezokeramiken durch eine Schraube wurde nicht berücksichtigt.
- Die Dämpfung im FE- Modell wurde als konstanter Wert angenommen.



## 8.5 Diskussion der Ergebnisse

Die hier dargestellte Methode basiert auf der Transformation des Systems in die modale Basis. Der bedeutendste Vorteil dieser Transformation liegt in der Möglichkeit der modalen Reduktion. Bei der modalen Superposition der Antwort wird meist ein Großteil der modalen Beiträge klein und kann daher vernachlässigt werden. Die untersuchte Übertragungsfunktion kann daher auf wenige relevante Eigenmoden reduziert werden. Diese Möglichkeit der modalen Transformation wurde verwendet, um reduzierte Modelle zur Beschreibung des Verhaltens von piezoelektrischen Systemen zu bilden. Dabei wurde eine Methodik für die Bestimmung der Parameter des Ersatzmodells erarbeitet. Im Gegensatz zu Standardmethoden der Parameterbestimmung, werden die Parameter hier nicht aus den Frequenzgängen ermittelt, sondern direkt aus den Ergebnissen der durchgeführten FE-Modalanalyse. Die zusätzliche statische Analyse ermöglicht die Ermittlung der statischen Kapazität. Die Quotienten der ermittelten Eigenvektoren von elektrischen Ladungen und mechanischen Auslenkungen ergeben die Übertragungsfaktoren, die das Verhältnis zwischen elektrischen und mechanischen Größen beschreiben. Mit den so ermittelten modalen Parametern kann jede Eigenmode des linearen piezoelektrischen Systems beschrieben werden. Durch die Superposition von vielen einzelnen Eigenmoden lässt sich das Systemverhalten über einem breiten Frequenzbereich abbilden. Diese gesamte Beschreibung des behandelten piezoelektrischen Systems kann anschließend als einfaches elektrisches Ersatzschaltbild mit mehreren parallelen RLC-Schaltkreisen grafisch dargestellt werden, siehe *Bild 7.2*.

Die durchgeführten Simulationen am Beispiel des Ultraschall-Transducers zeigen, dass durch den Einsatz der reduzierten Ersatzmodelle eine hohe Genauigkeit in der Antwort erzielt wird und nur sehr kleine Abweichungen gegenüber der Lösung am vollständigen FE-Modell auftreten. Die Unterschiede sind sehr gering und in den grafischen Darstellungen fast nicht erkennbar. Außerdem sind die Rechenzeiten bei Verwendung des reduzierten Modells drastisch verkürzt gegenüber denen des nicht reduzierten FE-Modells.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung neuer Produkte ist geprägt durch immer steigende Anforderungen von Seiten der Anwender sowie durch Anstrengungen zur Kostensenkung und zur Verkürzung der Entwicklungszeit. Diese Entwicklung geht einher mit zunehmender Integration von Bauelementen verschiedener Fachdisziplinen, die infolgedessen zu mechatronischen Produkten verschmelzen. Die synergetische Nutzung von Elementen der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik stellt dabei ein Erfolgspotenzial für die Gestaltung zukünftiger Produkte dar und bietet vielfältige Möglichkeiten.

Zu den klassischen Vertretern mechatronischer Systeme können die Produkte mit integrierten piezoelektrischen Komponenten gezählt werden. Die piezoelektrischen Komponenten – meistens Piezokeramiken – werden dabei als Aktoren und Sensoren verwendet. Die besonderen charakteristischen Merkmale der Piezokeramiken sind eine hohe Energiedichte, eine große mechanische Steifigkeit und ein sehr breites Anwendungsspektrum. Diese Eigenschaften tragen dazu bei, dass Piezokeramiken in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend Eingang in unterschiedliche Anwendungen gefunden haben.

Um die Entwicklung mechatronischer Systeme kostengünstig und schnell voranzutreiben, ist eine systematische, rechnergestützte Vorgehensweise unumgänglich. Da messtechnische Experimente oftmals zu kostspielig sind oder keine Prototypen zur Verfügung stehen, sind numerische Simulationen besonders bei der Konzeption und Auslegung mechatronischer Systeme von entscheidender Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Modellierung und Simulation von mechatronischen Systemen, bei denen piezoelektrische Komponenten im Mittelpunkt stehen. Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt dabei auf der Anwendung von FE-Simulationen zur Erstellung einfacher reduzierter Ersatzmodelle für die Beschreibung des piezoelektrischen Systemverhaltens.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die Grundlagen der Piezoelektrizität kurz erläutern. Ausgehend von den thermodynamischen Grundgesetzen und mit Hilfe der elektrischen Enthalpiedichte wurden die konstitutiven Gleichungen für das piezoelektrische Material abgeleitet. Es wurden die wichtigsten eindimensionalen Modelle zur Beschreibung des Verhaltens piezoelektrischer Komponente zusammengestellt. Diese Modelle (vor allem das KLM-Modell und das Mason-Modell) werden aufgrund ihrer mathematischen Formulierungen hauptsächlich für die Beschreibung des Verhaltens von piezoelektrischen Komponenten mit einfachen Geometrien verwendet. Anschließend wurden die elektromechanischen Analogien beschrieben und das äquivalente elektromechanische Ersatzmodell des piezoelektrischen Schwingers in der Nähe einer isolierten Resonanzfrequenz dargestellt. Dabei wurde auch auf die messtechnische Identifikation der Parameter des Ersatzmodells eingegangen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde basierend auf dem Prinzip von Hamilton eine FE-Formulierung für piezoelektrische Materialien hergeleitet. Die FEM erlaubt eine sehr genaue Abbildung des gesamten Systemverhaltens. Die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse hängt stark von der Detaillierungstiefe ab. Eine zunehmende Detaillierungstiefe bzw. Dimension von FE-Modellen führt zu einem erhöhten Rechenaufwand, der eine direkte Anwendung dieser Modelle bei z.B. für eine Online-Überwachung und Reglerauslegung erschwert oder unmöglich machen kann. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit eine Methodik erarbeitet, die es erlaubt, das detaillierte FE-Modell eines piezoelektrischen Systems in Form eines einfachen Ersatzmodells während der gesamten Entwurfphase des mechatronischen Systems und sogar später in seinem Betrieb zu verwenden. Es handelt sich dabei um eine modale Superpositionsmethode, bei der die ursprünglichen Systemgleichungen des FE-Modells durch Anwendung der projektionsbasierten Modellreduktion in die niedrigdimensionale modale Basis projiziert werden, wodurch eine effiziente Beschreibung der Systemdynamik möglich ist. Dieses Verfahren erfordert nur eine einzige durchzuführende FE-Modalanalyse, um die Eigenmoden und Eigenwerte des FE-Gesamtsystems, welche die modale orthogonale Basis bilden, zu bestimmen. Damit können die ursprünglichen Systemgleichungen auf modale Koordinaten transformiert werden. Anschließend kann eine neue Beschreibungsform des Systemverhaltens durch Superposition der mit den modalen Koordinaten multiplizierten Eigenvektoren abgeleitet werden. Dabei wird das ursprüngliche System gekoppelter Gleichungen mit Hilfe einfacher entkoppelter Gleichungen ausgedrückt. Die Summation der einzelnen Lösungsanteile liefert die Übertragungsfunktionen des untersuchten Systems in einem breiten Frequenzspektrum. Die entkoppelten Gleichungen der Übertragungsfunktionen werden verwendet, um die gesuchten Ersatzmodell-Parameter zu bestimmen. Anschließend wird, basierend auf den elektromechanischen Analogien, das einfache Ersatzmodell des piezoelektrischen Systems aufgestellt. Im Gegensatz zu dem klassischen Ersatzschaltbild beschränkt sich das hier vorgestellte Modell nicht nur auf einen Frequenzbereich in der Nähe einer Resonanzstelle, sondern ist in der Lage das Systemverhalten in einem breiteren Frequenzbereich abzubilden. Da bei der Erstellung des Ersatzmodells die Eigenmoden aus der FE-Modalanalyse verwendet wurden, werden diese Moden hier wiederum entsprechend der FE-Berechnung exakt abgebildet, so dass die relevanten Aspekte des ursprünglichen FE-Modells ohne nennenswerte Genauigkeitsverluste mit einem reduzierten Modell mit wenigen Freiheitsgraden wiedergespiegelt werden könnten. Die Einflüsse des kapazitiven Verhaltens der piezoelektrischen Komponenten, die besonders bei den Antiresonanzstellen der elektrischen Kurzschluss-Eingangsadmittanzen bemerkbar sind, werden durch Einbeziehung der Ergebnisse der statischen Analyse abgebildet.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen des piezoelektrischen Ultraschall-Transducers hat sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Übertragungsfunktionen des ursprünglichen FE-Modells und des reduzierten Ersatzmodells ergeben. Des Weiteren zeigt der Vergleich mit der Messung nur geringe Abweichungen, so dass die Übertragungseigenschaften des piezoelektrischen Ultraschall-Transducer in einem

breiten Frequenzbereich mit Hilfe des Ersatzmodells hinreichend genau wiedergegeben werden können.

Die in der vorliegenden Arbeit erarbeitete Methodik erlaubt es, einfache reduzierte Ersatzmodelle des piezoelektrischen Systems schnell und effizient zu erstellen. Diese Modelle mit wenigen Freiheitsgraden sind einerseits in der Lage rechenaufwändige FE-Simulationen im Frequenz- und Zeitbereich zu ersetzen. Andererseits können sie, aufgrund ihrer einfachen Form, direkt im realen mechatronischen System zur Reglerauslegung und z.B. zur Online-Rekonfiguration eingesetzt werden.



## Literaturverzeichnis

- [AGLO 04] Avdeev, I.; Gyimesi, M. ; Lovell, M. ; Ostergaard, D.: *Strongly coupled three-dimensional finite element transducer*. J. Micromech. Microeng. 14, S. 1491-1502, 2004
- [AllHug 70] Allik, H.; Hughes, T. J. R.: *Finite element method for piezoelectric vibration*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Nr.2, S. 151–157, 1970
- [ANS 9.0] ANSYS 9.0: *User's Manual*
- [AntSil 97] E. E. Antonova, E. E; Silvester,P.P.: Finite elements for piezoelectric vibrations with open electric boundaries. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 44, S. 548-556, 1997
- [BaiVel 05] Baillargeon, B.P.; Vel S.S.: *Active vibration Suppression of Sandwich Beams using piezoelectric shear Actuators: Experiments and numerical Simulations*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, S. 517-530, 2005
- [BalNar 01] Balamurugan V.; Narayanan, S.: *Active vibration control of smart shells using distributed piezoelectric sensors and actuators*. Smart Mater. Struct.10, S. 173-180, 2001
- [Bar 03] Baralic, N.: *Untersuchung der Rückwirkung nichtlinearer mechanischer Randbedingungen auf das Übertragungsverhalten piezoelektrischer Elemente mittels FEM-Simulation*. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2003
- [Bat 82] Bathe, K. J.: *Finite-Elemente-Methoden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990
- [BBGHS 76] Bauer, A. ; Bühling, D. ; Gesemann, H.-J. ; Helke, G. ; Schreckenbach, W.: *Technologie und Anwendungen von Ferroelektrika*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest&Portig K.-G., Lipzig 1976
- [BCJ 64] Berlincourt, D.A. ; Curran, D.R. ; Jaffe, H.: *Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers*. In: Physical Acoustics, W.P. Mason (Ed.), New York, Academic Press , 1964
- [Ben 05] Bennini F.: *Ordnungsreduktion von elektrostatisch-mechanischen Finite Elemente Modellen für die Mikrosystemtechnik*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2005

- [Ben 07] Benz, R.: *Fahrzeugsimulation zur Zuverlässigkeitsabsicherung von Karosseriefesten Kfz-Komponenten*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007
- [BLM 81] Boucher, D.; Lagier, M.; Maerfeld, C.: *Computation of the vibrational modes for piezoelectric array transducers using a mixed finite element-perturbation method*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-28, No. 5, 1981
- [Böh 99] Böhle, U.: *Phänomenologische Modellierung und Finite-Elemente-Simulationen von nichtlinearen elektromechanischen Vorgängen in ferroelektrischen Materialien*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999
- [Brö 06] Brökelmann, M.: *Neue Mikrosensoren für die Bondtechnik*. In: Gausemeier, J. ; Feldmann, K. (Hrsg.): *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. Hanser Fachbuchverlag, 2006
- [Brö 08] Brökelmann, M.: *Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik*. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Mechatronik und Dynamik, Diss., HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2008
- [But 06] Butz, A.: *Nichtlineare Formulierung piezoelektrischer 3D-Stabstrukturen - Theorie und Finite-Element-Modellierung*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2006
- [BWH 03] Brökelmann, M. ; Wallaschek, J. ; Hesse, H.: *Entwicklung eines integrierten Sensor-Aktor-Systems zur Steigerung der Prozessqualität beim Ultraschall-Drahtbenden*. VDI Berichte, (1753), S. 229-248, 2003
- [CasVal 04] Cassiano, B.P.; Valder, S.: *Discrete-continuous optimization for mechatronic system design*. Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Rio de Janeiro, Brazil, 2004
- [Cer 06] CeramTec: *Piezoceramics*. CeramTec AG : Firmenschrift, 2006
- [DHCBD 05] Donders, S.; Hadjit, R. ; Cuppens, K. ; Brughmans, M. ; Desmet, W.: *A Wave-Based Substructuring Approach for Faster Vehicle Assembly Predictions*. Proc. NOVEM 2005, Saint-Raphael, Frankreich, 2005
- [DieKno 97] Dietz, S. ; Knothe, K.: *Reduktion der Anzahl der Freiheitsgrade in Finite-Element-Substrukturen*. Bericht aus dem Institut für Luft-und Raumfahrt der Technischen Universität Berlin, 1997



- [Dij 03] Dijkstra, E.: *Ultrasonic distance detection in spinal cord stimulation*. Ph.D. Thesis, University of Twente, Nederland, 2003
- [DIN 483] DIN IEC 483: Leitfaden zur Bestimmung der dynamischen Eigenschaften von piezoelektrischer Keramik mit hohem elektromechanischen Koppelfaktor. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1988
- [EeN 67] Eer Nisse, E. P.: *Variational method for electroelastic vibration analysis*. IEEE Transactions On Sonics And Ultrasonics, 14(4): S. 153–160, 1967
- [Eer 67] EerNisse, E.P.: *Variational method for electroelastic vibration analysis*. IEEE Trans. Sonics Ultrason. SU-14,S. 153-160, 1967
- [GasKno 89] Gasch, R. ; Knothe, K.: *Strukturdynamik, Band 2: Kontinua und ihre Diskretisierung*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1989
- [GauCon] Gauckler, L. J. ; Conder, K.: *Ceramics II*. Skript zur Vorlesung ETH Zürich
- [Gaw 04] Gawronski, W.: *Actuators and sensors in structural dynamics*. Monographie, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, USA, 2004
- [Ges 02] Geßlein, R.: *Entwurf von Reglern reduzierter Ordnung und Entwicklung einer Workbench*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2002
- [GuoCaw 92] Guo N.; Cawley,P.: *The finite element analysis of the vibration characteristics of piezoelectric discs*. Journal of Sound and Vibration, 159(1), S. 115-137, 1992
- [Guy 65] Guyan, R. J.: *Reduction of Stiffness and Mass Matrices*. AIAA Journal, vol. 3, No. 2, 1965
- [Han 03] Hansch, R: *Optimierung des PbO-Haushaltes in undotierten und SKN-substituierten PZT-Fasern: Gefüge und Eigenschaften*. Dissertation, Universität Würzburg, 2003
- [Hat 01] Hatch, M. R.: *Vibraton simulation using Matlab and Ansys*. Chapman&Hall/CRC, 2001
- [HCF 90] Hagood, N.W.; Chung, W.H., von Flotow, A.: *Modelling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control*. J. of. Intell. Mater. Syst. And Struct., Vol 1, S.327-354, 1990

- [Hem 01] Hemsel, T.: *Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe*. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, HNIVerlagsschriftreihe, Bd. 101, 2001
- [Her 03] Herold, S.: *Simulation des dynamischen und akustischen Verhaltens aktiver Systeme im Zeitbereich*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2003
- [HLW 98] Hemsel, T ; Littmann, W. ; Wallaschek, J.: Modellierung piezoelektrischer Stapel- und Vielschichtaktoren für dynamischen Betrieb. In: 2. Polnischdeutscher Workshop: Werkzeuge der Mechatronik. Ilmenau, 1998, S. 224–233
- [HMH 04] Herold, S.; Mayer, D. ; Hanselka, H.: *Transient simulation of adaptive Structures*. Jour. of. Intell. Mater. Syst. And Struct., Vol. 15, S. 215-224, 2004
- [Hol 02] Hollburg, U.: *Maschinendynamik*. Oldenbourg Verlag München Wien, 2002
- [HolEer 69] Holland, R.; EerNisse , E.P.: *Design and analysis of piezoelectric resonant devices*. The M. I. T. press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1969
- [IEEE 176] ANSI/IEEE Standard 176-1987: IEEE standard on piezoelectricity. American Standards National Institut, New York, 1987
- [Ike 96] Ikeda, T.: *Fundamentals of Piezoelectricity*. Oxford University Press, Oxford, 1996
- [Jan 92] Janocha, D. J.: *Aktoren*. Springer Verlag, 1992
- [Jen 95] Jendritza, H.: *Technische Anwendung neuer Aktoren*. Expert Verlag, 1995
- [JGS 00] Janshoff, A. ; Galla, H.-J. ; Steinem, C.: *Mikrogravimetrische Sensoren in der Bioanalytik – eine Alternative zu optischen Biosensoren?*. Angew, Chem., 112, S. 4164-4195, 2000
- [JVV 97] Jaehwan, K.; Vasundara, V. V.; Vijay, K.V.: *Finite element modelling of structures including piezoelectric active devices*. International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 40, S. 817-832, 1997
- [KekTab 05] Kekana, M.; Tabakov, P.: *Static control of composite plates using piezoelectric sensor and actuator techniques*. Smart Mater. Struct.14, S. 349-353, 2005
- [KHM 00] Kim, S. J.; Hwang, J. S.; Mok, J.: *Sensor/Actuator optimal design for active vibration control of shell structure*. Jour. of. Intell. Mater. Syst. And Struct., Vol. 11, S. 848-856, 2000

- [KLM 70] Krimholtz, R.; Leedom, D.A.; Matthei, G.L.: *New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers*. Electron. Lett., Vol. 6, S. 398-399, 1970
- [Koc 00] Kocbach, J.: *Finite element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers*. PHD thesis, University of Bergen, Norway, 2000
- [Kos 66] Kossof, G: *The Effects of Backing and Matching on the Performance of Piezoelectric Ceramic Transducer*. IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, 1966, SU-13, S. 20-30
- [Kro 99] Krome, J. W.: *Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellenmotoren*. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 59, 1999
- [Lan 03] Lang, C.: *Beitrag zur Theorie, Numerik und Anwendung nichtlinearer Algorithmen zur statischen und dynamischen Analyse von Stahlbetonrotationsschalen*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2003
- [LCS 99] Lowrie, F.; Cain, M.; Stewart, M.: *Finite element modelling of electroceramics*. NPL Report CMMT(A)150, 1999
- [LSW 07] Lerch, R. ; Sessler, G. ; Wolf, D.: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [Lea 94] Leach, W.M.: *Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol. 41, No. 1, S. 60-66, 1994
- [Led 05] Ledworuski, R.: *Entwicklung eines Ultraschallkatheters mit integriertem Mikroantrieb*. Dissertation, Technische universität Berlin, 2005
- [Len 74] Lenk, A.: *Elektromechanische Systeme. Band 2: Systeme mit verteilten Parametern*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1974
- [Len 75] Lenk, A.: *Elektromechanische Systeme. Band 1: Systeme mit konzentrierten Parametern*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1975
- [Ler 90] Lerch, R.: *Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control , 37(3), S. 233–247, 1990
- [Lie 06] Lienemann, J.: *Complexity Reduction Techniques for Advanced MEMS Actuators Simulation*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2006

- [Lin 02] Link, M.: *Finite Elemente in der Statik und Dynamik*. Teubner B.G. GmbH, 2002
- [Lin 89] Link, M.: *Finite Elemente in der Statik und Dynamik*. B. G. Teubner, Stuttgart, 2. Auflage, 1989
- [Lit 03] Littmann, W.: *Piezoelektrische, resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen*. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Mechatronik und Dynamik, Diss., HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 124, 2003
- [Luc 02] Lucklum, R.: *Resonante Sensoren*. Habilitationsschrift, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2002
- [Mas 48] Mason, W.P.: *Electromechanical Transducers and Wave Filters*. 2nd ed. New York: Van Nostrand Company, Inc., 1948
- [May 03] Mayer, D.: *Regelung und Identifikation aktiver mechanischer Strukturen mit Adaptiven digitalen Filtern*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2003
- [Mel 01] Melz, T.: *Entwicklung und Qualifikation modularer Satellitensysteme zur adaptiven Vibrationskompensation an mechanischen Kryokühlern*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [Mes 04] Mesecke-Rischmann, S.: *Modellierung von flachen piezoelektrischen Schalen mit zuverlässigen finiten Elementen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2004
- [Mey 03] Meyer, S.: *Modellbildung und Identifikation von lokalen nichtlinearen Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften in komplexen strukturdynamischen Finite Elemente Modellen*. Dissertation, Universität Kassel, 2003
- [MHES 01] Makkonen, T.; Holappa, A. ; Ellä, J. ; Salomaa, M.M.: *Finite element simulations of thin-film composite BAW resonators*. IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 48, No. 5, S. 1241-1258, 2001
- [MLJS 95] Moetakef, M. A.; Lawrence, K. L.; Joshi, S. P.; Shiakolas, P. S.: *Closed-form expressions for higher order electroelastic tetrahedral elements*. AIAA Journal, 33(1), S. 136–142, 1995

- [MülGro 02] Müller G.; Groth, C.: FEM für Praktiker Band 2. Strukturdynamik. Edition expertsoft, Band 44, Expert-Verlag GmbH, 2002
- [MülGro 06] Müller G.; Groth, C.: FEM für Praktiker Band 1. Grundlagen. Edition expertsoft, Band 23, Expert-Verlag GmbH, 2006
- [NCB 83] Naillon, M.; Coursant, R. H.; Besnier, F.: *Analysis of piezoelectric structures by a finite element method*. Acta Electr. 25, 341-362, 1983
- [NeuBri 97] Neubig, B.; Briese, W.: *Das Grosse Quarzkochbuch*. Franzis-Verlag, 1997
- [Nor 05] Nordmann, R.: Mechatronische Systeme im Maschinenbau I. Studienskript, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 2005
- [NSA 04] Nader, G.; Silva, E. C. N.; Adamowski, J.C.: *Effective Damping Value of Piezoelectric Transducer Determined by Experimental Techniques and Numerical Analysis*. ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 1 - S. 271-279, 2004
- [Oud 03] Oude Nijhuis, M. H. H.: *Analysis tools for the design of active structural acoustic control systems*. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2003
- [OudBoe 02a] Oude Nijhuis, M. H. H.; de Boer, A.: *Finite element models applied in active structural acoustic control*. In: Smart Structures and Materials 2002: Modeling, Signal Processing, and Control. SPIE, Bellingham, Washington, S. 57-68, 2002
- [OudBoe 02b] Oude Nijhuis, M. H. H.; de Boer, A.: *Optimization strategy for actuator and sensor placement in active structural acoustic control*. In Proceedings of Active 2002, Southampton, UK, 2002
- [PIC] [www.piceramic.de](http://www.piceramic.de), Internetseite der Firma PI Ceramic
- [Pie 01] Piefort, V.: *Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures*. Dissertation, Universite Libre de Bruxelles, Active Structures Laboratory, 2001
- [PiePre 00a] Piefort, V.; Preumont, A.: *Finite element modelling of smart piezoelectric shell structures*. 5th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Louvain-La-Neuve, Belgium, 2000
- [PiePre 00b] Piefort, V.; Preumont, A.: *Modeling of smart piezoelectric structures with finite elements*. ISMA25, 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 2000

- [Piet 92] Pietrzko, S. J.: *Verfahren zur Identifikation der Dämpfungsmatrix mechanischer Systeme*. EMPA Bericht Nr. 223, Dübendorf, Schweiz, 1992
- [Pre 97] Preumont, A.: *Vibration Control of Active Structures - An Introduction*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1997
- [Pre 97] Preumont, A.: *Vibration Control of Active Structures*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997
- [RadMan 04] Radmanovic, M.D.; Mancic, D.D.: *Design and Modelling of the power ultrasonic transducers*. Monographie, University of Nis, Serbien, 2004
- [Red 61] Redwood, M.: *Transient Performance of a Piezoelectric Transducer*. Journal of the Acoustical Society of America, 33, S.527-536, 1961
- [Rei 98] Reichl, H.: *Direktmontage*. Springer-Verlag GmbH, 1998
- [RMG 85] Ramos-Fernandez, A.; Montoya-Vitini, F.; Gallago-Juarez, J. A.: *Automatic system for dynamic control of resonance in high power and high Q ultrasonic transducers*. Ultrasonic, July 1985, S. 151-126, 1985
- [Ros 88] Rosenbaum, J. F.: *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*. Artechhouse, Boston, USA, 1988
- [Rus 94] Ruschmeyer, K.: *Piezokeramik*. Expert Verlag, 1994
- [SBHnk 04] Sangki, L.; Byung, C. C; Hoon, C. P.; Nam, S. G.; Kwang, J. Y.: *Piezoelectric actuator-sensor analysis using a three-dimensional assumed strain solid element*. Jour. of. Intell. Mater. Syst. And Structs, Vol. 15, No. 5, S. 329-338, 2004
- [SCR 94] Saunders, W. R.; Cole, D. G.; Robertshaw H.H.: *Experiments in piezostructure modal analysis for MIMO feedback control*. Smart Mater. Struct. 3, S. 210-218, 1994
- [SedHef 05] Sedlak, P.; Hefner, S.: *Piezoceramic sensor: Basic notes for Finite Element Model*. In Student EEICT 2005, Brno University of Technology, S. 308 – 312, 2005
- [Sim 02] Simkovic, R.: *Nichtlineares piezoelektrisches Finite-Elemente-Verfahren zur Modellierung piezokeramischer Aktoren*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 334, VDI Verlag, Düsseldorf, 2002

- [SLDB 99] Sherrit, S.; Leary, S. P.; Dolgin, B. P.; Bar-Cohen, Y.: *Comparison of the Mason and KLM equivalent circuits for piezoelectric resonators in the thickness mode*. IEEE Ultrasonics Symposium, Vol. 2, S. 921-926, 1999
- [SMGR 04] Sastry, C. V. S.; Mahapatra, D. R.; Gopalakrishan, S.; Ramamurthy, T.S.: *Distributed sensing of static and dynamic Fracture in self-sensing piezoelectric composite: Finite element simulation*. Jour. of. Intell. Mater. Syst. And Struct., Vol. 15, S. 339-354, 2004
- [Ste 02] Steinhausen, R.: *Charakterisierung und Modellierung piezoelektrischer 1-3 Komposite*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002
- [StePos 95] Stephan W.; Postl, R.: *Schwingungen elastischer Kontinua*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1995
- [TicGau 80] Tichy J.; Gautschi, G.: *Piezoelektrische Messtechnik*. Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1980
- [Tie 67] Tiersten, H. F.: *Hamilton's principle for linear piezoelectric media*. In Proceedings of the IEEE, S. 1523–1524, 1967
- [Tie 68] Tiersten, H. F.: *Natural boundary and initial conditions from a modification of Hamilton's principle*. Journal of Mathematical Physics, Vol. 9, S. 1445–1451, 1967
- [Tie 69] Tiersten, H. F.: *Linear Piezoelectric Plate Vibrations: Elements of the Linear Theory of Piezoelectricity and the Vibrations of Piezoelectric Plates*. Plenum Press, New York, 1969
- [Tzo 93] Tzou, H.S.: *Piezoelectric Shells (Distributed Sensing and Control of Continua)*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1993
- [TzoTse 90] Tzou, H. S.; Tseng, C. I.: *Distributed piezoelectric sensor/actuator design for dynamic measurement/control of distributed parameter systems: a piezoelectric finite element approach*. Journal of Sound and Vibration, 138(1):17–34, 1990
- [VaD 25] Van Dyke, K. S.: *The electric network equivalent of a piezoelectric resonator*. Physical Review, vol. 25, S. 895, 1925
- [VDI 3830] Richtlinie VDI 3830, *Werkstoff- und Bauteildämpfung*, 2004
- [VDy 25] Van Dyke, K. S.: *The electrical network equivalent of a piezo-electric resonator*. Phys. Rev., Vol. 25, No. 6, Abs. No.52, S. 895, 1925

- [Wag 03] von Wagner, U.: *Nichtlineare Effekte bei Piezokeramiken unter schwachem elektrischem Feld: Experimentelle Untersuchung und Modellbildung*. Habilitationsschrift, Technische Universität Darmstadt, 2003
- [Wag 05] Wagner, J.: *Piezoelektrizität und was daraus wurde*. Applikationsschrift, Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer, Wissenswertes über Piezoelektrizität, 2005
- [Wal 00a] Wallaschek, J.: *Piezoelektrische Werkstoffe und ihre technischen Anwendungen*. Universität Paderborn : Vorlesungsskript, 2000
- [Wal 00b] Wallaschek, J.: *Systementwurf piezoelektrischer Aktoren*. VDI Bildungswerk, Mechatronik-Workshop, Düsseldorf, 2000
- [Weh 03] Wehr, J.: *Temperaturabhängige Untersuchungen zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT-Keramiken*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003
- [Wit 07] Wittel, F. K.: *FEM for 4 - Eine kurze Einführung in die Finite Elemente Methode*. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, 2007
- [Wol 00] Wolf, K. D.: *Electromechanical Energy Conversion in Asymmetric Bending Actuators*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2000
- [XuKok 02] Xu, S. X.; Koko, T. S.: *Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures*. Finite Elements in Analysis and Design 40, S. 241-262, 2002
- [YLC 88] Yong, Y. K.; Lee, P. C. Y.; Chuang, S. S.: *Vibrations of Z-cut resonator-structure by finite element analysis*. 42nd Annual Frequency Control Symposium, 1988
- [YooYou 96] Yook-Kong, Y.; Young, C.: *Numerical algorithms for solutions of large eigenvalue problems in piezoelectric resonators*. International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 39, S. 909-922, 1996
- [YVV 97] Young-Hun, L.; Vasundara, V. V.; Vijay, K. V.: *Finite-element modeling of the transient response of MEMS sensors*. Smart Mater. Struct. 6, S. 53-61, 1997
- [Zha 03] Zhang, W.: *Datenreduktion und ihre Anwendungen in adaptiven mechanischen Systemen*. Dissertation, Universität Magdeburg, 2003
- [Zie 71] Zienkiewicz, O. C.: *The Finite Element Method in Engineering Science*. Mc Graw-Hill, Maidenhead, 1971



**Veröffentlichungen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstanden sind:**

- [BKWH 04] Brökelmann, M. ; Król, R. ; Wallaschek, J. ; Hesse, H. J.: *A Self-Sensing Transducer for Ultrasonic Wire Bonding*. In: Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics (ICA 2004), 4-9 April 2004, Kyoto, Japan, Band IV, S. 2901–2904, 2004
- [KMR 05] Król, R. ; Mracek, M. ; Redenius, A.: *Eine Methodik zur Ableitung einfacher Ersatzmodelle zur automatischen Konfigurierung piezoelektrischer Antriebe mittels der Finite Elementen Methode*. In: VDI- Berichte: Mechatronik 2005 - Innovative Produktentwicklung Nr. 1892, Bd. 1, S. 137–151, 2005
- [KrWa 05] Król, R. ; Wallaschek, J.: *A Methodology for Obtaining Simple Electromechanical Equivalent Models for Piezoelectric Systems Using FE*. In: Proceedings of 2nd Int. Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA) 2005, Paderborn
- [KWB 06] Król, R. ; Wallaschek, J. ; Brökelmann, M.: *A Methodology for Obtaining Simple Electromechanical Equivalent Models for Piezoelectric Systems Using FE*. Journal Solid State Phenomena, Volume: Mechatronic Systems and Materials (vol. 113), S. 1-6, 2006

## Anhang

### Werkstoffdaten für PIC-181

PIC 181 ist ein modifizierter Bleizirkonat-Bleititanat-Werkstoff mit extrem hohem mechanischem Gütefaktor und hoher Curie-temperatur. Auf Grund seiner guten Temperatur- und Zeitkonstanz der dielektrischen und elastischen Werte eignet er sich für Ultraschallanwendungen im Resonanzbetrieb [PIC].

Zur vollständigen Beschreibung des Materials in ANSYS wurden die folgenden Parameter aus dem Datenblatt der Firma PI Ceramic entnommen.

Dichte [ $kg/m^3$ ]:

$$\rho = 7850$$

Dielektrizitätszahlen:

$$\epsilon_{11}^S / \epsilon_0 = 740$$

$$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0 = 624$$

Piezoelektrische Konstante [ $N/Vm$ ]:

$$e_{31} = -4,5$$

$$e_{33} = 14,7$$

$$e_{15} = 11,0$$

Elastizitätsmoduln [ $N/m^2$ ]:

$$c_{11}^E = 1,523E+11$$

$$c_{33}^E = 1,314E+11$$

$$c_{12}^E = 8,909E+10$$

$$c_{13}^E = 8,547E+10$$

$$c_{44}^E = 2,830E+10$$

$$c_{66}^E = 3,161E+10$$





## **Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik**

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenzuführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut sieben Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

## **Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology**

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today seven Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 1 FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-00-0
- Bd. 2 HORNBOSTEL, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 2, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-01-9
- Bd. 3 STEMANN, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 3, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-02-7
- Bd. 4 KETTERER, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 4, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-03-5
- Bd. 5 HARTMANN, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 5, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-04-3
- Bd. 6 WACHSMANN, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-05-1
- Bd. 7 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Die Szenariotechnik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 7, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-06-X
- Bd. 8 CZUMAJ, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 8, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-07-8
- Bd. 9 HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 9, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-08-6
- Bd. 10 AMEUR, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-09-4
- Bd. 11 PAUL, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 11, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-10-8
- Bd. 12 HOLL, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-11-6
- Bd. 13 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENnet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 13, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-12-4
- Bd. 14 PETRI, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 14, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-13-2
- Bd. 15 LESCHKA, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 15, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-14-0
- Bd. 16 SCHNEIDER, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 16, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-15-9

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 17 FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 17, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-16-7
- Bd. 18 GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 18, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-17-5
- Bd. 19 DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 19, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-18-3
- Bd. 20 HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 20, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-19-1
- Bd. 21 GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerp, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 21, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-20-5
- Bd. 22 BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 22, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-21-3
- Bd. 23 GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-22-1
- Bd. 24 GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 24, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-23-X
- Bd. 25 EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 25, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-24-8
- Bd. 26 FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologischer neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 26, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-25-6
- Bd. 27 DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 27, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-26-4
- Bd. 28 BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 28, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-27-2
- Bd. 29 PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 29, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-28-0
- Bd. 30 HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 30, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-29-9
- Bd. 31 DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 31, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-30-2
- Bd. 32 BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 32, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-31-0



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |  |
|---|--|
| <p>Bd. 33 HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 33, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-32-9</p> <p>Bd. 34 SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 34, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-33-7</p> <p>Bd. 35 STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 35, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-34-5</p> <p>Bd. 36 MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 36, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-35-3</p> <p>Bd. 37 SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 37, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-36-1</p> <p>Bd. 38 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 38, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-37-X</p> <p>Bd. 39 GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 39, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-38-8</p> <p>Bd. 40 REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 40, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-39-6</p> | <p>Bd. 41 DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 41, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-40-X</p> <p>Bd. 42 KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-41-8</p> <p>Bd. 43 TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 43, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-42-6</p> <p>Bd. 44 GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 44, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-43-4</p> <p>Bd. 45 nicht erschienen!</p> <p>Bd. 46 VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 46, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-45-0</p> <p>Bd. 47 SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 47, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-46-9</p> <p>Bd. 48 GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 48, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-47-7</p> <p>Bd. 49 WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 49, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-48-5</p> |
|---|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 50 FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 50, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-49-3
- Bd. 51 HOLTkamp, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 51, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-50-7
- Bd. 52 KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 52, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-51-5
- Bd. 53 SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 53, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-52-3
- Bd. 54 KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 54, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-53-1
- Bd. 55 SCHÜRHOlz, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 55, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-54-X
- Bd. 56 GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 56, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-55-8
- Bd. 57 KRESS, S.: Architektur eines workflow-basierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 57, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-56-6
- Bd. 58 THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 58, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-57-4
- Bd. 59 KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statorn für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 59, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-58-2
- Bd. 60 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 60, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-59-0
- Bd. 61 LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 61, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-60-4
- Bd. 62 KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 62, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-61-2
- Bd. 63 LUKOVszKI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 63, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-62-0
- Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 64, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-63-9
- Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMUnet - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 65, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-64-7

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 66 HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 66, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 67 SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 67, Paderborn, Band 2000 – ISBN 3-931466-66-3
- Bd. 68 LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 68, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-67-1
- Bd. 69 SCHMIDTMANN, A.: Eine Spezifikationsprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 69, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-68-X
- Bd. 70 GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 70, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 71 WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 71, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-70-1
- Bd. 72 LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 72, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931433-71-X
- Bd. 73 LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 73, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-72-8
- Bd. 74 WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 74, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-73-6
- Bd. 75 GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 75, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-74-4
- Bd. 76 DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 76, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-75-2
- Bd. 77 KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 77, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-76-0
- Bd. 78 SCHEIDELER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 78, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-77-9
- Bd. 79 GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-78-7
- Bd. 80 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungs-umgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-79-5
- Bd. 81 RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Implementations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 81, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-80-9

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |  |  |
|--|--|
| <p>Bd. 82 GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 82, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-81-7</p>  | <p>Bd. 90 WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 90, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-89-2</p>                                     |
| <p>Bd. 83 DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 83, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-82-5</p>  | <p>Bd. 91 LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 91, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-00-X</p>  |
| <p>Bd. 84 SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrichtung in kooperativen Verbänden; Klassifikation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 84, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-83-3</p>   | <p>Bd. 92 VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 92, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-01-8</p>                  |
| <p>Bd. 85 KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechnischen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 85, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-84-1</p> | <p>Bd. 93 BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 93, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-02-6</p>                       |
| <p>Bd. 86 BARTSCHER, T.: Methoden des Integrierten Workflowmanagements (IWFm). Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 86, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-85-X</p>   | <p>Bd. 94 WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturierungsprojekten in Forschungs- und Entwicklungsorganisationen der Automobilindustrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 94, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-03-4</p> |
| <p>Bd. 87 QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsmethode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 87, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-86-8</p>   | <p>Bd. 95 WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 95, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-04-2</p>   |
| <p>Bd. 88 PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 88, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-87-6</p>  | <p>Bd. 96 HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 96, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-05-0</p>  |
| <p>Bd. 89 nicht erschienen!</p>  | <p>Bd. 97 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMiRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 97, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-06-9</p>  |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 98 LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungs-Lenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 98, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-07-7
- Bd. 99 BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 99, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-08-5
- Bd. 100 WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 100, Paderborn, 2001 – ISBN-3-935433-09-3
- Bd. 101 HEMSEL, T.: Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 101, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-10-7
- Bd. 102 MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 102, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-11-5
- Bd. 103 WAGENBLAßT, D.: Eine Analyseverfahren zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 103, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-12-3
- Bd. 104 PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 104, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-13-1
- Bd. 105 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 105, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-14-X
- Bd. 106 SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 106, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-15-8
- Bd. 107 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 107, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-16-6
- Bd. 108 FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 108, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-17-4
- Bd. 109 AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 109, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-18-2
- Bd. 110 HELMKE, S.: Eine simulationsgestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 110, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-19-0
- Bd. 111 CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 111, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-20-4
- Bd. 112 GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 112, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-21-2
- Bd. 113 LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 113, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-22-0

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 114 HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 114, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-23-9
- Bd. 115 ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 115, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-24-7
- Bd. 116 SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 116, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-25-5
- Bd. 117 EL-KEBBE, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 117, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-26-3
- Bd. 118 PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 118, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-27-1
- Bd. 119 SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 119, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-28-X
- Bd. 120 KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 120, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-29-8
- Bd. 121 MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 121, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-30-1
- Bd. 122 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 122, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-31-X
- Bd. 123 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 123, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-32-8
- Bd. 124 LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 124, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-33-6
- Bd. 125 WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 125, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-34-4
- Bd. 126 HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 126, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-35-2
- Bd. 127 WITKOWSKI, U.: Einbettung selbstorganisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 127, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-36-0
- Bd. 128 BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 128, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-37-9
- Bd. 129 HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 129, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-38-7

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 130 KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 130, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-39-5
- Bd. 131 KEIL-SLAWIK, R.; BRENECKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 131, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-40-9
- Bd. 132 OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 132, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-41-7
- Bd. 133 HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 133, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-42-5
- Bd. 134 UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 134, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-43-3
- Bd. 135 BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplatzierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 135, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-44-1
- Bd. 136 FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 136, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-45-X
- Bd. 137 KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 137, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-46-8
- Bd. 138 STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 138, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-47-6
- Bd. 139 KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 139, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-48-4
- Bd. 140 ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 140, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-49-2
- Bd. 141 BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 141, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-50-6
- Bd. 142 BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 142, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-51-4
- Bd. 143 KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 143, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-52-2
- Bd. 144 HENZLER, S.: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 144, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-53-0
- Bd. 145 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 145, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-54-9

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 146 LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 146, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-55-7
- Bd. 147 HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 147, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-56-5
- Bd. 148 BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 148, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-57-3
- Bd. 149 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 149, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-58-1
- Bd. 150 MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 150, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-59-X
- Bd. 151 GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 151, Paderborn, 2004 – ISBN 3-9354 33-60-3
- Bd. 152 FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 152, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-61-1
- Bd. 153 SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 153, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-62-X
- Bd. 154 RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 154, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-63-8
- Bd. 155 FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-64-6
- Bd. 156 MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-65-4
- Bd. 157 FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 157, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-66-2
- Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 158, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-67-0
- Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 159, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-68-9
- Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, , Band 160, Paderborn 2004 – ISBN 3-935433-69-7



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 161, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-70-0
- Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 162, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-71-9
- Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 163, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-72-7
- Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 164, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-73-5
- Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 165, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-74-3
- Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 166, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-75-1
- Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-76-X
- Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 168, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-77-8
- Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-78-6
- Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 170, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-79-4
- Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorations: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 171, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-80-8
- Bd. 172 MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 172, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-81-6
- Bd. 173 KLIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 173, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-82-4
- Bd. 174 BALÁŽOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-83-2
- Bd. 175 FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-84-0
- Bd. 176 BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 176, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-85-9

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 177 BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive - Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 177, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-86-7
- Bd. 178 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuhardenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 178, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-87-5
- Bd. 179 FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 179, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-88-3
- Bd. 180 WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 180, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-89-1
- Bd. 181 MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel & Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 181, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-00-1
- Bd. 182 HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 182, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-01-X
- Bd. 183 PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 183, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-02-8
- Bd. 184 BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenariotechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 184, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-03-6
- Bd. 185 KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 185, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-04-4
- Bd. 186 KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 186, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-05-2
- Bd. 187 WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 187, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-06-0
- Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 188, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-07-9
- Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 189, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-08-7
- Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 190, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-09-5
- Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 191, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-10-9
- Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 192, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-11-7

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 193, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-12-5
- Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 194, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-13-3
- Bd. 195 KUHLE, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 195, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-14-1
- Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-15-X
- Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 197, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-16-8
- Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhausen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 198, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-17-6
- Bd. 199 FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 199, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7
- Bd. 200 SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 200, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4
- Bd. 201 KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 201, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0
- Bd. 202 HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 202, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7
- Bd. 203 RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 203, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4
- Bd. 204 SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 204, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1
- Bd. 205 IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 205, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8
- Bd. 206 ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 206, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5
- Bd. 207 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 208 LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 208, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9
- Bd. 209 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 209, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6
- Bd. 210 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 210, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3
- Bd. 211 KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 211, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9
- Bd. 212 DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 212, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6
- Bd. 213 DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 213, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3
- Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 214, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0
- Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 215, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7
- Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMiRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 216, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4
- Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 217, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1
- Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 218, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8
- Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele & Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 219, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5
- Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architekturenkonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produktpräsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 220, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2
- Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8
- Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project "Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)", Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 222, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2
- Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 224, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9
- Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 225, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6
- Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 226, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3
- Bd. 227 ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 227, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-46-0
- Bd. 228 PARISI, S.: A Method for the intelligent Authoring of 3D Animations for Training and Maintenance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 228, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-47-7
- Bd. 229 DITTMANN, F.: Methods to Exploit Reconfigurable Fabrics. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 229, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-48-4
- Bd. 230 TONIGOLD, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 230, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-49-1
- Bd. 231 BRANDT, T.: A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 231, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-50-7
- Bd. 232 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-51-4
- Bd. 233 CHANG, H.: A Methodology for the Identification of Technology Indicators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 233, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-52-1
- Bd. 234 ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; TSCHESCHNER, T.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-53-8
- Bd. 235 DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-54-5
- Bd. 236 GEHRKE, M.; GIESE, H.; STROOP, J.: Proceedings of the 4th Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER4), Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 236, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-55-2

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 237 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 4. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 30. und 31. Oktober 2008, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 237, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-56-9
- Bd. 238 BRÖKELMANN, M.: Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 238, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-57-6
- Bd. 239 KETTELHOIT, B.: Architektur und Entwurf dynamisch rekonfigurierbarer FPGA-Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 239, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-58-3
- Bd. 240 ZAMBALDI, M.: Concepts for the development of a generic Multi-Level Test Bench covering different areas of applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 240, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-59-0
- Bd. 241 OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 241, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-60-6
- Bd. 242 STOLLT, G.: Verfahren zur strukturierten Vorausschau in globalen Umfeldern produzierender Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 242, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-61-3
- Bd. 243 WENZELMANN, C.: Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 243, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-62-0
- Bd. 244 BRÜSEKE, U.: Einsatz der Bibliometrie für das Technologiemanagement. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 244, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-63-7
- Bd. 245 TIMM, T.: Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 245, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-64-4
- Bd. 246 GRIESE, B.: Adaptive Echtzeitkommunikationsnetze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 246, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-65-1
- Bd. 247 NIEMANN, J.-C.: Ressourceneffiziente Schaltungstechnik eingebetteter Parallelrechner. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 247, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-66-8
- Bd. 248 KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 248, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-67-5
- Bd. 249 GANS, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 249, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-68-2
- Bd. 250 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-69-9
- Bd. 251 LESSMANN, J.: Protocols for Telephone Communications in Wireless Multi-Hop Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 251, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-70-5

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 252 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 252, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-71-2
- Bd. 253 KLÖPPER, B.: Ein Beitrag zur Verhaltensplanung für interagierende intelligente mechatronische Systeme in nicht-deterministischen Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 253, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-72-9
- Bd. 254 LOW, C. Y.: A Methodology to Manage the Transition from the Principle Solution towards the Controller Design of Advanced Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 254, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-73-6
- Bd. 255 XU, F.: Resource-Efficient Multi-Antenna Designs for Mobile Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 255, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-74-3
- Bd. 256 MÜLLER, T.: Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 256, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-75-0
- Bd. 257 BONORDEN, O.: Versatility of Bulk Synchronous Parallel Computing: From the Heterogeneous Cluster to the System on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 257, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-76-7
- Bd. 258 KORTENJAN, M.: Size Equivalent Cluster Trees - Rendering CAD Models in Industrial Scenes. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 258, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-77-4
- Bd. 259 SCHOMAKER, G.: Distributed Resource Allocation and Management in Heterogeneous Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 259, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-78-1
- Bd. 260 MENSE, M.: On Fault-Tolerant Data Placement in Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 260, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-79-8
- Bd. 261 LÜRWER-BRÜGGEMEIER, K.: Mächtigkeit und Komplexität von Berechnungen mit der ganzzahligen Division. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 261, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-80-4
- Bd. 262 ALTEMEIER, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 262, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-81-1
- Bd. 263 MAHAJAN, K.: A combined simulation and optimization based method for predictive-reactive scheduling of flexible production systems subject to execution exceptions. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 263, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-82-8
- Bd. 264 CHRISTIANSEN, S. K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 264, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-83-5
- Bd. 265 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 5. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 19. und 20. November 2009, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 265, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-84-2

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 266 KAULMANN, T.: Ressourceneffiziente Realisierung Pulsmoderter Neuronaler Netze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 266, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-85-9
- Bd. 267 WEHRMEISTER, M. A.: An Aspect-Oriented Model-Driven Engineering Approach for Distributed Embedded Real-Time Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 267, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-86-6
- Bd. 268 DANNE, C.: Assessing the Cost of Assortment Complexity in Consumer Goods Supply Chains by Reconfiguration of Inventory and Production Planning Parameters in Response to Assortment Changes. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 268, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-87-3
- Bd. 269 AUFENANGER, M.: Situativ trainierte Regeln zur Ablaufsteuerung in Fertigungssystemen und ihre Integration in Simulationssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 269, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-88-0
- Bd. 270 STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-89-7
- Bd. 271 IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstützung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-90-3
- Bd. 272 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-91-0
- Bd. 273 PURNAPRAJNA, M.: Run-time Reconfigurable Multiprocessors. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 273, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-92-7
- Bd. 274 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-93-4
- Bd. 275 WEDMAN, S.: Lebensdauerüberwachung in mechatronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 275, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-94-1
- Bd. 276 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 28. und 29. Oktober 2010, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 276, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-95-8
- Bd. 277 HUBER, D.: Geregelt Vereinfachung hierarchischer Partitionen von Modellen in der Materialflusssimulation. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 277, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-96-5
- Bd. 278 DEGENER, B.: Local, distributed approximation algorithms for geometric assignment problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 278, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-97-2
- Bd. 279 WARKENTIN, A.: Systematik zur funktionsorientierten Modellierung von Elektrik/Elektronik-Systemen über den Produktlebenszyklus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 279, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-98-9
- Bd. 280 BRINK, V.: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 280, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-99-6



## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 281 SAMARA, S.: Adaptable OS Services for Distributed Reconfigurable Systems on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 281, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-00-7
- Bd. 282 BIENKOWSKI, M.: Page migration in dynamic networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 282, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-01-4
- Bd. 283 MAHLMANN, P.: Peer-to-peer networks based on random graphs. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 283, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-02-1
- Bd. 284 DYNIA, M.: Collective graph exploration. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 284, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-03-8
- Bd. 285 POHL, C.: Konfigurierbare Hardwarebeschleuniger für selbst-organisierende Karten. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 285, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-04-5
- Bd. 286 DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-05-2
- Bd. 287 MEHLER, J.: Power-Aware Online File Allocation in Dynamic Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 287, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-06-9
- Bd. 288 HARCHENKO, J.: Mechatronischer Entwurf eines neuartigen aktiven Fahrzeugfederungssystems für PKW unter Verwendung einer reversierbaren Flügelzellenpumpe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 288, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-07-6
- Bd. 289 KORZENIOWSKI, M.: Dynamic Load Balancing in Peer-to-Peer Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 289, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-08-3
- Bd. 290 FRAHLING, G.: Algorithms for Dynamic Geometric Data Streams. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 290, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-09-0
- Bd. 291 REYES PÉREZ, M.: A Specification Technique for the Conceptual Design of Manufacturing Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 291, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-10-6
- Bd. 292 STEHR, J.: On the design and implementation of reliable and economical telematics software architectures for embedded systems: a domain-specific framework. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 292, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-11-3