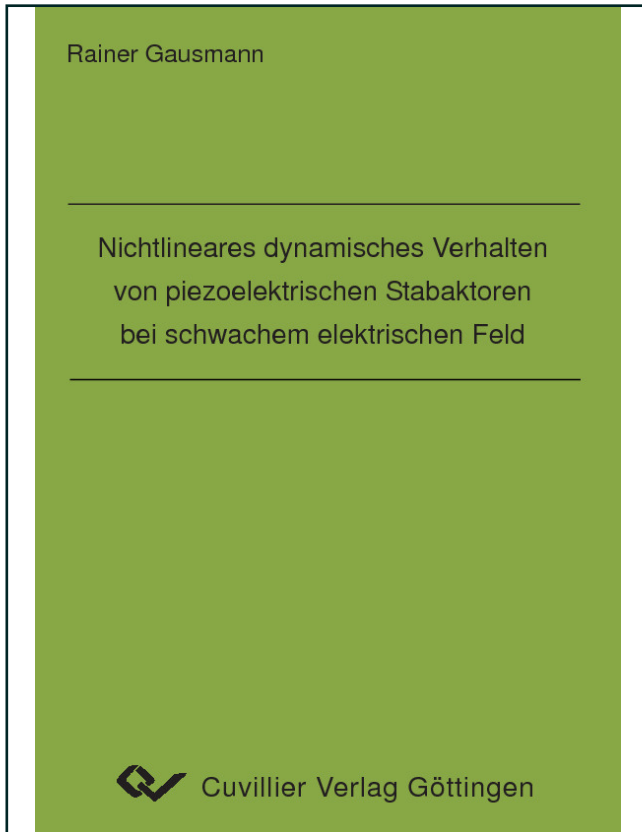




Rainer Gausmann (Autor)
**Nichtlineares dynamisches Verhalten von
piezoelektrischen Stabaktoren bei schwachem
elektrischen Feld**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2510>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Obwohl der piezoelektrische Effekt seit über 100 Jahren bekannt ist, mangelt es an Materialmodellen gerade für die häufig eingesetzten gesinterten Industriekeramiken. Besonders in der Sensorik und Aktorik bedarf es einer genauen Kenntnis des Materialverhaltens, um die in der Regel komplexen Strukturen auszulegen und bereits im Vorfeld präzise Aussagen zum statischen und dynamischen Verhalten des Systems treffen zu können. Derartige Strukturen werden in der Regel mit Hilfe von kommerziellen Finite Elemente Programmen, z.B. ABAQUS und ANSYS ausgelegt. Diese Programme beinhalten zwar 3D-Elemente zur Beschreibung piezokeramischer Materialien, jedoch sind sie in der Regel auf lineare konstitutive Gleichungen beschränkt [LWQ02]. Tatsächlich zeigt sich aber in Messungen, dass die Annahme eines linearen Materialverhaltens nur zutreffend ist, wenn zum einen das elektrische Feld klein ist und zum anderen keine Resonanzfrequenzen angeregt werden. Messungen zeigen bei einer Anregung im Kleinsignalebereich in der Nähe einer Resonanzfrequenz Nichtlinearitäten, die mit linearen konstitutiven Gleichungen nicht mehr beschrieben werden können. Materialmodelle zur Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens von Piezokeramiken sind in der Literatur vielfach zu finden, allerdings beschränken sich die meisten Veröffentlichungen auf die Modellbildung und beinhalten weder eine Parameteridentifikation noch den Vergleich der theoretischen Ergebnisse mit Messungen. Eine detaillierte Beschreibung der bisherigen Forschungsarbeiten erfolgt in Kapitel 1.3.

In dieser Arbeit wird eine nichtlineare Beschreibung des dynamischen Verhaltens piezoelektrischer Stäbe bei Anregung in der Nähe der ersten „longitudinalen“ Resonanzfrequenz mit schwachem elektrischen Feld modelliert und mit Messungen verglichen. Mittels einer Parameteridentifikation werden die Materialparameter bestimmt und an unterschiedlichen Geometrien verifiziert.

Zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Piezokeramiken können numerische

(z.B. FEM) oder analytische Verfahren verwendet werden. Diese Arbeit widmet sich zum Großteil den analytischen Verfahren, da die parametrische Systemidentifikation bei analytischen Verfahren sehr viel weiter erforscht wurde, als es bei der Parameteridentifikation mit numerischen Methoden der Fall ist. In manchen Kapiteln wird auf FE-Methoden zurückgegriffen, wenn die Gültigkeit von Näherungen in der analytischen Modellierung verifiziert werden soll.

1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit widmet sich im wesentlichen der Modellierung von Longitudinalschwingungen piezoelektrischer Stäbe. Beginnend mit einer einfachen Stabtheorie wird Schritt für Schritt die Modellierungstiefe erweitert. So wird in den linearen konstitutiven Gleichungen die Querträgheit und die Dämpfung berücksichtigt. Am Beispiel eines piezoelektrischen Transformators werden die linearen konstitutiven Gleichungen angewendet und mit FEM-Ergebnissen und Messungen verglichen. Der piezoelektrische Transformator wird als Anwendungsbeispiel verwendet, da sowohl das elektrische als auch das mechanische Übertragungsverhalten sehr anschaulich beschrieben werden können. Darüber hinaus sind die Nichtlinearitäten sowohl im elektrischen als auch im mechanischen Übertragungsverhalten beobachtbar. Um auszuschließen, dass die gemessenen Nichtlinearitäten durch andere als den Piezokeramiken zuzuordnende Effekte hervorgerufen werden, werden einzelne piezokeramische Stäbe mit verschiedenen Durchmesser- / Längenverhältnissen untersucht. Dazu wird das lineare Modell eines piezoelektrischen Stabes um nichtlineare Terme erweitert. Es folgen Vergleiche mit Messungen und eine Parameteridentifikation.

Ziel ist es, ein einfaches nichtlineares Materialmodell zu entwickeln, das die auftretenden Nichtlinearitäten bei der Erregung der ersten Eigenfrequenz longitudinaler piezoelektrischer Stabschwingungen mit einem schwachen elektrischen Feld beschreiben kann.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt. Der Literaturüberblick befasst sich zum einen mit Veröffentlichungen zur Modellierung nichtlinearer Effekte in Ferroelektrika, speziell der Hysteresemodellierung (analytische und numerische Modelle) sowie der Modellierung auf der Mikroebene und der phänomenologischen Modellierung. Das Kapitel „Nichtlineare Zustandsgleichungen“ widmet sich den Veröffentlichungen, die sich mit der Messung und Modellierung des nichtlinearen Materialverhaltens von Piezokeramiken befassen, Hystereseffekte vernachlässigen und das Materialverhalten mittels nichtlinearer konstitutiver Gleichungen beschreiben. Besondere Bedeutung wird den Publikationen gewidmet, die sich mit nichtlinearen Effekten in Resonanznähe bei Anregung mit schwachem elektrischen Feld beschäftigen. Abschließend wird ein kurzer Literaturüberblick zu piezoelektrischen Transformatoren gegeben.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen zu Ferro- und Piezoelektrika beschrieben. Zu Beginn befasst sich das Kapitel mit den Domänenprozessen in Ferro- und Piezoelektrika. Durch die Kopplung der elektrischen mit den mechanischen Größen müssen neben den mechanischen Grundgleichungen die MAXWELLSchen Gleichungen berücksichtigt werden. Daher wird im weiteren Verlauf von Kapitel 2 auf die Kontinuumsmechanik, die Elektrodynamik, die konstitutiven Gleichungen und das Prinzip von HAMILTON für dielektrische Materialien eingegangen.

Kapitel 3 beinhaltet die lineare Modellierung piezoelektrischer Aktoren. Es wird ein analytisches Modell für einen Stabaktor hergeleitet. Das lineare Modell wird am Beispiel eines piezoelektrischen Transformators mit FEM-Ergebnissen und Messungen verifiziert. Im Anschluss werden Messergebnisse des piezoelektrischen Transformators gezeigt, die die Notwendigkeit einer nichtlinearen Modellierung aufzeigen sollen. Um die Ursache der Nichtlinearitäten eindeutig den Piezokeramiken zuordnen zu können, wird in Kapitel 4 ein allgemeines nichtlineares Modell basierend auf Polynomansätzen für die Materialparameter aufgestellt. Das allgemeine Modell wird am Beispiel eines Polynomgrades bis zur dritten Ordnung veranschaulicht. Abschließend werden die Ergebnisse des theoretischen Modells diskutiert.

Kapitel 5 widmet sich der Parameteridentifikation. Es wird ein Least Square Verfahren und das Simplex Verfahren von Nelder und Mead [NM65] verwendet, um die linearen und die zusätzlich eingeführten Materialparameter zu bestimmen. Es werden die identifizierten Parameter verwendet, um die Messergebnisse unterschiedlicher Probengeometrien mit dem theoretischen Modell zu vergleichen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

1.3 Literaturüberblick

Das nichtlineare Verhalten von ferroelektrischen und piezoelektrischen Materialien ist seit vielen Jahren bekannt. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Modellierung und Messung verschiedener Nichtlinearitäten in Ferroelektrika und Piezoelektrika gegeben. Da Ferroelektrika Hystereseeffekte und demzufolge auch Piezoelektrika Hystereseeffekte aufweisen, wird auf die wesentlichen Publikationen der Hysteresemodellierung eingegangen. Häufig kann die Hysterese im Kleinsignalbereich vernachlässigt werden, allerdings sollte bei größeren elektrischen oder mechanischen Belastungen auf die Berücksichtigung der Hysterese in der Modellierung nicht verzichtet werden. Ferner gehört zum grundsätzlichen Verständnis des piezoelektrischen Materialverhaltens auch das Verständnis des ferroelektrischen Verhaltens, so dass im Folgenden die Hysteresemodellierung in Ferroelektrika betrachtet und im Unterkapitel 1.3.2 auf Nichtlinearitäten von piezoelektrischen Materialien eingegangen wird. Abschließend werden noch

die wesentlichen Veröffentlichungen zu piezoelektrischen Transformatoren zusammengefasst.

In dieser Arbeit wird nicht auf die verschiedenen Kristallstrukturen eingegangen, die einer piezoelektrischen Symmetrieklasse entsprechen. Eine ausführliche Beschreibung der Kristallphysik ist z.B. in dem Buch „Piezokeramik“ von K. Ruschmeyer [Rus94] zu finden.

1.3.1 Hystereseemodelle

Die Modellierung der ferroelektrischen Hysterese kann im wesentlichen in zwei Forschungsrichtungen aufgeteilt werden: Die eine beschreibt eine makroskopisch phänomenologische Methode, wie sie von RAYLEIGH [Ray87] vorgeschlagen wurde. Die bedeutendsten Arbeiten in jüngster Zeit sind von Kamlah et al. [KT97], [KB01] und von Landis [La02] verfasst worden.

Die andere Modellierungsvariante basiert auf mikroskopischen physikalischen Methoden, wie sie von PREISACH [Pre35] veröffentlicht wurden. Die aktuellen Arbeiten zu dieser Modellierungsvariante sind in Hwang und McMeeking [HM98], Steinkopff [Ste99] und Cao und Gabbert [CG01] zu finden. Dabei werden für ein finites Volumen die relevanten physikalischen Gleichungen gelöst und auf das reale Volumen skaliert. Dadurch haben die verwendeten Größen einen physikalisch begründeten Ursprung, so dass derartige Modelle zur Vorhersage oftmals besser geeignet sind als die phänomenologischen Modelle. Nachteilig ist allerdings der zur Zeit noch enorme Rechenaufwand der Modelle. Einen Überblick über die phänomenologische Modellierung und der Modellierung von Hysterese auf Mikroebene kann Zhang und Rogers [ZR93] entnommen werden. In der Arbeit werden Messungen, Modelle und Erkenntnisse über die mikromechanische Modellierung zusammengefasst und mit Erkenntnissen ein phänomenologisches Modell hergeleitet. Das eindimensionale Modell beinhaltet die Temperatur- und die Frequenzabhängigkeit der Domänenwandbewegung. Die Modellierung ist sehr allgemein gehalten und es wird kein Vergleich mit Messdaten vorgenommen.

1.3.1.1 Modellierung auf der Mikroebene

Hwang und McMeeking [HM98] modellieren die Domänenprozesse mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM). Dabei wird von einer statistisch verteilten Polarisation ausgegangen. Jedes Element besitzt eine Polarisation und abhängig von einem Kriterium, das über eine Energiefunktion definiert ist, wird entschieden, wann eine Domäne bzw. ein Element umklappt. Unberücksichtigt bleiben die mechanischen Zustandsgrößen und Domänenwandbewegungen. Als Ergebnis ist es möglich, die dielektrische Hysterese-schleife qualitativ zu beschreiben. Ein Nachteil bei den FEM-Berechnungen ist die Modellierung einer Domäne durch ein Element. Durch Abfragen der Zustandsgrößen nach

jeder inkrementellen Veränderung des elektrischen Feldes und die anschließende Auswertung des Umklappkriteriums und der Neuvernetzung wächst der Rechenaufwand quadratisch mit der Anzahl der Elemente.

Die Berücksichtigung mechanischer Zustandsgrößen wird in Cao und Gabbert [CG01] beschrieben. Mit einem Modell, das sowohl auf FEM als auch auf analytischen Ansätzen basiert, kann das nichtlineare Verhalten polykristalliner PLZT Keramiken qualitativ beschrieben werden. Es werden die dielektrische Hysterese und die so genannten Schmetterlingskurven berechnet, wobei die Vorgehensweise jener von Hwang und McMeeking in [HM98] sehr ähnlich ist. Daher gilt auch hier, dass die Rechenzeit bei der reinen FEM-Modellierung quadratisch mit der Anzahl der Elemente zunimmt. Allerdings kann durch einen vorgeschlagenen analytischen Ansatz für das Umklappkriterium die Effizienz deutlich verbessert werden.

1.3.1.2 Phänomenologische Modellierung

Die ersten Arbeiten, die eine dreidimensionale komplexe Modellierung der elektromechanischen Zustände von Ferroelektrika mittels einer phänomenologischen Modellierung thematisieren, sind vermutlich von Maugin [BGM88], [BGM88a], [BM89], [BM89a]. Beispielhaft werden mit dem Modell Hystereseschleifen berechnet, jedoch werden die Modelle nicht mit Messungen validiert.

Verwandte Modelle sind von Kamlah et al. [KT97], [KBM97], [KB01] entstanden. Verschiedene nichtlineare Ansätze werden verwendet, um das Umklappen der Domänen zu beschreiben. Eine dreidimensionale Modellierung der Hysterese kann in [KB01] gefunden werden. Es werden die Schmetterlingskurven berechnet und mit Messungen verglichen.

Ähnliche Modelle werden auch von McMeeking benutzt. In Cocks und McMeeking [CM99] wird ein eindimensionales Modell verwendet. Das Modell ist stark an bekannte plastische und kinematische Verfestigungsmodelle angelehnt. In [McM00] wird das Modell auf die dritte Dimension erweitert und es werden realistische dielektrische Hysterese und Schmetterlingshysteresekurven beschrieben.

Eine Erweiterung des Modells von McMeeking wurde von Landis vorgeschlagen [Lan02]. Mit einer thermodynamisch konsistenten dreidimensionalen Beschreibung und der Verwendung von neun internen Variablen werden die Hysteresekurven beschrieben. In einer späteren Veröffentlichung [ML02] wird das Modell auf die Verwendung von drei internen Variablen reduziert.

Eine vollständig auf der FEM basierende Modellierung von Steinkopff findet sich in [Ste99]. Mit der Software ANSYS und einem modifizierten SOLID-5-Element wird die ferroelektrische und dielektrische Hysterese berechnet. Es wird ein Umklappkriterium definiert, das sowohl die mechanischen als auch die elektrischen Zustandsgrößen berücksichtigt.

In Simkovic et al. [SLK00a], [SLK00b] werden mit einem Preisach-Modell die Hystereseschleifen modelliert. Dazu werden ANSYS als Pre- und Postprozessor und das Programm CAPA als Solver verwendet, das am Lehrstuhl für Sensorik der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt wurde. Abschließend werden gemessene und berechnete Kurvenverläufe verglichen.

Ein allgemeineres Modell für Smart Materials zur Modellierung der Hysterese wurde von R.C. Smith vorgeschlagen [SS02]. Mit einem Preisach-Modell beschreibt er am Beispiel von piezokeramischen Wafern in [SS02] und piezoelektrischen Stacks in [SSC02] die Hysterese im tieffrequenten Bereich.

Abschließend sei noch die Möglichkeit der Beschreibung der Hysterese mit einem Boltzmann-Modell erwähnt. Eine der jüngsten Arbeiten findet sich in der Veröffentlichung von Liu et al. [LWQ02].

1.3.2 Nichtlineare Zustandsgleichungen

Bereits 1964 entdeckten unter anderen Šuvalov und Širokov [SS64], dass sich bei Eigenschwingungen von piezoelektrischen Stäben mit zunehmender Anregungsfeldstärke die Resonanzfrequenzen verschieben. In den folgenden Jahren sind zu diesem Thema sehr viele Veröffentlichungen erschienen. Die wesentlichen Arbeiten zur Modellierung von Nichtlinearitäten im Kleinsignalbereich sollen im Folgenden vorgestellt werden.

McMahon [McM68] verfasste vermutlich die erste Arbeit, die eine nichtlineare Modellierung zur Beschreibung piezoelektrischer Materialien beinhaltet.

Beige et al. [Bei],[BDF92],[BBD94],[BS81],[Be] untersuchen einen Längsschwinger, der auf dem d_{31} -Effekt beruht. In den im Folgenden zitierten Arbeiten werden zum Teil sehr unterschiedliche Keramiken untersucht, so dass je nach Keramiktyp andere Nichtlinearitäten modelliert werden. So ist bei einigen Keramiken die elastische Nichtlinearität bedeutend und die dielektrische Nichtlinearität vernachlässigbar, bzw. umgekehrt.

In [BDF92],[BBD94] vergleichen die Autoren eine Serienschaltung aus einem linearen Widerstand, einer linearen Spule und einer ferroelektrischen Keramik als nichtlineare Kapazität mit der Differentialgleichung des DUFFING Oszillators mit kubischer Nichtlinearität. Die Simulationen und Messungen werden anhand von Phasenportraits verglichen und zeigen ein qualitativ ähnliches Verhalten. Im Frequenzspektrum werden höhere Harmonische bis zum fünffachen der Erregerfrequenz beobachtet. Aus der Differentialgleichung wird ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem elektrischen Feld und der elektrischen Verschiebungsdichte abgeleitet (dielektrische Nichtlinearität). Dabei wird das elektrische Feld durch einen dreigliedrigen Polynomansatz von der elektrischen Verschiebungsdichte abhängig gemacht. Es zeigt sich aber, dass der verwendete Polynomansatz nur bestimmte Bereiche beschreiben kann, da die Koeffizienten je nach Erregerspannung variieren.

In [Bei] wird eine thermodynamische Betrachtung eines verwendeten Polynomansatzes angegeben. Durch viele Näherungen und unter Vernachlässigung der mechanischen Größen werden anhand von Resonanzmessungen und der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Erregeramplitude die Parameter im Polynomansatz näherungsweise bestimmt. Letztlich wird ausgesagt, dass die gemessenen Nichtlinearitäten allein durch eine kubische dielektrische Nichtlinearität beschrieben werden können. Im Weiteren werden noch Aussagen zur Temperaturabhängigkeit der Materialparameter gemacht, worauf hier aber nicht eingegangen werden soll.

In den Arbeiten [BS81], [Be] wird eine nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung vorausgesetzt und innere Dämpfung und COULOMBSche Reibung modelliert. Die eindimensionale partielle Differentialgleichung wird durch einen GALERKIN-Ansatz approximiert und die Amplituden der Grundharmonischen der Verschiebung und des Stroms näherungsweise berechnet. Als Ergebnis werden die bekannten DUFFING-Nichtlinearitäten skizziert. Die nichtlinearen Parameter werden durch die Frequenz-Amplituden-Abhängigkeit grob abgeschätzt. Als wesentliches Ergebnis ergibt sich, dass weder eine nichtlineare Dämpfung modelliert werden muss, noch der Piezomodul d_{31} im betrachteten Feldstärkebereich (0.1 – 1 V/mm) als konstant vorausgesetzt werden kann.

Bryant und Keltie [BK86a] beobachten an einem piezoelektrischen Longitudinalaktor in der Nähe der Resonanzfrequenzen ausgeprägte Doppelte und gering vorhandene Dreifache der Erregerfrequenzen im Beschleunigungssignal, sowie eine ausgeprägte Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Erregeramplitude. Sie schätzen den Einfluss des nichtlinearen Verhaltens durch Hystereseeffekte auf 10% und das der Materialnichtlinearitäten auf 90%.

In [BK86b] wird der Aktor durch ein stark vereinfachtes diskretes Modell modelliert und die Parameter mittels eines Least-Square-Verfahrens an die Messungen angepasst. Der Vergleich mit Messungen zeigt, dass das vorgeschlagene Modell nur sehr eingeschränkt die beschriebenen Nichtlinearitäten abbilden kann.

Joshi [Jos92] schlägt eine quadratische elastische Nichtlinearität vor und überführt das GIBBSsche Potential durch die LEGENDRE-Transformation in diverse Potentialfunktionen. Simulationen und Messungen bleiben in der Arbeit aus.

Sherrit et al. [SSW96] führen Messungen an PZT-Keramiken im tieffrequenten Bereich durch. Dabei wird die Keramik sprungförmig be- und entlastet. Es wurde die Abhängigkeit der piezoelektrischen Konstante d_{33} von der Temperatur und der Zeit experimentell bestimmt und eine Beziehung für die Abhängigkeiten hergeleitet. Die Zeitabhängigkeit bedeutet hier, dass nach einer sprungförmigen Belastung noch eine gewisse Zeit Ladungen induziert werden, was auf Umorientierungsprozesse der Domänen zurückgeführt wird. Ferner wird eine Abhängigkeit des piezoelektrischen Moduls von der Be- und Entlastungsfrequenz beobachtet, die sich derart ausdrückt, dass der piezoelektrische Modul mit steigender Frequenz abnimmt.

Aurelle et al. [AGE96] beobachten nicht-harmonische Schwingungen im Signalverlauf des Stroms, der Oberflächengeschwindigkeit und der mechanischen Spannung eines PZT-Schwingers. Am freien Ende des betrachteten Schwingers ist eine Masse angebracht. Durch elastische und dielektrische Nichtlinearitäten in den konstitutiven Gleichungen wird mit quasistatischen Näherungen eine nichtlineare Differentialgleichung hergeleitet, die näherungsweise gelöst wird. Mit Hilfe gemessener Abhängigkeiten der Verschiebung, des Stroms und der elektrischen Leistung von der Erregeramplitude werden die unbekannt Materialkonstanten an Messdaten angepasst.

Mueller und Zhang [MZ98] modellieren bei Scherschwingern den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Scherung und dem elektrischen Feld im tieffrequenten Großsignalbereich. Dazu wird die piezoelektrische Konstante d_{15} um einen nichtlinearen feldabhängigen Term erweitert und die Ergebnisse mit Messdaten verglichen.

Ishii et al. [IAT99] beobachten in Stromverläufen bei Schwingern höher harmonische Schwingungen bis zum Dreifachen der Grundharmonischen, die sie mit einem elektrischen Ersatzschaltbild beschreiben. Das Ersatzschaltbild soll eine dielektrische Nichtlinearität wiedergeben. Die simulierten Vergrößerungsfunktionen zeigen den typischen Charakter des DUFFING-Schwingers.

In Simkovics et al. [SLK99] wird mit dem bereits angesprochenem Programm CAPA eine piezoelektrische Scheibe modelliert. Es können geometrische Nichtlinearitäten sowie nahezu beliebige Materialnichtlinearitäten in Form von gemessenen Kurvenverläufen zur Modellierung verwendet werden. Die Materialkonstanten werden abhängig von der elektrischen Feldstärke und der mechanischen Spannung definiert. In der Arbeit werden Admittanzkurven und die Resonanzverschiebungen durch Materialnichtlinearitäten simuliert und mit Messungen verglichen.

Wolf und Gottlieb verwenden in [WG01] einen Polynomansatz zur Modellierung einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungsbeziehung. Es werden quadratische und kubische Nichtlinearitäten bei einer linearen dielektrischen Beziehung zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens eines Balkens, der mit ZnO-Keramiken zu Biegeschwingungen erregt wird, verwendet (d_{31} -Effekt). Durch den Ansatz lassen sich im Kleinsignalbereich erwartungsgemäß die typischen Vergrößerungsfunktionen des DUFFING-Schwingers modellieren. Ein Vergleich mit Experimenten wird nicht angegeben.

Nguyen [Ngu00] verwendet zur Modellierung einer Piezo-Balken Struktur einen Enthalpieansatz, der elastische und piezoelektrische Nichtlinearitäten berücksichtigt. Als wesentliche Nichtlinearität wird der piezoelektrische Parameter d_{31} bestimmt.

Von Wagner [Wag03] nutzt Modelle zur Beschreibung des nichtlinearen Schwingungsverhaltens eines Längsschwingers aus dem Material PIC-181, die auf Polynomansätzen in den konstitutiven Gleichungen basieren. Durch die Ergänzung von linearen und nichtlinearen Dämpfungstermen wird ein Modell mit einer sehr großen Anzahl an unbekannt Parametern aufgestellt. Durch Parameterstudien wird die Anzahl der

Parameter minimiert und die verbleibenden Parameter bestimmt, so dass eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell bzgl. der Verschiebungen und Ströme erreicht wird.

1.3.3 Piezoelektrische Transformatoren

Piezoelektrische Transformatoren existieren in Patentschriften in den unterschiedlichsten Bauformen, wobei die in der Literatur am häufigsten zitierte Art die des ROSENtransformators [Ros56] ist. In Anwendungen, in denen eine kleine Baugröße erforderlich ist, finden piezoelektrische Transformatoren Anwendungen. Diese umfassen Batterieladegeräte für Mobilfunkgeräte, AC-Adapter für Laptops, AC/DC Konverter, Spannungsversorgungen für fluoreszierende Lampen etc. [BB02],[IZB02],[BSI00].

Ein entscheidender Vorteil der piezoelektrischen Transformatoren gegenüber elektromagnetischen Transformatoren liegt in den kleinen Abmessungen für hohe Frequenzen bei gleichzeitig großem Übersetzungsverhältnis. Bei elektromagnetischen Transformatoren bewirkt das große Übersetzungsverhältnis eine große Anzahl an Windungen und die aus dem großen Übersetzungsverhältnis resultierenden großen Spannungen eine moderate Isolation der Windungen, um die Durchschlagisolation zu gewährleisten. Daraus resultiert eine große Bauform und ein schlechter Wirkungsgrad [BSI00], [SKM98], Nachteile die bei dem piezoelektrischen Transformator nicht auftreten. Ein weiterer Vorteil gegenüber elektromagnetischen Transformatoren ist die Wandlung einer Wechselspannung in eine kleine Gleichstromspannung in speziellen Anwendungen [IBB02]. Der Wirkungsgrad heutiger piezoelektrischer Transformatoren ist gegenüber dem ROSENtransformator [Ros56] erheblich verbessert worden. So werden Wirkungsgrade von bis zu 80% erzielt [CLM99]. Ein weiterer Vorteil besteht in der für eine Signaltrennung notwendigen galvanischen Trennung zwischen Ein- und Ausgangsspannung und der hohen Durchschlagspannung [LB00], sowie die Vermeidung von magnetischen Feldern, was in bestimmten Anwendungen gefordert wird.

Piezoelektrische Transformatoren sind bei bestimmten Anforderungen als Alternative zum elektromagnetischen Transformator anzusehen. Bei Standardanwendungen zeichnen sie sich nicht durch Vorteile aus, da sowohl die Leistungsübertragung als auch der Wirkungsgrad nicht mit dem elektromagnetischen Transformator konkurrieren können. Eine Eigenschaft der piezoelektrischen Transformatoren besteht darin, dass Energie am effektivsten in der Nähe einer Resonanzfrequenz transformiert wird, die jedoch von der angeschlossenen (elektrischen) Last abhängt. Dieser Nachteil kann durch die Verwendung von Phasenreglern (PLL's) umgangen werden [BL02]. Andererseits kann diese Eigenschaft aber auch als Vorteil ausgelegt werden, da Störsignale außerhalb der Resonanzfrequenz weniger stark übertragen werden [LB00].

Die Modellierung piezoelektrischer Transformatoren erfolgt in der Literatur fast ausschließlich mit Hilfe von Impedanzmodellen. Derartige Impedanzmodelle finden sich