

# Charakterisierung von Piezokeramik

*Bestimmung keramischer Kenngrößen,  
elektromechanischer Eigenschaften  
und Simulation eines  
Polungsprozesses*

**Diplomarbeit**  
Montanuniversität Leoben  
*Institut für Struktur- und Funktionskeramik*

abgefasst\*  
von  
**Stefan PAUL**

Leoben am 5. November 2007

\* Betreut von O. Univ.-Prof. Mag. et Dr. rer. nat. Robert Danzer und  
Ao. Univ.-Prof. Mag. rer. nat. Dr. mont. Peter Supancic

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von Jänner bis Oktober 2007 am Institut für Struktur- und Funktionskeramik der Montanuniversität Leoben mit Unterstützung des Materials Center Leoben durchgeführt.

Herrn O. Univ.-Prof. Dr. Robert Danzer danke ich für die Ermöglichung und Förderung dieser Arbeit. Seine Diskussionsbereitschaft und die von ihm geschaffene Arbeitsatmosphäre haben sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt der Arbeitsgruppe für piezoelektrische Keramiken unter der Leitung von Prof. Dr. Supancic, sowie den weiteren Mitgliedern Mag. Josef Kreith, Dr. Raul Bermejo und Dipl. Ing. Hannes Grünbichler. Sie habe mit ihren Ideen und Diskussionen entscheidende Impulse gegeben und damit den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit ermöglicht.

Abschließend möchte ich mich noch bei allen anderen Mitarbeitern des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik bedanken ohne deren Mitwirkung die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

## Eidesstattliche Erklärung

---

Hiermit erkläre ich eidesstattlich diese Diplomarbeit selbstständig und ohne zur Hilfenahme unlauterer Mittel verfasst zu haben, sowie sämtliche zitierte Textstellen ordnungsgemäß gekennzeichnet und im Literaturverzeichnis angeführt zu haben.

Stefan PAUL

<b>1. Einführung .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Grundlagen.....</b>	<b>5</b>
2.1 Historische Entwicklung und Einführung.....	5
2.2 Elektromechanische Effekte.....	6
2.2.1 Elektrostriktion .....	6
2.2.2 Piezoelektrischer Effekt.....	6
2.2.3 Pyroelektrischer Effekt .....	8
2.2.4 Ferroelektrischer Effekt.....	8
2.2.5 Antiferroelektrischer Effekt.....	9
2.2.5 Elektromechanische Eigenschaften auf Basis der Kristallsymmetrie .....	10
2.3 Ferroelektrische Domänen .....	12
2.3.1 Feldinduziertes Dehnungsverhalten .....	14
2.4 Blei-Zirkonat-Titanat (PZT).....	16
2.4.1 Morphotrope Phasengrenze (MPB) .....	18
2.5 Eigenschaftsmodifikation von PZT- Keramiken durch Dotierung.....	20
2.5.1 Akzeptordotiertes PZT .....	20
2.5.2 Donatordotiertes PZT .....	21
2.6 Technische Anwendung von PZT- Keramiken.....	22
<b>3. Keramographie .....</b>	<b>26</b>
3.1 Probenvorbereitung .....	27
3.1.1 Probenpräparation.....	27
3.2 Bestimmung keramischer Gefügekenngößen .....	29
3.2.1 Optische Inspektion der Schliche .....	29
3.2.2 Bestimmung der Korngröße .....	30
3.2.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung .....	32
3.3.1 Härteprüfung.....	34
3.3.2 Risslängenauswertung .....	36

<b>4. Elektromechanisches Verhalten eines Piezo- Stacks.....</b>	<b>39</b>
4.1 Beschreibung der verwendeten Wegmesssysteme.....	39
4.1.1 Funktionsprinzip des DD1 Biegewegaufnehmers .....	39
4.1.2 Funktionsprinzip des Laservibrometers.....	40
4.2 Grenzen der Einsatztauglichkeit verschiedener Messsysteme.....	42
4.2.1 Versuchsbeschreibung .....	42
4.2.2 Vergleich der Messgenauigkeit unterschiedlicher Messsysteme .....	44
4.2.3 Resonanzstudie .....	49
4.3 Messungen elektromechanischer Größen eines Piezo- Stacks .....	55
4.3.1 Messung der Querverschiebung und Verkippung des Stempels .....	55
4.3.2 Ermittlung der longitudinalen Auslenkung in Abhängigkeit der Vorkraft.....	58
4.3.3 Erfassung der Rissbildung im Stack mittels des Laservibrometers.....	60
<b>5. Simulation der Polung eines Vielschichtaktors mittels der Finiten Elementen Methode .....</b>	<b>61</b>
5.1 Polungsvorgang und Modellentwicklung .....	62
5.1.1 Polung eines Piezostacks .....	62
5.1.2 Modellentwicklung.....	63
5.2 Beschreibung des Programmcodes .....	67
5.2.1 Parameterdefinition .....	67
5.2.2 ANSYS Programmcode.....	69
5.3 Diskussion der Ergebnisse .....	77
5.3.1 Auswertung des longitudinalen Dehnungsverhaltens während des Polens.....	78
5.3.2 Auswertung der berechneten Spannungsverteilung im Stack .....	80
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>85</b>
<b>8. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>93</b>
<b>9. Anhang A.....</b>	<b>96</b>
<b>10. Anhang B.....</b>	<b>100</b>
<b>11. Anhang C.....</b>	<b>101</b>

# 1. Einführung

Das piezoelektrische Verhalten bestimmter Materialien wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts von den Brüdern Jacques und Pierre Curie [1] entdeckt und an Einkristallen systematisch erforscht. Den wesentlichen Durchbruch für die praktische Anwendung bewirkte aber erst der Nachweis, dass auch polykristalline Materialien durch Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes ihre innere Struktur auf eine Art und Weise verändern können, sodass sie ein Verhalten ähnlich dem, der von den Brüdern Curie erforschten Einkristalle, zeigen. Dieser Umstand führte schließlich zu einem verstärkten Einsatz piezoelektrisch aktiver Werkstoffe in technischen Anwendungen.

Heutzutage besitzen Piezoelektrika ein breites Anwendungsspektrum von der Sensortechnik über Aktoren bis hin zu speziellen Anwendungen wie Transformatoren deren Primär- und Sekundärseite nicht magnetisch sondern mechanisch gekoppelt ist. Ein Grund für den Einsatz piezoelektrischer Werkstoffe liegt in der optimalen Anpassungsmöglichkeit an die jeweils gestellte Aufgabe und in der Realisierung einer möglichst kompakten Bauweise. Aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften lassen sich piezoelektrisch aktive Werkstoffe in die Kategorie der „smart materials“ einordnen.

Am Institut für Struktur- und Funktionskeramik werden Blei-Zirkonat-Titanat- Keramiken für die Herstellung von Vielschichtaktoren untersucht. Die Arbeit konzentriert sich dabei einerseits auf das Verständnis des Werkstoffverhaltens der Keramik, sowie auf die Charakterisierung des elektromechanischen Verhaltens von fertigen Bauteilen. Das Ziel ist, durch die so gewonnen Erkenntnisse die Performance und Zuverlässigkeit der Bauteile maßgeblich zu erhöhen.

Diese Diplomarbeit gliedert sich in drei Aufgabenbereiche, wobei ein Bereich als Kernthema ausführlicher behandelt wurde:

Das Kernthema beschäftigte sich mit der Untersuchung von verschiedenen Wegaufnehmer-systemen für einen elektromechanischen Piezoprüfplatz. Dabei waren zuerst grundlegende Versuche bezüglich der Verwendung ausgewählter Messsysteme notwendig, um anschließend die gewonnenen Erkenntnisse zur Bestimmung elektromechanischer Kenngrößen eines Piezoaktors einzusetzen.

Ein weiterer Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der keramographischen Untersuchung von keramischen Vielschichtaktoren (Stacks), die über ein alternatives Sinterverfahren hergestellt wurden. Es wurden dabei lokal keramische Kenngrößen in ausgewählten Bereichen des Bauteils bestimmt.

Abschließend wurde ein 2D- Modell zur Beschreibung von Stacks mittels der FE- Programms ANSYS entwickelt, mit dem es möglich ist, den Polungsvorgang unter Miteinbeziehung der remanenten Dehnung mit Hilfe eines Pseudo- Temperaturmodells zu berechnen. Damit ist es möglich, Rückschlüsse auf die Spannungsverteilung im Stack zu ziehen.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Historische Entwicklung und Einführung

Erstmals wurde der piezoelektrische Effekt 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie [1] entdeckt, als sie systematische Studien über die Auswirkung von Druck auf die Bildung von Oberflächenladungen an einkristallinen Quarz-, Zinkblende- und Turmalinkristallen durchführten. Die Tatsache, dass Piezoelektrizität die Erzeugung von Ladungen als Resultat einer aufgetragenen Drucklast ist, spiegelt sich auch im Namen wieder, da sich „Piezo“ aus dem griechischen Wort für „drücken“ ableitet. Ein Jahr später war es ihnen gelungen, auch den inversen piezoelektrischen Effekt, eine durch ein elektrisches Feld induzierte Deformation des Einkristalls, nachzuweisen [1]. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der anisotropen, nicht- zentrosymmetrischen Kristallstruktur der untersuchten Materialien [2].

Zur praktischen Anwendung kamen Piezoelektrika erst nach dem ersten Weltkrieg in Mikrofonen und Tonabnehmern (Seignettesalz) und zur Erzeugung von Ultraschall (Quarz). Ihre eigentliche technische Bedeutung erlangten sie jedoch erst gegen Ende der 40er Jahre des 20ten Jahrhunderts mit der Entdeckung piezoelektrischer Eigenschaften polykristalliner Materialien. Dies mag auf dem ersten Blick widersprüchlich erscheinen, da polykristalline Materialien, aufgrund der statistisch gleichverteilten Orientierung der Körner, stets isotropes Verhalten zeigen, während für Piezoelektrika eine nicht- zentrosymmetrische Struktur ohne Inversionszentrum zwingende Voraussetzung ist. Das bedeutet, dass makroskopisch betrachtet selbst dann kein piezoelektrisches Verhalten zu beobachten ist, wenn sich die einzelnen Körner piezoelektrisch verhalten. Durch das Einbringen einer Textur kann aber die makroskopische Isotropie aufgehoben werden. Man spricht von einem Ferroelektrikum, wenn man die Textur durch Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes erzeugen kann. Mikroskopisch werden die polaren Achsen der einzelnen Kristallite in Feldrichtung ausgerichtet (analog zum Magnetisieren eines Ferromagnetikums) [3].

Erstmals nachgewiesen wurde der ferroelektrische Effekt in Seignettesalz 1912. Polykristalline Materialien mit ferroelektrischen Eigenschaften wurden erst gegen Ende des zweiten Weltkrieges, im Zuge der Forschung nach Keramikkondensatoren höherer Kapazität, entdeckt. Noch während des Krieges wurde Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) als Kondensatormaterial mit extrem hoher Dielektrizitätskonstante entwickelt. 1945 entdeckte R. B. Gray schließlich, dass sich die Domänen nach dem außen angelegten Feld orientieren. So konnte er eine polykristalline Keramik erzeugen die, ähnlich wie Einkristalle, ferroelektrische und piezoelektrische Eigenschaften besitzt [1].

Heutzutage werden hauptsächlich Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) Keramiken eingesetzt die, durch Variation der Zusammensetzung und unterschiedlichen Dotierungen, in vielfältiger Weise modifiziert und an die jeweiligen anwendungsspezifischen Anforderungen angepasst

werden können. Aufgrund von Umweltschutzaufgaben geht der Trend in die Entwicklung bleifreier Piezowerkstoffe [4].

## 2.2 Elektromechanische Effekte

Wird an ein (elektrisch isolierendes) Dielektrikum ein elektrisches Feld angelegt, so induziert dieses unterschiedliche elektromechanische Effekte. Die Art und die Ausbildung dieser Effekte ist sowohl vom kristallographischen Aufbau der Werkstoffe als auch vom Gefüge abhängig.

### 2.2.1 Elektrostriktion

Als Elektrostriktion bezeichnet man die elastische Formänderung, die ein Dielektrikum beim Anlegen eines elektrischen Feldes erfährt. Die Ursache für die Verformung beruht auf der feldinduzierten Verschiebung von Atomen bzw. Ionen (Verschiebungspolarisation) und tritt bei allen Dielektrika auf. Die feldinduzierte Deformation ist unabhängig vom Vorzeichen des äußeren Feldes und proportional zu dessen zweiter Potenz (Abb. 2.1 a). Die durch Elektrostriktion erreichbaren Dehnungen sind im allgemeinen sehr gering, d. h. sie liegen deutlich unter 1 ‰.

Eine inverse Elektrostriktion existiert nicht, d. h. es ist nicht möglich durch das Aufbringen einer Drucklast auf ein rein elektrostriktives Material Oberflächenladungen zu erzeugen [5].

### 2.2.2 Piezoelektrischer Effekt

Der piezoelektrische Effekt tritt nur bei jenen Kristallen auf, die eine nicht-zentrosymmetrische Struktur besitzen, d. h. von den 32 ausgewiesenen Punktgruppen<sup>1</sup> sind nur 20 piezoelektrisch aktiv [2].

Bei einem Piezoelektrikum werden bei unidirektionaler mechanischer Belastung (sowohl unter Zug als auch unter Druck) an der Kristalloberfläche Ladungen induziert. Diese elektrische Polarisierung resultiert aus der (im Betrag unterschiedlich großen) Verschiebung von positiven und negativen Ladungsschwerpunkten innerhalb der Einheitszelle, welche mit

---

<sup>1</sup> Die Punktgruppe ist ein spezieller Typus der dreidimensionalen euklidischen Geometrie, der sich durch zusätzliche Punktrotation der 14 Bravaisgitter ergibt.

einer Verzerrung derselben einhergeht. Von der Temperatur ist der lineare intrinsische Piezoeffekt weitgehend unabhängig.

In einem idealen Piezoelektrikum gilt eine direkte Proportionalität zwischen elektrischer Polarisation und der mechanischen Spannung (Abb. 2.1 b), welche durch folgende mathematische Beziehung in Form einer Matrixschreibweise beschrieben werden kann.

$$\{S\} = [s] * \{T\} + [d] * \{E\} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

$$\{D\} = [d]^T * \{T\} + [\epsilon] * \{E\} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

$\{E\}$  elektrisches Feld [V/m] (Vektor: 1x3)

$\{S\}$  Dehnung [-] (Vektor: 1x6)

$\{D\}$  elektrische Verschiebung [C/m<sup>2</sup>] (Vektor: 1x3)

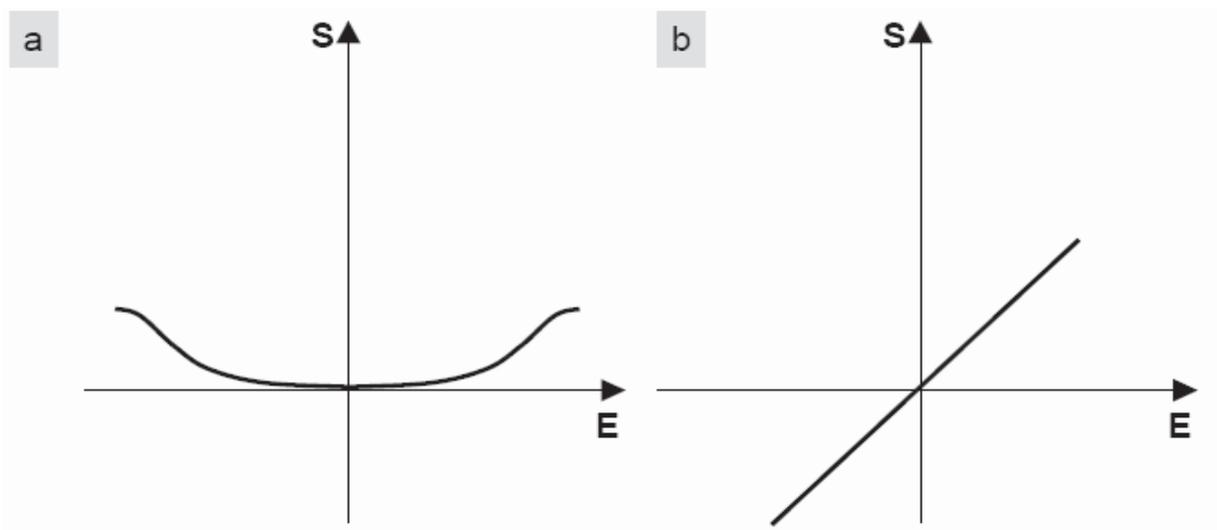
$\{T\}$  Spannung [Pa] (Vektor: 1x6)

$[s]$  Nachgiebigkeitsmatrix [1/Pa] (Matrix: 6x6)

$[d]$  piezoelektrische Ladungsmatrix [m/V] (Matrix: 3x6)

$[\epsilon]$  Dielektrizitätsmatrix [C/Vm] (Matrix: 6x6)

Liegt an ein Piezoelektrikum ein elektrisches Feld an, so kommt es zu einer Verformung der Elementarzelle (inverser piezoelektrischer Effekt). Die induzierte Dehnung ist aber, im Gegensatz zur Elektrostriktion, direkt proportional zur angelegten Feldstärke und ändert ihr Vorzeichen, wenn das elektrische Feld umgepolt wird [6].



**Abb. 2.1:** Qualitativer Kurvenverlauf der Dehnung  $S$  als Funktion des elektrischen Feldes

a.) elektrostriktives Verhalten (quadratischer Effekt)

b.) piezoelektrisches Verhalten (linearer Effekt)

### 2.2.3 Pyroelektrischer Effekt

Von den 20 piezoelektrischen Punktgruppen besitzen 10 eine singuläre polare Achse. Das bedeutet, dass solche Einkristalle auch im mechanisch unbelasteten Zustand und ohne äußeres elektrisches Feld ein Dipolmoment besitzen. Bei diesen Kristallklassen bewirkt eine isotrope Temperaturänderung eine anisotrope Verzerrung der Elementarzelle in Richtung der polaren Achse. Dabei ändert sich auch die Polarisierung und es kommt zur Ausbildung einer Oberflächenladung (pyroelektrischer Effekt).

Der inverse Effekt wird elektrokalorischer Effekt genannt und bezeichnet die Änderung der Polarisierung, die durch ein äußeres elektrisches Feld hervorgerufen wird und eine Temperaturänderung bewirkt [7].

### 2.2.4 Ferroelektrischer Effekt

Die Ferroelektrika bilden eine technisch besonders wichtige Untergruppe der pyroelektrischen Kristalle. Die Besonderheit der ferroelektrischen Keramiken liegt darin, dass ihre Polarisierung durch ein äußeres elektrisches Feld in eine stabile Lage umgeklappt werden kann (Orientierungspolarisation), und dabei das für sie typische hysteresebehaftete Dehnungsverhalten zeigen (Abb. 2.2 a).

Die meisten bei Raumtemperatur ferroelektrischen Materialien durchlaufen beim Erhitzen einen Phasenübergang von der ferroelektrischen Tieftemperaturphase zur paraelektrischen Hochtemperaturphase höherer Symmetrie. Die Temperatur, bei der die Umwandlung stattfindet, wird Curietemperatur genannt und liegt bei  $\text{PbTiO}_3$  bei  $490^\circ\text{C}$ . Paraelektrische Kristalle zeigen aufgrund der Symmetriehöherung weder ferro- noch piezoelektrisches Verhalten. Bei ferroelektrischen Einkristallen bilden sich auch ohne äußere Einwirkung Bereiche gleicher Dipolorientierung, aus die Domänen genannt werden. Diese Unterteilung der Kristalle in Domänen dient der Minimierung der freien Energie.

Ein wichtiges Kriterium für ferroelektrisches Verhalten ist, dass die zur Änderung der Polarisierung notwendige Feldstärke (Koerzitivfeldstärke  $E_C$ ) kleiner ist als die Durchbruchfeldstärke  $E_D$ . Sonst würde man den Werkstoff durch einen elektrischen Durchbruch zerstören, bevor es zum Polungsprozess kommt [8].

### 2.2.5 Antiferroelektrischer Effekt

Wie bei den Ferroelektrika setzt auch der antiferroelektrische Effekt die Existenz von permanenten Dipolen voraus. Der Unterschied zum ferroelektrischen Material liegt in der Anordnung der Dipole innerhalb der Domänen. Diese sind bei Antiferroelektrika alternierend antiparallel orientiert, sodass die einzelnen Domänen kein äußeres Dipolmoment besitzen.

Wird an ein Antiferroelektrikum nun ein äußeres Feld angelegt so wird es zunächst wie ein lineares Dielektrikum polarisiert. Beim Erreichen einer kritischen Feldstärke  $E_K$  klappen die antiparallel zum angelegten Feld orientierten Dipole in die energetisch günstigere Lage parallel zu äußeren Feld um, und das Material geht in einen induzierten ferroelektrischen Zustand über. Das Antiferroelektrikum verhält sich somit oberhalb der Feldstärke  $E_K$  wie ein Ferroelektrikum. Daraus resultiert das für antiferroelektrische Werkstoffe typische Dehnungsverhalten mit doppelter Hystereseschleife (Abb. 2.2 b) [9].

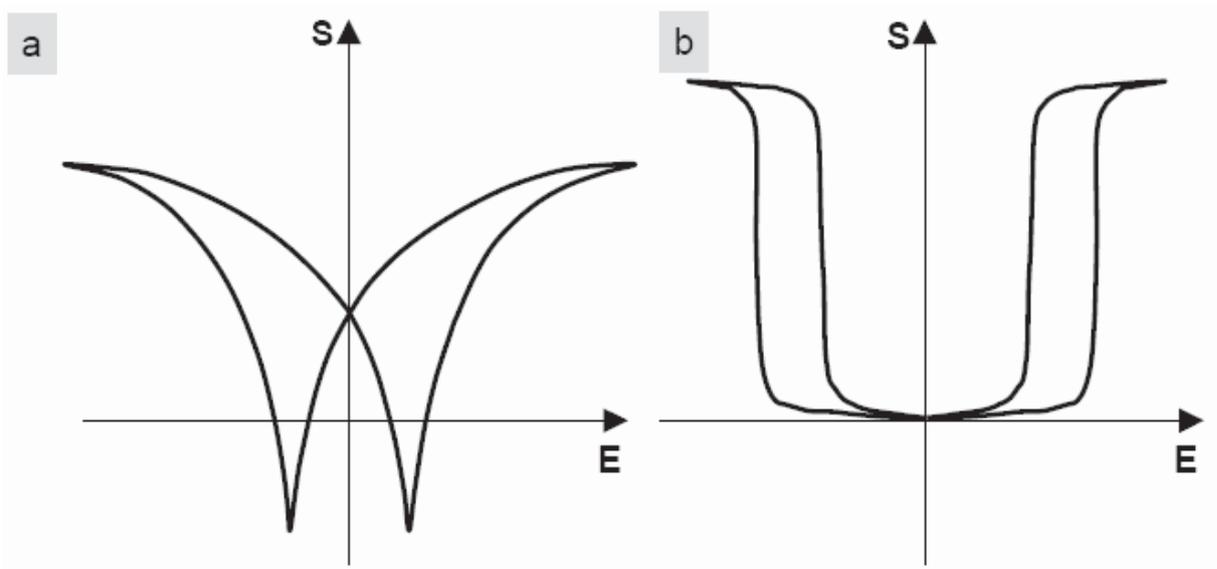
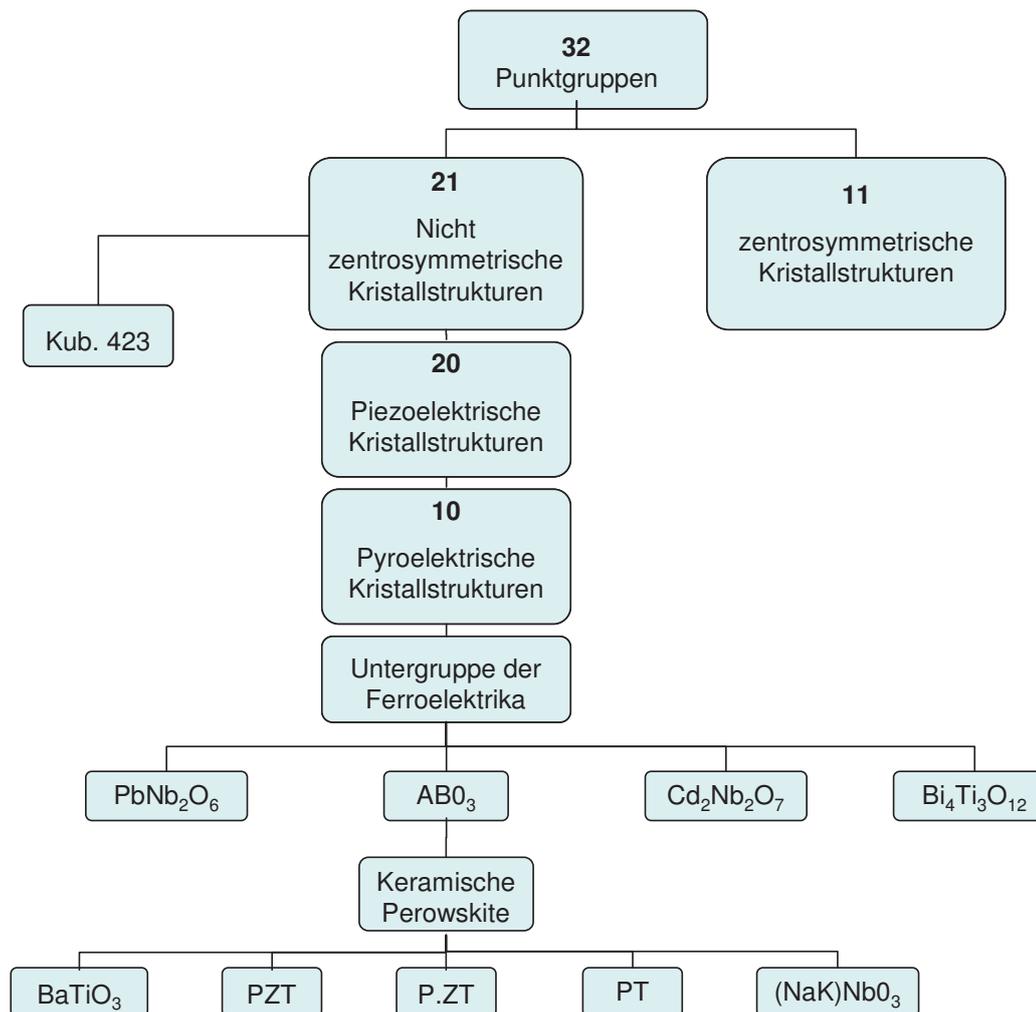


Abb. 2.2: Qualitativer Kurvenverlauf der Dehnung  $S$  als Funktion des elektrischen Feldes

- a.) ferroelektrisches Verhalten
- b.) antiferroelektrisches Verhalten

## 2.2.5 Elektromechanische Eigenschaften auf Basis der Kristallsymmetrie

Die Einteilung der Kristallstrukturen erfolgt bezüglich ihrer Symmetrie, woraus sich sieben grundlegende Kristallklassen ergeben (kubisch, hexagonal, rhomboedrisch, tetragonal, orthorhombisch, monoklin und triklin). Aus diesen sieben Kristallklassen lassen sich nun die 14 Bravaisgitter, durch translatorische Punktverschiebung, und in weiterer Folge die 32 Punktgruppen durch zusätzliche Rotation herleiten. Diese 32 Punktgruppen werden nun bezüglich ihrer Symmetrie und deren daraus resultierenden elektromechanischen Eigenschaften in entsprechende Untergruppen unterteilt (Abb. 2.3).



**Abb. 2.3:** Übersicht der elektromechanischen Eigenschaften der 32 Punktgruppen in Bezug auf die Kristallsymmetrie.

( $\text{ABO}_3$ : allg. Summenformel für Perowskite, P.ZT: dotierte PZT Keramiken, PT: Blei-Titanat)

Die erste Unterteilung erfolgt in zentrosymmetrische und nicht- zentrosymmetrische Kristalle. Dabei ist zu beachten, dass von den 21 nicht- zentrosymmetrischen nur 20 piezoelektrisch aktiv sind, weil Kristalle vom Typ kubisch 423 zwar nicht- zentrosymmetrisch sind jedoch

ansonsten eine so hohe Symmetrie aufweisen, dass kein piezoelektrisches Verhalten auftritt. Aus diesen 20 piezoelektrischen Kristalltypen sind wiederum nur 10 pyroelektrisch und zeigen eine spontane Polarisation. Die Ferroelektrika bilden nun eine weitere Untergruppe der pyroelektrischen Materialien. Die ferroelektrischen Keramiken mit Perovskitstruktur stellen dabei sicherlich die technisch bedeutendste Gruppe dar [1].

Für die Forschung von besonderer Bedeutung ist Bariumtitanat, weil an diesem Material erstmals grundlegende piezoelektrische und ferroelektrische Eigenschaften untersucht und erklärt werden konnten. Betrachtet man nun den Aufbau des  $\text{BaTiO}_3$  (Abb. 2.4) so erkennt man, dass das große Bariumion von 12 Sauerstoffionen als nächste Nachbarn umgeben ist. Die Titanionen befinden sich in Oktaederlücken des kubisch flächenzentrierten Gitters und sind somit von jeweils sechs Sauerstoffatomen umgeben. Die charakteristische Struktur vom Barium- und Bleititanat unterscheidet sich gänzlich von der anderer Perovskite, da die großen Barium- bzw. Bleiionen die Elementarzelle derart vergrößern, sodass das Titanion in der Oktaederlücke gerade noch stabil ist. Die „rattling titanium“ Hypothese behauptet nun, dass es außerhalb des Zentrums der Oktaederlücke noch andere Positionen minimaler Energie für das Titanion gibt, bei deren Besetzung es zur Ausbildung eines elektrischen Dipols kommt. Dies erklärt auch die Abnahme des piezoelektrischen Effekts bei höheren Temperaturen, da mit größeren thermischen Energie, das Titanion nicht mehr einen fixen Platz einnimmt, sondern zwischen den verschiedenen möglichen Plätzen hin und her springt, womit sich im Mittel die Polarisation wieder aufhebt [10].

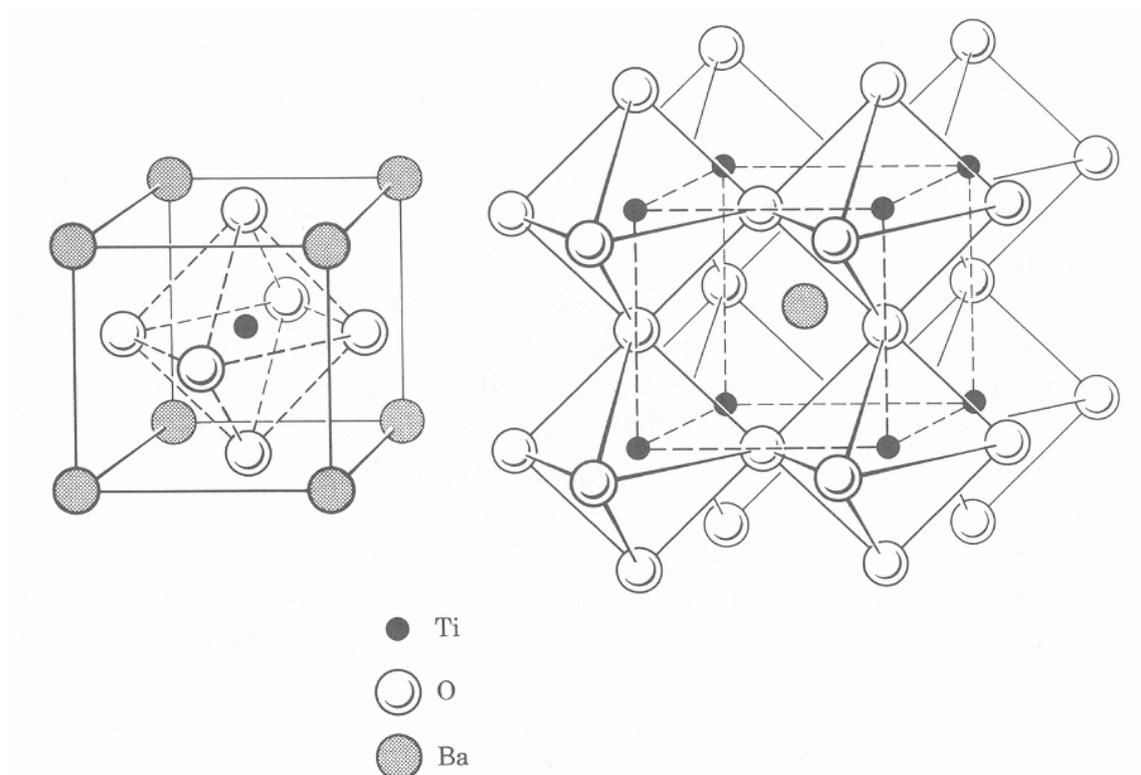
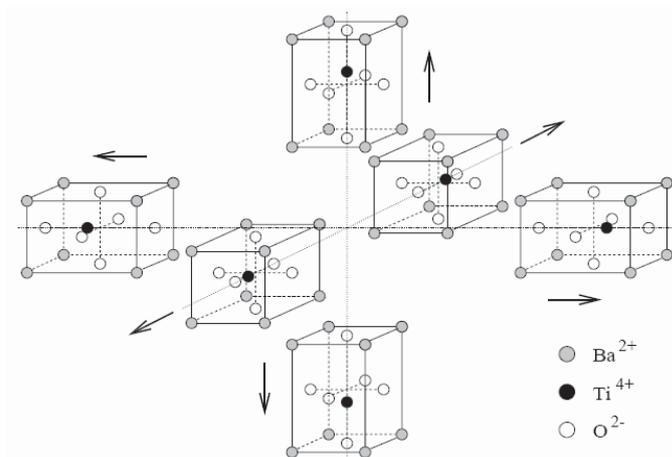


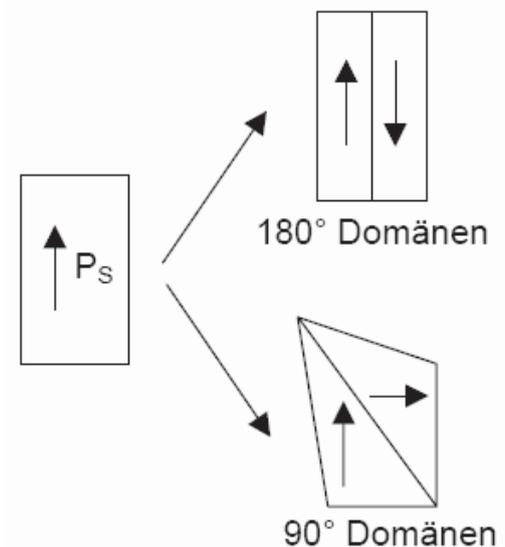
Abb. 2.4: Aufbau einer kubisch flächenzentrierten  $\text{BaTiO}_3$  Einheitszelle mit Perovskitstruktur [10].

## 2.3 Ferroelektrische Domänen

Die beim Unterschreiten der Curietemperatur einsetzende Polarisation ist in der Regel nicht über den gesamten Kristall einheitlich ausgerichtet, sondern es bilden sich innerhalb des Kristalls sogenannte Domänen aus. In den Domänen sind die einzelnen Dipolmomente parallel ausgerichtet. Die einzelnen Domänen weisen allerdings jeweils unterschiedliche Polarisationsrichtungen auf. Das gesamte Dipolmoment über alle Domänen ergibt wieder Null. Getrennt werden die Domänen innerhalb eines Kristalls durch sogenannte Domänenwände. Die Orientierung der Dipolmomente in der Einheitszelle ist allerdings nicht beliebig, sondern von der jeweiligen Kristallstruktur abhängig (Abb. 2.5). Daraus ergibt sich nur eine eingeschränkte Anzahl von Richtungen, in welche das Dipolmoment ausgerichtet sein kann, wodurch sich auch für zwei benachbarte Domänen nur bestimmte Winkelkonstellationen abhängig vom Kristallgitter ergeben können. Für ein tetragonales Gitter ergeben sich so nur Domänenkonfigurationen, die entweder um  $90^\circ$  oder  $180^\circ$  gegeneinander verdreht sind. Im rhomboedrischen Gitter sind hingegen nur  $71^\circ$ ,  $109^\circ$  oder  $180^\circ$  Domänen möglich. Es ist allerdings zu beachten, dass mit Ausnahme der  $180^\circ$  Domänengrenzen alle anderen Winkelkonfigurationen zu einer elastischen Deformation der Kristallite führen (Abb. 2.6) [11].

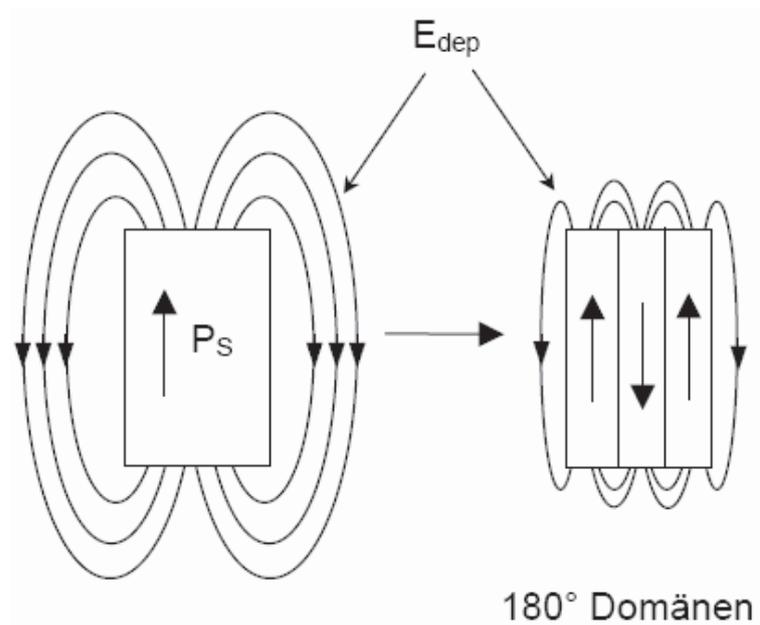


**Abb. 2.5:** Die 6 möglichen Richtungen bei der spontanen Polarisation einer tetragonalen  $\text{BaTiO}_3$  Einheitszelle.



**Abb. 2.6:** Auswirkung der Domänenkonfiguration im tetragonalen Gitter auf die elastische Deformation der Kristallite.

Die spontane Polarisation  $P_S$  führt zur Entstehung von Oberflächenladungen, die im Ferroelektrikum ein sogenanntes Depolarisationsfeld  $E_{dep}$  erzeugen, welches der Polarisation  $P_S$  entgegengesetzt ist. Durch die Ausbildung einer Domänenstruktur ist es nun möglich, die Feldenergie  $E_{dep}$  zu minimieren und somit einen energetisch günstigeren Zustand zu erreichen (Abb. 2.7). Die Aufteilung des Kristalls in Domänen kann nicht beliebig lang fortgeführt werden, da die Bildung neuer Domänenwände mit einer Erhöhung der freien Energie im Kristall einhergeht. Der Prozess der Domänenbildung ist somit beendet, sobald sich die Energie des depolarisierenden Feldes und die Wandenergie im Gleichgewicht befinden. Die Lage des Gleichgewichts bestimmt die Größe der Domänen [12].



**Abb. 2.7:** Schwächung des Depolarisationsfeldes durch die Aufteilung in mehrere Domänen.



Vor dem erstmaligen Anlegen eines elektrischen Feldes sind die Dipolmomente der einzelnen Domänen statistisch verteilt. Beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes beobachtet man mit zunehmender Feldstärke zunächst nur ein geringes Ansteigen der longitudinalen Dehnung, da in diesem Bereich lediglich günstig orientierter Domänen wachsen. Erst mit dem Erreichen einer kritischen Feldstärke kommt es zu Umklappen ganzer Domänen und somit zum raschen Anstieg der Dehnung bis zum Maximalwert  $S_{max}$  (Neukurve).

Reduziert man die Feldstärke anschließend wieder, so kommt es lediglich zu einer partiellen Reorientierung der Domänen, sodass auch bei Feldstärke  $E = 0$  das Material einen Teil seiner longitudinalen Dehnung behält. Das wird als remanente Dehnung  $S_{rem}$  bezeichnet.

Bei der Umpolung des Feldes beginnt die Reorientierung der Domänen erneut nur in entgegengesetzter Richtung. Wenn nahezu alle Domänen senkrecht zum angelegten Feld ausgerichtet sind, erreicht die longitudinale Dehnung ihr Minimum  $S_{min}$ . Die in diesem Punkt der Schmetterlingskurve auftretende Feldstärke wird als Koerzitivfeldstärke bezeichnet  $E_C$ . Erhöht man die Feldstärke weiter so richten sich die einzelnen Dipole wiederum parallel zum angelegten Feld aus, sodass wieder ein Punkt maximaler Dehnung erreicht wird jedoch mit um  $180^\circ$  gedrehten Dipolen.

Der maximal erreichbare Orientierungsgrad polykristalliner ferroelektrischer Keramiken ist stets kleiner als der einkristalliner Ferroelektrika und wird von der Elementarzellengeometrie vorgegeben ( $O_{max, \text{Einkristall}} = 100\%$ ,  $O_{max, \text{tetragonal}} = 83,1\%$ ,  $O_{max, \text{rhombodrisch}} = 86,6\%$ ,  $O_{max, \text{MBP}} = 92,2\%$ ) [14].

## 2.4 Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)

Blei-Zirkonat-Titanat ist eine der technisch bedeutendsten ferroelektrischen Keramiken. Das antiferroelektrische Blei-Zirkonat ( $\text{PbZrO}_3$ ) und das ferroelektrische Bleititanat ( $\text{PbTiO}_3$ ) bilden eine lückenlose Mischkristallreihe. Dem quasibinären Zustandsdiagramm nach Jaffe et al. [11] lässt sich entnehmen, dass PZT oberhalb des Curiepunktes  $T_C$ , unabhängig vom Zirkon/ Titan- Verhältnis, in einer paraelektrischen, kubischen Perowskitstruktur mit der Raumgruppe  $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$  kristallisiert (Abb. 2.9). Ausgehend vom Bleititanat sinkt der Curiepunkt durch die Substitution von Titanionen durch Zirkonionen von  $490^\circ\text{C}$  auf  $230^\circ\text{C}$  ab.

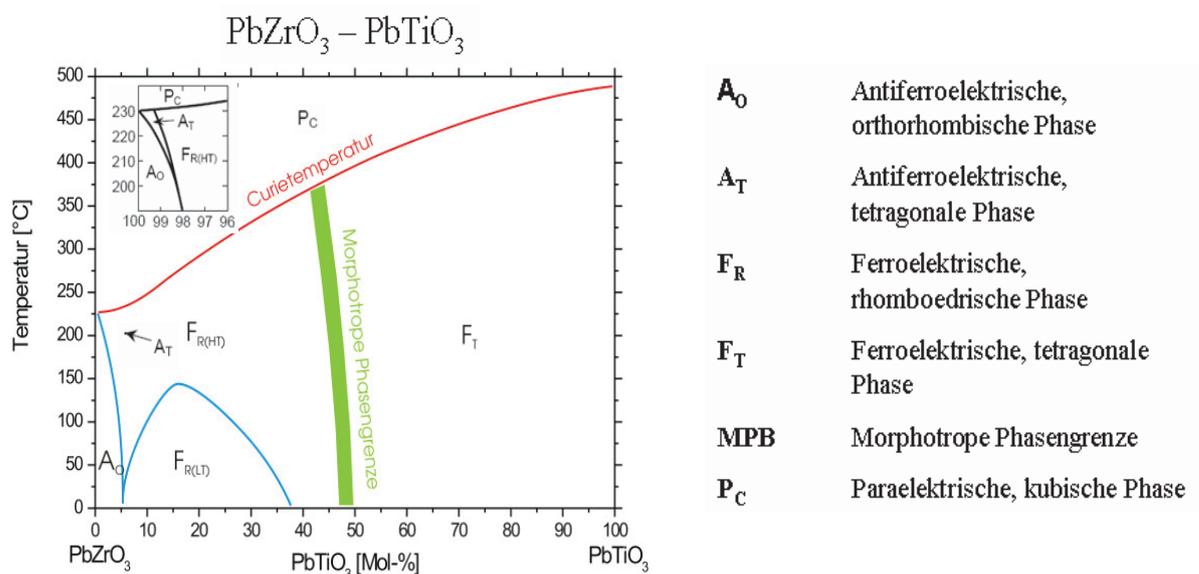
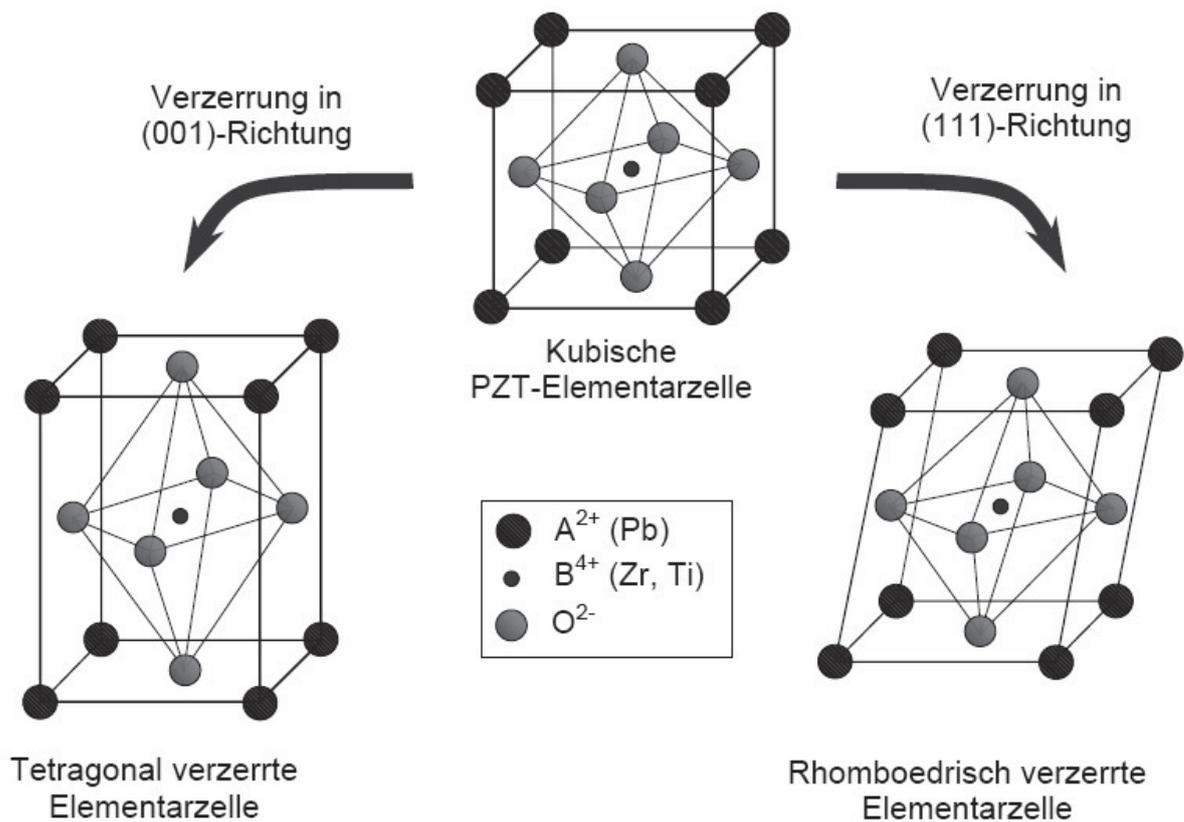


Abb. 2.9: Quasibinäres Phasendiagramm des PZT- Systems nach Jaffe et al [11].

Bei der Unterschreitung des Curiepunktes  $T_C$  kommt es spontan zu einer Phasenumwandlung von der kubischen Hochtemperaturphase in (abhängig vom Zirkon-/ Titanverhältnis) ferroelektrische oder antiferroelektrische Phasen. Ab einem  $\text{PbTiO}_3$  Anteil von ca. 50% bildete sich, isotyp zum reinen Blei-Titanat, eine tetragonale ferroelektrische Phase aus (Raumgruppe  $\text{P4mm}$ ). Die sukzessive Substitution der  $\text{Ti}^{4+}$ - durch  $\text{Zr}^{4+}$ - Ionen führt, aufgrund des größeren Radius der  $\text{Zr}^{4+}$ - Ionen, zu einer Abnahme der tetragonalen Verzerrung, bis schließlich bei einem Titangehalt  $x_{\text{Ti}} < 47 \text{ mol}\%$  die Umwandlung in die ferroelektrische rhomboedrische Gitterstruktur erfolgt. Die beiden ferroelektrischen Phasen werden durch die sogenannte morphotrope Phasengrenze (MPB) voneinander getrennt [14].

Betrachtet man die ferroelektrische, rhomboedrische Phase so lässt sich eine weitere Unterteilung in eine Tieftemperaturphase (Raumgruppe R3c) und eine Hochtemperaturphase (Raumgruppe R3m) erkennen. Die Strukturunterschiede der beiden Phasen sind nur gering, jedoch sind sie bezüglich der thermischen Ausdehnungen und der dielektrischen Eigenschaften sehr unterschiedlich [16, 17].



*Abb. 2.10: Umklappen der kubischen PZT- Elementarzelle in die beiden ferroelektrischen Phasen beim unterschreiten der Curietemperatur.*

PbZrO<sub>3</sub> kristallisiert bis zu einem Zirkongehalt von  $x_{\text{ZR}} > 94 \text{ mol\%}$  in einer orthorhombischen, antiferroelektrischen Phase (Raumgruppe Pba2), die piezoelektrisch inaktiv ist. Neben dieser orthorhombischen Phase bilden PZT- Mischkristalle mit  $x_{\text{ZR}} > 98 \text{ mol\%}$  bei Temperaturen über 190°C eine weitere antiferroelektrische Phase mit tetragonaler Struktur aus [18, 19].

### 2.4.1 Morphotrope Phasengrenze (MPB)

Die Grenze, die im Blei-Zirkonat-Titanat-System die tetragonale ( $F_T$ ) von der rhomboedrischen ( $F_R$ ) ferroelektrischen Phase trennt, bezeichnet man nach Groth als morphotrope Phasengrenze [20]. In diesem Bereich führt eine geringfügige Änderung des Zr/Ti- Verhältnisses ohne Änderung des Formeltyps ( $ABO_3$ ) zur Ausbildung unterschiedlicher Kristallstrukturen. Dieser Übergang ist aber nicht scharf abgegrenzt, sondern es handelt sich dabei um einen relativ breiten Koexistenzbereich beider ferroelektrischer Phasen. In der Literatur werden Werte für den Zirkongehalt, bei dem beide Phasen zu gleichen Anteilen vorliegen, zwischen 51,5 mol% und 54,5 mol% angegeben [21, 22, 23].

Die Breite der morphotropen Phasengrenze ist Gegenstand vieler Publikationen. Konsens besteht darin, dass der Koexistenzbereich maßgeblich durch das Herstellungsverfahren beeinflusst wird. Vergleicht man PZT- Keramiken, die mittels Mixed- Oxid- Verfahren hergestellt wurden, mit jenen, die nasschemisch produziert wurden, so weisen letztere einen deutlich schmaleren Koexistenzbereich auf. Die Werte für den Koexistenzbereich liegen beim Mixed- Oxid- Verfahren bei ca. 15 mol% und bei der nasschemischen Herstellung bei ca. 1 mol% [23, 24, 25].

Für die Koexistenz der beiden ferroelektrischen Phasen werden unterschiedliche Ursachen diskutiert:

Härdtl [26] führt die Koexistenz der beiden Phasen auf lokale innere Spannungen im Gefüge zurück. Die Entstehung dieser Spannungen begründet er mit der für beide Phasen unterschiedlichen Zunahme der Elementarvolumina beim Unterschreiten der Curietemperatur (2 % bei tetragonaler, 1 % bei rhomboedrischer Verzerrung). Dabei führen diese Spannungen zu lokalen druckinduzierten Phasenumwandlungen im Gefüge und somit zur Entstehung eines Zweiphasengebietes.

Kakegawa et al. und Singh et al. [22, 23] erklären die Koexistenz der beiden ferroelektrischen Phasen mit einer intergranularen Fluktuation der  $Zr^{4+}$ - und  $Ti^{4+}$ - Ionen, deren Ursache in der unzureichenden Homogenisierung der Ausgangsstoffe sowie den unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten der  $Zr^{4+}$ - und  $Ti^{4+}$ - Ionen zu suchen ist.

Wersing et al. [27] sehen den Grund der Koexistenz in der Minimierung der freien Energie der PZT Keramik und vergleichen die beiden gleichzeitig existierenden tetragonalen und rhomboedrischen Kristallbereiche mit der Domänenstruktur. Dabei soll die Koexistenz der beiden ferroelektrischen Phasen zu einer Reduzierung der Depolarisationsenergie und der elastischen Verzerrungsenergie führen.

Für den technischen Einsatz ist von Bedeutung, dass die MPB nahezu temperaturunabhängig ist, sowie die Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  und der Kopplungsfaktor  $k$  bei dieser Zusammensetzung

maximale Werte annehmen. Eine allgemein akzeptierte Erklärung dafür wurde bis heute nicht gefunden. Das Verhalten wird aber häufig aus der Koexistenz und dem daraus resultierenden Maximum der Polarisationsrichtungen erklärt (8 polare Achsen in rhomboedrischen und 6 in der tetragonalen Phase) [11, 15].

Auf der anderen Seite werden auch kristallographische Aspekte für die Erklärung der Maxima von  $\varepsilon$  und  $k$  angeführt. Aus röntgenographischen Untersuchungen weiß man, dass die tetragonalen bzw. rhomboedrischen Gitterverzerrungen im Bereich der morphotropen Phasengrenze ein Minimum aufweisen. Das rührt daher, da sich die Dipole bei morphotroper Zusammensetzung im elektrischen Feld leichter ausrichten lassen, was sich in einer stärkeren Polarisation und einer größeren mikroskopischen Dehnung auswirkt [22, 28].

## 2.5 Eigenschaftsmodifikation von PZT- Keramiken durch Dotierung

Im technischen Einsatz verwendete PZT- Keramiken benötigen je nach Einsatzgebiet speziell abgestimmte Eigenschaften, wobei die entsprechenden Keramiken dotiert werden, um das gewünschte Eigenschaftsprofil zu erhalten. Aus den unzähligen Varianten an PZT- Keramiken die sich daraus ergeben unterscheidet man zwei grundsätzliche Arten:

Besitzt das Dotierungskation eine höhere Ladung als das Substituierte so spricht man von donatordotiertem oder „weichem“ PZT. Ist das Dotierungskation von niedrigerer Ladung so spricht man von akzeptordotiertem oder „hartem“ PZT.

Beim Dotieren von PZT- Keramiken muss außerdem beachtet werden, dass selbst kleine Mengen an Dotierungskationen schon zu einer Verschiebung der morphotropen Phasengrenze führen können.

Der Einbau der Additive in die Perowskitstruktur ist in erster Linie vom Ionenradius abhängig. Sind die Radien der Additivkationen etwa in der Größe der  $\text{Pb}^{2+}$ - Ionen (1,32 nm), wie zum Beispiel  $\text{La}^{3+}$  (1,22 nm), so werden diese bevorzugt auf A- Gitterplätzen eingebaut. Dotierungskationen mit kleineren Radien, wie  $\text{Ta}^{5+}$  (0,68 nm),  $\text{W}^{6+}$  (0,65 nm) oder  $\text{Fe}^{3+}$  (0,67 nm), werden hingegen eher auf B- Gitterplätze eingebaut und substituieren  $\text{Zr}^{4+}$ - bzw.  $\text{Ti}^{4+}$ - Ionen. Der Einbau von Additiven auf Zwischengitterplätzen kann aufgrund der dichtgepackten Perowskitstruktur als sehr unwahrscheinlich betrachtet werden, da alle möglichen Zwischengitterplätze bereits besetzt sind [29].

### 2.5.1 Akzeptordotiertes PZT

Um akzeptordotiertes PZT zu erhalten, substituiert man entweder die  $\text{Pb}^{2+}$ - Ionen durch monovalente Kationen (z.B.:  $\text{Ag}^+$ ), oder man ersetzt die  $\text{Zr}^{4+}/\text{Ti}^{4+}$ - Ionen durch den Einbau dreiwertiger Kationen (z.B.:  $\text{Fe}^{3+}$ ). Um die Erhaltung der Elektroneutralität zu gewährleisten werden zweifach positiv geladene Sauerstoffleerstellen  $\text{V}_{\text{O}}^{\circ\circ}$  erzeugt, die mit den Additivkationen sogenannte Defektdipole  $\text{V}_{\text{O}}^{\circ\circ}\text{-M}^{\text{x}+}$  bilden [8]. Weil die Sauerstoffleerstellen auch unterhalb der Curietemperatur eine große Mobilität im Sauerstoffgitter besitzen, richten sich die Defektdipole parallel zur Polarisationsrichtung der Domänen aus [30]. Das von den Defektdipolen induzierte innere Feld verstärkt die Polarisierung der Domänen, und kommt es zu einer Stabilisierung der Domänenkonfiguration und einer Verringerung der Domänenwandbeweglichkeit (Domänenwandpinning).

Daraus resultieren sowohl geringere Dielektrizitätszahlen und kleinere Kopplungsfaktoren als auch höhere Koerzitivfeldstärken und eine schlechtere Polarisierbarkeit von akzeptordotierten PZT- Keramiken. Deshalb werden sie auch als „hart“ bezeichnet [8, 31].

### 2.5.2 Donatordotiertes PZT

Substituiert man die  $\text{Pb}^{2+}$ - Ionen durch dreiwertige und vierwertige Kationen (z.B.:  $\text{La}^{3+}$ ), oder die  $\text{Zr}^{4+}/\text{Ti}^{4+}$ - Ionen durch fünf- oder sechswertige Kationen (z.B.:  $\text{Ta}^{5+}$ ,  $\text{W}^{6+}$ ) so erhält man donatordotiertes „weiches“ PZT. Der Ladungsausgleich zur Erhaltung der Elektroneutralität erfolgt in diesem Fall durch die Bildung von Kationenleerstellen in der Perowskitstruktur. Allgemein wird angenommen, dass es durch diese Leerstellen zu einer Erhöhung der Domänenwandbeweglichkeit kommt, da sie die Verschiebung einzelner Ionen erleichtern. Gleichzeitig wird durch die Perowskitstruktur aber die Kationendiffusion stark behindert, da alle Kationen von Sauerstoff umgeben sind und der nächste gleichwertige Gitterplatz eine ganze Elementarzelle entfernt ist [15]. Daher können sich die Kationenleerstellen– Donatorkationen– Paare nicht parallel zum Polarisationsfeld der einzelnen Domänen ausrichten und die Domänenwandbeweglichkeit wie bei dem akzeptordotiertem PZT einschränken. Für die elektromechanischen Eigenschaften bedeutet dies kleinere Koerzitivfeldstärken, leichter Polarisierbarkeit, größere Dielektrizitätszahlen und höhere Kopplungskoeffizienten [8, 15, 31, 32].

Es sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass die Position der Kationenleerstellen im Gitter bis heute kontrovers diskutiert wird. Es gibt sowohl Theorien, welche die Bildung von A- Leerstellen postulieren, wie auch welche, die eher eine Bildung von B- Leerstellen für wahrscheinlich halten. Natürlich gibt es – neben diesen beiden Grenzfällen – noch Diskussionen über die gleichzeitige Bildung von A- und B- Leerstellen im Gitter. Es wird auch ein Zusammenhang zwischen der Leerstellenverteilung und den dielektrischen Eigenschaften angenommen, jedoch wird im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht näher darauf eingegangen.

## 2.6 Technische Anwendung von PZT- Keramiken

Durch die Entwicklung und Modifikation der Blei-Zirkonat-Titanat- Keramiken und der darauf basierenden Komponenten setzte eine rasante Zunahme der Anwendungen ein, die bis heute anhält. Eine umfassende Darstellung aller Anwendungen ist daher schwierig. Deshalb werden im Folgenden nur die Grundzüge typischer Applikationen dargestellt.

Da piezoelektrische Keramikbauelemente elektromagnetische Wandlerkomponenten darstellen kann man sie in folgende Grundklassen einteilen.

Ausnutzung des direkten Piezoeffekts:

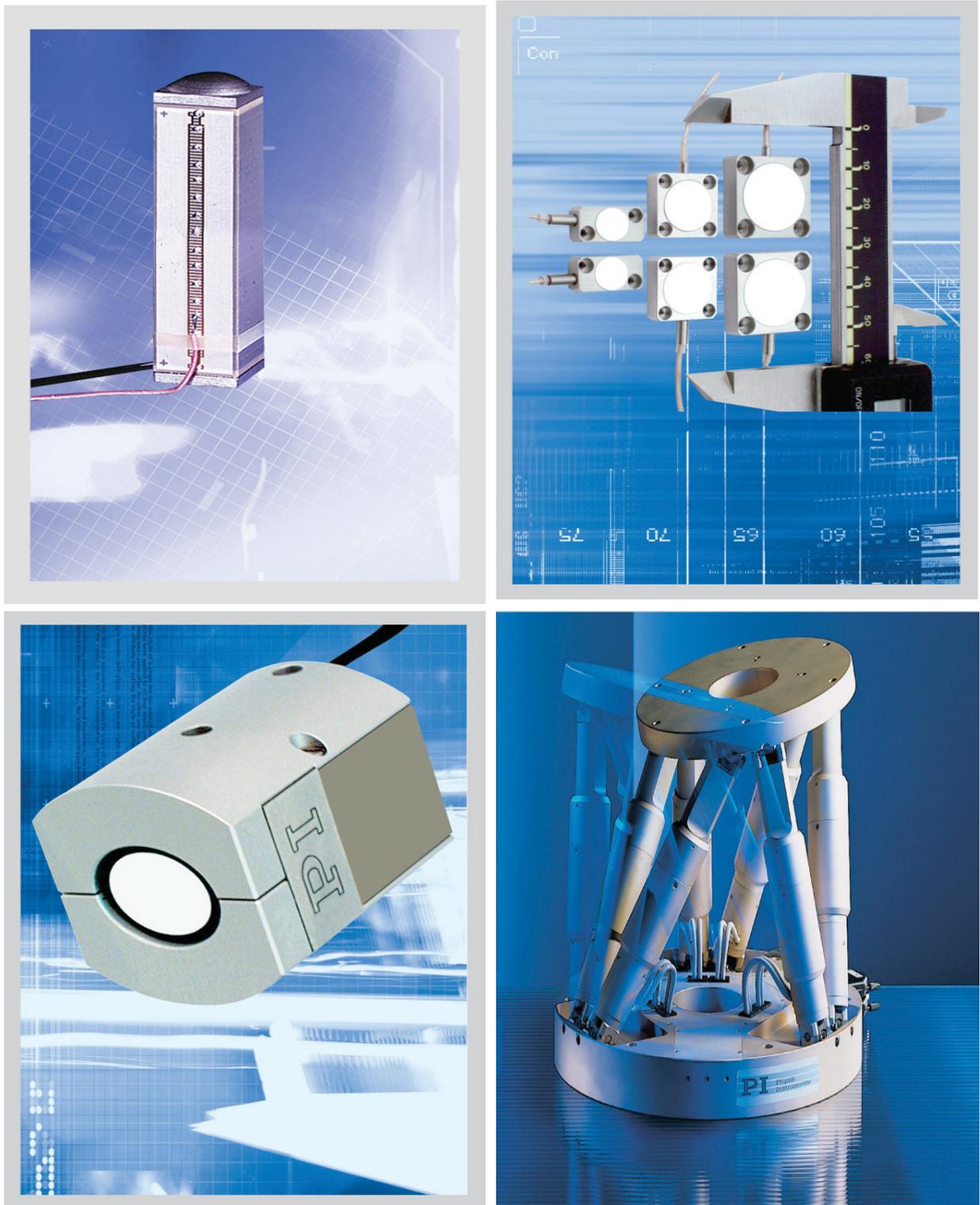
- Sensoren für Beschleunigung
- Zündelemente
- Piezotastaturen
- Generatoren
- Passive Dämpfung
- Schall- und Ultraschallempfänger

Ausnutzung des indirekten Piezoeffekts (Aktoren):

- Micro- und Nanopositionierung
- Mikropumpen
- Einspritzsysteme für Kraftfahrzeuge
- Leistungsultraschallgenerator
- Mikromotoren

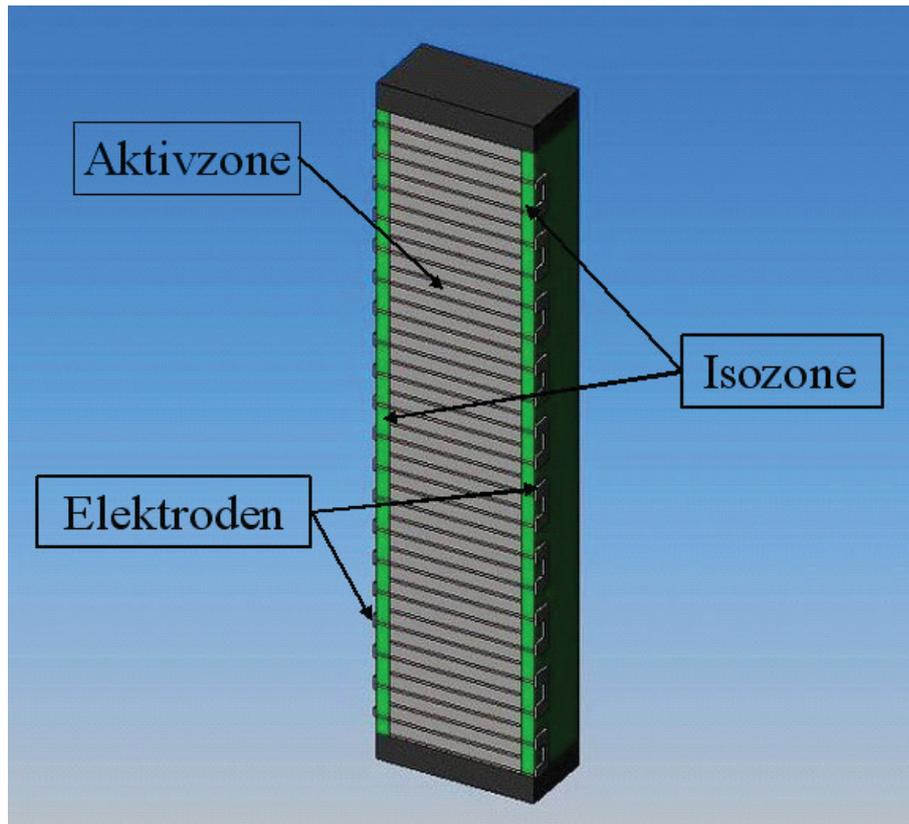
Ausnutzung beider Effekte:

- Füllstandsmessungen
- Durchflussmessungen
- Medizinesche Diagnostik
- Adaptive Strukturen
- Piezotransformatoren



**Abb. 2.11:** *Verschiedene Anwendungen für piezoelektrisch aktive Keramiken.  
(l. o.): keramisch isolierte Hochleistungsaktoren  
(r. o.): Kapazitive Sensoren für den Sub- Nanometerbereich  
(l. u.): hochdynamischer Piezokippspiegel (Kippwinkel 3°)  
(r. u.): Hochlast- Hexapod*

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchten Piezokeramiken sind Aktoren für Dieseleinspritzsysteme in Kraftfahrzeugen. Die dafür verwendeten Multilayeraktoren nutzen den inversen piezoelektrischen Effekt und erzielen so Längenänderungen im Bereich von ca. 1,5 %. Dabei zeichnen sie sich durch eine hohe mechanische Belastbarkeit, extrem niedrige Leistungsaufnahme (im geschalteten Zustand praktisch stromlos), kürzeste Ansprechzeiten im sub- Millisekunden Bereich und hohe Auflösung der Bewegung sowie durch eine hohe Zuverlässigkeit aus [33].



*Abb. 2.12: Schematische Darstellung der wesentlichen Bereiche eines Vielschicht- Piezoaktors [37].*

Der Grund für den Einsatz der Piezo- Technologie im Motorenbau ist, die Effizienz durch eine Optimierung der Einspritzsysteme zu steigern und dadurch auch den Kraftstoffverbrauch zu senken. Dadurch lässt sich der Kraftstoffverbrauch bei Diesel- und Benzinmotoren um bis zu 15% verringern [34].

Vereinfacht dargestellt besteht ein Einspritzsystem aus einer Pumpe, die den Kraftstoff auf ein Druckniveau von bis zu 2000 bar bringt, und einer Düse, die mit Hilfe eines Ventils fein dosierte Mengen Kraftstoff in die Motorenzylinder einspritzt. Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors kann beim Einspritzen durch Variation der Parameter Einspritzdruck, Treibstoffmenge und Einspritzzeit verbessert werden [34].

Bevor aber die Anwendung von Piezo- Aktoren in der Automobiltechnologie möglich war mussten noch einige Probleme gelöst werden. So war es zum Beispiel notwendig die erforderliche Anspeisespannung auf den Bereich von unter 200V zu reduzieren. Die heute eingesetzten Aktuatoren für die Dieselinjektion bestehen aus rund 350 aktiven Piezo- Lagen, schaffen einen Hub von 40  $\mu\text{m}$  bei einer Länge von 30 mm und setzen dabei Kräfte bis zu 2500 Newton frei. Dies ist völlig ausreichend um eine Ventalnadel gegen einen Druck von 2000 bar zu öffnen und somit den Einspitzvorgang präzise zu steuern [34].

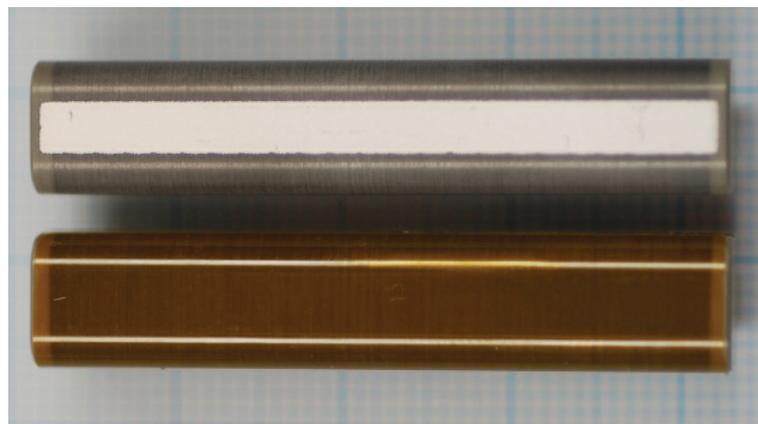


*Abb. 2.13: Aufbau eines Common – Rail – Dieseleinspritzsystem mit integriertem Piezokeramik Aktor.*

### 3. Keramographie

Das Ziel dieser Untersuchung war die Bestimmung von keramographischen Kenngrößen in einem Piezostack in Abhängigkeit vom Ort, sowie deren Vergleich mit den ebenfalls ermittelten Referenzwerten einer Bulkprobe. Sämtliches Probenmaterial wurde von der Firma EPCOS zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen wurden im Rahmen des FWK2 Projektes, welches sich mit dem mechanischen Verhalten von piezokeramischen Vielschichtaktoren beschäftigt, durchgeführt.

Die untersuchten Stacks stammten aus einer Stichprobe, die 30 ungepolte und 20 gepolte Piezostacks aus der sogenannten LOW-T<sup>2</sup> Serie umfasste, und am 15.12.2006 von EPCOS an das ISFK<sup>3</sup> übermittelt wurden. Es handelte sich dabei um geschliffene und umhüllte Stacks mit einer Länge von ca. 40 mm und einem Querschnitt von durchschnittlich 8,8 x 7,8 mm<sup>2</sup> mit abgerundeten Kanten mit einer kontaktierenden Schicht an beiden Isozonen (Abb. 3.1). Zur Bestimmung der Referenzwerte wurden zusätzlich Bulkproben charakterisiert, die aus dem gleichen Material bestanden, aber unter Standardbedingungen gesintert wurden.



**Abb. 3.1:** Piezostacks aus der LOW-T Serie:  
Oben: ungepolter Stack (Blick auf die Kontaktierung)  
Unten: gepolter Stack mit Slikonumhüllung (Blick auf die Seitenfläche)

---

<sup>2</sup> Low Time Sintered

<sup>3</sup> Institut für Struktur- und Funktionskeramik

### 3.1 Probenvorbereitung

Folgende keramographische Kenngrößen wurden bestimmt:

- Korngröße:* Bulk  
Stack: Iso- und Aktivzone
- Vickershärte (HV 0,2):* Bulk: gepolt und ungepolt  
Stack: Iso- und Aktivzone jeweils an der Oberfläche und im Inneren, an gepolten und ungepolten Proben
- Risslängenmessung:* Die Risslängen wurden bei allen Härteeindrücken bezüglich ihrer Orientierung zur Polungsrichtung vermessen.

Die Kenngrößen im Inneren des Stacks wurden ca. 2 mm unter der Oberfläche ermittelt, indem die Proben einheitlich von der Seitenfläche ohne Außenelektrode her abgeschliffen wurden.

#### 3.1.1 Probenpräparation

Das Polieren der Proben erfolgte entweder teilautomatisch oder händisch. Der Vorteil des teilautomatischen Polierens liegt in dem genau definierten, gleichmäßigen Anpressdruck und dem daraus resultierenden exakt planparallelen Schliff. Jedoch ist dabei zu beachten, dass in diesem Fall die einzelnen Proben mit Wachs auf eine Trägerscheibe aufgeklebt werden müssen. Dies führt einerseits zu einer thermischen Belastung des Probenmaterials beim Aufkleben wie beim Ablösen. Andererseits kann durch die anschließende Reinigung der Proben von den Wachsrückständen mit Azeton die Schlieffläche angegriffen werden, und ein nochmaliges händisches Nachpolieren erforderlich sein.

Die Proben für die Untersuchungen im Inneren des Stacks wurden teilautomatisch mit den Parametern aus Tabelle 3.1 geschliffen (20  $\mu\text{m}$ ) bzw. nach dem Abtragen der äußeren Schicht poliert (9  $\mu\text{m}$  – 1  $\mu\text{m}$ ).

Korngröße des Schleifmittels [ $\mu\text{m}$ ]	Anpressdruck [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	Polierdauer [min]	Laufsinn Polier- / Trägerscheibe
20	0,05	3	$\times<$ <sup>4</sup>
9	0,10	2	$\times<$
3	0,10	5	$\times<$
	0,10	10	$\times>$ <sup>5</sup>
1	0,10	5	$\times>$
	0,075	5	$\times<$
	0,05	5	$\times<$
<b>Die Drehzahl der Polierscheibe:</b>		konstant 150 U/min	

**Tab. 3.1:** Parameter für teilautomatisches Polieren der Proben.

Die Stacks für die Untersuchungen an der Oberfläche sowie die Bulkproben wurden händisch poliert, daher sind präzise Angaben bezüglich des Anpressdrucks nicht möglich. Die Werte für die Polierzeiten und die Drehzahl entsprechen aber jenen aus Tabelle 3.1.

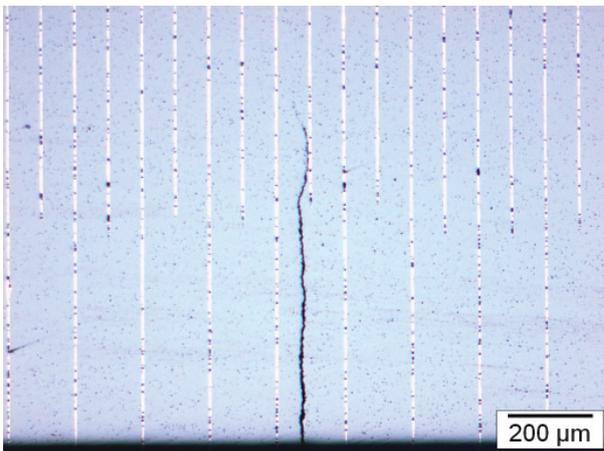
<sup>4</sup>  $\times<$  gegenläufiger Drehsinn von Polier- und Trägerscheibe

<sup>5</sup>  $\times>$  gleichläufiger Drehsinn von Polier- und Trägerscheibe

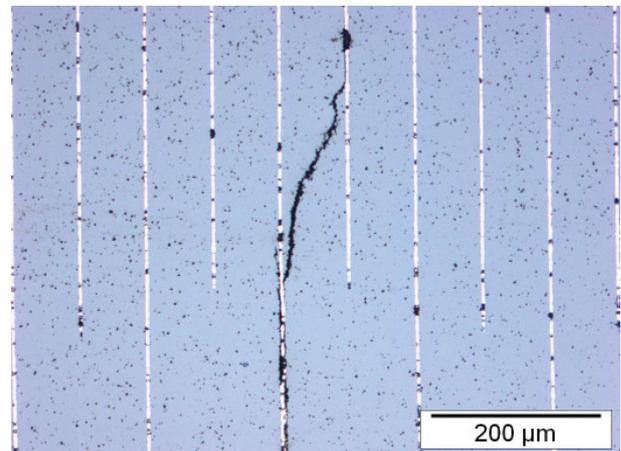
## 3.2 Bestimmung keramischer Gefügekenngößen

### 3.2.1 Optische Inspektion der Schliffe

Bei der mikroskopischen Betrachtung der polierten Proben wurden Risse in der Isozone aller gepolten Stacks festgestellt, die in Abständen von ca. 1,8 – 7,4 mm auftraten. Ihr Verlauf beginnt an der Oberfläche und erstreckt sich parallel zu den Elektroden oft bis in die Aktivzone (Abb. 3.2). Dabei ändern einige nach dem Erreichen der Aktivzone ihre Richtung und wachsen schräg durch den Stack. Dies kann zu einem Kurzschluss zweier Elektroden führen und so das Bauteil zerstören (Abb. 3.3).



*Abb. 3.2: Parallel verlaufender Polungsriss ohne Auswirkung auf das Funktionsverhalten.*



*Abb. 3.3: Abgezwigter Polungsriss der zwei Elektroden verbindet und somit einen Kurzschluss im Bauteil verursachen kann.*

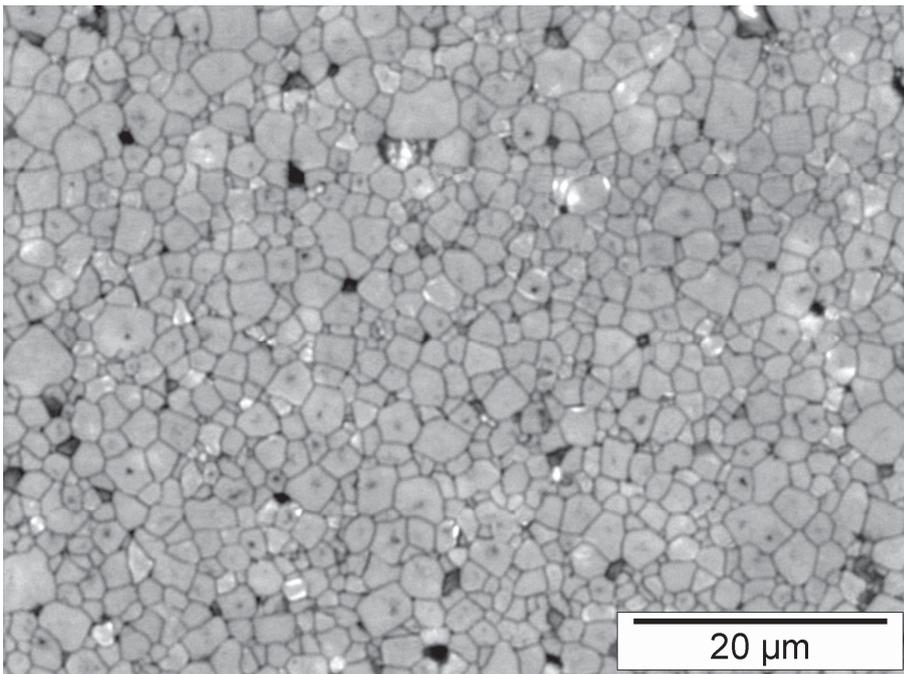
Da an den ungepolten Proben keine derartigen Risse festgestellt werden konnten, sind sie vermutlich auf den Polungsvorgang zurückzuführen.

### 3.2.2 Bestimmung der Korngröße

Um die Korngrenzen sichtbar zu machen, musste die Probenoberfläche nach dem polieren geätzt werden. Dazu wurde die Probe für 8 Sekunden in eine Mischung aus 95 ml H<sub>2</sub>O, 5 ml HCl (37%) und 5 Tropfen HF (40%) gelegt und anschließend sofort mit destilliertem Wasser gereinigt.

Die quantitative Bestimmung der Korngröße wurde in den Bereichen Aktiv- sowie Isozone des Stacks und einer Bulkprobe jeweils nur an ungepolten Proben durchgeführt, da die Polung keinerlei Einfluss auf die Korngröße hat.

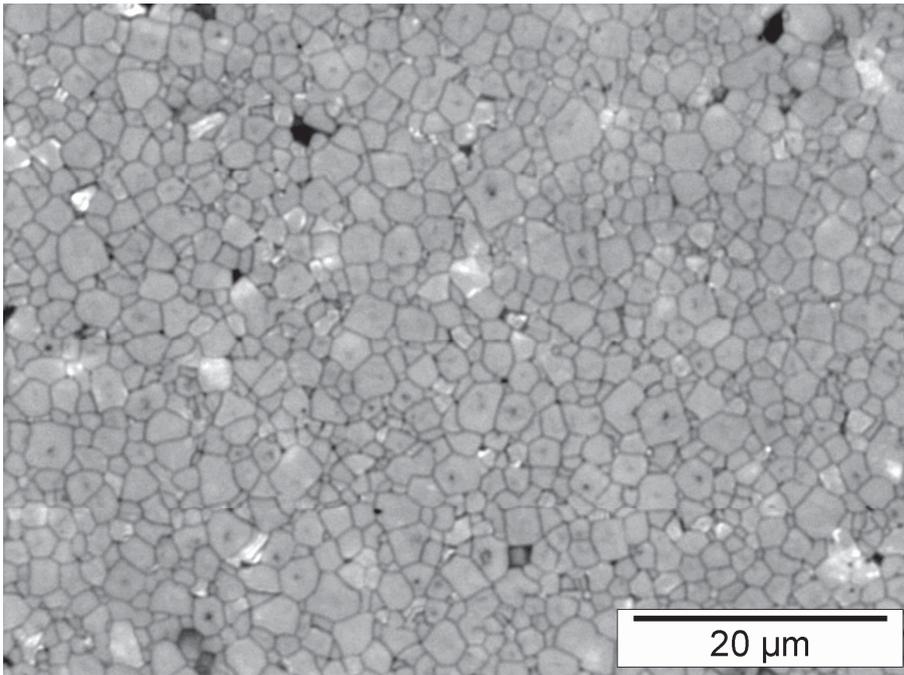
Von jedem Bereich wurden 5 bis 6 lichtmikroskopische Bilder (Auflösung: 1040 x 772 Pixel, Digitalkamera ColorView II) aufgenommen. Die durchschnittliche Korngröße wurde anschließend mit Hilfe der Linienschnittmethode bestimmt, wobei für jede Auswertung circa 1000 Körner vermessen wurden. Abbildung 3.4 a bis c zeigt die typischen lichtmikroskopischen Gefügebilder der untersuchten Bereiche.



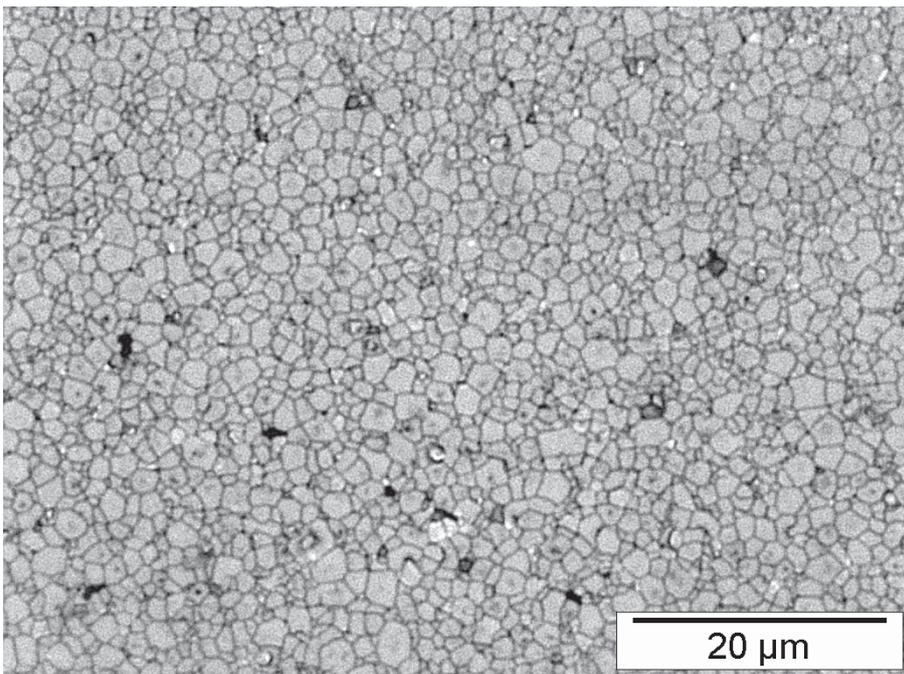
*Abb. 3.4 a: Geätzter Schliff aus der Aktivzone des Stacks (LiMi, 1000x)<sup>6</sup>. Eines von 5 Bildern zur Bestimmung der Korngröße mittels der Linienschnittmethode.*

---

<sup>6</sup> Lichtmikroskop, 1000 fache Vergrößerung



**Abb. 3.4 b:** Geätzter Schliff aus der Isozone des Stacks (LiMi, 1000x).  
Eines von 5 Bildern zur Bestimmung der Korngröße mittels der Linienschnittmethode.



**Abb. 3.4 c:** Geätzter Schliff der Bulkprobe (LiMi, 1000x).  
Eines von 5 Bildern zur Bestimmung der Korngröße mittels der Linienschnittmethode.

In der nachfolgenden Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse der Korngrößenbestimmung für die jeweiligen Bereiche aufgelistet. Die Detailergebnisse der Auswertung befinden sich im Anhang A.

Bereich	Anzahl der Sekantenschnitte	Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]	Standardabweichung [ $\mu\text{m}$ ]
Stack/ Aktivzone	1038	1,66	0,063
Stack/ Isozone	1048	1,57	0,069
Bulk	933	1,44	0,060

*Tab. 3.2: Ergebnisse der Korngrößenbestimmung mittels Linienschnittverfahren als Mittelwert der Einzelbilddauswertung.*

Die Ergebnisse der Korngrößenbestimmung zeigen eine leichte Tendenz zu einer geringeren Korngröße im Bulkmaterial. Die Ursache für das stärkere Kornwachstum im Stack kann an der Anwesenheit von Metallionen, die vom Elektrodenmaterial stammen, liegen.

### 3.2.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Neben der mittleren Korngröße wurde auch die Korngrößenverteilung ermittelt. In Abbildung 3.5 a ist die Häufigkeitsverteilung der Korngrößen auf Basis der Schnittlängenverteilung dargestellt. Weiters findet sich eine Darstellung des Flächenanteils der einzelnen Korngrößenfraktionen die aus der Häufigkeitsverteilung berechnet wurde (Anzahl der Körner mal mittlere Kornfläche) in Abbildung 3.5 b.

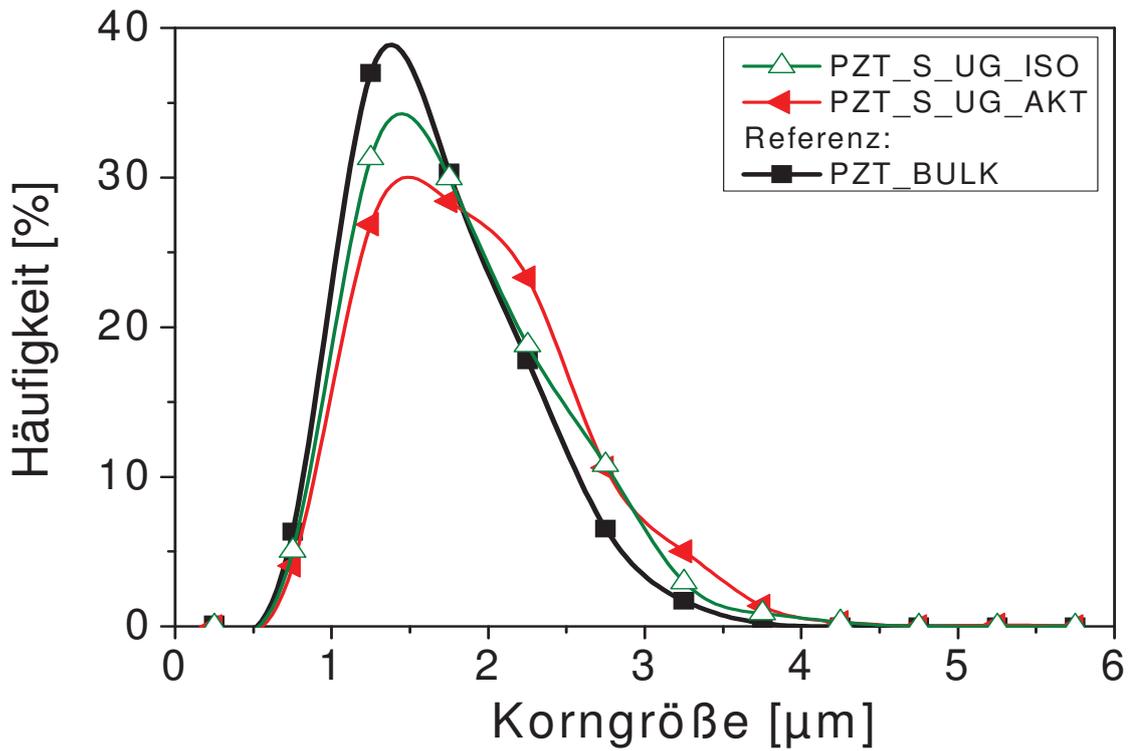


Abb. 3.5 a: Häufigkeitsverteilung der Korngrößen auf Basis der Schnittlängenverteilung  
 PZT\_S\_UG\_ISO: ungepolter Stack, Isozone  
 PZT\_S\_UG\_AKT: ungepolter Stack, Aktivzone  
 PZT\_BULK: Referenzprobe, Bulkmaterial

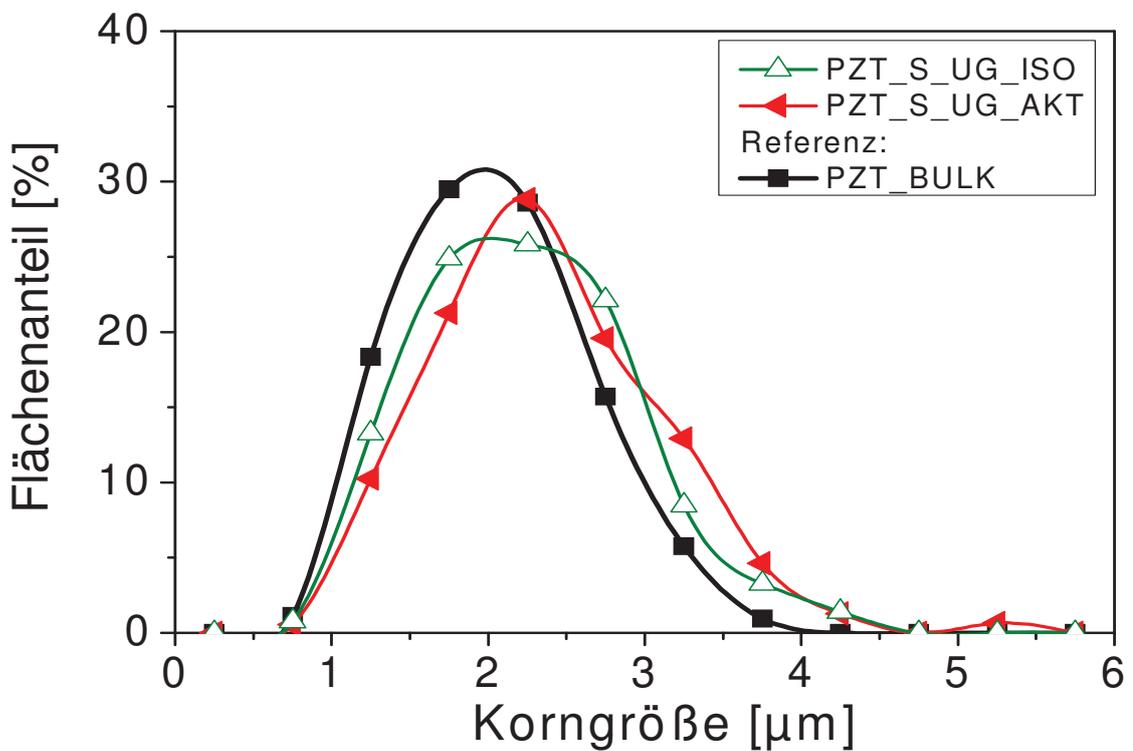


Abb. 3.5 b: Darstellung des Flächenanteils der einzelnen Korngrößenfraktionen (Legende siehe Abb. 3.4).

### 3.3 Härteprüfung und Risslängenvermessung

Die Härtemessungen wurden mit einer standardisierten Vickers-Eindruck-Pyramide durchgeführt. Diese Methode eignet sich neben der reinen Härtebestimmung auch besonders, um Risse zu induzieren und Unterschiede in der Rissausbreitung in den verschiedenen Bereichen festzustellen. Da die Länge der entstehenden Risse mit der Bruchzähigkeit korreliert, kann so auf ein möglicherweise anisotropes Verhalten der Bruchzähigkeit geschlossen werden.

#### 3.3.1 Härteprüfung

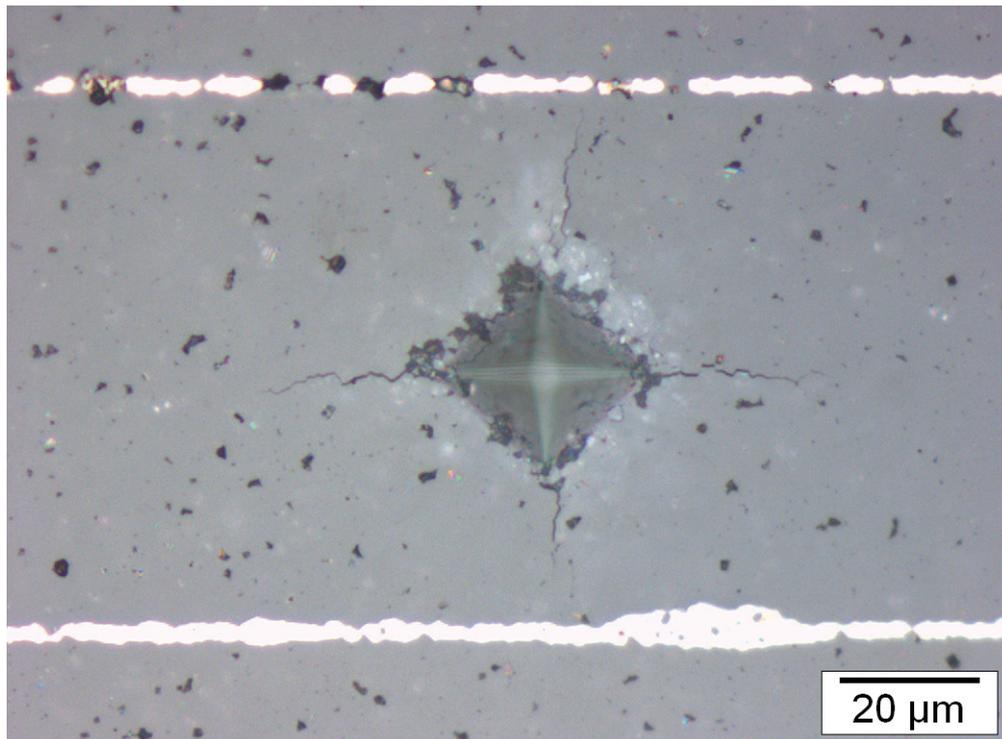
Bei diesen Untersuchungen wurde die Härte  $H$  in Form der wahren Härte (true hardness) ermittelt (i. e. Kraft pro projizierte Eindruckfläche). Die wird aus der aufgebrachten Last  $P$  und dem Mittelwert  $d$  der beiden Diagonalen des Eindrucks wie folgt ermittelt (Vgl. EN-843-4) [35]:

$$H = \frac{2 \times P}{d^2} \quad [3.1]$$

$H$	Härte [MPa]
$P$	aufgebrachte Last [N]
$d$	mittlere Länge der Diagonalen [mm]

Für die durchgeführten Messungen wurde eine Eindrucklast  $P$  von 1.96 N (entspricht 0,2 kg) gewählt. Auf diese Weise entstanden Eindrücke, die deutlich kleiner als der Abstand der Innenelektroden waren. Dadurch wurde einerseits der Einfluss der Elektroden minimiert, und andererseits waren die Eindrücke groß genug, um an den Ecken des Eindrucks Risse zu bilden. Für die Risslängenauswertung stellten die Innenelektroden dennoch eine wesentliche Einschränkung dar, weil sie die maximale Risslänge auf die Dicke der Aktivzone beschränkten.

Die Eindrücke wurden bei allen Stacks circa auf halber Bauteilhöhe eingebracht, wobei, wie bereits erwähnt, sowohl die Aktiv- als auch die Isozone geprüft wurde. Wie es die Vorschrift verlangte wurden pro Messung 10 Härteeindrücke (Abb. 3.6) vermessen und gemittelt.



**Abb. 3.6:** Härteeindruck in die Aktivzone eines ungepolten Stacks (LiMi, 500x)  
 Das der Stack ungepolt ist lässt sich daran erkennen, dass die Risslängen in vertikale und horizontale Richtung gleich lang sind.

Die Ergebnisse der Härtemessung sind in Tabelle 3.3 festgehalten, die Detaildaten befinden sich im Anhang A.

Polungszustand	Probe	Härte [GPa] ± Standardabweichung	
		Isozone	Aktivzone
<i>ungepolt</i>	Bulk	4,67 ± 0,17	
<i>gepolt</i>		4,69 ± 0,12	
<i>ungepolt</i>	Stack/ Oberfläche	4,84 ± 0,28	4,72 ± 0,29
	Stack/ Innen	4,96 ± 0,22	4,96 ± 0,27
<i>gepolt</i>	Stack/ Oberfläche	4,93 ± 0,52	4,76 ± 0,32
	Stack/ Innen	4,99 ± 0,31	4,90 ± 0,23

**Tab. 3.3:** Zusammengefasste Ergebnisse der Härteprüfung.

Wie erwartet lässt sich, innerhalb der Messgenauigkeit, kein Einfluss der Polung auf die Härte feststellen.

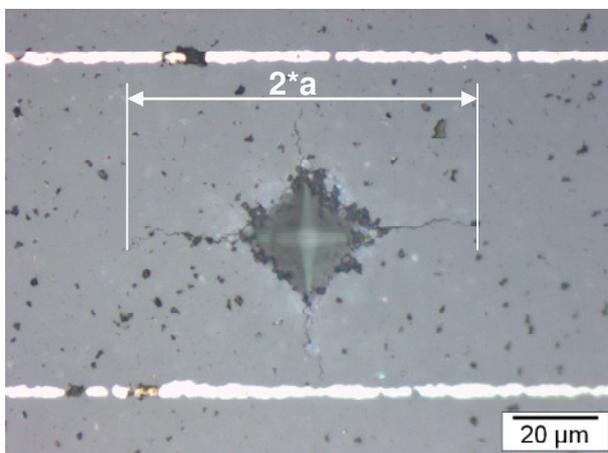
Beim Vergleich zwischen Stack und Bulk stellte sich heraus, dass die Bulkprobe etwas weicher als der Stack ist. Es ist anzunehmen, dass diese Abweichung auf die unter-

schiedlichen Sinterparameter bzw. den Einfluss des Elektrodenmaterials zurückzuführen ist. Beim Betrachten der Stackproben stellte sich eine leichte Tendenz zu höheren Messwerten im Inneren heraus, da aber die Standardabweichungen der Messungen fast gleich groß wie die Schwankungen der Messwerte sind, ist keine konkrete Aussage über den möglichen Einfluss der Polung bzw. der Elektroden auf die lokale Härte im Stack möglich.

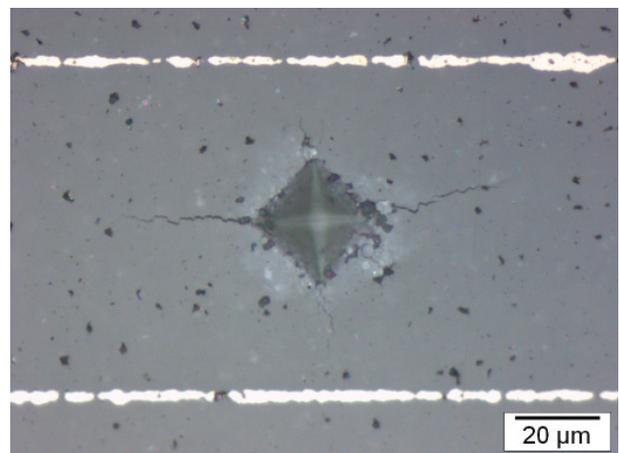
### 3.3.2 Risslängenauswertung

In der folgenden Untersuchung wurde das durch die Vickersindrücke induzierte Risswachstum im Material in Abhängigkeit von der Orientierung des Risses zur Polungsrichtung bei unterschiedlichen Polungszuständen und in verschiedenen Bereichen ermittelt. Dabei verlaufen als horizontal bezeichnete Risse normal und als vertikal bezeichnete Risse parallel zur Polungsrichtung.

Abbildung 3.7 a bis d zeigt jeweils einen Härteeindruck in der Aktiv- und der Isozone im ungepolten sowie im gepolten Zustand, wobei eine deutliche Abhängigkeit der Risslängen<sup>7</sup> vom Polungszustand zu erkennen ist (Risslängenmessung siehe Abb. 3.8 a).

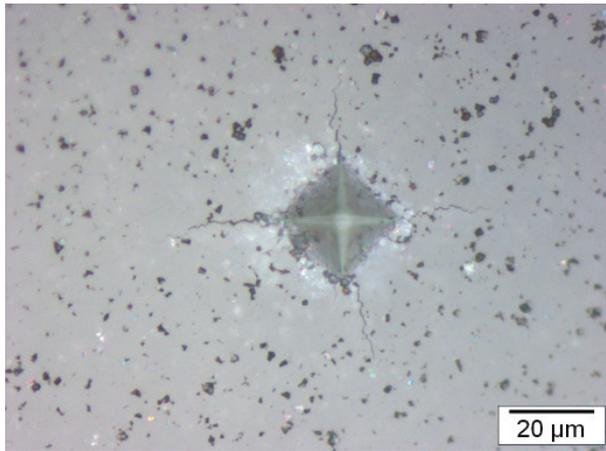


**Abb. 3.7 a:** Härteeindruck mit induzierten Rissen, Stack/ Aktivzone ungepolt, (LiMi, 500x)



**Abb. 3.7 b:** Härteeindruck mit induzierten Rissen, Stack/ Aktivzone gepolt, (LiMi, 500x)

<sup>7</sup> Die Messung der Risslänge erfolgt immer von einer Risspitze bis zur gegenüberliegenden und wird als 2\*a Länge bezeichnet.



**Abb. 3.7 c:** Härteeindruck mit induzierten Rissen, Stack/ Isozone ungepolt, (LiMi, 500x)



**Abb. 3.7 d:** Härteeindruck mit induzierten Rissen, Stack/ Isozone gepolt, (LiMi, 500x)

Vergleicht man nun die gemessenen Risslängen (Tab. 3.4), so fällt sofort ein signifikanter Unterschied zwischen den gepolten und ungepolten Proben auf. Während in der Gruppe der ungepolten Proben die horizontalen und vertikalen Risse ungefähr die gleiche Länge besaßen, zeigten die gepolten Proben, längere horizontale Risse und deutlich kürzere vertikale Risse. Es sei angemerkt, dass in der Aktivzone die maximal auftretende vertikale Risslänge durch deren Schichtdicke (ca. 75 µm) begrenzt ist. Dadurch ist, auch bei ungepolten Proben, der Mittelwert der vertikalen Risse deutlich niedriger ist als jener der horizontalen Risse.

Probe	Polungszustand	Risslänge: <i>horizontal</i>		Risslänge: <i>vertikal</i>	
Bulk	<i>ungepolt</i>	71,02 ± 2,46		74,28 ± 3,72	
	<i>gepolt</i>	86,67 ± 2,56		48,50 ± 1,88	
		Isozone		Aktivzone	
		Risslänge: <i>horizontal</i>	Risslänge: <i>vertikal</i>	Risslänge: <i>horizontal</i>	Risslänge: <i>vertikal</i>
Stack	<i>ungepolt</i>	79,83 ± 4,36	70,43 ± 4,63	82,89 ± 3,01	67,93 ± 3,66
Innen	<i>gepolt</i>	89,93 ± 4,29	70,44 ± 3,72	94,54 ± 2,56	62,53 ± 2,82

**Tab. 3.4:** Risslängen der einzelnen Bereiche in Abhängigkeit vom Polungszustand. Da in den durchgeführten Messungen keine Abhängigkeit der Risslänge von der Tiefe im Stack festgestellt wurde, sind hier nur die Werte in 2 mm Tiefe angeführt.

Eine Abhängigkeit der Risslänge von der Tiefe im Stack wurde nicht festgestellt, daher sind in der Tabelle 3.4 nur die Werte in 2 mm Tiefe angeführt. Die vollständige Detailauswertung befindet sich im Anhang A.

Der Vergleich der Risslängen von gepolten und ungepolten Proben weist auf einen signifikanten Einfluss des Domänengefüges auf die Rissausbreitung hin. Ein besonderes Augenmerk muss auf die Isozone der gepolten Proben gelegt werden. Dort baut sich einerseits eine unbekannte Domänenkonfiguration, sowohl durch das elektrische Feld beim Polungsvorgang als auch durch die dabei auftretenden Dehnungen auf. In diesem Bereich bleibt aufgrund der remanenten Dehnung zusätzlich ein komplexes Eigenspannungsfeld zurück.

Die unterschiedlichen Risslängen längs und quer zur Polungsrichtung können durch eine Anisotropie der Zähigkeit und/ oder durch anisotrope Spannungsfelder hervorgerufen werden. G. A. Schneider und V. Heyer erklären diese Zähigkeitssteigerung durch ein ferroelastisches Umklappen der Domänen hervorgerufen durch das Spannungsfeld der Rissspitze. Dieser Effekt tritt allerdings nur parallel zur Polungsrichtung auf, da im Falle einer normal auf die Polarisationsrichtung stehenden Wachstumsrichtung es zu keinem Umklappen der Domänen kommt [36].

Eine andere Theorie, die von Guiu et al. entwickelt wurde, sieht die Ursache dieses Phänomens in einem anisotropen Spannungsfeld unter dem Vickerseindruck. Er vermutet dabei eine stärkere Intensität oder eine größere Ausdehnung des Spannungsfeldes normal zur Polungsrichtung, welche er auf die unterschiedlichen Schubmoduli  $c_{44}$  und  $c_{66}$  in ferroelektrisch gepoltem Material zurückführt [36].

## **4. Elektromechanisches Verhalten eines Piezo-Stacks**

In diesem Teil der Arbeit wurde das elektromechanische Verhalten der Stacks einer Standardserie der Firma EPCOS auf ihre elektromechanischen Eigenschaften, sowie die Eignung unterschiedlicher Messsysteme bzw. Versuchsaufbauten für die Erfassung der entsprechenden Daten untersucht.

Ein besonderes Augenmerk kommt dabei den Wegmesssystemen zu, da mit Hilfe dieser, sowohl bei statischen als auch dynamischen Messungen, eine genaue Bestimmung der Längenänderung des Stacks gewährleistet werden muss.

### **4.1 Beschreibung der verwendeten Wegmesssysteme**

Zur Wegmessung wurden zwei unterschiedliche Methoden eingesetzt:

Eine mechanisch Wegmessung mittels Biegewegaufnehmer (System DD1 der Firma HBM), sowie eine optische Wegerfassung mit Hilfe eines Laservibrometers.

#### **4.1.1 Funktionsprinzip des DD1 Biegewegaufnehmers**

Das Grundprinzip des DD1 Wegaufnehmersystems (Abb. 4.1) besteht darin, dass die Verschiebung der Spitze einer Tastzunge in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Die Umwandlung erfolgt mit Hilfe von Dehnmessstreifen, die in einer Vollbrückenschaltung (Abb. 4.2) auf der Messzunge innerhalb des Gerätes angeordnet sind. Dabei ist eine maximale Verschiebung der Tastspitze von  $\pm 2,5$  mm möglich [38].

Die genauen technischen Spezifikationen finden sich im DD1 Datenblatt.



Abb. 4.1: Darstellung eines DD1 Wegaufnehmers von HBM.

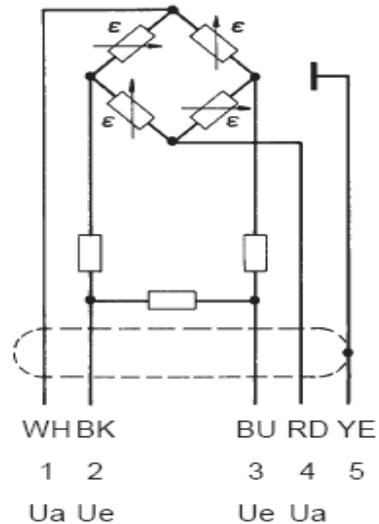
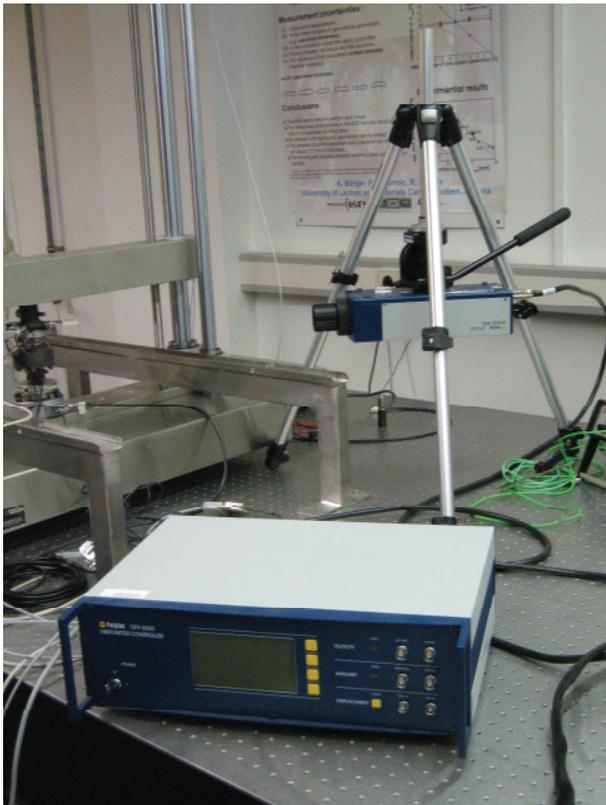


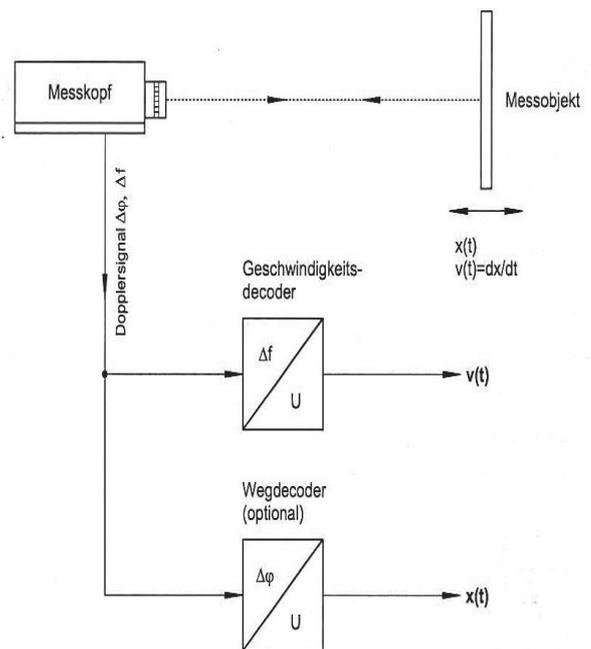
Abb. 4.2: Bild aus dem Handbuch von HBM: Vollbrückenschaltung eines DD1

#### 4.1.2 Funktionsprinzip des Laservibrometers

Das Laservibrometer OFV-5000 der Firma Polytec (Abb. 4.3) erfasst Kenngrößen von mechanischen Schwingungen oder instationären Bewegungsvorgängen nach dem Prinzip des Heterodyne- Interferometers. Dabei wird mit Hilfe einer Bragg- Zelle am Fotodetektor ein hochfrequentes Trägersignal erzeugt. Zur Schwingungsmessung wird der Strahl des Helium-Neon- Lasers auf das Messobjektgerichtet und von dort zurückgestreut. Aufgrund des Dopplereffekts bewirkt die Geschwindigkeit und Amplitude des Messobjekts eine Frequenz- bzw. Phasenmodulation des Laserlichtes, woraus in den Decodereinheiten sowohl der Weg als auch die Geschwindigkeit ermittelt werden kann. Dabei wird aus der Frequenzmodulation des Dopplersignals die Geschwindigkeitsinformation gewonnen, während gleichzeitig aus der vorhandenen Phasenmodulation das Wegsignal rekonstruiert wird (Abb. 4.4). Die Verarbeitung der Daten kann mit bis zu vier verschiedenen Decodern erfolgen, wobei für die folgenden Versuche aber nur der Geschwindigkeitsdecoder DD-200 bzw. der Wegdecoder VD02 eingesetzt wurden [39].



**Abb. 4.3:** Vibrometercontroller mit dem auf einem Stativ befestigten Messkopf.



**Abb. 4.4:** Schematische Übersicht des Signalverlaufs aus dem Handbuch der Fa. Polytec.

Der verwendete Wegdecoder DD-200 arbeitet nach dem Streifenzählverfahren und besitzt zusätzlich eine Interpolationsgruppe zur Steigerung der Auflösung bis auf 2 nm. Mit den dadurch entstehenden dreizehn Messbereichen lassen sich praktisch alle Schwingungsamplituden im Frequenzbereich von 0 Hz bis 250 kHz erfassen, wobei in hochauflösenden Messbereichen nur eingeschränkte Geschwindigkeits- und Frequenzbereiche zur Verfügung stehen.

Für die Geschwindigkeitsmessung wurde der analoge VD-02 Breitbanddecoder eingesetzt. Dieser ist für einen Frequenzbereich bis 1,5 MHz geeignet und besitzt vier Messbereiche von  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}/\text{V}$  bis  $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}/\text{V}$  wobei in den Bereichen  $125 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}/\text{V}$  und  $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}/\text{V}$  sich auch stationäre Geschwindigkeitskomponenten mit eingeschränkter Genauigkeit erfassen lassen [39].

## 4.2 Grenzen der Einsatztauglichkeit verschiedener Messsysteme

Der Zweck dieser Untersuchung war ein Vergleich der Messgenauigkeit mechanischer und optischer Wegaufnehmersysteme in unterschiedlichen Frequenzbereichen, sowie eine Studie zur Auffindung von Frequenzbereichen wo störende Resonanzerscheinungen auftreten.

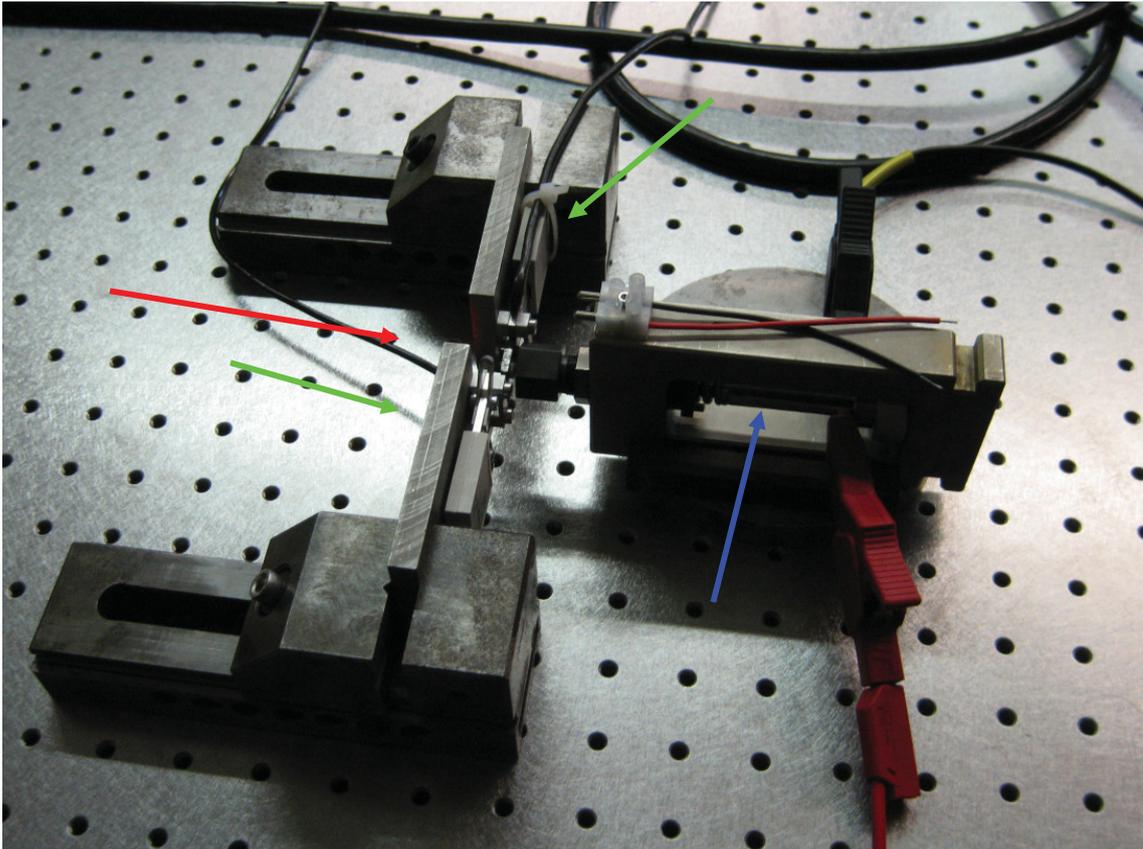
### 4.2.1 Versuchsbeschreibung

Die Signalerfassung der optischen Messung erfolgte mittels eines LeCroy Oszilloskops. Für die mechanische Wegmessung mittels DD1 standen ein externer Messverstärker der Firma HBM, Type MGC, sowie wahlweise auch externe Eingänge an der Steuereinheit EDC120 (Firma Doli) der Microstrain EDC120 zur Verfügung. Leider erwiesen sich die maximal möglichen Aufzeichnungsraten der jeweils dazugehörenden Software als zu niedrig (max. 50 Messpunkte/ sek. bei der EDC120 bzw. max. 150 Messpunkte/ sek. bei der MGC Software). Aufgrund dieser Begrenzung der Aufzeichnungsrate ist eine Verwendung dieser beiden Systeme nur für Messungen bis ca. 5 Hz möglich. Um nun auch bei höheren Frequenzen brauchbare Ergebnisse zu erhalten musste auch die Signalerfassung der mechanischen Wegmessung mittels Oszilloskop erfolgen. Dies war möglich da, der MGC Messverstärker für jeden Messkanal über einen analogen Ausgang verfügt, der mit dem Oszilloskop verbunden werden kann.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die optische Messung indirekt an der Auslenkung des hinteren DD1 gemessen wurde.

Der Versuch wurde mit einem gepolten Standard- Piezostack (Stack1) durchgeführt, der in einen Metallrahmen eingespannt war. Die mittels einer Feder aufgebrachte Betriebsvorkraft betrug 800 N (Abb. 4.5). Zur weiteren Stabilisierung wurde für einige Messungen der Metallrahmen in einen, am Tisch fest verschraubten, Schraubstock eingespannt.

Sämtliche im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mittels eines zweiten Stacks (Stack2) gleicher Art und selber Zustand verifiziert und auf ihre Reproduzierbarkeit überprüft.



*Abb. 4.5:* Versuchsaufbau mit lose aufliegenden Rahmen und zwei DDI Wegaufnehmern (grüne Pfeile) zur Messung der Auslenkung des Stacks (blauer Pfeil). Die Wegmessung mittels Laservibrometer erfolgte indirekt an der Auslenkung des hinteren DDI (roter Pfeil stellt die Richtung des Laserstrahls dar).

#### 4.2.2 Vergleich der Messgenauigkeit unterschiedlicher Messsysteme

##### *Quasistatische Messungen bis 5 Hz*

Die Aufzeichnung der Messdaten dieser Serie erfolgte, wie oben beschrieben, für die optische Wegmessung mittels eines LeCroy Oszilloskops und für die mechanische Wegmessung wahlweise mittels der EDC 120 bzw. der MGC.

Das Ziel war die Anweichung der mechanischen von der optischen Wegmessung bei Frequenzen bis 5 Hz zu bestimmen. Dazu wurden die jeweils gemessenen Amplitudenhöhen miteinander verglichen und der relative Fehler bezüglich der, in diesem Bereich als exakt betrachteten, optischen Messung bestimmt (Tab. 4.1).

Frequenz [Hz]	Fehler [%] bez. Laservibrometer	
	<i>EDC120</i>	<i>HBM MGC</i>
0,5	0,19	2,21
1	0,07	1,95
5	1,24	1,95

**Tab. 4.1:** Relativer Amplitudenfehler bezüglich der optischen Wegmessung.

Wenn wir zunächst die Messung mittels EDC120 betrachten, fällt neben der exzellenten Übereinstimmung bei 0,5 und bei 1 Hz eine, wenn auch absolut betrachtet unbedeutende, Zunahme des relativen Fehlers auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messsoftware nur ca. 50 Messwerte in der Sekunde aufzeichnen kann und daher bei 5 Hz nur noch 10 Messwerte pro Schwingung zur Verfügung stehen. Daher ist die Messung von höheren Frequenzen mit diesem System nicht möglich.

Die Problematik der Aufzeichnungsrate fällt bei Messungen mit der MGC bei diesen Frequenzen nicht ins Gewicht, weil die dazugehörige Messsoftware bis zu 150 Messungen pro Sekunde aufzeichnen kann. Auffällig ist jedoch der nahezu über alle gemessenen Frequenzen konstante Fehler von ca. 2 %.

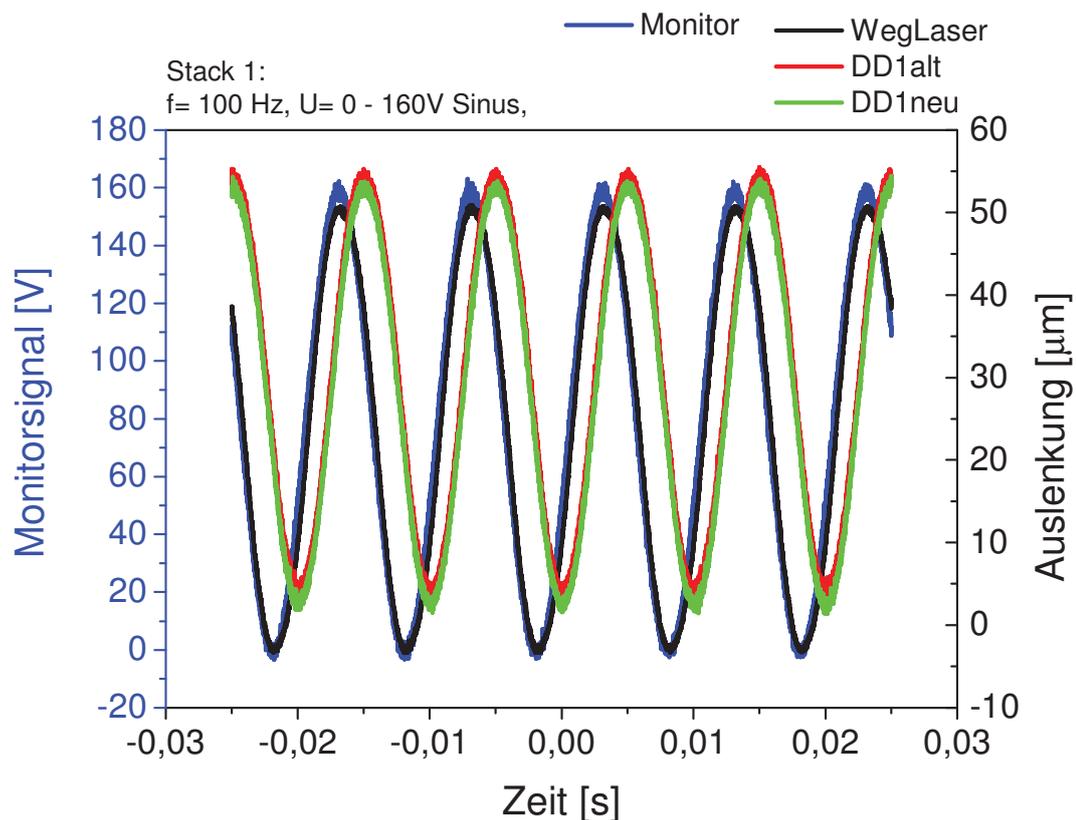
Abschließend sei festgestellt, dass alle drei Messsysteme im Frequenzbereich bis 5 Hz eine hinreichende Genauigkeit liefern, um sie bei zukünftigen Messungen einsetzen zu können.

*Dynamische Messungen bis 150 Hz*

Diese Messserie widmete sich den Grenzen der mechanischen Wegmessung, wobei neben der Bestimmung der maximalen Einsatzfrequenz der DD1 auch die auftretende Phasenverschiebung der einzelnen Signale bezüglich des Monitorsignals bestimmt wurde.

In diesem Fall wurden sämtliche Aufzeichnungen mittels des Oszilloskops durchgeführt, wobei die Messsignale der beiden DD1 (im Folgenden als DD1alt und DD1neu bezeichnet) über die Analogausgänge des MGC in das Oszilloskop eingespeist wurden. Dieser Aufbau war notwendig, da die zu messenden Frequenzen mit der zur Verfügung stehenden Software des MGC nicht ausreichend genau aufgezeichnet werden konnten.

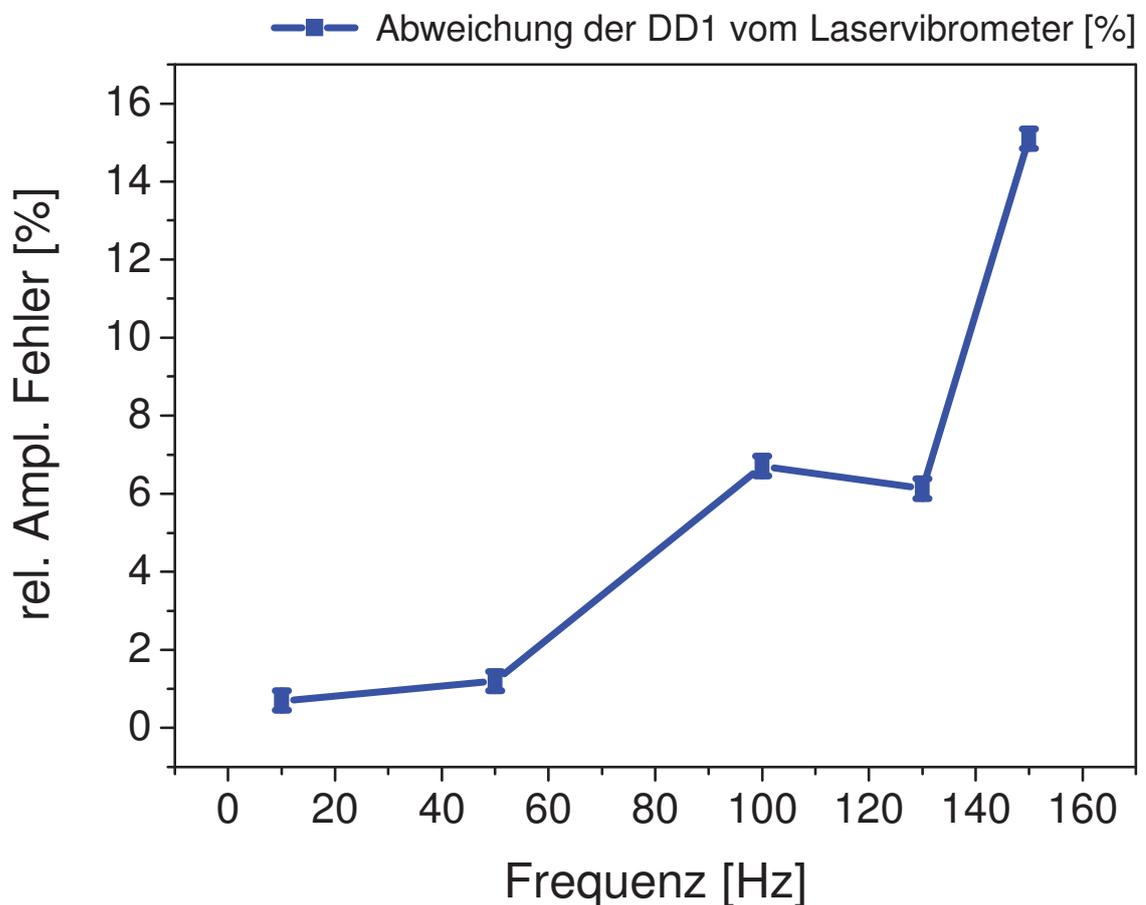
Die Obergrenze für die Messung mit den DD1 wurde aufgrund von Vorversuchen auf 150 Hz festgelegt, weil es bei der Überschreitung dieser Frequenz zu verstärkter Geräuschentwicklung kam und eine Beschädigung der mechanischen Wegaufnehmer nicht ausgeschlossen werden konnte.



**Abb. 4.6** Darstellung der Auslenkungsmessung (optisch und mechanisch) und des Monitorsignals bei 100Hz Die zeitliche Verschieben der beiden DD1 Signale ergibt sich aus der 1,7 ms dauernden Auswertung im MGC Messbrückenverstärker.

Die Auswertung der Messsignale erfolgte für mehrere Frequenzen zwischen 10 und 150 Hz, wobei jeweils die Phasenverschiebung bezüglich des Monitorsignals und die gemessene Amplitudenhöhe der unterschiedlichen Wegaufnehmer betrachtet wurden. Abbildung 4.6 zeigt eine solche Aufzeichnung des Monitorsignals und der verschiedenen Wegsignale bei 100 Hz.

Die Wegmessung mittels Laservibrometer dient bei der Bestimmung der Abweichung der Amplituden als Referenz, da bei diesem Messsystem, im betrachteten Frequenzbereich, frequenzabhängige Messfehler auszuschließen sind. Abbildung 4.7 zeigt die relative Abweichung vom Messwert des Laservibrometers im Vergleich mit dem Mittelwert der beiden mechanischen Wegaufnehmer DD1alt und DD1neu.

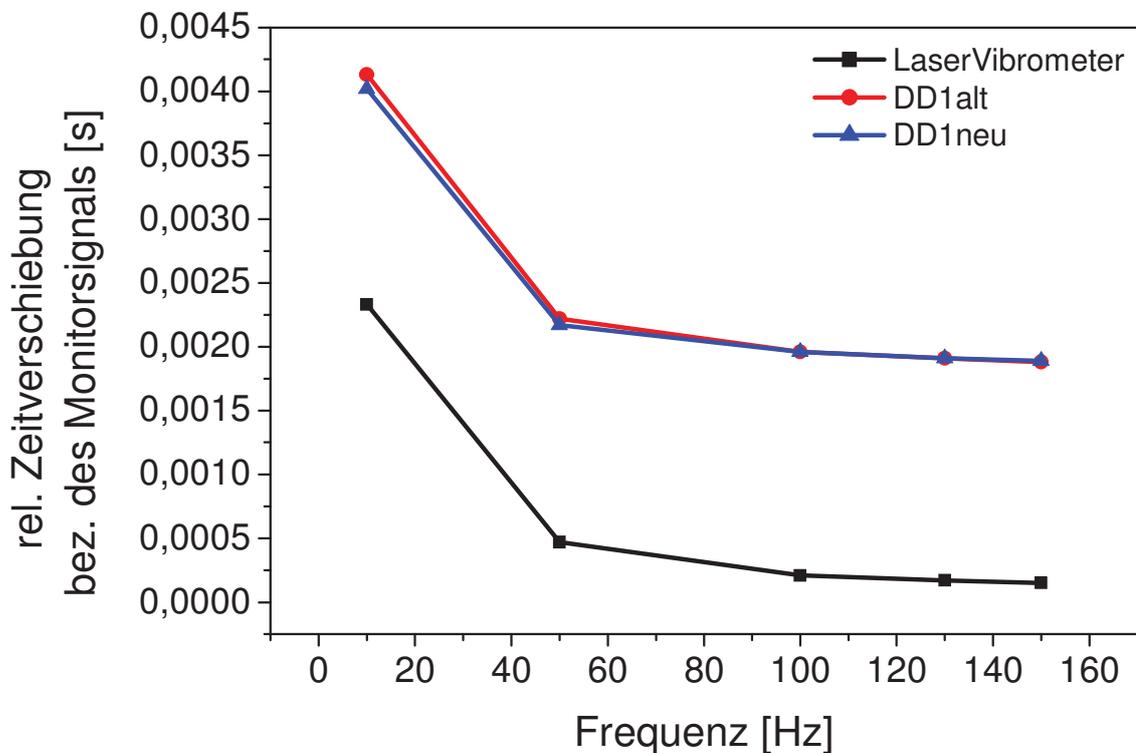


**Abb. 4.7:** Abweichung der mechanischen Wegmessung von der optischen Erfassung bei Frequenzen zwischen 10 und 150 Hz. Bis 50 Hz liegt der Fehler unter zwei Prozent, sodass präzise Messungen bis zu dieser Grenzfrequenz möglich sind. Der bei höheren Frequenzen auftretende etwas seltsam anmutende Kurvenverlauf ist auf diverse Trägheits- und Resonanzeffekte zurückzuführen.

Wie man sieht liegt der Messfehler der mechanischen Wegaufnehmer bis zu 50 Hz unter zwei Prozent. Bei Frequenzen über 50 Hz ist jedoch eine starke Zunahme des Fehlers zu erkennen. Bei noch höheren Frequenzen ergibt sich ein etwas seltsamer Kurvenverlauf, welcher auf diverse Trägheits- und Resonanzeffekte bei der mechanischen Wegmessung zurückzuführen ist.

Die maximale Einsatzfrequenz für das DD1 Wegaufnehmersystem lässt sich somit, in Bezug auf die oben dargestellten Ergebnisse, auf 50 Hz festlegen. Bei höheren Frequenzen ist Wahl eines anderen Wegmesssystems zu empfehlen.

Weiters wurden die gemessenen Phasenverschiebungen der einzelnen Wegaufnehmer analysiert. Abbildung 4.8 zeigt eine Darstellung der absoluten Zeitdifferenz die über die Frequenz aufgetragen ist.

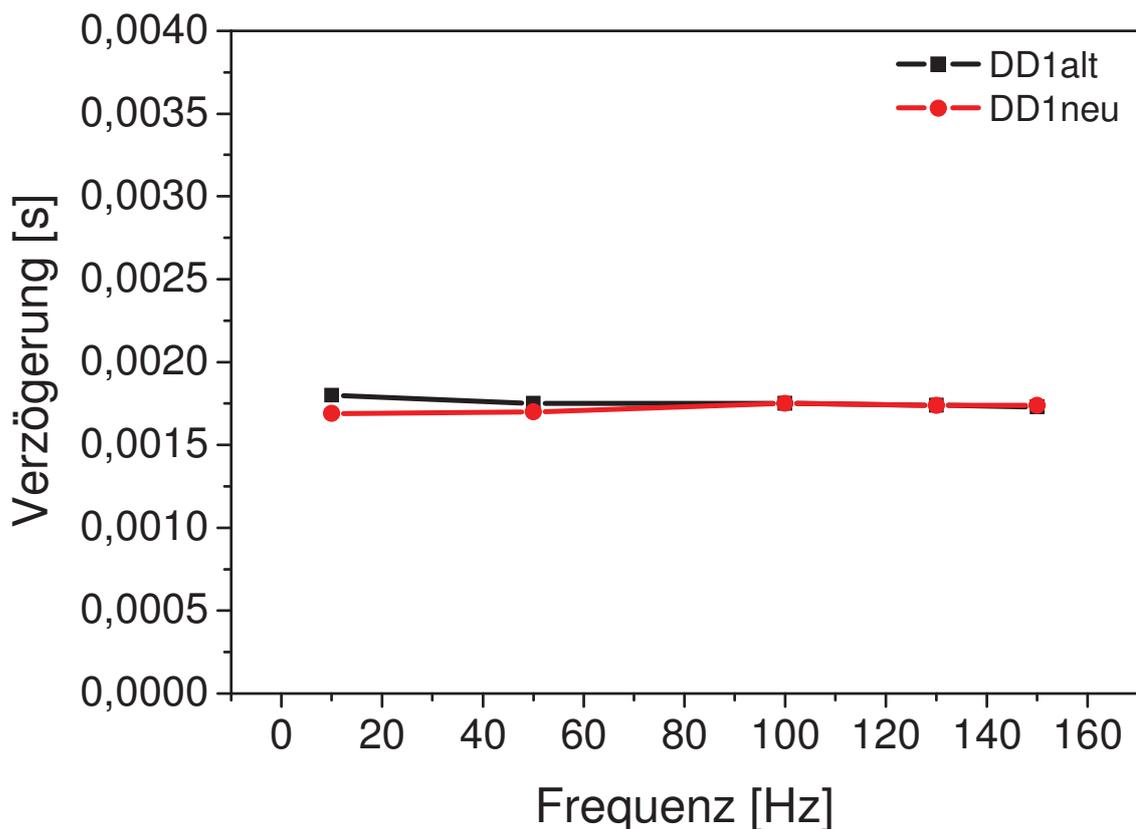


*Abb. 4.8:* Gesamte Zeitverschiebung der einzelnen Signale bezüglich des Monitorsignals in Sekunden. Die zu längeren Zeiten verschoben Signale der mechanischen Wegmessung sind auf den MGC Messbrückenverstärker zurückzuführen.

Betrachten wir zunächst das Signal des Laservibrometers. Dieses Signal kann als Echtzeitmessung betrachtet werden, da laut Beschreibung die Verzögerung durch den Vibrometercontroller nur wenige  $\mu\text{s}$  beträgt, und es für alle hier gemessene Frequenzbereiche, keiner Frequenzabhängigkeit unterliegt. Nun ist in Abbildung 4.8 deutlich eine starke Zunahme des Zeit-Offsets bei kleinen Frequenzen zu beobachten, sowohl beim Signal des Laservibrometers als auch bei den Signalen der beiden DD1. Dieser Verlauf ergibt sich, weil der Stack bei der Ansteuerung eine Phasenverschiebung von  $8^\circ$  zwischen den elektrischen

Signal und der mechanischen Antwort aufweist. Eine mögliche Ursache dafür kann im mechanischen Verhalten des Versuchsaufbaus, auftretenden Resonanzeffekten und Kriechvorgängen, sowie in einer Überlagerung mehrerer Effekte liegen.

Weiters zeigt Abbildung 4.8, dass die zeitliche Differenz zwischen den optisch-, und mechanisch erfassten Phasenverschiebungen nahezu konstant ist. Trägt man nun die zeitliche Verschiebung der mechanischen Wegaufnahme bezüglich des Signals des Laservibrometers auf, so ergibt sich folgende Abbildung 4.9.



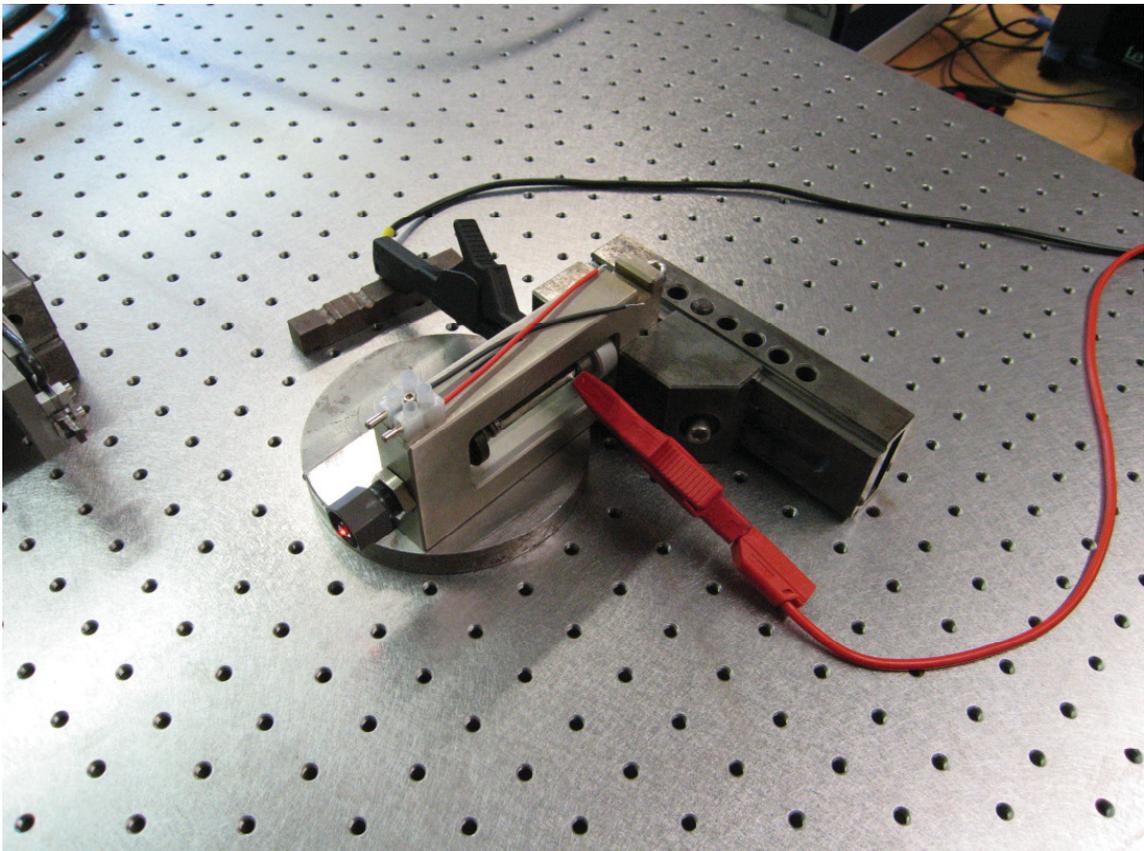
*Abb. 4.9: Zeitliche Verzögerung der beiden DD1- Signale bezüglich der Wegmessung mittels Laservibrometer. Die konstante Zeitverzögerung ist ein Resultat der Signalverarbeitung im MGC Messbrückenverstärker.*

Deutlich erkennt man eine konstante zeitliche Verzögerung der mechanisch aufgenommenen Wegsignale von 1,7 ms. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Wegmessung der DD1 über eine DMS- Vollbrückenschaltung erfolgt, welche über die MGC angesteuert und in ein verwertbares Ausgangssignal umgewandelt werden muss, woraus sich schließlich die oben beobachtet Verzögerung ergibt.

### 4.2.3 Resonanzstudie

Um die Erfassung der Stack- Auslenkung über einen weiten Frequenzbereich zu gewährleisten, ist es notwendig genaue Kenntnisse über das Auftreten von Resonanzerscheinungen zu besitzen. Der Versuchsaufbau musste geringfügig um eine feste Einspannung des Rahmens erweitert werden (Abb. 4.10), da es im Bereich der Resonanzfrequenzen zu starken Vibrationen kommt, und daher ohne eine geeignet Befestigung eine Verschiebung des Rahmens unvermeidlich ist.

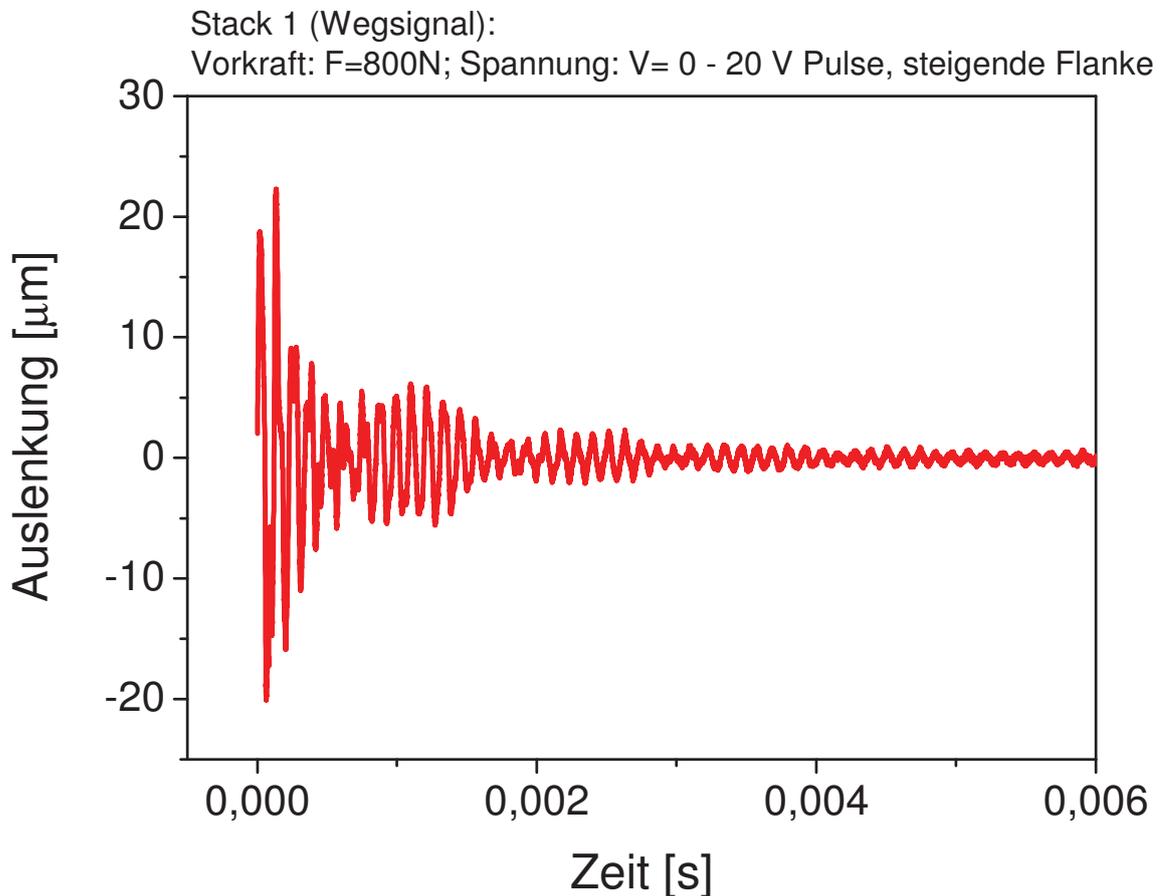
Die Ermittlung der Resonanzfrequenzen erfolgte indirekt über die Bestimmung der Eigenfrequenzen des Schwingungssystems.



*Abb. 4.10: Modifizierter Versuchsaufbau mit Einspannung des Rahmens und rein optischer Wegerfassung. Der leuchtend rote Punkt an der Vorderseite des Rahmens stammt vom Laserstrahl des Vibrometers.*

*Messung der Eigenfrequenz mittels elektrischer Anregung*

Dabei wurde der Stack mittels eines Spannungsimpulses angeregt und das Nachschwingverhalten mittels Laservibrometer und Oszilloskop aufgezeichnet (Abb. 4.11).

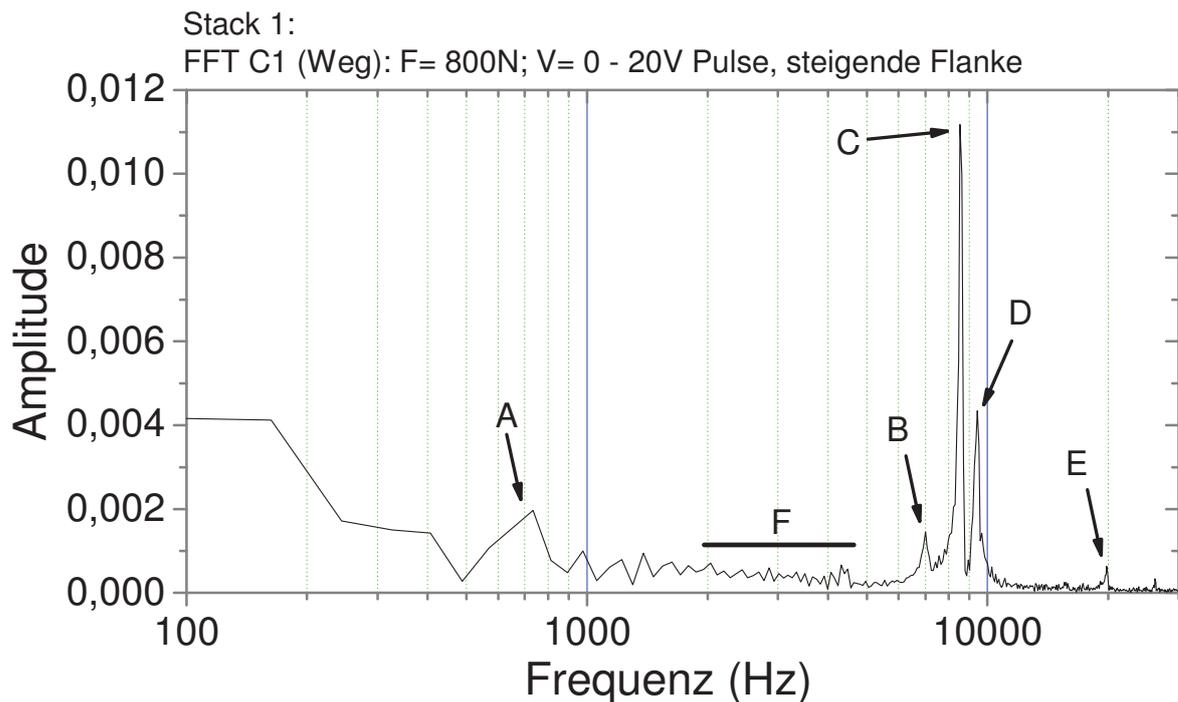


*Abb. 4.11: Nachschwingungssignal zur Bestimmung der Eigenfrequenz nach erfolgter elektrischer Anregung. Es ist deutlich eine gedämpfte Sinusschwingung mit überlagerten Schwebungen zu erkennen.*

Um nun aus dem gemessenen Signal die sich überlagernden Eigenschwingungsfrequenzen zu ermitteln wurde das Verfahren der FFT<sup>8</sup>- Analyse angewendet (Abb. 4.12).

---

<sup>8</sup> Fast Fourier Transformation



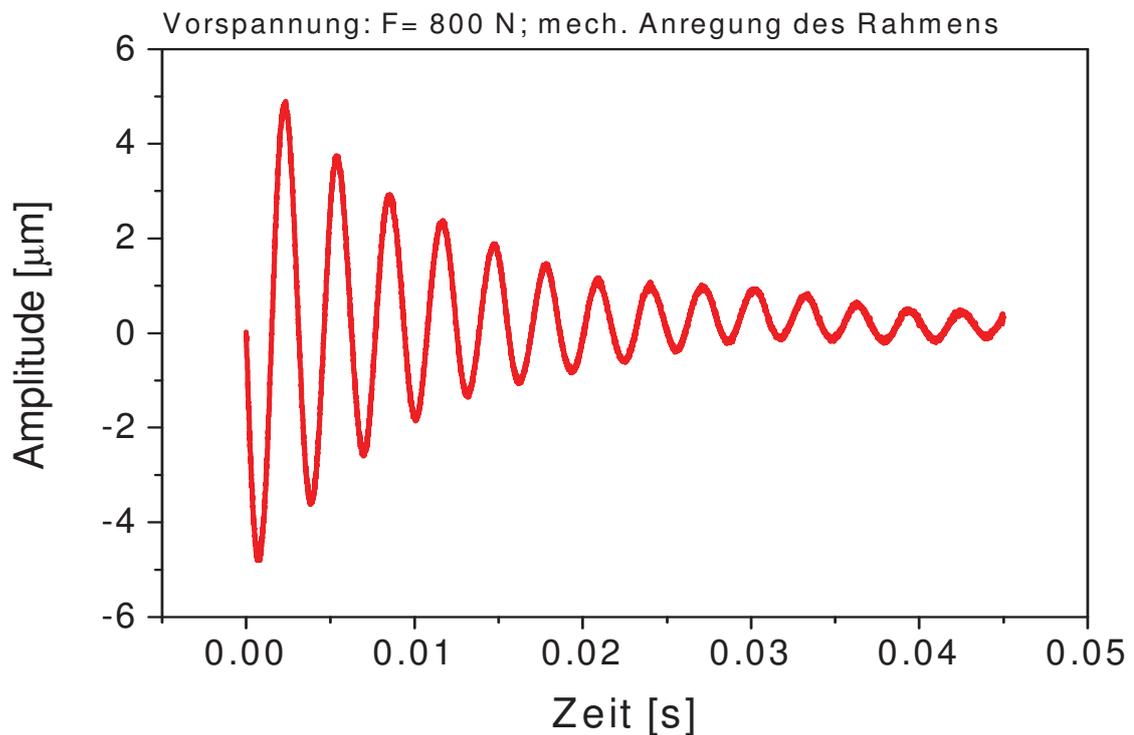
*Abb. 4.12: Fourieranalyse des Nachschwingungssignals aus Abb. 4.11. Die Höhe der Peaks entspricht dem Anteil der entsprechenden Resonanzfrequenz am gesamten Spektrum. Das heißt, je höher die Peaks bei einer Frequenz, desto größer die Störung durch die auftretenden Resonanzeffekte.*

Betrachten wir die Fourieranalyse, so erkennen wir sofort die drei aufeinanderfolgenden Peaks zwischen 7 und 10 kHz (B, C u. D). Die relative Höhe der Peaks ist proportional zum Anteil dieser Frequenzen am Gesamtspektrum. Daraus ist zu schließen, dass in diesem Bereich mit sehr starken Resonanzerscheinungen zu rechnen ist. Im Bereich von 1 bis 5 kHz (F) befinden sich viele kleinere Peaks, sodass auch in diesem Bereich mit eventuellen Resonanzeffekten zu rechnen ist. Zur vollständigen Beurteilung des Spektrums sind auch noch der Peak bei ca. 700 Hz (A) und jener bei 20 kHz (E) zu betrachten. Zur Verifikation wurde der Stack anschließend manuell mit allen Frequenzen zwischen 100 Hz und 20 kHz angesteuert und die Frequenzen bei denen Resonanzeffekte auftraten mit denen, welche die Fourieranalyse ergeben hatte verglichen.

Insgesamt wurde eine ganze Messreihe mit unterschiedlichen Vorspannkraften ( $\pm 10\%$  der normalen Vorspannkraft von 800 N) durchgeführt, um die Auswirkungen auf das Resonanzverhalten zu erforschen. Dabei wurde festgestellt, dass es im unteren Frequenzbereich bis 1000 Hz zu kleinen Verschiebungen des Frequenzspektrums kommt. Auswirkungen auf das restliche Spektrum wurden allerdings nicht festgestellt, woraus zu schließen ist, dass geringe Abweichungen von der vorgeschriebenen Vorkraft zu keinem veränderten Resonanzverhalten führen.

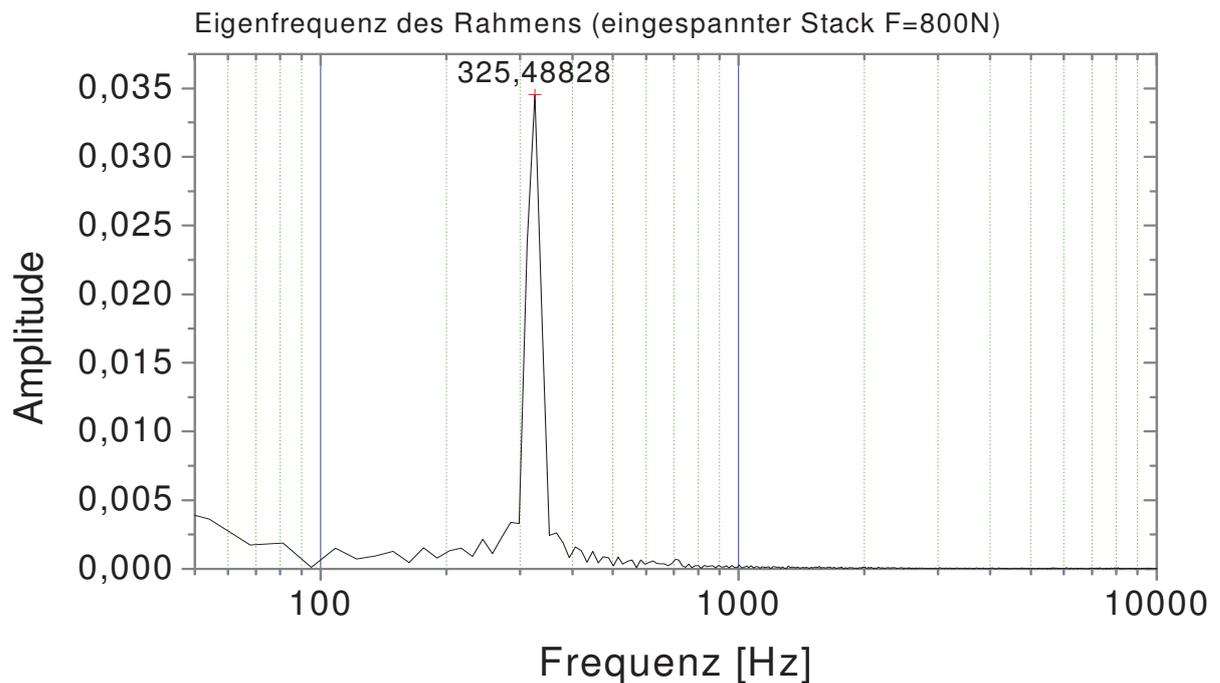
*Bestimmung der Eigenfrequenz des Rahmens mittels mechanischer Anregung*

Für diesen Versuch wurde der Rahmen in aufrechter Lage frei auf den Tisch gestellt. Im Unterschied zu den vorangegangenen Versuchen zielte der Laser allerdings nicht auf die, durch den Stack bewegten Teile des Rahmenaufbaus, sondern auf den starren Stahlrahmen selbst. Die Anregung erfolgte mechanisch durch einen leichten Schlag mit einem Metallstück gegen den Rahmen. Die Schwingung des Rahmens wurde dabei wieder mittels des Laservibrometer aufgezeichnet (Abb. 4.13).



*Abb. 4.13: Nachschwingen des Rahmens nach mechanischer Anregung. Deutlich ist eine gedämpfte Sinusschwingung zu erkennen, die zur Berechnung der Eigenfrequenz des Rahmens verwendet wurde.*

In Abbildung 4.13 ist deutlich die - auch erwartete - gedämpfte Sinusschwingung zu erkennen. Um die Frequenz der Schwingung zu ermitteln wurde ebenfalls wieder eine Fourieranalyse durchgeführt (Abb. 4.14).



*Abb. 4.14: Fourieranalyse der Nachschwingung des Rahmens aus Abb. 4.13. Wie die Kurve in Abb. 4.13 bereits vermuten lässt, besteht das Spektrum nur aus einer einzigen Frequenz (ca. 325 Hz).*

Die in den Bildern 4.13 und 4.14 dargestellten Ergebnisse wurden unter der normalen Vorspannung von 800 N ermittelt. Es wurden aber auch Versuche ohne eingespannten Stack und mit eingespannten Stack aber doppelter Vorspannung (1600 N) durchgeführt. Dies hat zu keiner Änderung der Ergebnisse geführt.

Somit kann festgestellt werden, dass die Eigenfrequenz des starren Rahmens, ohne die Berücksichtigung der beweglichen Element und Federn, bei ca. 325 Hz liegt. Es konnte allerdings keine direkte Auswirkung der Eigenfrequenz des Rahmens auf Resonanzerscheinungen während des Betriebs nachgewiesen werden, da bei der Ansteuerung des Stacks im Frequenzbereich von 300 bis 350 Hz keine Resonanzerscheinungen auftraten.

### *Ergebnisse der Resonanzstudie*

Wie bereits oben festgestellt, können auftretende Resonanzeffekte den Betrieb bzw. die Messungen deutlich erschweren und bisweilen sogar gänzlich unmöglich machen. Somit ist für den Erhalt präziser Messergebnisse eine genaue Kenntnis des Schwingungsverhaltens des Gesamtsystems nötig.

Die oben durchgeführte Studie betrachtete den Frequenzbereich von 0 bis 20 kHz, wobei folgende Erkenntnisse gewonnen wurden:

1. Im Bereich bis 1000 Hz können Messungen, bis auf einen kleinen Bereich bei ca. 700 Hz, relativ problemlos durchgeführt werden.
2. Von 1000 bis ca. 5000 Hz kommt es zu einer Reihe leichter Resonanzerscheinungen, die Messungen zwar deutlich erschweren aber dennoch in gewissen Umfang zulassen.
3. Maximale Resonanz tritt im Bereich von 7 bis 10 kHz auf, daher sind in diesem Bereich keine Messungen möglich.
4. Überschreitet man die 10 kHz Marke, verschwinden die Resonanzeffekte wieder, und es ist bis 20 kHz, wo ebenfalls wieder stärkere Resonanzeffekte auftreten, ein problemloses Durchführen von Messungen möglich.

Abschließend muss noch angemerkt werden, dass die auftretenden Resonanzeffekte relativ unabhängig von den, dem System auferlegten, Randbedingungen sind. Sind Messungen in sensiblen Frequenzbereichen notwendig, sind größere Veränderungen des gesamten Schwingungssystems erforderlich. Geeignete Maßnahmen wären zum Beispiel die Verwendung einer Vorspannfeder mit geänderter Federkonstante oder eine Veränderung der beweglichen Massen.

### 4.3 Messungen elektromechanischer Größen eines Piezo- Stacks

Bei den folgenden Messungen wurde, wie bei den vorherigen Messungen, ein Standard- Stack der Firma EPCOS verwendet, um das Auslenkungsverhalten des Stacks sowie die Stabilität der Prüfmaschine während des Versuches zu ermitteln. Weiters wurde der Versuch unternommen, mit Hilfe des Laservibrometers eventuell entstehende Risse im Stack zu detektieren.

#### 4.3.1 Messung der Querverschiebung und Verkipfung des Stempels

In diesem Versuch wurden die Quersteifigkeit und die Planparallelität des Ober- und Unterstempels der Prüfmaschine untersucht. Dazu wurde der Stack zwischen die beiden Druckstempel eingespannt und mit einer Vorkraft von 800 N belastet und anschließend mit einer Sinusspannung von 0 bis 160 V angesteuert. Die Kraftmessung erfolgte über eine 10 kN Kraftmessdose, die direkt unter dem Unterstempel angebracht war. Um auch die Verkipfung des Oberstempels relativ zum Unterstempel zu ermitteln erfolgte die Wegmessung mit Hilfe dreier DD1, welche im 120° Winkel die Abstandsänderung zwischen Ober- und Unterstempel während des Betriebs maßen. Zusätzlich wurde noch mit dem Laservibrometer die absolute Querverschiebung in der Mitte des Stacks gemessen (Abb. 4.15).

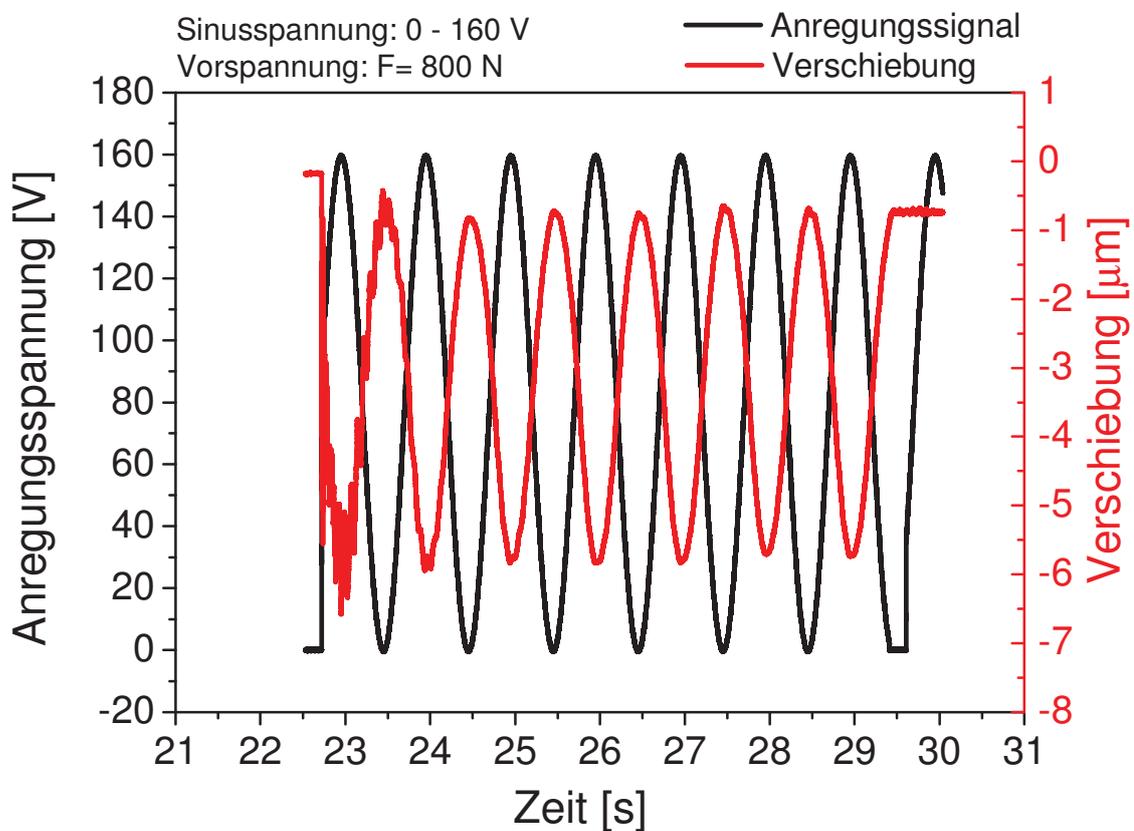


*Abb. 4.15: Versuchsaufbau zur Messung der relativen Verkipfung des Oberstempels und der Querverschiebung des Stacks (roter Pfeil). Im Hintergrund ist auch der Messkopf des Laservibrometers mit dem dazugehörigem Stativ zu erkennen.*

Zur Bestimmung der relativen Verkipfung wurde die Abstandsänderung zwischen Ober- und Unterstempel an den drei um  $120^\circ$  Auflagepunkten der DD1 bei maximaler Last ermittelt und mit Hilfe der Vektoranalysis der Verkipfungswinkel  $\Theta$  der Oberstempelachse bezüglich der Unterstempelachse errechnet.

$$\text{relative Verkipfung: } \Theta = 0,12^\circ = 7,2'$$

Die Querverschiebung unter Last wurde, wie bereits oben erwähnt, mittels Laservibrometer dynamisch bei einer Frequenz von  $\frac{1}{4}$  Hz gemessen und das Ergebnis in Abbildung 4.16 dargestellt.



**Abb. 4.16:** Querverschiebung des Stacks im Abhängigkeit der Anregungsspannung (Sinus: 0 – 160 V). Das gegenläufige Signal der Verschiebung deutet auf eine Verkipfung des Stacks weg vom Messkopf hin. Es ist am Beginn der Aufzeichnung auch eine Verzerrung des Wegsignals durch den Einschaltvorgang zu beobachten, die jedoch nach einer Schwingungsperiode wieder verschwindet.

Da die Anregungsspannung über die Maschinensteifigkeit proportional zur Kraft ist, stellt man eine mit zunehmender Kraft steigende Entfernung des Stacks vom Laservibrometer fest. Diese Verschiebung ist reversibel, da der Stack beim Vermindern der Steuerspannung, und damit auch der Kraft, wieder in seine Ausgangslage zurückkehrt. Die maximale Querverschiebung des Stacks beträgt ca.  $5 \mu\text{m}$ .

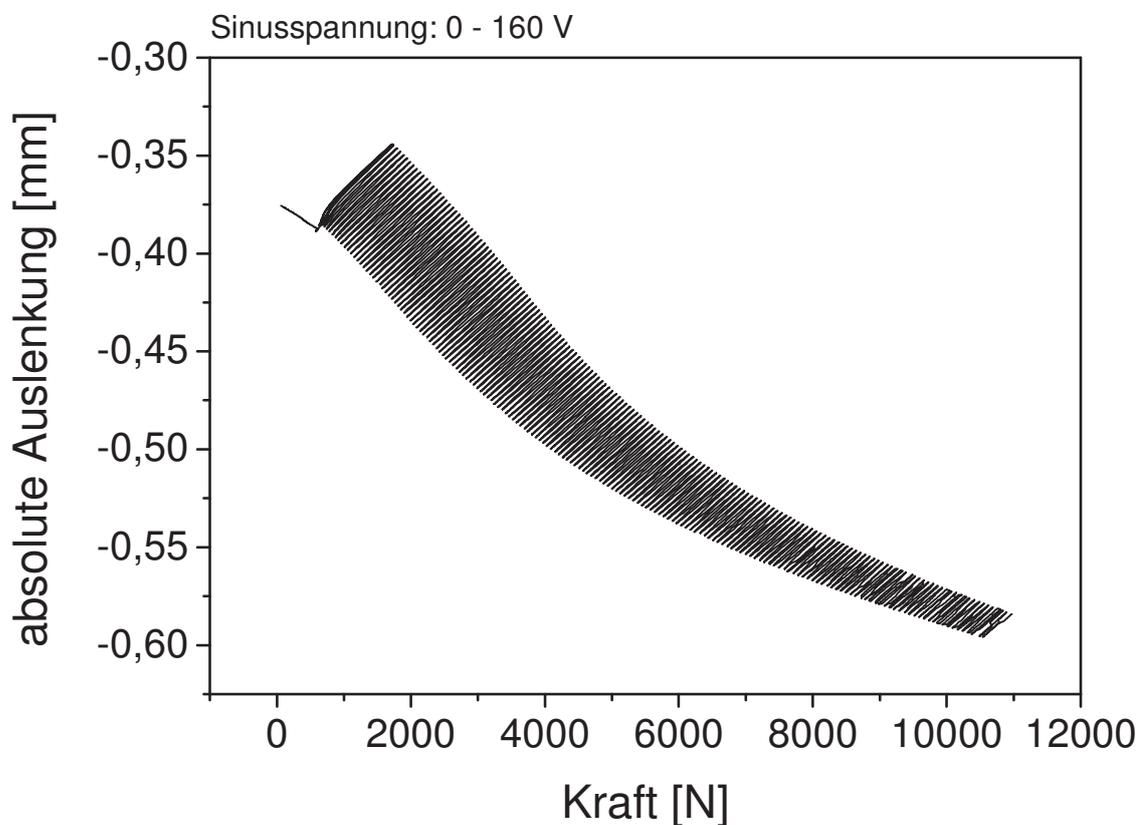
Die Ursache für dieses Verhalten liegt einerseits in der Verkippung des Systems sowie andererseits in einer elastischen Verschiebung des gesamten Traversen- Stempel- Systems. Weiters muss die Querkontraktion bei longitudinaler Dehnung, wie auch eine mögliche nicht exakt zentrische Positionierung des Stacks berücksichtigt werden.

Betrachtet man das Verschiebungssignal so erkennt man nach dem Einschaltvorgang eine überlagerte Schwingung von ca. 10 Hz, die auf das abrupte Einschalten zurückzuführen ist. Da sie bereits nach einer Periode deutlich abklingt hat sie keinen Einfluss auf die Messung. Weiters zu erkennen ist auch eine permanente Verschiebung von etwa  $0,75\ \mu\text{m}$ , die sich nach dem erstmaligen Ansteuern des Stacks ausbildet und auch nach dem abschalten der Erreger- spannung bestehen bleibt.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Eigenschaften der Prüfmaschine bezüglich Parallelität der Stempelflächen und Querverschiebung des Stempel- Traversen- Systems als hervorragend und für die folgenden Versuche als vollkommen ausreichend bezeichnet werden können.

### 4.3.2 Ermittlung der longitudinalen Auslenkung in Abhängigkeit der Vorkraft

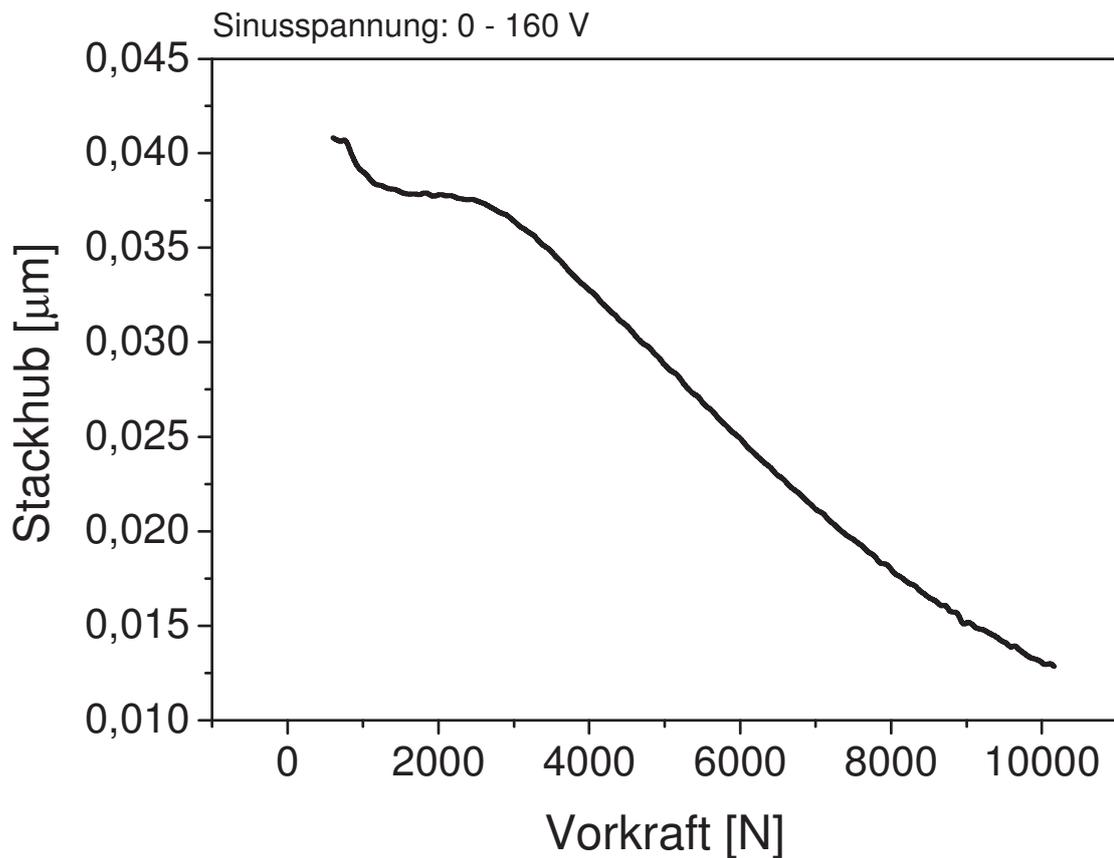
Um die Abhängigkeit der longitudinalen Auslenkung von der Vorkraft zu ermitteln wurde ein bereits gepolter Stack zuerst mit einer Vorkraft von 500 N belastet. Diese minimale Betriebsvorkraft war nötig um während des Betriebs eine Zerstörung des Bauteils zu verhindern. Anschließend wurde der Stack mit einer Sinusspannung von 0 bis 160 V angesteuert und die Vorkraft sukzessive erhöht. Die Wegmessung erfolgte dabei ähnlich wie im Versuchsaufbau vorher, jedoch wurde die exakte Auslenkung aus dem Mittelwert der drei DD1 errechnet, wodurch einer Beeinflussung der Messung durch die Verkippung des Stempels entgegengewirkt wurde (Abb. 4.17).



*Abb. 4.17: Absolute Auslenkung des Stacks bei einer kontinuierlichen Erhöhung der Vorkraft. Die elektrische Anregung des Stacks (Sinusspannung: 0 bis 160 V) beginnt erst bei einer Vorkraft von 500 N, um das Bauteil unter Druck zu halten und damit nicht zu zerstören.*

Mit steigender Kraft ist eine deutliche Verminderung des Hubs sowie eine Stauchung des Stacks zu erkennen. Die Form der Kurve ist einerseits auf das nichtlineare Dehnungsverhalten des Stacks zurückzuführen, andererseits drückt der Stack während des Betriebs gegen die Prüfmaschine, welche ebenfalls eine stark nichtlineare Steifigkeit aufweist.

Während dieses Versuchs wurde die Kraft bis auf ca. 11 kN erhöht. Größere Kräfte waren aufgrund der Belastbarkeit des Prüfrahmens nicht realisierbar. Es war daher nicht möglich die tatsächliche Blockierkraft zu ermitteln bei welcher die Auslenkung des Stacks bei voller Betriebsspannung Null wird. In Abbildung 4.18 ist der Stack- Hub in Abhängigkeit der aufgetragenen Vorkraft aufgetragen, wobei der Hub aus der Differenz der relativen Maxima und Minima der gesamten Auslenkung (Abb. 4.17) berechnet wurde.



**Abb. 4.18:** Abhängigkeit des Stack- Hubs (Sinusspannung: 0 bis 160 V) von der beaufschlagten Vorkraft. Mit steigender Kraft ist eine deutliche Verminderung des Hubs zu erkennen. Die Form der Kurve ist dabei durch das nichtlineare Dehnungsverhalten des Stacks und durch das stark nichtlineare Steifigkeitsverhalten der Prüfmaschine bedingt.

### 4.3.3 Erfassung der Rissbildung im Stack mittels des Laservibrometers

Es wurde der Versuch unternommen, die Entstehung von Rissen im Stack, speziell während der Polung, mittels des Laservibrometers zu detektieren. Die Ursache für die Entstehung dieser Risse liegt im Polungsvorgang selbst, weil sich dabei die Aktivzone in Richtung der Längsachse ausdehnt und so ein kompliziertes Zugspannungsfeld in die Isozone induziert. Dieses kann Risse verursachen. Die Überlegung ging nun dahin, dass die durch das Risswachstum entstehenden Schwingungen sich rasch über den ganzen Stack ausbreiten und schließlich mit dem Laservibrometer erfasst werden können. Es wäre so möglich den Zeitpunkt zu ermitteln, wann Risse während des Polungsvorganges entstehen.

Es war allerdings nicht möglich die schwachen Schwingungen im Wegsignal oder Geschwindigkeitssignal zu erkennen, obwohl bis zu 50000 Messpunkte pro Sekunde aufgezeichnet wurden. Der Grund dafür lag am Grundrauschen des Signals, von dem vor allem die Geschwindigkeitsmessung betroffen war.

Eine Möglichkeit, die Rissentstehung dennoch zu detektieren, liegt in der Verwendung eines Ultraschallmikrophons, welches sämtliche Geräusche im Stack erfasst. Zum Zeitpunkt der Messungen stand jedoch kein Ultraschall Messgerät zur Verfügung, sodass im Folgenden nur ein kurzer Ausblick über diese Möglichkeit der Rissdetektion gegeben wird.

Die Problematik bei Messungen mittels eines Ultraschallmikrophons liegt darin, dass keine berührungslose Messung möglich ist, und somit ein Weg gefunden werden muss, um das Mikrophon an den mit bis zu 160 V angesteuerten Stack zu befestigen, ohne dass dieses bei der Messung Schaden nimmt. Weiters verursachen, aufgrund der hohen Empfindlichkeit dieses Messsystems, eventuell auftretende Störgeräusche ernstzunehmende Probleme. Ein Lösungsansatz ist die Messung mittels Ultraschallmikrophon nicht direkt am Stack durchzuführen, sondern am Ober- oder Unterstempel. Dadurch können die vom Stack verursachten Schwingungen indirekt – ohne Berührung des Mikrophons – aufgezeichnet werden.

## **5. Simulation der Polung eines Vielschichtaktors mittels der Finiten Elementen Methode**

Die komplexen Problemstellungen der verschiedensten Disziplinen lassen sich oft nicht durch analytische, exakte mathematische Modelle erfassen bzw. berechnen. Daher muss bei derartigen Problemen auf numerische Näherungsverfahren wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) zurückgegriffen werden. Dabei wird das zu berechnende Gebiet in endlich viele Elemente unterteilt, auf welche Ansatzfunktionen und Randbedingungen definiert werden. So ist es möglich ein lösbares mathematisches Gleichungssystem auf Basis partieller Differentialgleichungen zu erstellen, die schließlich mit Hilfe numerischer Verfahren gelöst werden. Die Genauigkeit der Lösung hängt von verschiedenen Parametern (Größe der Elemente, Anzahl der Knoten pro Element bzw. Ordnung der Ansatzfunktionen) ab, die im Vorfeld definiert werden müssen. Es muss aber stets beachtet werden, dass ein Modell immer nur ein idealisiertes Abbild der Wirklichkeit darstellt. Die erhaltenen Resultate sind daher immer in Bezug auf ihre allgemeine Gültigkeit kritisch zu betrachten.

Konkret widmet sich dieses Kapitel der Erstellung eines Modells zur Polungssimulation eines piezoelektrischen Vielschichtaktors. Es soll dabei sowohl das piezoelektrische als auch das ferroelektrische Verhalten des Materials in Abhängigkeit der angelegten Feldstärke beschrieben werden. Die Simulation des nichtlinearen ferroelektrischen Verhaltens erfolgt dabei indirekt über eine Temperaturerhöhung der entsprechenden Bereiche unter der Voraussetzung einer orthotropen Wärmedehnung. Damit kann die remanente Dehnung beschrieben werden, die Ladungsmenge durch Polarisation wird jedoch nicht korrekt erfasst, diese entspricht nur dem linearen Anteil ohne Polungseffekt. Eine Berücksichtigung des ferroelastischen Verhaltens aufgrund der auftretenden mechanischen Spannungen erfolgt nicht.

## 5.1 Polungsvorgang und Modellentwicklung

### 5.1.1 Polung eines Piezostacks

Das Polen eines Stacks erfolgt durch das Anlegen einer Spannung an den Seitenelektroden, wodurch ein elektrisches Feld in der Aktivzone des Stacks aufgebaut wird (Abb. 5.1). Erhöht man nun die Spannung, so kommt es ab dem Überschreiten der Koerzitivfeldstärke zum Ausrichten der Domänen durch das elektrische Feld (siehe Kap. 2.3.1). Die Dehnung, die der Stack dabei erfährt, setzt sich aus einem remanenten ferroelektrischen und einen nicht remanenten piezoelektrischen Anteil zusammen, wobei ersterer den größeren Beitrag zur Gesamtdehnung liefert. Die Ausrichtung der Domänen erfolgt ausschließlich in den Bereichen, in welchen das dafür notwendige elektrische Feld vorhanden ist. Dies ist natürlich in der Aktivzone und in kleinen Teilen des Übergangs zur Isozone der Fall. Die restlichen Teile der Isozone bleiben ungepolt und erfahren durch die Stackdehnung eine reine elastische Verzerrung. Dadurch kommt es zur Ausbildung eines Zugspannungsfeldes innerhalb der Isozone.

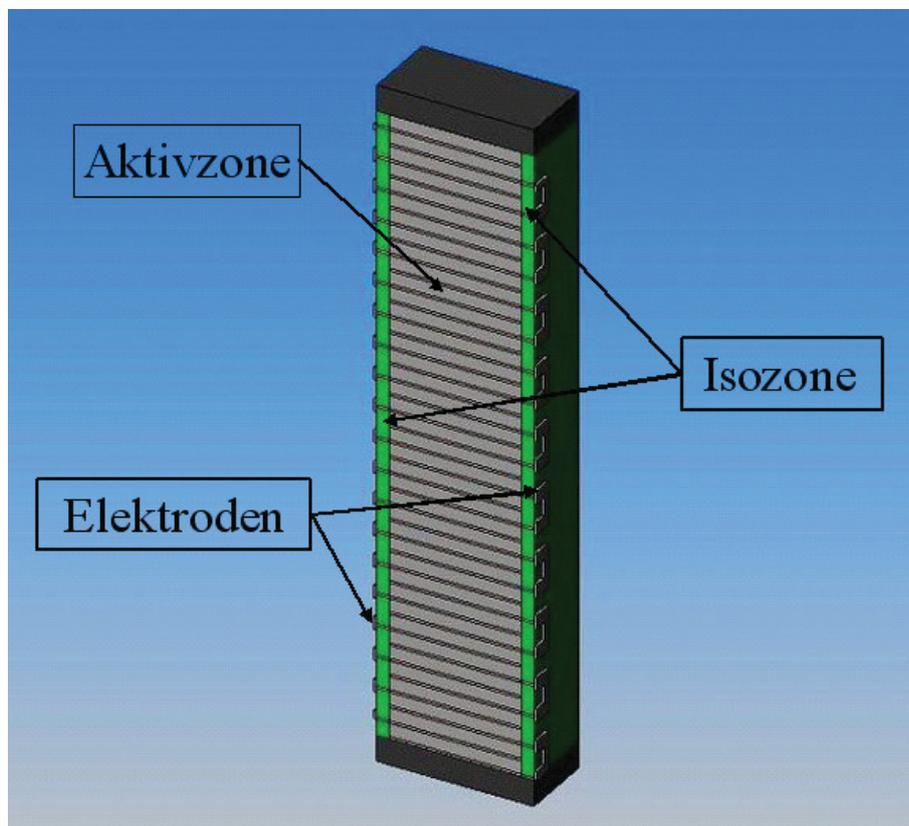


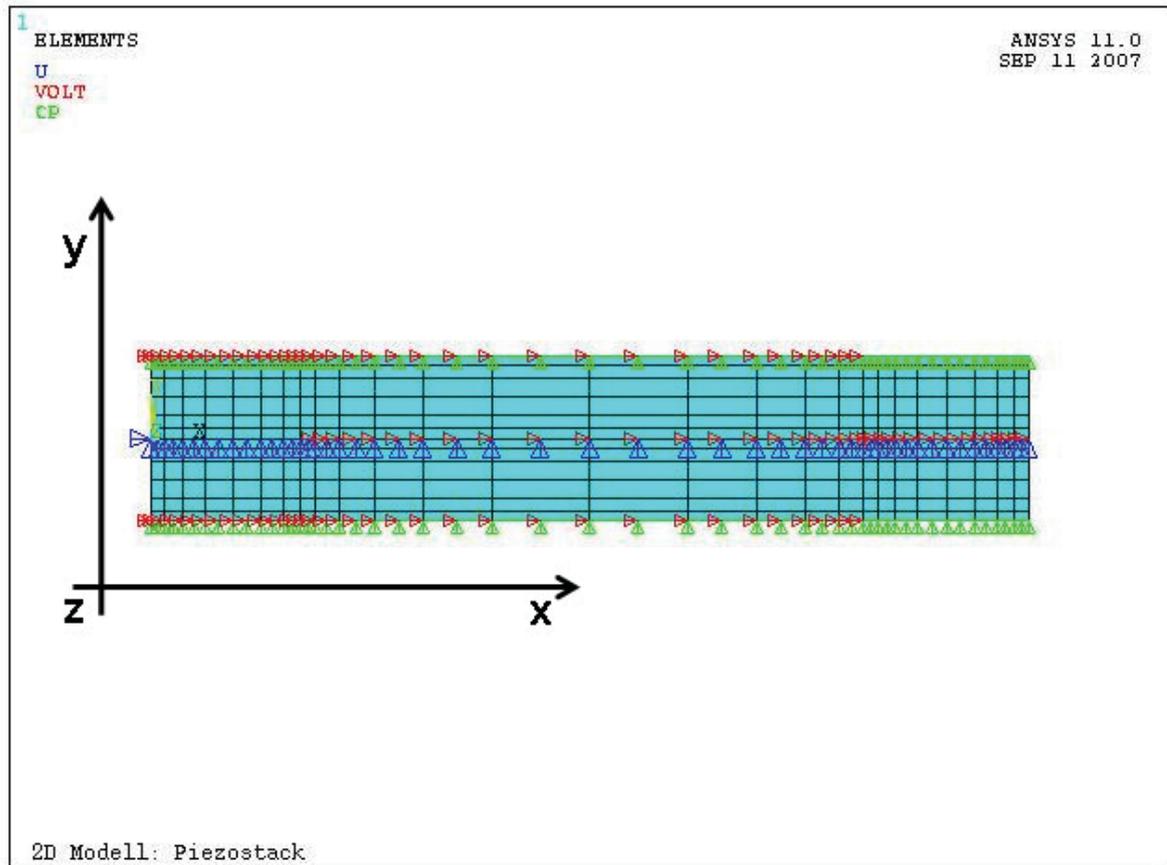
Abb. 5.1: Schematische Darstellung eines Piezostacks mit eingezeichneter Aktiv- und Isozone.

Das Ziel ist nun ein geeignetes Modell zu entwickeln, welches diesen Vorgang möglichst genau beschreibt, um konkrete Aussagen bezüglich der auftretenden Spannungen und Dehnungen im Stack machen zu können. Dazu wurde das kommerzielle FE- Paket ANSYS Version 11.0 verwendet. Die so ermittelten Ergebnisse sollen in weiterer Folge auch dazu verwendet werden, die Rissentstehung während der Polung besser zu verstehen.

### **5.1.2 Modellentwicklung**

Aufgrund des periodischen Aufbaus eines Stacks ist es lediglich notwendig, eine Schicht zu modellieren, um das Verhalten des gesamten Bauteils simulieren zu können. Es ist allerdings zu beachten, dass mit diesem Modell keine Randeffekte an den Enden des Stacks berücksichtigt werden, und es daher nur einen unendlich langen Stack korrekt beschreibt.

Das zweidimensionale Modell stellt einen Schnitt aus der vertikalen Symmetrieebene des Stacks dar, wobei in dieser Arbeit aufgrund der besseren Visualisierung zwei Schichten modelliert wurden. Die drei Elektroden, welche die Schichten begrenzen sind nur durch Knotenpunkte gleichen Potentials simuliert und stellen daher kein eigenes Material dar. Da das Modell nur ein Ausschnitt aus einem periodisch aufgebauten Stack ist, muss zwischen den Schichten jeweils eine horizontale Symmetriegerade ( $x$ - Richtung) als zwingende Randbedingung eingeführt werden, die sich sowohl auf mechanische wie auch elektrische Größen bezieht. Abbildung 5.2 zeigt schematisch das FE- Modell mit den aufgebrachten elektrischen und mechanischen Randbedingungen. Zur besseren Übersichtlichkeit ist die Schichtdicke und die Dicke der Isozone um den Faktor 10 vergrößert dargestellt sowie ein sehr grobmaschiges Netz verwendet worden.



*Abb. 5.2: Schematische Darstellung des 2D FE- Modells mit eingezeichneten elektrischen und mechanischen Randbedingungen der einzelnen Knoten. Die longitudinale Dehnung erfolgt in Richtung der y- Achse.*  
*U: Einschränkung der Verschiebung in x- bzw. y- Richtung*  
*VOLT: Spannung am jeweiligen Knoten*  
*CP: Kopplung der Knotenverschiebung in y- Richtung*

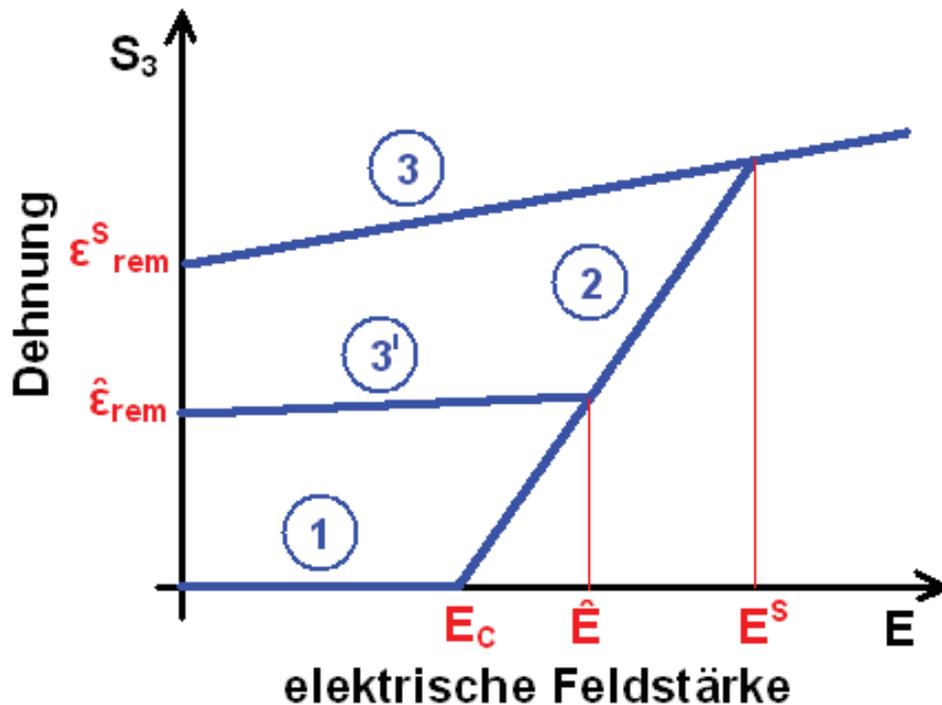
Sämtliche Knoten entlang der Mittellinie (x- Achse) sind bezüglich ihrer Verschiebung in y- Richtung eingeschränkt. Der Knoten ganz links im Koordinatenursprung ist in beide Richtungen festgehalten. Dies ist notwendig um einerseits die Spiegelsymmetrie bezüglich der x- Achse zu gewährleisten sowie auch eine Verschiebung des gesamten Bauteils entlang der x- Achse zu unterbinden. Um einer unzulässigen Verwölbung der unteren und oberen Randlinie entgegenzuwirken wurden die Knoten der jeweiligen Randlinie in ihrer y- Verschiebung gekoppelt. Die in Abbildung 5.2 rot dargestellte Spannungsbeaufschlagung der Knoten, welche die Elektroden simulieren soll, ist so definiert, dass die obere und untere Elektrode ständig auf Nullpotential liegt und nur die mittlere Elektrode entsprechend des Polungsvorgangs eine schrittweise Spannungserhöhung bis hin zur festgesetzten Maximalspannung erfährt.

Da es sich bei diesem 2D- Modell um einen Schnitt aus der Mitte eines Stacks handelt, muss ein ebener Verzerrungszustand bezüglich der x,y- Ebene als Grundlage der Berechnung festgesetzt werden.

Den während des Polungsvorganges auftretenden Dehnungen liegen, wie bereits oben erwähnt, zwei Effekte zugrunde, der lineare piezoelektrische und der nichtlineare ferroelektrische Effekt. Bei der Simulation der piezoelektrischen Dehnung kann auf die ANSYS interne „Coupled- Field Analyse“ zurückgegriffen werden um die auftretenden Dehnungen zu berechnen. Das grundlegende Problem dabei ist allerdings, dass dieser piezoelektrische Effekt bereits gepoltes Material voraussetzt, somit wird dieser jeweils nur in bereits gepolten Bereichen des Stacks wirksam bzw. ist auch vom entsprechenden Polungsgrad des Bereiches abhängig. Diese Abhängigkeit wurde durch eine lineare Skalierung der piezoelektrischen, dielektrischen und mechanischen Konstanten entsprechend des errechneten Polarisationsgrades für jedes Element einzeln realisiert. Der Polarisationsgrad ist immer direkt proportional zum bis zu diesem Zeitpunkt gewirkten maximalen elektrischen Feld. Gleichzeitig wird, um die remanente Dehnung zu simulieren, den Elementen entsprechend ihres Polarisationsgrades eine Temperatur zwischen null und eins zugewiesen. Die Temperatur entspricht in diesem Modellansatz somit dem Polungsgrad, dem auch eine remanente Dehnung zugeordnet wird, was über eine anisotrope Wärmedehnung realisiert wird.

Ausgangspunkt für die Simulation des Polungsprozesses ist der isotrope, ungepolte Zustand. Beim kontinuierlichen Erhöhen der elektrischen Spannung bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke  $E_C$  tritt weder eine piezoelektrische noch ferroelektrische Dehnung auf (Abb. 5.3: Bereich 1). Sobald die kritische Feldstärke überschritten wird, kommt es zur Polarisation des Elements und somit zu einer Dehnung aufgrund des linearen Piezoeffekts. Diese überlagert sich mit der, durch eine Temperaturerhöhung simulierte, ferroelektrischen Dehnung (Abb. 5.3: Bereich 2). Ein plötzliches, starkes Ansteigen der Dehnung ist die unmittelbare Folge, welche so lange andauert, bis entweder die Sättigungsfeldstärke  $E_S$  oder die maximal, während der Polung auftretende, Feldstärke  $\hat{E}$  erreicht ist. Ist  $E_S$  erreicht tritt nur noch der lineare Piezoeffekt auf. Trotz des weiter ansteigenden elektrischen Feldes, kommt es nun nur noch zu einem geringen, linearen Anstieg der Dehnung. Wird anschließend das äußere Feld abgeschaltet, so kommt es zu einer Kontraktion des Elements entsprechend der vorgegeben piezoelektrischen Konstanten, bis schließlich bei  $E$  gleich Null nur noch die remanente Dehnung bei vollständiger Polung  $\varepsilon_{rem}^S$  vorhanden ist (Abb. 5.3: Bereich 3). Wird hingegen die Sättigungsfeldstärke nicht erreicht, bevor der Polungsvorgang beendet ist, so ist durch die nicht vollständig durchgeführte Polung der wirkende Piezoeffekt schwächer ausgeprägt als bei vollständiger Polung. Dies hat zur Folge, dass bei abnehmendem elektrischen Feld die longitudinale Kontraktion  $S_3$  deutlich geringer ausfällt, als bei vollständig gepolten Elementen (Abb. 5.3: Bereich 3').

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass dieses Modell die ferroelastischen Eigenschaften des Materials und die damit verbundene, durch Eigenspannung verursachte Depolarisation nicht berücksichtigt. Der maximal erreichte Polungszustand im jeweiligen Element bleibt somit auch nach Abschalten des elektrischen Feldes erhalten.



**Abb. 5.3:** Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen longitudinaler Dehnung und elektrischer Feldstärke im Modell.

**1:** Keine Dehnung bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke

**2:** Steiler Anstieg durch Überlagerung der piezoelektrischen und ferroelektrischen Dehnungsanteile

**3:** Lineares Dehnungsverhalten durch reinen piezoelektrischen Effekt bei voll gepoltem Material

**3':** Schächer ausgeprägter piezoelektrischer Effekt durch unvollständige Dehnung

Auf dieser Basis wurde ein Programmcode für die Simulationssoftware ANSYS entwickelt, der genau diese Berechnung für jedes Element einzeln durchführt. Eine Simulation des Polungsvorganges, sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der remanenten Dehnung wird dadurch möglich.

## 5.2 Beschreibung des Programmcodes

Im folgenden Abschnitt wird der zur Simulation der Polung verwendete Programmcode beschrieben. Dabei sollen die Komplexität des Prozesses und die damit verbundenen Probleme bei der Simulation, sowie auch die Gültigkeitsgrenzen des Modells veranschaulicht werden.

### 5.2.1 Parameterdefinition

Sämtliche, im Folgenden angeführten Parameter können im Programmkopf frei definiert werden und dienen der Steuerung der Simulation.

```

20 ! Bauteilgeometrie [m]:
21 breite= 0.008000           ! Stackbreite
22 hoehe= 0.000075          ! Schichtdicke
23 iso= 0.000400           ! Breite der Isozone
24
25 ! Vernetzungsparameter:
26 ny_div=6                  ! Anzahl der Elemente in y- Richtung
27 nx_divakt=15              ! Anzahl der Elemente in x- Richtung (Aktivzone)
28 nx_diviso=10             ! Anzahl der Elemente in x- Richtung (Isozone)
29 fconc=3                   ! Faktor für Netzverfeinerung in d. Randbereichen
30
31 ! Elementtyp:      0 plane13           ! lineares 4-Knoten Element
32 !                  1 plane223        ! quadratisches 8-Knoten Element
33 f_elemtype=1          ! Auswahl des Elementtyps
34
35 ! Spannung an den Elektroden zu Beginn [V]:
36 u1=0                   ! oben, unten
37 u2=0                   ! mitte
38
39 u_max=200              ! Maximaler Spannungswert (mitte)
40
41 ! Koerzitivfeldstaerke [V/m:
42 ec=1.1E6               ! Koerzitivfeldstärke
43 es=2E6                  ! Sättigungsfeldstärke
44
45 ! Anzahl der zu berechnenden Polarisationschritte:
46 m_ges=4
47

```

```
48 ! Anzahl der Polarisationsstufen:
49 npiezomat=200                    ! Anzahl der Material- Parametersätze
50
51 ! Anzahl der Iterationsschritte fuer das EKS- drehen
52 niter=10                        ! Anzahl der Iterationsschritte (EKS drehen)
53
54 ! remanente Dehnung (JA=1,NEIN=0)
55 f_remD=1                        ! Berechnung mit oder ohne remanente Dehnung
```

Die Bauteilgeometrie wurde entsprechend den realen Gegebenheiten im Stack festgesetzt. Bei der Definition der Vernetzungsparameter ist besonders auf ein hinreichend feinmaschiges Netz im Übergangsbereich von der Aktiv- zur Isozone zu achten. Dieser Bereich ist bezüglich der Rissbildung besonders sensibel, da sich an der Elektroden Spitze eine Spannungssingularität ausbildet. Weiteres sind Vernetzungsparameter so zu wählen, dass die dabei entstehenden Elemente in ihrer Form nicht die erlaubten Grenzen verletzen (aspect ratio calculation 1:20).

Für den zu verwendenden Elementtyp kann sowohl ein lineares 4- Knoten Element (plane13) als auch, ein genaueres aber rechenintensiveres quadratisches Element (plane223) mit acht Integrationspunkten ausgewählt werden. Als Freiheitsgrade stehen für beide Elementtypen die Spannung, sowie die Verschiebungen in x- und y- Richtung zur Verfügung. Gleichzeitig ist auch eine Temperaturbeaufschlagung mittels sogenannter Bodyloads möglich, die zwar keinen zusätzlichen Freiheitsgrad darstellen, aber Wärmedehnungen im Material simulieren können. Diese Eigenschaft des Bodyload- Konzeptes wird im Programm dazu verwendet um die remanente Dehnung zu simulieren.

Bei der Festlegung der elektrischen Randbedingungen sind die Startpotentiale der Außenelektroden  $u1$  und der Mittelelektrode  $u2$  sowie die maximale Polarisationsspannung  $u_{max}$ , die auf die Mittelelektrode bezogen ist, frei zu wählen. Als Standardbedingung für die Berechnungen wurde als Ausgangspotential Null und als maximale Polarisationsspannung 200 V gewählt, was den realen Polungsbedingungen entspricht. Die Koerzitivfeldstärke  $ec$  und die Sättigungsfeldstärke  $es$  sind den Messergebnissen des entsprechenden Bulkmaterials entnommen.

Die Schrittzahl  $m_{ges}$  stellt die Anzahl der Berechnungsschritte vom Startpotential  $u2$  bis zur maximalen Spannung  $u_{max}$ , einschließlich eines abschließenden Berechnungsschrittes bei abgeschaltetem elektrischen Feld dar. Der letzte Schritt dient zur Berechnung der remanenten Dehnung (Dehnung die nach dem Polungsvorgang erhalten bleibt). Weitere Schritte während des Abschaltens sind nicht notwendig, weil hierbei (wie oben beschrieben) nur mehr der lineare piezoelektrische Effekt berechnet wird.

Die Anzahl der Polarisationsstufen  $npiezomat$  beschreibt wie viele Materialparametersätze zwischen ungepolten und gepolten Zustand generiert werden, um später, entsprechend der herrschenden Feldstärke, dem Element zugeordnet zu werden.

Um den piezoelektrischen Effekt in einem Element richtig zu simulieren, muss die piezoelektrisch aktive Achse des Elementkoordinatensystems, im Folgenden kurz EKS genannt, parallel zum wirkenden elektrischen Feld sein. Das bedeutet, dass sämtliche EKS, sobald die Koerzitivfeldstärke überschritten wird und ein piezoelektrischer Effekt auftritt, mit ihrer aktiven Achse parallel zum elektrischen Feld gedreht werden müssen. Dabei wird allerdings, aufgrund der dielektrischen Materialeigenschaften, wiederum das elektrische Feld beeinflusst, womit eine neuerliche Berechnung des elektrischen Feldes notwendig wird. Durch die Änderung des Feldes muss schließlich abermals die Ausrichtung des EKS angepasst werden. Um nun eine möglichst exakte Übereinstimmung zwischen dem elektrischen Feldvektor und der piezoelektrisch aktiven Achse des EKS zu erreichen, wird diese Prozedur entsprechend der Anzahl der vorgegebenen Iterationsschritte *niter* wiederholt. Nach mehreren durchgeführten Versuchen haben sich 10 Iterationsschritte als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechendauer herausgestellt.

Wie bereits oben erwähnt, wird der remanente Dehnungsanteil über eine Temperaturbeaufschlagung der entsprechenden Elemente proportional zu ihrem berechneten Polarisationsgrad eingebracht. Der letzte Parameter *f\_rem* lässt dem Anwender die Wahl, ob dieser remanente Dehnungsanteil in der Berechnung berücksichtigt werden soll oder nicht.

### 5.2.2 ANSYS Programmcode

Im Folgenden werden nur die wesentlichen Programmteile herausgegriffen, die für die richtige Wiedergabe des simulierten Polungsvorganges von Bedeutung sind. Der vollständige Programmcode befindet sich inklusive aller verwendeten Macros im Anhang C bzw. auf der beiliegenden CD.

Wie bereits oben erwähnt wurde, werden die einzelnen Materialparametersätze im Vorfeld definiert, um sowohl die elastischen als auch die piezoelektrischen Materialeigenschaften vom ungepolten bis zum gepolten Zustand in einer endlichen Anzahl von Abstufungen zu beschreiben. Dies erfolgt im folgenden Programmteil:

```
81 *USE,'x_piezostandart.mac',1,'y',0,'ortho',0,0
82
83 *DO,imat,1,npiezomat
84   ipiezomat=100+imat
85   skal=1/(npiezomat-1)*(imat-1)
86 *USE,'x_piezostandart.mac',ipiezomat,'y',skal,'ortho',skal,skal
87 *ENDDO
```

Um einen Materialparametersatz zu erstellen wird ein Macro mit der Bezeichnung „x\_piezostandart“ verwendet, das von Prof. Supancic verfasst und von mir an das verwendete Material angepasst wurde. Der Aufruf eines Macros erfolgt wie in Programmzeile 81 dargestellt, wobei nach dem Namen des auszuführenden Macros noch sechs Argumente übergeben werden:

Argument 1:	Materialnummer
Argument 2:	Polarisationsrichtung
Argument 3:	Skalierung der Piezokonstanten
Argument 4:	Typ des elastischen Tensors (isotrop, orthotrop, anisotrop)
Argument 5:	Skalierung der elastischen Konstanten
Argument 6:	Skalierung der dielektrischen Konstanten

Aus diesen sechs Argumenten wird im Macro ein entsprechender Parametersatz berechnet der einem bestimmten Polungszustand entspricht, wobei dafür noch ein zusätzliches Macro mit der Bezeichnung „x\_piezo1.mac“, ebenfalls von Prof. Supancic entwickelt, als Subprogramm ausgeführt wird. Die Piezokonstanten sowie die dielektrischen und elastischen Konstanten für den ungepolten und gepolten Zustand müssen zuvor für das jeweilige Material im Macro eingegeben werden.

Der Materialparametersatz, welcher in Zeile 81 generiert wird, entspricht dem ungepolten Ausgangszustand. Die in der Do- Loop- Schleife (Zeile 83 bis 87) erstellten Parametersätze entsprechen den diskreten Polarisationsstufen bis hin zum vollständig gepolten Material, das die höchste Materialnummer zugewiesen bekommt.

Der nächste entscheidende Programmabschnitt ist die Auswahl des Elementtyps und der passenden Keyoptions (Zeile 92 bis 101).

```
92 *IF,f_lemtype,EQ,0,THEN
93     ET,1,PLANE13,7
94 *ELSEIF,f_lemtype,EQ,1,THEN
95     ET,1,PLANE223,1001
96     KEYOPT,1,1,1001
97     KEYOPT,1,3,2
98 *EISE
99     /COM, Falsche Elementauswahl
100     /EOF
101 *ENDIF
```

Die Auswahl erfolgt über eine IF- Abfrage der Variable *f\_lemtype*. Ist sie “0“ wird der Elementtyp PLANE13, ist sie “1“ wird der Elementtyp PLANE223 verwendet. Die

nachgestellte 7 in Zeile 93 bzw. die Keyoptions in Zeile 96 weisen dem Elementtyp die entsprechenden Freiheitsgrade (VOLT, UX, UY) für diese Problemstellung zu. Bei Verwendung des Typs PLANE223 muss zusätzlich noch der ebene Verzerrungszustand festgelegt werden (Zeile 97). Dies ist beim Elementtyp PLANE13 nicht erforderlich, weil es dort der Standardeinstellung entspricht. Wird ein nicht zulässiger Wert für *f\_lemtype* eingegeben, so wird der Programmablauf abgebrochen (Zeile 98 bis 100).

Anschließend erfolgt die Vernetzung der Geometrie entsprechend der oben vorgegebenen Parameter (Zeile 106 bis 123). Dabei wird durch die gewählte Option „Mapped Mesh“ sichergestellt, dass keine Dreieckselemente gebildet werden, welche durch ihre höhere Steifigkeit die Genauigkeit der Berechnung negativ beeinflussen könnten. Die so erstellten Elemente und Knotenpunkte werden schließlich direkt mit den oben angeführten mechanischen und elektrischen Randbedingungen beaufschlagt (Zeile 128 bis 160).

Durch das Ausführen des Befehls NUMCMP,NODE bzw. ELEM (Zeile 162 und 163) wird sichergestellt, dass die Nummerierung aller Knoten und Elemente durchgehend lückenlos ist. Dies ist für den späteren Programmablauf von entscheidender Bedeutung, weil für die folgenden Do- Loop Schleifen dies eine Grundbedingung darstellt.

In den Zeilen 172 bis 175 wird das nun fertige Modell das erste Mal mit den vorgegebenen Startbedingungen berechnet sowie der erste Zeitschritt mit TIME,1 festgelegt.

Nun folgt das eigentliche Kernstück des Programms, in dem die Drehung der EKS, die Zuordnung der entsprechenden Materialparametersätze bezüglich des wirkenden elektrischen Feldes und Temperaturbeaufschlagung der Elemente für die Simulation der remanenten Dehnung durchgeführt werden.

```

180 delta_e=es-ec'           ! Diff.: Koerzitiv- u. Sättigungsfeldstärke
181 delta_u=u_max-u2        ! Diff.: Maximal- und Startpotential der Mittelelektrode
182 *GET,nzahl,ELEM,,COUNT ! Anz. der Elemente bestimmen
183 *DIM,pol_res,ARRAY,nzahl ! Array für die Polarisationszustände der Elemente
184 *DIM,eks_w,ARRAY,nzahl  ! Array für die Drehwinkel der Elemente
185
186 *DO,m,1,m_ges
187
188 *DO,n,1,niter
189
190
191      /POST1
192      *AFUN,DEG
193      ESEL,ALL
194      CSYS,0
195      ETable,sumFeld,EF,SUM
196      ETable,xFeld,EF,X
197      ETable,yFeld,EF,Y
198      FINISH
199      /PREP7

```

```

200      *VGET,eFsum_a,ELEM,1,ETAB,sumFeld
201      *VGET,eFx_a,ELEM,1,ETAB,xFeld
202      *VGET,eFy_a,ELEM,1,ETAB,yFeld
203      *VOPER,thxy_a,eFy_a,ATN2,eFx_a

```

Die in Zeile 180 bis 184 berechneten Variablen werden für spätere Berechnungen benötigt und bleiben während des gesamten Programmdurchlaufes konstant, da sie sich direkt auf die eingegebenen Parameter beziehen. Weiters wird in diesem Abschnitt die Gesamtanzahl der Elemente erfasst (Zeile 182). Es werden zwei eindimensionale Arrays mit der Länge gleich der Anzahl der existierenden Elemente erzeugt, in welche später die jeweiligen, im vorhergehenden Iterationsschritt berechneten Polarisationszustände und Drehwinkel gespeichert werden.

In der weiteren Folge ist der Programmcode aus drei ineinander verschachtelten Do- Loop-Schleifen aufgebaut. Die äußerste Schleife (Zeile 186) zählt die Polarisations Schritte deren Gesamtanzahl durch die Variable *m\_ges* vorgegeben ist. Zeile 188 startet die Schleife, welche die Anzahl der Iterationsschritte durchführt, die als Parameter *niter* vorgegeben werden. Sie sind notwendig, um eine ausreichende Genauigkeit des Endergebnisses zu gewährleisten. Bei jedem Iterationsschritt werden dabei die einzelnen Komponenten (x, y und Summe) des elektrischen Feldes für jedes Element in sogenannten „Element tables“ erneut gespeichert (Zeile 195 bis 197). Die so ermittelten Werte werden anschließend in die Form eines Arrays gebracht (Zeile 200 bis 202), damit sie für nachfolgende Berechnungen, wie den Drehwinkel des EKS (Zeile 203), zur Verfügung stehen.

Sind all diese Aufgaben in der Iterationsschleife erfüllt, kann mit der Zuordnung an die jeweiligen Elemente begonnen werden, wozu die innerste Schleife benutzt wird.

```

205      *DO,i,1,nzahl
206          eF=%eFsum_a(i)%
207          winkel=%thxy_a(i)%
208      *IF,ec,LE,eF,THEN
209
210          *IF,eF,GT,es,THEN
211              eF=es
212          *ENDIF
213
214          pol_e=(npiezomat/delta_e)*(eF-ec)
215          pol_res(i)=(0.8)*pol_res(i)+(0.2)*pol_e
216          eks_w(i)=(0.3)*eks_w(i)+(0.7)*winkel
217
218          CSYS,0
219          LOCAL,10+i,0,0,0,0,(eks_w(i)-90)
220          EMODIF,i,ESYS,10+i
221

```

```

222                temp=pol_res(i)/npiezomat
223
225                *IF,m,LT,m_ges,THEN
226                    *IF,pol_res(i),GT,0,AND,pol_res(i),LE,npiezomat-1,THEN
227                        EMODIF,i,MAT,101+pol_res(i)
228                    *ELSEIF,pol_res(i),GT,npiezomat-1,THEN
229                        EMODIF,i,MAT,100+npiezomat
230                    *ENDIF
231
232                BFE,i,TEMP,1,temp*f_remD.
233                *ENDIF
234
235                *ENDIF
236                *ENDDO

```

Das erste entscheidende Kriterium für die Zuordnung der Elementparameter ist, ob die im Element wirkende elektrische Feldstärke  $eF$  über der Koerzitivfeldstärke  $ec$  liegt (Zeile 208). Ist dies nicht der Fall werden sämtliche nachfolgende Befehle bis zur Zeile 242 übersprungen. In Zeile 210 wird  $eF$  mit der Sättigungsfeldstärke  $es$  verglichen und bei einer größeren Feldstärke als die Sättigungsfeldstärke automatisch auf den Wert von  $es$  begrenzt (Zeile 211), weil eine Polarisierung über die Sättigungsfeldstärke hinaus nicht zulässig ist. Die Berechnung des, dem elektrischen Felde proportionalen Polarisationsgrades  $pol_e$ , erfolgt in Zeile 214. Dieser Wert kann allerdings nicht direkt dem Element zugeordnet werden, da dies die Konvergenz der Iteration gefährden würde. Es wird daher ein Wert verwendet, der einen Kompromiss zwischen der tatsächlich geforderten und der bereits bestehenden Polarisierung darstellt, und in Zeile 215 berechnet wird. Um die Konvergenz während der Iteration sicherzustellen, geht die ursprüngliche Polarisierung mit 80 % in dem neu errechneten Wert ein. Dasselbe geschieht auch bei der Berechnung des Drehwinkels für das EKS (Zeile 216), jedoch geht hier der tatsächlich benötigte Drehwinkel mit einer Gewichtung von 70 % deutlich stärker ein. Die beiden Gewichtungsfaktoren wurden rein empirisch aufgrund einer durchgeführten Testserie bestimmt. Der nächste Schritt ist die Drehung und Zuweisung der einzelnen EKS. Dazu muss zuerst ein Elementkoordinatensystem erstellt werden, das genau jene Eigenschaften bezüglich der Ausrichtung besitzt, wie sie oben berechnet wurden (Zeile 219). Die Bezeichnung des jeweiligen Elementkoordinatensystems ist gleich der Nummer des entsprechenden Elements plus 10. Anschließend muss das EKS nur noch dem Element übergeben werden (Zeile 220).

Nun muss dem Element noch der dem Polarisationsgrad entsprechende Materialparametersatz und die entsprechende Temperatur zugeordnet werden. Dazu wird zuerst aus dem Polarisationsgrad die Elementtemperatur, welche zwischen 0 und 1 liegen muss, berechnet (Zeile 222). Bevor nun die eigentliche Zuweisung erfolgt, wird überprüft, ob der letzte Schritt der Polarisierung noch nicht erreicht ist (Zeile 225). Im letzten Schritt wird, wie oben

beschrieben, die Spannung an den Elektroden bereits wieder 0 gesetzt. Die Polarisierung und die remanente Dehnung dürfen im letzten Schritt daher nicht mehr neu berechnet werden, sondern sollen bei ihrem Maximalwert eingefroren bleiben. Ist der letzte Schritt nicht erreicht und somit die Bedingung dahingehend erfüllt, dass eine Zuweisung möglich ist, wird dem Element ein entsprechender Parametersatz zugeordnet (Zeile 226 bis 230). Anschließend wird das Element mit der entsprechenden Temperatur beaufschlagt (Zeile 232). Die Zeile 236 beendet schließlich diese Schleife und das Modell wird innerhalb der Iterationsschleife mit den geänderten Parametern neu berechnet.

```
238      FINISH
239      /SOLU
240      *IF,m,EQ,1,THEN
241          ANTYPE,,NEW
242      *ELSE
243          ANTYPE,,REST
244      *ENDIF
245      SOLVE
246      FINISH
247
248      /POST1
249      PLVECT,EF, , , ,VECT,ELEM,ON,0
250      /REPLOTT
251      FINISH
252
253 *ENDDO
```

Bevor allerdings die Berechnung startet, wird die Struktur des Resultfiles festgelegt. Zeile 240 und 241 legen fest, dass während der Iteration des ersten Polungsschrittes das Resultfile ständig wieder überschrieben wird, da nur das Ergebnis des letzten Iterationsschrittes für die Auswertung benötigt wird. Bei den nachfolgenden Polarisierungsschritten darf das Resultfile allerdings nicht mehr überschrieben werden, da in diesem Fall die benötigten Ergebnisse der vorherigen Polarisierungsschritte ebenfalls überschrieben würden. Daher ist es notwendig ab dem zweiten Polarisierungsschritt sämtliche Ergebnisse vorläufig abzuspeichern (Zeile 243), und erst am Ende der Simulation die nicht benötigten Sets zu löschen. In Zeile 245 erfolgt schließlich die eigentliche Finite- Elemente- Berechnung. Die Programmzeilen 248 bis 251 dienen lediglich zur Darstellung der berechneten elektrischen Feldvektoren und der Elementkoordinatensysteme um optisch die Konvergenz der Iteration während der laufenden Berechnung beurteilen zu können. Mit der Zeile 253 erfolgt der Abschluss der Iterationsschleife.

```
255 /PREP7
256 *IF,m,LT,m_ges-1,THEN
257     u_ist=(delta_u/(m-ges-2))*m
258     CMSEL,S,el_m,NODE
259     D,ALL,VOLT,u_ist
260 *ELSE
261     u_ist=0
262     CMSEL,S,el_m,NODE
263     D,ALL,VOLT,u_ist
264 *ENDIF
265 ALLSEL
266 FINISH
267
268 *ENDDO
```

Abschließend sind noch die elektrischen Randbedingungen für den nächsten Polarisations-schritt festzulegen. Dabei wird das Potential der Mittelelektrode kontinuierlich angehoben bzw. nach Erreichen der Maximalspannung auf Null zurückgesetzt. Solange die Maximalspannung noch nicht erreicht ist, dies wird in Zeile 256 über den aktuellen Polarisations-schritt festgestellt, wird die neue Elektrodenspannung  $u_{ist}$  in Zeile 257 aus den am Programmbeginn festgelegten Parametern und dem aktuellen Polarisations-schritt berechnet und anschließend sofort den entsprechenden Knotenpunkten der Mittelelektrode zugewiesen. Ist allerdings bereits der letzte Schritt des Polungsvorganges erreicht, so wird das Potential auf Null gesetzt, sodass die remanenten Dehnungsanteile berechnet werden können. In der Zeile 268 ist nach dem letzten Polarisations-schritt die Berechnung abgeschlossen. Anschließend werden die nicht benötigten Resultsets aus dem Resultfile gelöscht, um eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen.

```
274 /AUX3
275 FILEAUX3,Piezo_2D,rst
276
277
278 *DO,k,1,m_ges-1
279     *DO,j,1+k,niter+k
280         *IF,j,NE,niter+k,THEN
281             DELETE,SET,j,j
282         *ENDIF
283     *ENDDO
284     COMPRESS
285 *ENDDO
286 FINISH
```

Um ein Resultfile überhaupt bearbeiten zu können muss zuerst der entsprechende Editor gestartet (Zeile 274) und die zu bearbeitende Datei geladen werden (Zeile 275). Nun werden in einer zweifach verschachtelten Do- Loop- Schleife in der äußeren die Polarisationschritte gezählt und in der inneren die Laufvariable  $j$  vom Startwert, der sich aus dem Wert der äußeren Laufvariable  $k$  plus 1 zusammensetzt, bis zum Endwert, der der Anzahl der Iterationsschritte  $niter$  plus  $k$  entspricht, hinaufgezählt (Zeilen 278 bis 285). Ist nun  $j$  gleich  $niter$  plus  $k$ , so handelt es sich um ein Resultset, das am Ende einer Iterationsfolge gespeichert wurde. Ist dies nicht der Fall, wird das Set zum Löschen markiert (Zeilen 280 bis 282). Der Löschvorgang selbst erfolgt mittels des Befehls in Zeile 284. Die restlichen Resultsets werden gleichzeitig wieder von 1 weg neu durch nummeriert, sodass dabei keine Lücken in der Nummerierung entstehen.

Abschließend sei noch ein Macro erwähnt, welches des Öfteren im Programm aufgerufen wird und zur Erfassung der CPU Zeit dient.

```
296 *USE,'x_readtime_i.mac',3
297 deltwllh=wallt3-wallt0           ! [hr]
298 deltwlls=(wallt3-wallt0)*3600   ! [s]
299
300 deltcpuh=(cput3-cput0)/3600     ! [hr]
301 deltcpus=(cput3-cput0)          ! [s]
```

Dieses Macro mit der Bezeichnung „x\_readtime\_i.mac“ wurde ebenfalls von Prof. Supancic geschrieben und dient zur Abfrage der benötigten Rechenzeit an verschiedenen Stellen im Programm (Zeile 296). Die Ergebnisse dieser Abfragen werden schließlich in Variablen gespeichert und können so zur Programmoptimierung herangezogen werden. Mit den daraus erhaltenen Daten kann schließlich, wie in Zeile 297 bis 301 realisiert, die gesamt CPU Zeit für die Abwicklung der Simulation ausgegeben werden.

### 5.3 Diskussion der Ergebnisse

Die eigentliche Neuartigkeit dieser Simulation besteht darin, dass sie es auf eine relativ einfache Weise ermöglicht, das ferroelektrische Verhalten eines PZT Vielschichtaktors während der Polung im Hinblick auf die remanente Dehnung zu beschreiben. Damit ist eine Vorhersage der zu erwartenden Spannungen und Dehnungen in jedem Punkt des Stacks während des gesamten Vorgangs möglich.

Bei der Betrachtung der nachfolgenden Ergebnisse sind allerdings einige Einschränkungen ihrer Gültigkeit zu beachten:

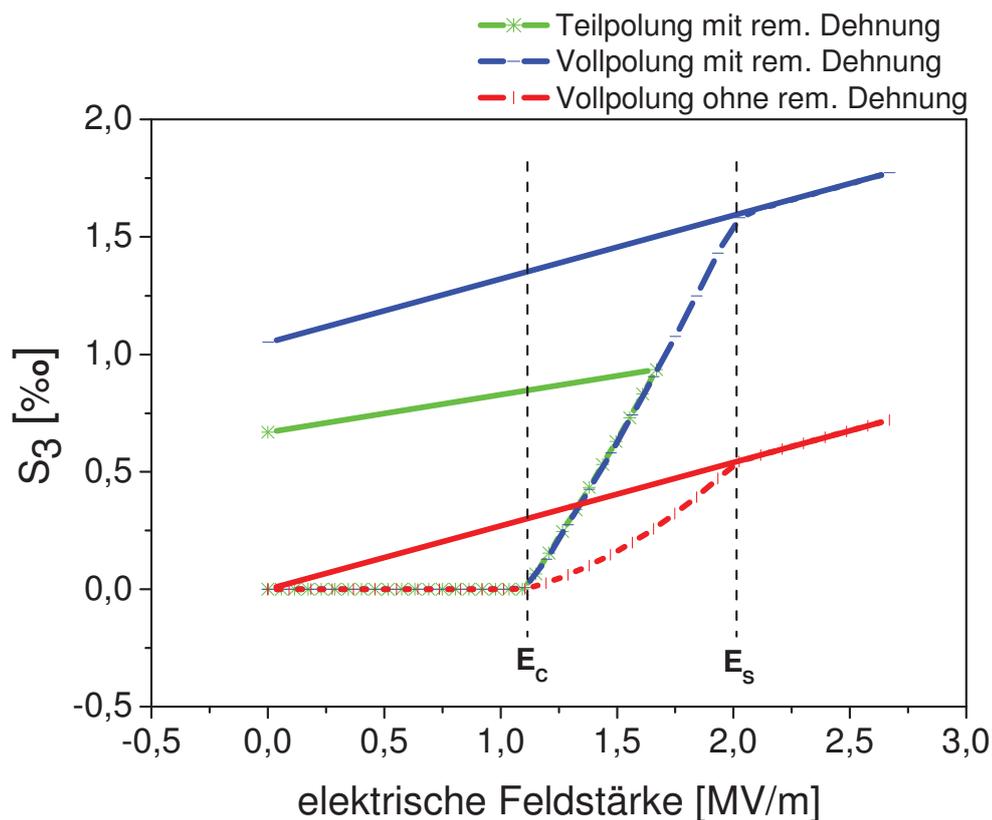
- Das Modell berücksichtigt nur den Piezoeffekt und das ferroelektrische Verhalten, welches über die thermische Dehnung simuliert wird. Die lokal unterschiedlichen Polarisationsgrade werden dabei berücksichtigt. Ferroelastische Effekte aufgrund der auftretenden Spannungen finden jedoch keine Berücksichtigung. Daraus folgt, dass auch keine mechanisch verursachte Depolarisation möglich ist und sämtliche Bereiche im Stack ihre maximal erreichten Polarisationsgrade behalten.
- Die elektrischen Eigenschaften beruhen nur auf der Berücksichtigung des piezoelektrischen Verhaltens. Das Simulieren des ferroelektrischen Verhaltens benötigt in diesem Modell keine zusätzliche elektrische Ladungseinbringung, womit Fragestellungen im Zusammenhang mit Stromstärken nicht sinnvoll sind (dynamische Systeme).

Die für die Berechnung verwendeten Materialdaten stammen aus dem Datenblatt der Fa. EPCOS bzw. aus vom ISFK durchgeführten Messungen. Im Folgenden sind die wichtigsten Simulationsparameter angeführt, die vollständige Auflistung befindet sich wiederum im Anhang C.

<b>Bauteilgeometrie :</b>	<i>Stackbreite</i>	8 mm
	<i>Schichtdicke</i>	75 $\mu\text{m}$
	<i>Breite der Isozone</i>	400 $\mu\text{m}$
<b>Elektrische Parameter :</b>	<i>Startspannung</i>	0 V
	<i>Max. Polungsspannung</i>	200 V (125 V bei Teilpolung)
<b>Piezoelektrische Parameter:</b>	<i>Koerzitivfeldstärke</i>	1,1 MV/ m
	<i>Sättigungsfeldstärke</i>	2 MV/ m
<b>Programmparameter :</b>	<i>Anz. der Polarisationsstufen</i>	300
	<i>Verwendeter Elementtyp</i>	PLANE223

### 5.3.1 Auswertung des longitudinalen Dehnungsverhaltens während des Polens

Die longitudinale Dehnung  $S_3$  des Stacks während der Polung wird unter verschiedenen Randbedingungen (vollständige bzw. nur teilweise Polarisation des Stacks sowie mit und ohne Berücksichtigung der remanenten Dehnung) in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke betrachtet (Abb. 5.4).



**Abb. 5.4:** Longitudinale Dehnung  $S_3$  in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke für unterschiedliche Polungsbedingungen. Betrachtet man die Kontraktion nach dem Abschalten des elektrischen Feldes bei einem nur teilgepolten Stack (grüne Kurve), so ist deutlich die geringere Steigung der Gerade zu erkennen, welche auf den nicht vollständig ausgeprägten piezoelektrischen Effekt zurückzuführen ist.

Wir können in Abbildung 5.4 deutlich erkennen, dass bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke  $E_C$  kein piezoelektrischer oder ferroelektrischer Effekt auftritt. Erst mit der Überschreitung von  $E_C$ , kommt es, je nach Berücksichtigung der remanenten Dehnung, zu einem unterschiedlich starkem Ansteigen der longitudinalen Dehnung  $S_3$ . Ohne Miteinbeziehung des ferroelektrischen Dehnungsverhaltens (rote Kurve), nimmt die Dehnung in Abhängigkeit des elektrischen Feldes mit steigender Feldstärke zu. Dies ist auf die Zunahme der Polarisation zurückzuführen. Ist die Sättigungsfeldstärke  $E_S$  überschritten so ist das Material vollständig gepolt. Das weitere Dehnungsverhalten ist entsprechend linear.

Entscheidend ist allerdings, dass nach dem Abschalten des äußeren Feldes die Dehnung wieder vollständig auf ihren Ausgangswert zurückgeht.

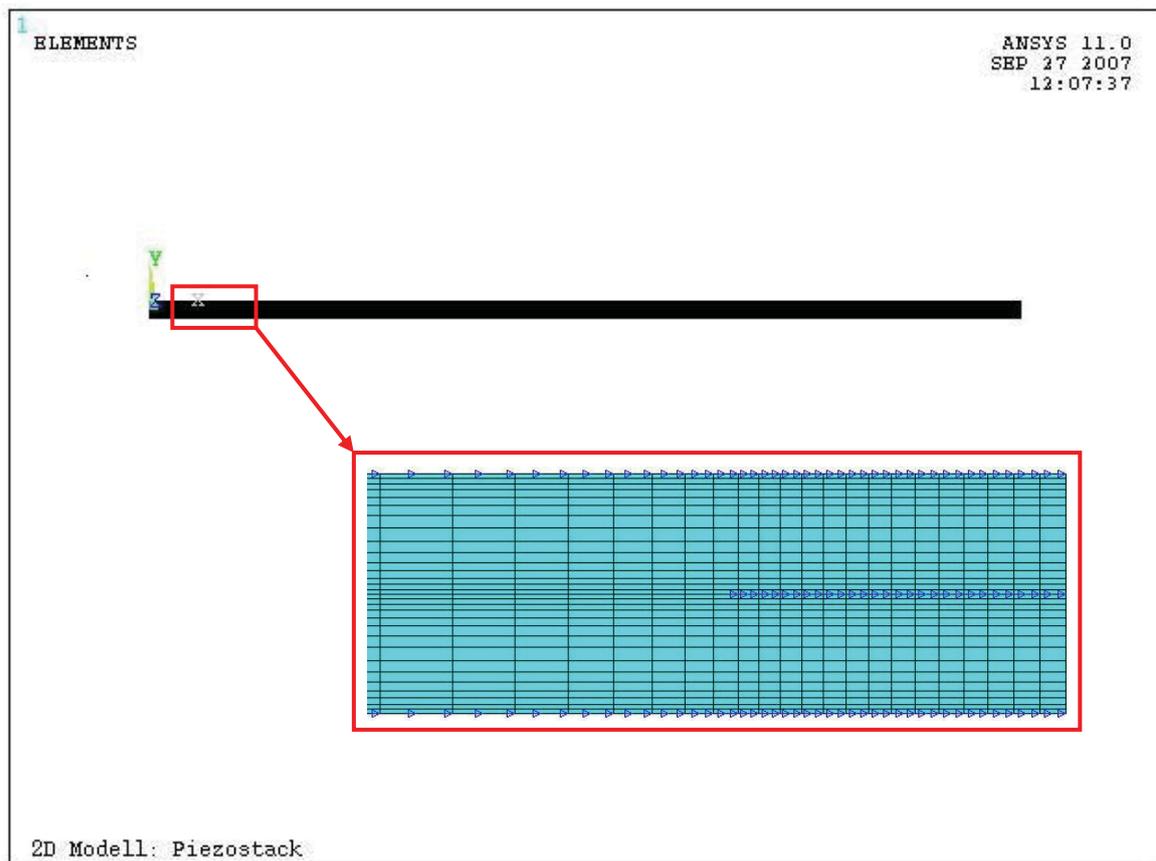
Betrachten wir nun den gleichen Polungsvorgang unter Berücksichtigung der remanenten Dehnung (blaue Kurve), so ist die Längenzunahme bei Feldstärken über  $E_C$  wie erwartet wesentlich stärker, da es zu einer Überlagerung der piezoelektrischen und ferroelektrischen Dehnung kommt. Wird allerdings die Sättigungsfeldstärke überschritten, so ist Steigung der Geraden identisch mit jener im vorher betrachteten Fall, weil ebenfalls nur noch der lineare piezoelektrische Effekt wirksam ist. Am Ende des Vorganges bleibt allerdings auch ohne das Anlegen eines Feldes der remanente Dehnungsanteil zurück.

Wird die Polung vorzeitig abgebrochen wird (grüne Kurve, plötzliches Abschalten des elektrischen Feldes vor Erreichen der Sättigungsfeldstärke  $E_S$ ) so bleiben die ferroelektrischen Dehnungsanteile unverändert. Allerdings tritt, wie auch bei den beiden anderen Kurven, eine durch den piezoelektrischen Effekt bedingte Kontraktion ein. Diese ist allerdings wesentlich geringer, wie sich deutlich durch die geringere Steigung der entsprechenden Geraden zeigt. Die Ursache dafür liegt in der nicht vollständigen Polarisierung des Materials, wodurch auch der piezoelektrische Effekt schwächer ausgeprägt ist.

### 5.3.2 Auswertung der berechneten Spannungsverteilung im Stack

Das folgende Kapitel befasst sich mit den berechneten Spannungs- und Dehnungszuständen vor allem im kritischen Übergangsbereich zwischen der Aktiv- und der Isozone. Die dort auftretenden Spannungen sind hauptverantwortlich für die während des Polungsprozesses entstehenden Risse, welche zum Versagen des gesamten Bauteils führen können.

Abbildung 5.5 zeigt eine vollständige Ansicht der beiden modellierten Schichten. Da aufgrund der Geometrie in der Gesamtansicht keine Details zu erkennen sind, beschränken sich die folgenden Bilder auf den eingezeichneten kritischen Übergangsbereich zwischen der Iso- und der Aktivzone.



*Abb. 5.5: Darstellung des gesamten, zwei Schichten umfassenden Stackmodells. Der rot gekennzeichnete Bereich ist jener der in den folgenden Bildern dargestellt ist.*

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen jeweils die y- Spannungskomponente bei angelegten 200 V, einmal ohne ferroelektrische Dehnungsanteile und einmal mit Berücksichtigung der remanenten Dehnung (Abb. 5.6).

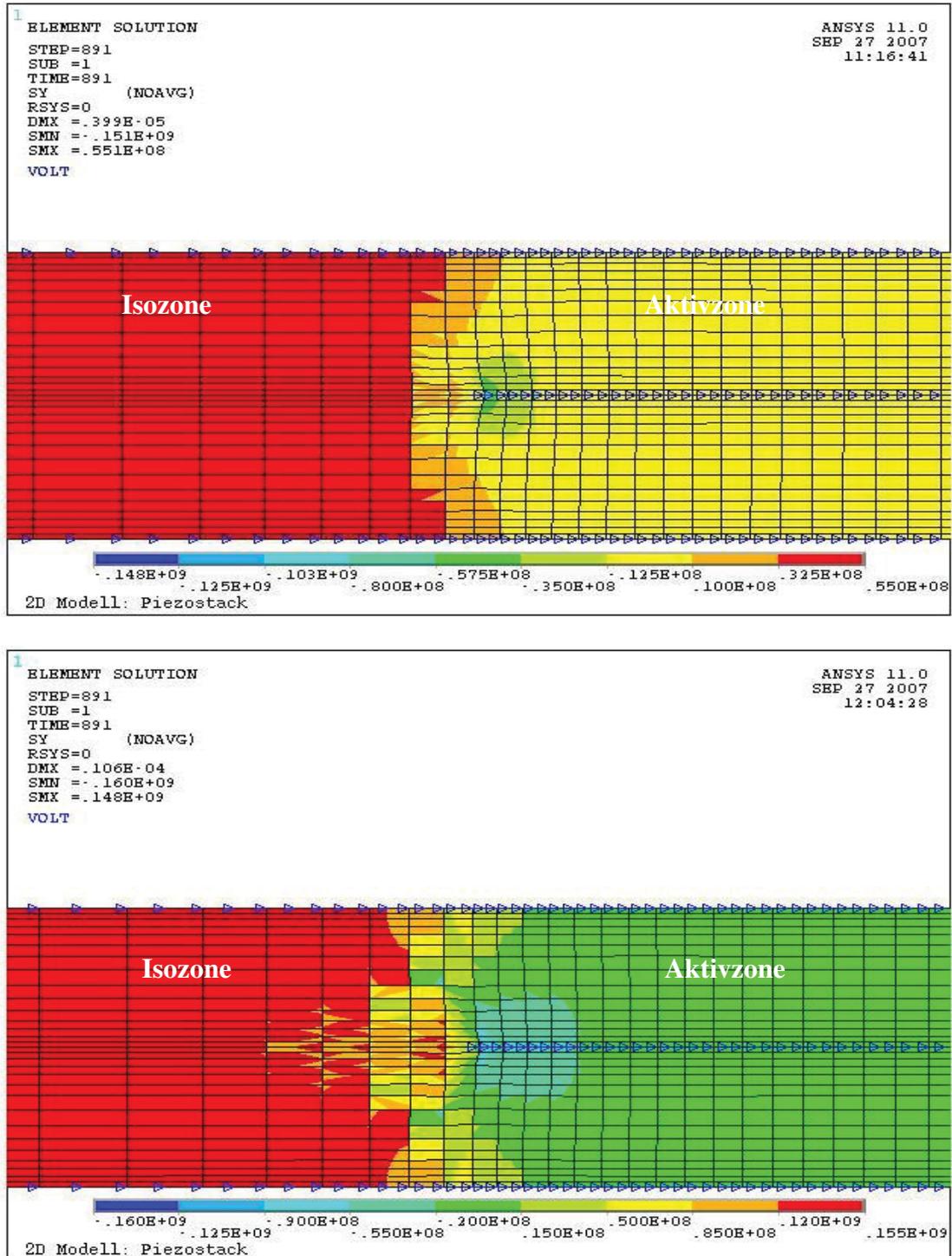


Abb. 5.6: Die beiden Abbildungen zeigen den gleichen Ausschnitt aus dem Übergangsbereich Isozone – Aktivzone jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Dehnung.  
 (o.) ohne remanenter Dehnung berechnet  
 (u.) mit remanenter Dehnung berechnet

In beiden Bildern ist die deutlich ausgeprägte mechanische Spannungssingularität am Ende der Mittelelektrode zu erkennen. Dies tritt besonders stark durch die Tatsache in Erscheinung, dass die Bereiche der Isozone nur rein elastisch auf die Beanspruchung reagieren können und somit ein Abbau der Spannungsspitzen über plastische oder ferroelektrische Verformung nicht möglich ist. Wie erwartet bildet sich in den Bereichen der Isozone ein Zugspannungsfeld und in der sich ausdehnenden Aktivzone ein Druckspannungsfeld aus, welches unter Miteinbeziehung der remanenten Dehnung Spitzenwerte aufweist, die circa um den Faktor 10 größer sind, als bei Berechnungen, die nur das piezoelektrische Verhalten des Materials berücksichtigen. Die dabei auftretenden Spannungen an der Elektrodenspitze und in weiten Teilen der Isozone betragen über 120 MPa, die durchschnittliche Festigkeit einer PZT-Keramik jedoch nur um die 100 MPa. Da im realen Bauteil die auftretenden Spannungen aber durch ferroelastische Dehnungen verringert werden, ist eine Aussage bezüglich des Materialversagens nur in begrenztem Umfang möglich. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt jedoch einen Zusammenhang zwischen der Rissentstehung in der Isozone und dem Polungsprozess

Betrachtet man nun dieselben beiden Fälle nach dem Abschalten der angelegten elektrischen Spannung, so muss, im Falle, dass nur das piezoelektrische Verhalten simuliert wird, der gesamte Bereich Spannungs- bzw. Dehnungsfrei (keine Verzerrung des FE- Netzes) sein, wie es auch die Abb. 5.6 (oben) eindeutig zu erkennen lässt. Im anderen Fall stellt sich ein Spannungsfeld entsprechend der remanenten Dehnung der Aktivzone ein (Abb. 5.7).

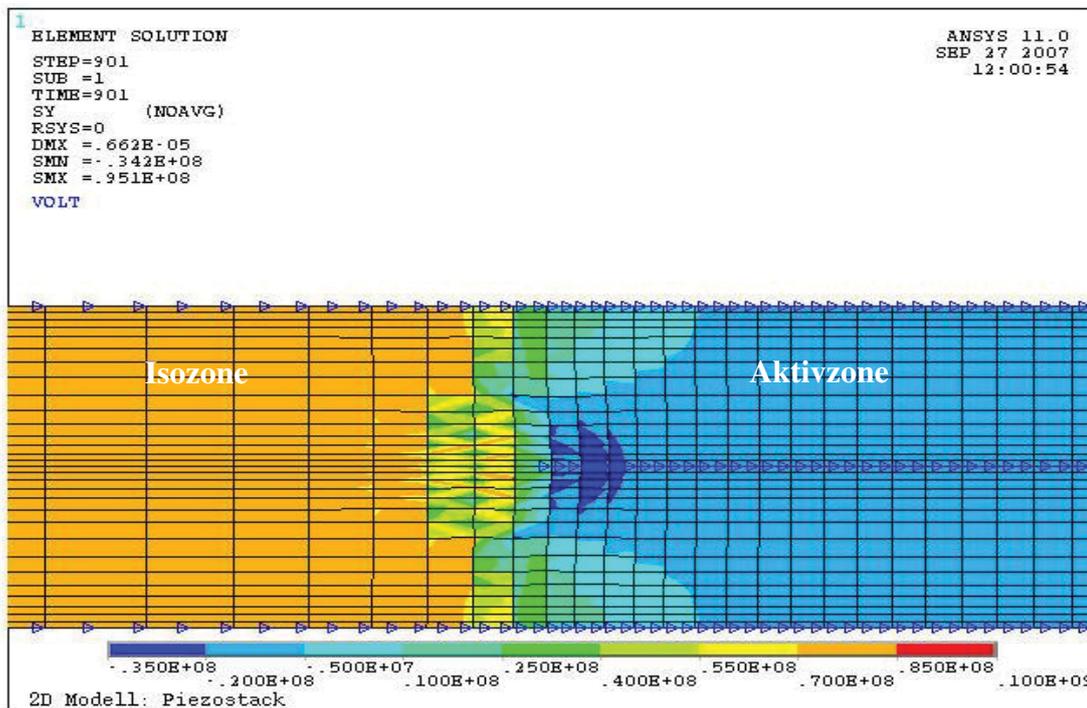
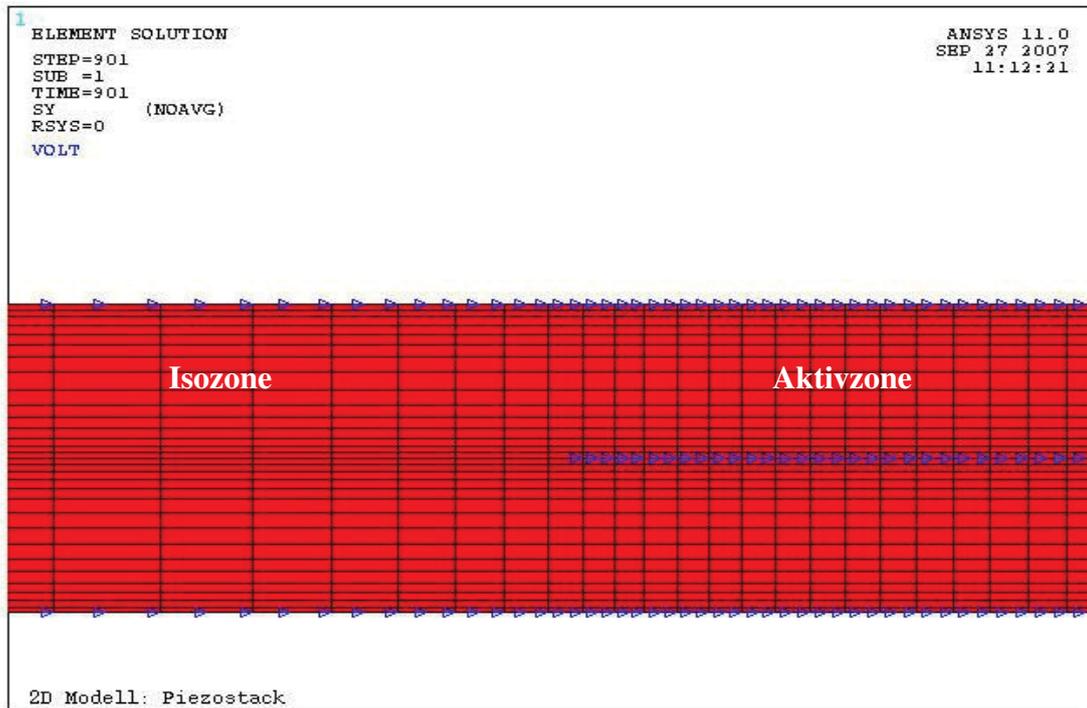
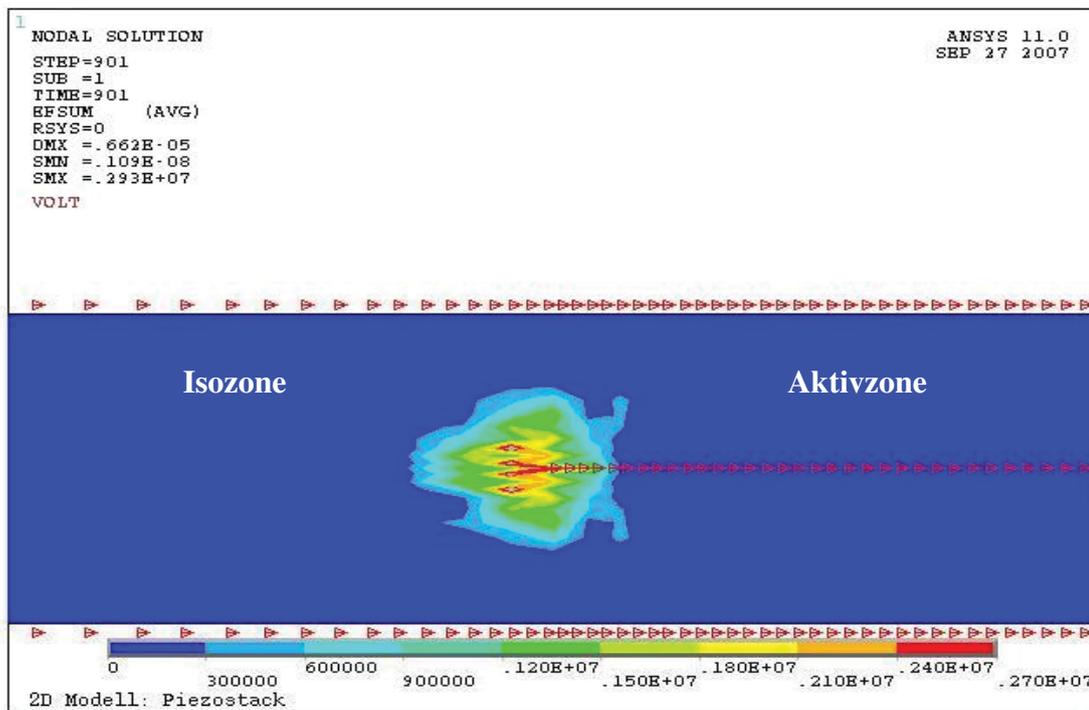


Abb. 5.7: Die Bilder zeigen einen Ausschnitt aus der Isozone bei abgeschaltetem elektrischem Feld.  
(o.) ohne remanenter Dehnung berechnet (keinerlei auftretende Spannungen im Stack)  
(u.) mit remanenter Dehnung berechnet (Ausbildung eines komplexen Spannungsfeldes)

Durch den in der Abbildung 5.7 (unten) dargestellten Spannungszustand, wird über den direkten piezoelektrischen Effekt wiederum ein inneres elektrisches Feld erzeugt (siehe Abb. 5.8). Überschreitet dieses die Koerzitivfeldstärke, so richten sich die Domänen ebenfalls parallel zu den Feldvektoren aus, und es entsteht eine Domänentextur die, ähnlich den ferroelastischen Verhalten, vom mechanischen Spannungszustand abhängt.



**Abb. 5.8:** Darstellung des elektrischen Feldes, das durch den direkten Piezoeffekt, hervorgerufen durch die in Abbildung 5.7 (unten) dargestellten mechanischen Spannungen, induziert wird. Die grünen bis roten Bereiche weisen eine Feldstärke über EC auf und besitzen somit eine auf Basis von mechanischen Spannungen entstandene Domänenkonfiguration.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Piezoelektrische Aktoren sind Bauteile, die es ermöglichen elektrische Energie in mechanische Dehnung umzuwandeln. Dies äußert sich in einer Längenänderung des Piezoaktors beim Anlegen einer elektrischen Spannung, wobei je nach Feldrichtung eine Verlängerung oder Verkürzung auftreten kann. Ein inzwischen etablierter Werkstoff ist die ferroelektrische Piezokeramik Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Seine makroskopische Piezoelektrizität erhält der Werkstoff durch einen elektrischen Polungsprozess nach dem Sintern. Die longitudinale Dehnung liegt bei typischen Feldstärken von 2 MV/m zwar nur im Bereich weniger Promille, sie erfolgt jedoch mit großer Kraft und hoher Geschwindigkeit. Es ist aber erst durch die Vielschichttechnologie gelungen, die Betriebsspannung der Bauteile soweit zu senken, um diese Teile bei moderaten Betriebsspannungen betreiben zu können. Die typischen Schichtdicken liegen dabei im Bereich von 30 – 80  $\mu\text{m}$ .

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Aktoren zur Steuerung von Dieseleinspritzsystemen in Kraftfahrzeugen untersucht. Die dafür verwendeten Vielschichtaktoren zeichnen sich durch eine hohe mechanische Belastbarkeit, niedrige Leistungsaufnahme, kürzeste Ansprechzeiten im sub- Millisekunden Bereich und eine hohe Auflösung in der Bewegung aus. Der Grund für den Einsatz piezoelektrischer Aktoren im Motorenbau ist die Effizienz durch eine Optimierung der Einspritzsysteme zu steigern und dadurch den Kraftstoffverbrauch zu senken.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte nun der Aufbau und die Wirkungsweise dieser Bauelemente untersucht und dadurch auch besser Verstanden werden. Dazu wurden zuerst die keramischen Gefügekenngößen in verschiedenen Bereichen des Bauteils bestimmt. Weiters wurde ein elektromechanischer Messplatz auf seine Eignung zur Bestimmung des Aktorenverhaltens untersucht. Unter Berücksichtigung der in diesen Versuchen gewonnenen Ergebnissen wurde schließlich ein zweidimensionales Finite- Elemente- Modell entwickelt, welches das Dehnungsverhalten eines piezoelektrischen Vielschichtaktors während des Polungsvorganges in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke beschreibt. Dabei wurde insbesondere der Einfluss der remanenten Dehnung berücksichtigt.

*Keramographische Untersuchung*

Das Ziel dieser keramographischen Untersuchung war die Bestimmung von Gefügekenngößen der Keramik eines Piezostacks in Abhängigkeit vom Ort und dem Polungszustand, sowie der Vergleich mit ebenfalls ermittelten Referenzwerten an einer Bulkprobe. Die untersuchten Stacks gehörten zur sogenannten LOW-T<sup>9</sup> Serie, die mittels alternativer Sinterparameter hergestellt wurden. Zur Bestimmung der Referenzwerte wurden dieselben Kenngößen an einer unter Standardbedingungen gesinterten Bulkprobe ermittelt.

Bei der zuerst durchgeführten optischen Inspektion der angefertigten Schlifflinien wurden Risse in der Randzone aller gepolten Stacks festgestellt. Besonders gefährlich gelten jene Risse, die benachbarte Innenelektroden miteinander verbinden, weil dies im Betrieb zu einem Kurzschluss führen kann. Da an den ungepolten Proben keine derartigen Risse festgestellt werden konnten, muss die Rissentstehung zumindest indirekt von Polungsprozess verursacht werden.

Bei der anschließenden Korngrößenbestimmung konnte keine signifikante Abweichung zwischen den untersuchten Proben festgestellt werden. Jedoch lässt sich eine leichte Tendenz zu einer geringeren Korngröße im Bulkmaterial erkennen. Eine mögliche Erklärung dafür liegt in den unterschiedlichen Sinterparametern sowie im Einfluss des Elektrodenmaterials auf den Sinterprozess.

Die Härtemessung ergab eine etwas größere Härte der Stackkeramik gegenüber dem Bulkmaterial, was auf die gleichen Gründe wie die geringfügig unterschiedliche Korngröße zurückzuführen ist. Eine Abhängigkeit der Härte vom Polungszustand konnte innerhalb der Messgenauigkeit nicht festgestellt werden.

Die abschließend durchgeführte Vermessung der durch die Härteeindrücke induzierten Risse ergab eine deutliche Abhängigkeit der Risslänge von der Orientierung des Risses zur Polungsrichtung in den gepolten Proben. So wurde festgestellt, dass im gepolten Material beim Risswachstum parallel zur Polungsrichtung wesentlich kürzere Risslängen gemessen wurden als normal zur Polungsrichtung. In ungepolten Proben konnte jedoch keine Anisotropie der Risslänge erkannt werden. Als mögliche Begründung für dieses Verhalten wurden die in der Fachliteratur diskutierten Erklärungen angeführt.

---

<sup>9</sup> Low Time Sintered

### *Elektromechanisches Verhalten eines Piezostacks*

Um das elektromechanische Verhalten eines piezoelektrischen Aktors zu beschreiben, war es zunächst notwendig, den Messplatz auf seine diesbezügliche Eignung zu untersuchen. Dazu wurden einerseits mechanische Biegewegaufnehmer (System DD1) sowie andererseits ein Laservibrometer (OFV-5000) zur optischen Wegmessung auf ihre Messgenauigkeit bei unterschiedlichen Frequenzen hin überprüft. Weiters wurde auch eine Resonanzstudie bei Frequenzen bis 20 kHz durchgeführt, um genaue Kenntnisse darüber zu gewinnen bei welchen Bedingungen Resonanzeffekte während der Messung auftreten.

Die Untersuchung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit der Frequenz ergab eine maximale Einsatzfrequenz für das DD1 Wegaufnehmersystem von ca. 50 Hz. Bei höheren Frequenzen ist die Verwendung der optischen Wegmessung mittels Laservibrometer zu empfehlen. Um die Eigenfrequenzen des Systems zu bestimmen, wurde es mit einem elektrischen Impuls angeregt und das resultierende Wegsignal mittels der Fast Fourier Transformation (FFT) Analyse ausgewertet. Anschließend wurden Versuchsmessungen im entsprechenden Frequenzbereich durchgeführt um die durch die FFT Analyse vorhergesagten Resonanzeffekte zu verifizieren.

Die Ergebnisse der Studie ergaben tatsächlich erhebliche Resonanzerscheinungen, die präzise Messungen in bestimmten Frequenzbereichen entweder sehr erschweren oder gänzlich unmöglich machen. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass die auftretenden Resonanzeffekte relativ unabhängig von den, dem System auferlegten, Randbedingungen sind. Sind aber trotzdem Messungen in resonanz-nahen Bereichen notwendig, sind größere Veränderungen des gesamten Schwingungssystems erforderlich. Geeignete Maßnahmen wäre die Verwendung einer Vorspannfeder mit geänderter Federkonstante oder eine Veränderung der beweglichen Massen.

In einem weiteren Versuch wurde die Quersteifigkeit sowie die Planparallelität des oberen und unteren Stempels der Prüfmaschine untersucht. Dazu wurde ein Stack zwischen die beiden Druckstempel gespannt und mit einer Vorkraft von 800 N belastet. Anschließend wurde der Stack mit einer elektrischen Sinusspannung (0 – 160 V, ¼ Hz) angesteuert. Die Wegmessung erfolgte mit drei DD1 Biegewegaufnehmern, die im Winkel von 120° angeordnet waren und so an drei Punkten gleichzeitig den Abstand zwischen Ober- und Unterstempel maßen. Zusätzlich wurde noch mit dem Laservibrometer die absolute Querverschiebung in der Mitte des Stacks gemessen.

Die Messungen ergaben eine maximale Verkipfung von 0,12° sowie eine Verschiebung des Traversen- Stempel- Systems von ca. 5 µm bei maximaler longitudinaler Auslenkung. Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Eigenschaften der Prüfmaschine bezüglich Parallelität der Stempelflächen und Querverschiebung des Stempel- Traversensystems unter Belastung für die weiters durchgeführten Versuche als vollkommen ausreichend bezeichnet werden können.

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse wurde die longitudinale Auslenkung des Stacks in Abhängigkeit der Vorkraft bestimmt. Dazu wurde ein gepolter Stack am Beginn mit einer minimalen Vorkraft von 500 N belastet um eine Zerstörung des Bauteils im Betrieb zu verhindern. Anschließend wurde der Stack mit einer Sinusspannung (0 – 160 V) angesteuert und die Vorkraft sukzessive erhöht. So konnte die Abnahme des Stackhubs mit steigender Vorkraft bis zu einer maximalen Belastung von 11 kN exakt bestimmt werden. Größere Kräfte waren aufgrund der Belastbarkeit des Prüfrahmens nicht realisierbar, sodass die Blockierkraft (keine Auslenkung des Stacks bei maximaler elektrischer Spannung) nicht ermittelt werden konnte.

Abschließend wurde auch der Versuch unternommen, die Entstehung von Rissen, speziell während des Polungsvorganges, mittels des Laservibrometers zu detektieren. Dabei ging die Überlegung dahin, dass die durch das Risswachstum entstehenden Schwingungen sich rasch über den ganzen Stack ausbreiten und so schließlich von Laservibrometer erfasst werden können. Allerdings war es nicht möglich diese Schwingungen im Weg- oder Geschwindigkeitssignal zu identifizieren. Der Grund dafür lag vermutlich in einem ungünstigen Signal/ Rausch Verhältnis, von dem besonders die Geschwindigkeitsmessung betroffen war.

Eine alternative Möglichkeit die Rissentstehung dennoch zu detektieren, liegt in der Verwendung eines Ultraschallmikrophons. Diesbezüglich wurden die Vorteile aber auch Probleme die in der Anwendung dieser Messmethode liegen theoretisch diskutiert. Ein praktischer Versuch wurde allerdings nicht unternommen, da zum gegebenen Zeitpunkt kein Ultraschallmikrophon zur Verfügung stand.

### *Simulation der Polung eines Vielschichtaktors mittels der Finiten Elementen Methode*

Im letzten Teil der Arbeit wurde ein Modell zur Simulation des Polungsvorgangs piezoelektrischer Vielschichtaktoren erstellt. Dabei wurde unter Berücksichtigung der in den praktischen Versuchen erhaltenen Ergebnisse ein 2D Finite Elemente Modell entwickelt, welches sowohl das piezoelektrische als auch Aspekte des ferroelektrischen Verhaltens (remanente Dehnung) des Materials in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke beschreibt. Dazu wurde das kommerzielle FE- Paket ANSYS Version 11.0 verwendet. Die Simulation des nichtlinearen ferroelektrischen Verhaltens erfolgt dabei indirekt über eine Temperaturerhöhung der entsprechenden Bereiche bei einer vordefinierten orthotropen Wärmedehnung des Materials. Damit war es auf relativ einfache Weise möglich, die remanenten Dehnungsanteile beim Polen piezoelektrischer Keramiken zu simulieren, wobei jedoch die Ladungsmenge nicht korrekt berechnet wird. Bei spannungsgesteuerten, quasistatischen Fragestellungen ist dies jedoch nicht von Bedeutung. Eine Berücksichtigung des ferroelastischen Verhaltens aufgrund der auftretenden Spannungen erfolgt in diesem Modell allerdings nicht.

Mit diesem Modell wurden schließlich mehrere Simulationen für unterschiedliche Polungsbedingungen durchgeführt, und dabei sowohl die Abhängigkeit der longitudinalen Dehnung von der angelegten elektrischen Feldstärke als auch die auftretenden Spannungsfelder im Bauteil untersucht. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf den Einfluss der remanenten Dehnung gelegt.

Mit diesem Modell kann das mechanische Verhalten beim Polen dann richtig wiedergegeben werden, wenn die dabei auftretenden mechanischen Spannungen unter der Koerzitivspannung bleiben. Andernfalls würden diese im Material durch ferroelastische Effekte abgebaut werden. Somit liefert dieses Modell je nach Randbedingungen quantitative richtige oder zumindest qualitative Trendaussagen.

Ziel ist es schließlich ein Modell zu entwickeln, welches in der Lage ist den linearen piezoelektrischen Effekt in Verbindung mit dem ferroelektrischen und ferroelastischen Materialverhalten korrekt zu berechnen.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Haertling, Gene H. (1999): Ferroelectric Ceramics: History and Technology, in: J. Am. Ceram. Soc., 82 [4] 797-818, S. 797 - 799
- [2] Whittaker, E. J. W. (1981), Crystallographie. An Introduction Earth Science (and Other Solid State) Students, Pergamon Press, Oxford
- [3] Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donatordotierten PZT-Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 13
- [5] Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donatordotierten PZT-Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 15
- [6] Tichy, J. (1980), Piezoelektrische Messtechnik, Springer Verlag, Berlin
- [7] Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donatordotierten PZT-Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 13
- [8] Damanovic, D. (1998), Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films, Rep. Prog. Phys., 61, S. 1267 – 1324
- [9] Mitsui, T. (1976), An Introduction to the Physics of Ferroelectrics, Gordon and Breach, London
- [10] Kingery, W. D. et al (1975), Introduction to Ceramics, 2. Auflage, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons, S. 967, 968
- [11] Jaffe, B. et al. (1971), Piezoelectric Ceramics, Academic Press, London und New York
- [12] Sonin, A. S. (1974), Einführung in die Ferroelektrizität, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig
- [13] Helke, G. (1999), Piezoelektrische Keramiken: Physikalische Eigenschaften, Zusammensetzung, Herstellungsprozess, Kenngrößen und praktische Anwendung, in: Keram. Zeitschrift, 51 (12), S. 1048 – 1052
- [14] Bärwald, H. G. (1957), Thermodynamic Theory of Ferroelectric Ceramics, Phys. Rev., 105, S. 480 – 486
- [15] Endriss, A. (1996), Reorientierungsverhalten von Domänen und mikroskopische Gitterdeformation in piezoelektrischen PZT- Keramiken, Diss., Tübingen
- [16] Dia, X., Wang, Y. (1991), Study on the Order of the  $F_{R(LT)} - F_{R(HT)}$  Phase Transition of PZT Ceramics, Phys. Stat. Sol. (a), 124, S. 435 – 440

- [17] Barnett, H. (1962), Evidence for a New Phase Boundary in the Ferroelectric Lead Zirconate – Lead Titanate System, *J. All. Phys.*, 33, S. 1606
- [18] Roleder, K. (1998), Properties and Phase Transitions in  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ , *Key Engineering Mat.*, 155/156, S. 123 – 158
- [19] Jona, F., Shirane, G., Mazzi, F., Pepinsky, R. (1957), *Phys. Rev.*, 105, S. 849 – 856
- [20] Groth, P. v. (1870), Über Beziehungen zwischen Krystallform und chemischer Constitution bei einigen organischen Verbindungen, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, S. 449 - 457
- [21] Fukuhara, M., Bhalla, A., Newnham, R. (1990), Morphotropic Phase Boundary in the  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ - System, *Phys. Stat. Sol. (A)*, 122, S. 677 – 682
- [22] Kakegawa, K., Mohri, J., Shirasaki, S., Takahashi, K. (1982), Sluggish Transition Between Tetragonal and Rhombohedral Phases of  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  Prepared by Application of Electric Field, *J. Am. Ceram. Soc.*, 65, [10], S. 515 – 519
- [23] Singh, A. P., Mishra, S. K., Lal, R., Pandey, D. (1995), Coexistence of Tetragonal and Rhombohedral Phases at the Morphotropic Phase Boundary in PZT Powders, I, X-Ray Diffraction Studies, *Ferroelectrics*, 163, S. 103 – 113
- [24] Ari-Gur, P., Benguigui, L. (1975), Direct Determination of the Coexistence Region in the Solid Solutions  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ , *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 8, S. 1856 – 1862
- [25] Eckstein, G. (1983), Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von PZT- Keramiken an der Phasengrenze rhomboedrisch- tetragonal, hergestellt aus sprühgetrockneten Salzen, *Diss.*, Erlangen
- [26] Härdtl, K. H. (1973), *Science of Ceramics*, 6, [7], S. 1 -15
- [27] Wersing, W., Roßner, W., Eckstein, G., Tomandl, G. (1985), The Morphotropic Phase Boundary in PZT Ceramics Prepared by Spray Drying of Salt Solution and Mixed-Oxid- Method, *Silicates Industriels*, 3, S. 41 – 46
- [28] Lal, R., Sharma, S. C., Dayal, R. (1993), Phase Transition and Piezoelectric Properties of  $(\text{Pb}, \text{La})(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  Ceramics Prepared from Spray- Dried Powders, *Ferroelectrics*, 46, S. 165 – 175
- [29] Hahn, J. –P. (1990), Influence of Grain Growth Inhibiting Dopants on the Electrophysical Properties of Rhombohedral Pyroelectric Lead Zirconate Titanate Ceramics, *Diss.*, Zürich
- [30] Warren, W.L. et al. (1996), *J. Appl. Phys.*, 79, 9250
- [31] Xu, Y. (1991), *Ferroelectric Materials and Their Applications*, Elsevier Sci. Pub., Amsterdam, Netherlands
- [32] Pferner, R.A. (1997), Mechanische Eigenschaften von PZT- Keramiken mit definiertem Gefüge, *Diss.*, Stuttgart

- [33] PI Piezotechnologie, [Online]. Available.  
[http://www.piezo.de/pdf/PIC\\_Piezoelektrische\\_Materialien\\_c.pdf](http://www.piezo.de/pdf/PIC_Piezoelektrische_Materialien_c.pdf)  
Abfragedatum. 11.07.2007
- [34] homepage Fa. EPCOS, [On-line]. Available:  
<http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/Components/Page,locale=nn,r=263288,a=263406.html>  
Abfragedatum: 11.07.2007
- [35] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, Engineering Materials 1. Oxford: Pergamon Press, 1980
- [36] Schneider, G. A., Heyer, V. (1999), Influence of the Electric Field on Vickers Indentation Crack Growth in BaTiO<sub>3</sub>, in Journal of the European Ceramic Society 19 (1999) 1299 – 1306, S. 1299 – 1300
- [37] Wikipdia, [On-line]. Available:  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/15/Piezostack.jpg/400px-Piezostack.jpg>  
Abfragedatum: 11.07.2007
- [38] homepage Fa. HBM, [On-line]. Available:  
<http://www.hbm.de/products/SEURLF/ASP/SFS/SUBCAT.5/CATEGORY.1/PRODID.118/MM.3,18,/SFE/ProductDataSheet.htm>  
Abfragedatum: 22.08.2007
- [39] Handbuch der Fa. Polytec (2004) , Vibrometer Controller PFV-5000, S. 2-1 – 2-3
- [40] M. Demartin Maeder, D. Damjanovic, and N. Setter, "Lead Free Piezoelectric Materials," Journal of Electroceramics, vol. 13, pp. 385-392, 2004

## 8. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2.1: modifiziert nach: Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT- Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 17
- Abb. 2.2: modifiziert nach: Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT- Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 17
- Abb. 2.3: modifiziert nach: Haertling, Gene H. (1999): Ferroelectric Ceramics: History and Technology, in: J. Am. Ceram. Soc., 82 [4] 797-818, S. 799
- Abb. 2.4: Kingery, W. D. et al (1975), Introduction to Ceramics, 2. Auflage, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons, S. 968
- Abb. 2.5: modifiziert nach: Kamlah M. (2001), Ferroelectric and ferroelastic piezoceramics – modeling of electromechanical hysteresis phenomena, in: Continuum Mech. Thermodyn. (2001) 13: 219 – 268, S. 224
- Abb. 2.6: Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT- Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 20
- Abb. 2.7: Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT- Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 20
- Abb. 2.8: modifiziert nach: Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT- Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 21
- Abb. 2.9: Jaffe, B., Cock, W.R., Jaffe, H., (1971), Piezoelectric Ceramics, Academic Press, London und New York
- Abb. 2.10: Wehr, Jürgen (2003), Temperaturabhängige Untersuchung zum mikroskopischen und makroskopischen Dehnungsverhalten von akzeptor- und donator-dotierten PZT- Keramiken, Diss., TH Karlsruhe 2003, S. 30
- Abb. 2.11: inkl. Bildunterschrift; PI Piezotechnologie, [Online]. Available: <http://www.physikinstrumente.de/de/produkte/>  
Abfragedatum: 11.07.2007
- Abb. 2.12: Wikipdia, [On-line]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/15/Piezostack.jpg/400px-Piezostack.jpg>  
Abfragedatum: 11.07.2007

Abb. 2.13: IFAS RWTH Aachen, [On-line]. Available:

[http://www.ifas.rwth-aachen.de/Main/Kontakt/kurzlebenslaeufe/veroeff/OuP2006\\_12\\_hochdynamisches\\_hydraulisches\\_servoventil.pdf](http://www.ifas.rwth-aachen.de/Main/Kontakt/kurzlebenslaeufe/veroeff/OuP2006_12_hochdynamisches_hydraulisches_servoventil.pdf)

Abfragedatum: 11.07.2007

Abb. 3.1: eigene Darstellung

Abb. 3.2: eigene Darstellung

Abb. 3.3: eigene Darstellung

Abb. 3.4: Buchstabe a bis c, eigene Darstellung

Abb. 3.5: Buchstabe a und b, eigene Darstellung

Abb. 3.6: eigene Darstellung

Abb. 3.7: Buchstabe a bis d, eigene Darstellung

Abb. 4.1: homepage Fa. HBM, [On-line]. Available:

<http://www.hbm.de/products/SEURLF/ASP/SFS/SUBCAT.5/CATEGORY.1/PRODID.118/MM.3,18,/SFE/ProductDataSheet.htm>

Abfragedatum: 22.08.2007

Abb. 4.2: HBM, Operating manual: DD1, Darmstadt A0800-11 en, S. 8

Abb. 4.3: eigene Darstellung

Abb. 4.4: Polytec, Handbuch: Vibrometer Controller OFV-5000, 41151 – Man – Vib – OFV5000 – 0805 – 06d

Abb. 4.7: eigene Darstellung

Abb. 4.8: eigene Darstellung

Abb. 4.9: eigene Darstellung

Abb. 4.10: eigene Darstellung

Abb. 4.11: eigene Darstellung

Abb. 4.12: eigene Darstellung

Abb. 4.13: eigene Darstellung

Abb. 4.14: eigene Darstellung

Abb. 4.15: eigene Darstellung

Abb. 4.16: eigene Darstellung

Abb. 4.17: eigene Darstellung

Abb. 4.18: eigene Darstellung

Abb. 5.1: Wikipdia, [On-line]. Available:  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/15/Piezostack.jpg/400px-Piezostack.jpg>  
Abfragedatum: 11.07.2007

Abb. 5.2: eigene Darstellung

Abb. 5.3: eigene Darstellung

Abb. 5.4: eigene Darstellung

Abb. 5.5: eigene Darstellung

Abb. 5.6: eigene Darstellung

Abb. 5.7: eigene Darstellung

Abb. 5.8: eigene Darstellung

Abb. 6.1: IFAS RWTH Aachen, [On-line]. Available:  
[http://www.ifas.rwth-aachen.de/Main/Kontakt/kurzlebenslaeufe/veroeff/OuP2006\\_12\\_hochdynamisches\\_hydraulisches\\_servoventil.pdf](http://www.ifas.rwth-aachen.de/Main/Kontakt/kurzlebenslaeufe/veroeff/OuP2006_12_hochdynamisches_hydraulisches_servoventil.pdf)  
Abfragedatum: 11.07.2007

Abb. 6.2: eigene Darstellung (Diagramm und Hintergrund)

Abb. 6.3: eigene Darstellung

Abb. 6.4: eigene Darstellung

Abb. 6.5: eigene Darstellung

Abb. 6.6: eigene Darstellung

Abb. 6.7: eigene Darstellung

Abb. 6.8: eigene Darstellung

## 9. Anhang A

### Korngröße von PZT\_BULK und ungepolte PZT\_STACKS

Probe_Bild	Anzahl	Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]	St. Abweichung [ $\mu\text{m}$ ]	
PZT_BULK_KG1	131	1.40	0.59	
PZT_BULK_KG2	140	1.40	0.52	
PZT_BULK_KG3	131	1.52	0.56	
PZT_BULK_KG4	131	1.49	0.49	
PZT_BULK_KG5	147	1.42	0.54	
PZT_BULK_KG6	137	1.50	0.52	
PZT_BULK_KG7	116	1.35	0.53	
	933	<b>1.44</b>	<b>0.54</b>	<b>0.06</b>

PZT_S_ISO_KG1	211	1.56	0.62	
PZT_S_ISO_KG2	210	1.46	0.54	
PZT_S_ISO_KG3	215	1.63	0.65	
PZT_S_ISO_KG4	194	1.59	0.61	
PZT_S_ISO_KG5	218	1.62	0.65	
	1048	<b>1.57</b>	<b>0.61</b>	<b>0.07</b>

PZT_S_AKT_KG1	219	1.60	0.67	
PZT_S_AKT_KG2	200	1.62	0.63	
PZT_S_AKT_KG3	207	1.71	0.66	
PZT_S_AKT_KG4	200	1.75	0.68	
PZT_S_AKT_KG4	212	1.65	0.59	
	1038	<b>1.66</b>	<b>0.65</b>	<b>0.06</b>

---

Einzelwerte zu den Härtemessungen und Risslänge

HV 0,2 kg von Probe PZT\_BULK

Bildname	Diagonale Länge [μm]	2a [μm]	d [mm]	Härte [GPa]
PZT_BULK_1H	28.8	72.7		
PZT_BULK_1V	29.8	77.0	0.029	4.57
PZT_BULK_2H	29.2	66.2		
PZT_BULK_2V	29.5	72.8	0.029	4.55
PZT_BULK_3H	28.1	72.5		
PZT_BULK_3V	28.1	71.4	0.028	4.96
PZT_BULK_4H	29.9	72.4		
PZT_BULK_4V	28.6	70.1	0.029	4.58
PZT_BULK_5H	28.4	71.3		
PZT_BULK_5V	29.5	80.1	0.029	4.68
	<b>Horizontal</b>	<b>Vertikal</b>		
<b>Mittelwert</b>	<b>71.0</b>	<b>74.3</b>		<b>4.67</b>
<b>St.Abw.</b>	2.5	3.7		0.17

## HV 0,2 kg von Probe PZT\_S\_ISO

## Ungepolte Stack

Bildname	Diagonale Länge [µm]	2a [µm]	d [mm]	Härte [GPa]
PZT_ISO_1H	27.7	73.7		
PZT_ISO_1V	28.6	68.0	0.028	4.95
PZT_ISO_2H	28.8	85.9		
PZT_ISO_2V	29.5	69.2	0.029	4.61
PZT_ISO_3H	26.5	78.6		
PZT_ISO_3V	28.7	71.9	0.028	5.15
PZT_ISO_4H	27.6	80.5		
PZT_ISO_4V	28.4	73.7	0.028	5.00
PZT_ISO_5H	26.2	74.3		
PZT_ISO_5V	29.4	60.3	0.028	5.07
PZT_ISO_6H	28.1	80.7		
PZT_ISO_6V	28.4	75.9	0.028	4.91
PZT_ISO_7H	27.3	85.2		
PZT_ISO_7V	30.1	71.3	0.029	4.76
PZT_ISO_8H	28.1	77.0		
PZT_ISO_8V	28.4	69.1	0.028	4.91
PZT_ISO_9H	26.9	82.6		
PZT_ISO_9V	30.1	74.5	0.029	4.83
PZT_ISO_10H	26.3	---		
PZT_ISO_10V	27.6	---	0.027	5.40

## Gepolte Stack

Bildname	Diagonale Länge [µm]	2a [µm]	d [mm]	Härte [GPa]
PZT_ISO_1H	25.8	94.3		
PZT_ISO_1V	28.7	75.3	0.027	5.28
PZT_ISO_2H	26.8	84.7		
PZT_ISO_2V	28.1	66.2	0.027	5.20
PZT_ISO_3H	26.6	84.5		
PZT_ISO_3V	29.5	69.7	0.028	4.98
PZT_ISO_4H	29.1	85.7		
PZT_ISO_4V	30.1	65.5	0.030	4.47
PZT_ISO_5H	27.7	94.3		
PZT_ISO_5V	29.4	68.1	0.029	4.81
PZT_ISO_6H	29.4	93.9		
PZT_ISO_6V	29.4	75.0	0.029	4.54
PZT_ISO_7H	27.0	94.2		
PZT_ISO_7V	27.4	72.8	0.027	5.30
PZT_ISO_8H	27.6	86.2		
PZT_ISO_8V	28.3	74.5	0.028	5.02
PZT_ISO_9H	26.9	89.5		
PZT_ISO_9V	29.5	67.4	0.028	4.93
PZT_ISO_10H	26.3	92.0		
PZT_ISO_10V	27.9	69.9	0.027	5.34

	Horizontal	Vertikal	
Mittelwert	79.8	70.4	4.96
St.Abw.	4.4	4.6	0.22

	Horizontal	Vertikal	
Mittelwert	89.7	70.5	4.99
St.Abw.	4.5	3.9	0.31

## HV 0,2 kg von Probe PZT\_S\_AKT

## Ungepolte Stack

Bildname	Diagonale Länge [µm]	2a [µm]	d [mm]	Härte [GPa]
PZT_AKT_1H	26.3	82.3		
PZT_AKT_1V	28.3	69.2	0.027	5.26
PZT_AKT_2H	26.8	79.4		
PZT_AKT_2V	28.4	65.4	0.028	5.15
PZT_AKT_3H	25.8	84.7		
PZT_AKT_3V	28.1	68.3	0.027	5.40
PZT_AKT_4H	26.8	78.5		
PZT_AKT_4V	29.8	61.5	0.028	4.89
PZT_AKT_5H	27.9	82.3		
PZT_AKT_5V	28.0	68.4	0.028	5.02
PZT_AKT_6H	27.0	84.1		
PZT_AKT_6V	29.8	72.1	0.028	4.86
PZT_AKT_7H	27.9	89.4		
PZT_AKT_7V	29.2	74.3	0.029	4.81
PZT_AKT_8H	29.2	81.5		
PZT_AKT_8V	30.2	68.1	0.030	4.44
PZT_AKT_9H	27.3	83.4		
PZT_AKT_9V	28.8	64.3	0.028	4.98
PZT_AKT_10H	27.6	83.3		
PZT_AKT_10V	29.7	67.7	0.029	4.78

## Gepolte Stack

Bildname	Diagonale Länge [µm]	2a [µm]	d [mm]	Härte [GPa]
PZT_AKT_1H	27.3	95.6		
PZT_AKT_1V	30.8	64.5	0.029	4.65
PZT_AKT_2H	25.7	91.0		
PZT_AKT_2V	29.5	58.8	0.028	5.15
PZT_AKT_3H	26.3	98.5		
PZT_AKT_3V	29.8	58.6	0.028	4.98
PZT_AKT_4H	26.3	94.6		
PZT_AKT_4V	28.3	63.2	0.027	5.26
PZT_AKT_5H	27.0	91.7		
PZT_AKT_5V	29.1	63.7	0.028	4.98
PZT_AKT_6H	28.1	91.0		
PZT_AKT_6V	30.9	65.5	0.030	4.50
PZT_AKT_7H	28.8	95.3		
PZT_AKT_7V	28.1	62.6	0.028	4.84
PZT_AKT_8H	28.6	96.8		
PZT_AKT_8V	28.7	58.6	0.029	4.78
PZT_AKT_9H	27.6	94.5		
PZT_AKT_9V	29.2	65.7	0.028	4.86
PZT_AKT_10H	27.3	96.4		
PZT_AKT_10V	28.6	64.1	0.028	5.02

	Horizontal	Vertikal
Mittelwert	82.8	68.0
St.Abw.	3.2	3.9

4.96
0.27

	Horizontal	Vertikal
Mittelwert	94.3	62.4
St.Abw.	2.6	2.9

4.90
0.23

## 10. Anhang B

Alle Daten die im Kapitel 4 gemessen und ausgewertet wurden befinden sich auf einer beiliegenden CD. Um das Auffinden entsprechender Daten auf der CD zu erleichtern ist hier die Verzeichnisstruktur aufgelistet und kurz erklärt.

### Verzeichnisstruktur:

#### Anhang B

##### Vgl Wegmesssysteme

###### **quasistatische Messungen**

*Auflistung der Messdaten*

*Auswertungen der Messungen bis 5 Hz (Origin) (Kap. 4.2.2)*

###### **dynamische Messungen**

*Auflistung der Messdaten*

*Auswertungen der Messungen bis 150 Hz (Origin) (Kap. 4.2.2)*

##### Verkipfung Oberstempel

*Auswertung in Origin (Kap. 4.3.1)*

*Berechnung der Stempelverkipfung (Mathematica)*

##### Resonanzstudie

###### **Schwingungsanalyse Rahmen**

*Auflistung der Messdaten*

*Auswertung der Eigenfrequenz (Origin) (Kap. 4.2.3)*

###### **Schwingungsanalyse Gesamtsystem**

*Auflistung der Messdaten*

*Auswertung der Resonanzfrequenzen (Origin) (Kap. 4.2.3)*

##### Blockierkraft Stack

*Auswertung und Messdaten (Origin) (4.3.2)*

---

# 11. Anhang C

```
1 /COM, autor: spa, 07.08.2007
2 /COM, Batch: /INPUT,Piezo_2D,inp
3
4 FINISH
5 /OUT,rubbish
6 /CLEAR
7 /OUT
8
9 /TITLE, 2D Modell: Piezostack
10
11 *USE,'x_readtime_i.mac',0           ! Macro für Lesen der CPU/WALL-time
12
13 /PREP7
14     /PLOPTS,LOGO,0
15     /PLOPTS,DATE,1
16
17 !-----
18 ! **Eingabe der PARAMETER**
19
20 ! Bauteilgeometrie:
21     breite= 0.008000           ! Stackbreite
22     hoehe= 0.000075           ! Schichtdicke
23     iso= 0.000400             ! Breite der Isozone
24
25 ! Vernetzungsparameter:
26     ny_div=6                   ! Anzahl der Elemente in y- Richtung
27     nx_divakt=15               ! Anzahl der Elemente in x- Richtung
    (Aktivzone)
28     nx_diviso=10              ! Anzahl der Elemente in x- Richtung
    (Isozone)
29     fconc=3                   ! Faktor für Netzverfeinerung in den
    Randbereichen
30
31 ! Elementtyp:    0 plane13      ! lineares 4-Knoten Element
32 !               1 plane223     ! quadratisches 8-Knoten Element
33     f_elementype=1            ! Auswahl des Elementtyps
34
35 ! Spannung an den Elektroden zu Beginn
36     u1=0                       ! oben, unten
37     u2=0                       ! mitte
38
39     u_max=200                  ! Maximaler Spannungswert (mitte)
40
```

## Anhang C

---

```
41 ! Koerzitivfeldstärke [SI: V/m]
42   ec=1.1E6                               ! Koerzitivfeldstärke
43   es=2E6                                 ! Sättigungsfeldstärke
44
45 ! Anzahl der zu Berechnenden Schritte
46   m_ges=4
47
48 ! Anzahl der Polarisationsstufen:
49   npiezomat=200                          ! Anzahl der Material- Parametersätze
50
51 ! Anzahl der Iterationsschritte für das EKS- drehen
52   niter=10                               ! Anzahl der Iterationsschritte (EKS drehen)
53
54 ! remanente Dehnung (JA=1,NEIN=0)
55   f_remD=1                               ! Berechnung mit oder ohne remanente Dehnung
56 !-----
57
58
59 ! **Kontrolle der Parameter**
60
61   *IF,m_ges,LT,3,THEN
62       /COM, Es müssen mindestens 3 Punkte berechnet werden
63       /EOF
64   *ENDIF
65
66
67 ! **Bauteilerzeugen**
68
69 RECTNG,0,breite,0,hoehe                   ! Erstellen der Aktivzone
70 RECTNG,iso,breite-iso,0,hoehe           ! Erstellen der beiden Isozonen
71 APTN,ALL
72 ARSYMM,y,ALL,,,,0,0                     ! Spiegeln der oberen Schicht an der
x- Achse
73 APTN,ALL
74
75
76 ! **Festlegen der Materialparametersätze**
77
78 ! x_piezostandart.mac ist ein Makro zur Erstellung von Materialparametern
79 ! Folgende Argumente werden übergeben: Mat.Nr, Polarisationsrichtung, Skalierung
,elast. ortho- bzw isotrop
80
81 *USE,'x_piezostandart.mac',1,'y',0,'ortho',0,0 ! Erst. des Parametersatzes 1
82
83 *DO,imat,1,npiezomat                      ! Erstellen der restlichen
Parametersätze
84   ipiezomat=100+imat
85   skal=1/(npiezomat-1)*(imat-1)
86   *USE,'x_piezostandart.mac',ipiezomat,'y',skal,'ortho',skal,skal
87 *ENDDO
88
89
```

## Anhang C

---

```
90 ! **Festlegen des Elementtyps**
91
92 *IF,f_elementype,EQ,0,THEN
93     ET,1,PLANE13,7                                ! Element: Plane13 (4-nodes),
                                                    plane strain = standart
94 *ELSEIF,f_elementype,EQ,1THEN
95     ET,1,PLANE223,1001                            ! Element: Plane223 (8-nodes)
96     ! KEYOPT,1,1,1001                            ! Keyopt 1001: Thermo-Piezo-Option: VOLT,
                                                    UX, UY
97     KEYOPT,1,3,2                                  ! Keyopt 2: plane strain
98 *ELSE
99     /COM, Falsche Elementauswahl!
100    /EOF
101 *ENDIF
102
103
104 ! **Vernetzen des Modells **
105
106 LSEL,S,LOC,Y,hoehe/2'                            ! Festlegen der Elementgröße in y- Richtung
107 LSEL,A,LOC,Y,-hoehe/2
108 LESIZE,ALL, , ,ny_div,-fconc, , , ,1
109
110
111 LSEL,S,LOC,X,breite/2                            ! Festlegen der Elementgröße in x- Richtung
                                                    (Aktivzone)
112 LESIZE,ALL, , ,nx_divakt,-fconc*2, , , ,1
113
114 LSEL,A,LOC,Y,hoehe/2                            ! Festlegen der Elementgröße in x- Richtung
                                                    (Isozone)
115 LSEL,A,LOC,Y,-hoehe/2
116 LSEL,INVE
117 LESIZE,ALL, , ,nx_diviso,-fconc, , , ,1
118
119 LSEL,ALL
120
121 MSHAPE,0,2D                                      ! Vernetzen
122 MSHKEY,1
123 AMESH,ALL
124
125
126 ! Definition der Randbedingungen
127
128 NSEL,S,LOC,Y,hoehe
129 NSEL,R,LOC,X,0,breite-iso,
130 CM,el_o,NODE                                     ! speichern der ausgewählten Knoten als: el_o
131 D,ALL,VOLT,u1                                    ! Festlegen des Elektrodenpotentials (Elektr. oben)
132
133 NSEL,S,LOC,Y,-hoehe
134 NSEL,R,LOC,X,0,breite-iso,
135 CM,el_u,NODE                                     ! speichern der ausgewählten Knoten als: el_u
136 D,ALL,VOLT,u1                                    ! Festlegen d. Elektrodenpotentials (Elektr. unten)
137
```

## Anhang C

---

```
138 ! elektrode mitte (u2)
139
140 NSEL,S,LOC,Y,0
141 NSEL,R,LOC,X,iso,breite,
142 CM,el_m,NODE ! speichern der ausgewählten Knoten als: el_m
143 D,ALL,VOLT,u2 ! Festlegen des Start- Elektrodenpotentials
                    (Elektr. mitte)

144
145 NSEL,S,LOC,Y,0 ! Auswahl: Mittellinie
146 DSYM,SYMM,Y, , ! Definieren der Mittellinie als
Symmetriegerade
147 CM,syma_x,NODE
148
149 NSEL,S,LOC,Y,hoehe ! Auswahl: oberer Rand
150 CM,symnode_top,NODE
151 CP,NEXT,UY,ALL ! Koppeln der Randknoten bez. y-
                    Verschiebung

152
153 NSEL,S,LOC,Y,-hoehe ! Auswahl: unterer Rand
154 CM,symnode_top,NODE
155 CP,NEXT,UY,ALL ! Koppeln der Randknoten bez. y-
                    Verschiebung

156
157 ALLSEL
158
159 D,NODE(0,0,0),,,,,,UX, ! Festhalten des linken Knotens der
160 ! Mittellinie um eine Translation des
                    Modells zu unterbinden

161
162 NUMCMP,NODE
163 NUMCMP,ELEM
164
165 FINISH
166
167 *USE,'x_readtime_i.mac',1 ! Macro fuer Lesen der CPU/WALL-time
168
169
170 ! **Loesen des Modells mit den Startbedingungen**
171
172 /SOLU
173 TIME,1
174 SOLVE
175 FINISH
176
177 *USE,'x_readtime_i.mac',2 ! Macro fuer Lesen der CPU/WALL-time
178
179
180 delta_e=es-ec' ! Diff. zwischen Koerzitiv- u.
                    Sättigungsfeldstärke
181 delta_u=u_max-u2 ! Diff. zwischen u_max und u2
                    (Mittlelektrode)
182 *GET,nzahl,ELEM,,COUNT ! Anz. der Elemente bestimmen
```

## Anhang C

```

183 *DIM,pol_res,ARRAY,nzahl      ! Array für die Polarisationszustände der
                                ! Elemente
184 *DIM,eks_w,ARRAY,nzahl      ! Erstellen eines Arrays für die Drehwinkel
der Elemente
185
186 *DO,m,1,m_ges                ! Schleife zur Berechnung der einzelnen
                                ! Polarisationsstufen
187
188 *DO,n,1,niter                ! Schleife die Iterationsschritte
189                                ! (EKS- Drehen, Polarisation, BODY Temp.)
190
191 /POST1                        ! General Postprocessor
192 *AFUN,DEG
193 ESEL,ALL
194 CSYS,0
195 ETable,sumFeld,EF,SUM        ! Estellen einer Element- TABLE: Summe des
                                ! elektrischen Feldes
196 ETable,xFeld,EF,X            ! x- Komponente des eletr. Feldes
197 ETable,yFeld,EF,Y            ! y- Komponente des eletr. Feldes
198 FINISH
199 /PREP7                        ! Preprocessor

200 *VGET,eFsum_a,ELEM,1,ETAB,sumFeld ! Array für die Werte des elektr.
                                ! Feldes aller Elemente
201 *VGET,eFx_a,ELEM,1,ETAB,xFeld ! Array für die x- Komp. des elektr. F.
                                ! aller Elemente
202 *VGET,eFy_a,ELEM,1,ETAB,yFeld ! Array für die y- Komp. des elektr. F.
                                ! aller Elemente
203 *VOPER,thxy_a,eFy_a,ATN2,eFx_a ! Berechnung des Drehwinkels für jedes
                                ! Element
204
205 *DO,i,1,nzahl                ! Schleife für die Zuweisung
                                ! (EKS- Drehwinkel, Pol.)
206     eF=%eFsum_a(i)%
207     winkel=%thxy_a(i)%
208     *IF,ec,LE,eF,THEN        ! Abfrage ob e- Feld größer als
                                ! Koerzitivfeldstärke
209
210         *IF,eF,GT,es,THEN    ! Abfrage ob e- Feld größer als
                                ! Sättigungsfeldstärke
211             eF=es
212         *ENDIF
213
214         pol_e=(npiezomat/delta_e)*(eF-ec) ! Berechnung der
                                ! Polarisation (bez. eF)
215         pol_res(i)=(0.8)*pol_res(i)+(0.2)*pol_e ! Berechnung der
                                ! Pol. (für Zuweisung)
216         eks_w(i)=(0.3)*eks_w(i)+(0.7)*winkel ! Berechnung des
                                ! zuzuweisenden Winkels
217
218         CSYS,0                ! EKS- drehen
219         LOCAL,10+i,0,0,0,0,(eks_w(i)-90) ! Def. des Koordinatensystems
220         EMODIF,i,ESYS,10+i    ! Zuweisen des EKS zu einem Element

```

## Anhang C

---

```
221
222           temp=pol_res(i)/npiezomat           ! Berechnung der Temp. des
                                                Elements
223
224       ! Abfrage ob Spannung noch nicht Abgeschaltet (letzter Schritt)
225       *IF,m,LT,m_ges,THEN
226           *IF,pol_res(i),GT,0,AND,pol_res(i),LE,npiezomat-1,THEN
227               EMODIF,i,MAT,101+pol_res(i)     ! Zuweisen des
                                                Polungszustandes
228           *ELSEIF,pol_res(i),GT,npiezomat-1,THEN
229               EMODIF,i,MAT,100+npiezomat
230           *ENDIF
231
232           BFE,i,TEMP,1,temp*f_remD           ! Zuweisen der
                                                berechneten BODY Temp.
233
234       *ENDIF
235
236 *ENDDO           ! Schleifenende: Elementparameter zuweisen
237
238 FINISH
239 /SOLU           ! Solver
240 *IF,m,EQ,1,THEN ! Resultdatei stets wieder überschreiben
241     ANTYPE,,NEW
242 *ELSE
243     ANTYPE,,REST ! Resultdatei pro Berechnung erweitern
244 *ENDIF
245     SOLVE
246 FINISH
247
248 /POST1
249 PLVECT,EF, , , ,VECT,ELEM,ON,0 ! Ausgabe der e- Feldvektoren
250 /REPLOT
251 FINISH
252
253 *ENDDO           ! Schleifenende: Iteration
254
255 /PREP7
256 *IF,m,LT,m_ges-1,THEN
257     u_ist=(delta_u/(m-ges-2))*m
258     CMSEL,S,el_m,NODE
259     D,ALL,VOLT,u_ist           ! nächst höheren Spannungswert zuweisen
260 *ELSE
261     u_ist=0
262     CMSEL,S,el_m,NODE
263     D,ALL,VOLT,u_ist           ! am Ende Spannung an der Mittelelektrode
                                                auf 0 setzen
264 *ENDIF
265 ALLSEL
266 FINISH
267
268 *ENDDO           ! Schleifenende: Polarisationschritte
269
```

## Anhang C

---

```
270
271 ! **Löschen der nicht benötigten Result Sets**
272
273 FINISH
274 /AUX3                                ! Resultfile Editor
275 FILEAUX3,Piezo_2D,rst
276 n_set=(niter*(m_ges-1))+1
277
278 *DO,k,1,m_ges-1
279   *DO,j,1+k,niter+k
280     *IF,j,NE,niter+k,THEN
281       DELETE,SET,j,j                  ! Auswahl des zu löschenden Sets
282     *ENDIF
283   *ENDDO
284   COMPRESS                            ! Löschen der ausgewählten Sets
285 *ENDDO
286 FINISH
287
288 /POST1
289 PLNSOL,EPTT,Y,0.1.0                  ! Gesamtdehnung in y- Richtung
290 FINISH
291
292
293 ! **Ausgabe der benötigten CPU Zeiten**
294
295 FINISH
296 *USE,'x_readtime_i.mac',3           ! Macro für Lesen der CPU/WALL-time
297 deltwllh=wallt3-wallt0              ! [hr]
298 deltwlls=(wallt3-wallt0)*3600      ! [s]
299
300 deltcpuh=(cput3-cput0)/3600        ! [hr]
301 deltcpus=(cput3-cput0)             ! [s]
302
```