

Polungs- und Biegeverhalten von $\text{Ba}(\text{Ti},\text{Sn})\text{O}_3$ - Keramiken mit einem Funktionsgradienten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doktor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Azamat Kuvatov
geb. am 28.10.1973 in Ufa

Gutachterin / Gutachter:

1. Prof.Dr. Horst Beige, Halle
2. Dr. Marc Kamlah, Karlsruhe

Halle(Saale), 10.01.2005

urn:nbn:de:gbv:3-000008387

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000008387>]

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	V
Einführung	1
1 Grundlagen	3
1.1 Ferroelektrizität	3
1.1.1 Polarisierung, Elektrostriktion	3
1.1.2 Die Kristallstruktur von Ferroelektrika	3
1.1.3 Hysterese- und Dehnungskurve	4
1.1.4 Piezoelektrische Grundgleichungen	5
1.2 Einfluss des Zinngehalts auf die Eigenschaften der BaTi _(1-x) Sn _x O ₃ Keramik	6
1.3 Anwendung ferroelektrischer Keramiken	8
1.3.1 Nutzung des direkten oder inversen Piezoeffektes	8
1.3.2 Biegeaktuatoren	9
1.4 Materialien mit einem Gradient der funktionalen Eigenschaften	10
1.4.1 FGM - Functional Gradient Materials	10
1.4.2 BaTi _(1-x) Sn _x O ₃ Keramik mit einem Gradient des Zinngehalts	11
1.5 Herstellung ferroelektrischer Keramiken	12
1.5.1 Mischoxidverfahren	12
1.5.2 Polungsprozess der Ferroelektrika	14
1.5.3 Herstellung der BaTi _(1-x) Sn _x O ₃ Keramik mit einem Gradient des Zinngehalts	14
1.6 Experimentelle Methoden	15
1.6.1 Bestimmung der Biegeauslenkung	15
1.6.2 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Keramik	16
1.6.3 Bestimmung der Dielektrizitätskonstante	17
1.6.4 Ferroelektrische Hysteresekurve	17
1.6.5 Bestimmung der piezoelektrischen Koeffizienten	17
1.6.6 Mikrodehnungsmeßplatz	18
1.6.7 Numerische Modellierung mit Finite-Elemente-Methode	19

2	Das Polungsverhalten von Gradientenmaterialien	21
2.1	Die Polarisierung in inhomogenen Ferroelektrika	21
2.2	Modellierung des Polungsverhaltens von Gradientenmaterialien	23
2.3	Mehrschichtstrukturen	25
2.3.1	Elektrisch verbundene, geklebte und monolithische Mehrschichtstrukturen	25
2.3.2	Zinnverteilung in den untersuchten Systemen	27
2.4	Vergleich zwischen Modellierung und Experiment	29
2.4.1	Polungsverhalten von Proben mit niedrigem Zinngehalt	29
2.4.2	Polungsverhalten von Proben mit höherem Zinngehalt	32
2.5	Modellierung der Dehnungskurve von Mehrschichtsystemen	34
2.5.1	Dehnung S_3 als Funktion der Polarisierung	34
2.5.2	Modellierung der Dehnungskurve	35
2.6	Bestimmung des Polungsgrades mit Hilfe der Modellierung des Polungsverhaltens	39
2.7	Einfluss der Polungsrichtung auf das Polungsverhalten von $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$ basierten Mehrschichtsysteme	41
2.8	Feldabhängigkeit des Polungsverhaltens des auf $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$ basierten Mehrschichtsystems	43
2.9	Polungsverhalten der Mehrschichtsysteme unter Berücksichtigung der elektrischen Leitfähigkeit	46
2.9.1	Modellierung des Polungsverhaltens von Mehrschichtsystemen unter Berücksichtigung der elektrischen Leitfähigkeit	46
2.9.2	Messung der Feldstärkeverteilung beim Polen mit Gleichfeld	48
3	Biegeverhalten von Gradientenmaterialien	51
3.1	Verteilung des elektrischen Feldes in seriell verbundenen Ferroelektrika bei niedrigen elektrischen Spannungen	51
3.2	Biegeaktuatoren mit Mehrschichtstruktur	53
3.2.1	Beschreibung der Modellstruktur	53
3.2.2	Grundlagen der Biegetheorie	54
3.2.3	Biegeradius und Auslenkung	57
3.2.4	Die mechanische Spannung im Aktuator während der Biegung	58
3.3	Analytische und numerische Untersuchung des Biegeverhaltens von Aktuatoren	59
3.3.1	Berechnung der Auslenkung	60
3.3.2	Verteilung der mechanischen Spannung	61
3.3.3	Maximale mechanische Spannung	62
3.4	Aktuatoren mit nichtlinearer, kontinuierlicher Verteilung des piezoelektrischen Koeffizienten d_{31}	65
3.5	Analytische Analyse des Einflusses der dielektrischen Eigenschaften auf das Biegeverhalten	67
3.6	Geklebte Aktuatoren aus BaTiO_3 -Keramik	69
3.6.1	Die Struktur von Aktuatoren aus BaTiO_3 -Keramik	69

3.6.2	Biegeverhalten von Aktuatoren aus BaTiO ₃	71
3.6.3	Vergleich zwischen Experiment und Modellierung	71
3.7	Monolithische Aktuatoren aus BaTi _(1-x) Sn _x O ₃ -Keramik	73
3.7.1	Die Struktur von monolithischen Aktuatoren aus BaTi _(1-x) Sn _x O ₃ - Keramik	73
3.7.2	Besonderheiten in der Biegetheorie für Aktuatoren mit unidirek- tionalem Gradient der Eigenschaften	75
3.7.3	Biegeverhalten von Aktuatoren mit niedrigem Zinngehalt	76
3.7.4	Biegeverhalten von Aktuatoren mit höherem Zinngehalt	80
3.7.5	Vergleich des Biegeverhaltens von Aktuatoren mit verschiedener Verteilung der Eigenschaften	85
4	Optimierung und Ausblick	87
4.1	Einfluss der Polungsfeldstärke auf das Biegeverhalten von monolithischen Aktuatoren	87
4.2	Einfluss der Polungszeit auf das Biegeverhalten	88
4.3	Elektrische Zyklierung	89
	Zusammenfassung	91

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

A	Fläche
BT	BaTiO ₃
BTSx	BaTi _(1-x) Sn _x O ₃
c_{mj}	Elastische Steifigkeit
D	Elektrische Verschiebung
$d_{in}, e_{mn}, g_{ji}, h_{ik}$	Piezoelektrischen Koeffizienten
E_i	Elektrische Feldstärke
E_{ber}	berechnete Polungsfeldstärke
E_{pol}	Polungsfeldstärke
\overline{E}	Mittelwert der Feldstärke
FEM	Finite-Elemente-Methode
J	Elektrischer Strom
$h^{(i)}$	Schichtdicke
h	Dicke der Probe
L	Länge der Probe
N	Anzahl der Schichten
P_i	Polarisation
R	Biegeradien
S_i	Mechanische Dehnung
S_1^{bieg}	Biegedehnung
$\overline{S_1}$	mittlere Dehnung
s_{ij}	Elastische Nachgiebigkeit
T_i	Mechanische Spannung
U	Elektrische Spannung
w	Breite der Probe
w	Kreisfrequenz
WDX-EPMA	Wavelength Dispersive Electron Probe Micro-Analysis
Y_p	Youngscher Modul
β_{ji}	Dielektrische Suszeptibilität
δ	Auslenkung
ε_{ij}	Dielektrizitätskonstante
σ	Leitfähigkeit
φ	Winkel
B-1	BTS(0-2.5)
T-1	BTS(2.5-0-7.5)
B-2	BTS(7.5-15)
T-2	BTS(7.5-12.5-15)
V-2	BTS(7.5-10-12.5-15)

