
Inhaltsverzeichnis

Teil I Schwerpunkte des Buches

1	Einleitung	3
1.1	Einsatzgebiete piezoelektrischer Aktoren	3
1.2	Motivation und Zielsetzung des Buches	4
1.3	Stand der wissenschaftlichen Forschung	5
1.3.1	Statisches Verhalten piezoelektrischer Biegewandler	6
1.3.2	Dynamisches Verhalten piezoelektrischer Biegewandler	7
1.3.3	Netzwerkdarstellung piezoelektrischer Biegewandler	9
1.4	Aufbau und inhaltliche Schwerpunkte des Buches	10
	Literatur	12

Teil II Piezoelektrizität und piezoelektrische Funktionskeramik PZT

2	Piezoelektrizität	17
2.1	Entdeckung der Piezoelektrizität	17
2.2	Direkter und reziproker piezoelektrischer Effekt	19
	Literatur	31
3	Piezoelektrische Funktionskeramik PZT	33
3.1	Entdeckungsgeschichte piezoelektrischer Keramiken	33
3.2	Kristallstruktur von PZT	37
3.3	Phasendiagramm und Materialeigenschaften von PZT	42
3.4	Mikroskopisches Verhalten des Ferroelektrikums PZT	45
3.4.1	Ferroelektrische Domänen	49
3.4.2	Polung eines PZT-Keramikkörpers	51
3.4.3	Domänenprozesse im ferroelektrischen Einkristall	53

3.5	Makroskopisches Verhalten des Ferroelektrikums PZT	56
3.5.1	Verhalten unter elektrischer Belastung	57
3.5.2	Verhalten unter mechanischer Belastung	60
3.5.3	Verhalten unter gekoppelter elektromechanischer Belastung....	62
	Anhang: Remanente Dehnung einer PZT-Keramik bei Druck- und Zugbelastung	65
	Literatur	66
4	Aufbereitung und Herstellung von PZT-Keramiken	71
4.1	Einleitende Betrachtungen zum Herstellungsprozess von Keramiken im System Bleizirkonat-Bleititanat (PZT)	71
4.2	Auswahl der Rohstoffe	72
4.3	Aufbereitung der Rohstoffe	74
4.3.1	Mischoxidverfahren (MO)	74
4.3.2	Trocknungsprozess	75
4.3.3	Kalzinieren	76
4.3.4	Feinmahlen	76
4.4	Formgebung	77
4.4.1	Formgebung durch Pressen	78
4.4.2	Formgebung feuchter Keramikmassen	80
4.4.3	Grünfolienbearbeitung	82
4.5	Sintern	83
4.5.1	Besonderheiten beim Sintern	85
4.5.2	Mechanische Bearbeitung gesinterter PZT-Keramiken	86
4.6	Metallisierung	86
4.7	Polung	87
4.8	Dotierung	88
4.8.1	Donatordotierte PZT-Keramiken	89
4.8.2	Akzeptordotierte PZT-Keramiken	89
4.9	Piezoelektrische Aktoren	89
4.9.1	Stapelaktoren	91
4.9.2	Transversalaktoren	92
4.9.3	Biegeaktoren	92
	Literatur	96

Teil III Lineare Theorie piezoelektrischer Materialien

5	Energiedichte der elastischen Verformung	101
5.1	Spannungsvektor und Spannungstensor	101
5.2	Gleichgewichtsbedingungen am elastisch verformbaren Körper	106
5.2.1	Kräftegleichgewichtsbedingungen	108
5.2.2	Momentengleichgewichtsbedingungen	109

5.3	Der räumliche Verschiebungs- und Verzerrungszustand	111
5.3.1	Räumliche Verschiebungen	111
5.3.2	Der räumliche Verzerrungszustand	112
5.4	Energiedichte der elastischen Verformung	118
	Anhang 1: Lineare Näherung nichtlinearer Funktionen	126
	Anhang 2: Rechnen mit Differenzialen – Produktregel	129
	Literatur	130
6	Energiedichte im elektrostatischen Feld	133
6.1	Coulomb-Kraft und Coulombsches Gesetz	133
6.2	Elektrisches Feld im Vakuum	136
6.2.1	Der Fluss des elektrischen Feldes	137
6.2.2	Arbeit im elektrischen Feld	139
6.2.3	Das elektrische Potenzial	142
6.3	Die Feldgleichungen der Elektrostatik im Vakuum	144
6.3.1	Die Integralform der Feldgleichungen	144
6.3.2	Die Differenzialform der Feldgleichungen	145
6.4	Feld des Plattenkondensators als Modellfeld	151
6.5	Energiedichte des elektrischen Feldes im Vakuum	153
6.6	Elektrisches Feld im isotropen Dielektrikum	156
6.6.1	Dielektrikum im homogenen Feld eines Plattenkondensators ...	156
6.6.2	Mittlere Feldgrößen in inhomogenen elektrischen Feldern	159
6.7	Energiedichte des elektrischen Feldes in Dielektrika	164
6.7.1	Energiedichte in isotropen Dielektrika	164
6.7.2	Energiedichte in anisotropen Dielektrika	169
	Anhang 1: Eigenschaften des elektrischen Flusses	170
	Anhang 2: Energie und Energiedichte des elektrostatischen Feldes im Vakuum	173
	Anhang 3: Differenziation von Parameterintegralen nach der Leibniz-Regel ...	177
	Anhang 4: Energiedichte des elektrostatischen Feldes im Dielektrikum	179
	Literatur	182
7	Piezoelektrische Zustandsgleichungen	185
7.1	Thermodynamische Grundbegriffe	185
7.2	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	187
7.3	Thermodynamik der Deformation eines elastischen Dielektrikums	190
7.4	Lineare Zustandsgleichungen	193
7.4.1	Zustandsgleichungen – unabhängige Zustandsgrößen (T, E)	196
7.4.2	Zustandsgleichungen – unabhängige Zustandsgrößen (S, E)	201
7.4.3	Komprimierte Notation elastischer, dielektrischer und piezoelektrischer Tensoren	204
	Literatur	208

**Teil IV Theorie des statischen und dynamischen Verhaltens
piezoelektrischer Biegewandler**

8	Statisches Verhalten piezoelektrischer Biegewandler	213
8.1	Schnittlasten im Biegebalken	213
8.2	Kinematik der Verformung des ebenen Balkens	215
8.3	Lage der neutralen Faser	220
8.4	Biegesteifigkeit des ebenen Schichtsystems und inneres piezoelektrisches Moment	223
8.5	Energetische Beschreibung des auf Biegung beanspruchten Schichtsystems	226
8.5.1	Innere Energie der Einzelschicht unter Biegebeanspruchung ...	227
8.5.2	Innere Energie des Schichtsystems unter Biegebeanspruchung	229
8.6	Energetisch konjugierte Größen und statische Kopplungsmatrix	231
8.6.1	Eingeprägte Lastgrößen am mehrschichtigen Biegewandler	231
8.6.2	Innere Energie und energetisch konjugierte Größen	233
8.6.3	Grundlegende Betrachtungen zur statischen Kopplungsmatrix	237
8.7	Prinzip der virtuellen Arbeit für ein System starrer Körper	239
8.8	Prinzip der virtuellen Arbeit für linear elastische Systeme.....	243
8.9	Satz vom stationären Wert des Gesamtpotenzials	246
8.9.1	Arten von Gleichgewichtslagen	250
8.9.2	Prinzip vom Minimum des Gesamtpotenzials.....	253
8.9.3	Anwendung des Prinzips vom Minimum des Gesamtpotenzials am Beispiel des ebenen Balkens.....	254
8.9.4	Das Verfahren von Ritz.....	257
8.10	Herleitung der statischen Kopplungsmatrix.....	260
8.10.1	Statische Momente als eingeprägte Wirklasten	262
8.10.2	Statische Kraft als eingeprägte Wirklast.....	265
8.10.3	Statischer Druck als eingeprägte Wirklast.....	268
8.10.4	Eingeprägte Wirklasten und erzeugte Ladungsverschiebungen	271
8.11	Statische Kopplungsmatrix	283
Anhang 1:	Biegesteifigkeit eines ebenen Schichtsystems.....	286
Anhang 2:	Energieinhalt einer piezoelektrischen Einzelschicht unter Biegebeanspruchung	287
Anhang 3:	Punktverschiebungen in kartesischen Koordinaten	289
Literatur	292

9	Lagrange-Gleichungen und Aspekte der Variationsrechnung	295
9.1	Zu den Begriffen Impuls und Kraft.....	295
9.1.1	Klassifikation von Zwangsbedingungen.....	299
9.1.2	Generalisierte Koordinaten.....	300
9.2	D'Alembertsches Prinzip	300
9.3	Herleitung der Lagrange-Gleichung I. und II. Art	302
9.4	Anwendung der Lagrange-Gleichungen II. Art.....	306
9.5	Euler-Lagrange-Differenzialgleichung	308
	Literatur	313
10	Hamilton-Prinzip und piezoelektrische Biegewandler	315
10.1	Hamilton-Prinzip	315
10.2	Berücksichtigung nicht-konservativer Lastgrößen.....	316
10.3	Lagrange-Funktion eines piezoelektrischen Biegewandlers	319
10.4	Variation der Lagrange-Funktion	322
10.5	Arbeit nicht-konservativer Größen	325
10.6	Variation der Arbeit	331
10.7	Differenzialgleichungen eines piezoelektrischen Biegewandlers	332
	Anhang 1: Berechnung der elektrischen Enthalpiedichte	333
	Anhang 2: Zusammenhang zwischen Materialparametern	334
	Literatur	336
11	Dynamisches Verhalten piezoelektrischer Biegewandler	337
11.1	Eigenmoden des einseitig eingespannten Biegewandlers	337
11.2	Orthogonalitätsbeziehungen der Eigenfunktionen	344
11.3	Beschreibung des zeitabhängigen Verhaltens von Eigenmoden	347
11.4	Allgemeiner Lösungsansatz für das zeitabhängige Verhalten von Biegeschwingungen	349
11.5	Freie gedämpfte Biegeschwingung	351
11.6	Biegeschwingungen bei harmonischer Anregung	353
11.7	Herleitung der Admittanz-Matrix	357
11.7.1	Harmonische Anregung durch ein Moment	360
11.7.2	Harmonische Anregung durch eine Kraft	362
11.7.3	Harmonische Anregung durch einen Druck	364
11.7.4	Harmonische Anregung durch eine Wechselspannung	365
11.7.5	Harmonische Lastgrößen und erzeugte Ladungsverschiebung	366
11.8	Admittanz-Matrix	369
	Anhang 1: Von den Rayleigh-Funktionen zur charakteristischen Gleichung	372
	Anhang 2: Zur harmonischen Anregung durch eine Kraft	373
	Literatur	374

12	Piezoelektrischer Biegewandler als elektromechanisches System	377
12.1	Grundstruktur elektromechanischer Systeme	377
12.1.1	Besonderheiten der Netzwerkbeschreibung	378
12.1.2	Isomorphie zwischen elektrischen und translatorischen mechanischen Netzwerken	379
12.2	Der ideale Stab als Translations-Rotations-Wandler	383
12.3	Biegung eines differenziellen Balkenelements	386
12.3.1	Verknüpfungsgleichungen am differenziellen Balkenelement	389
12.3.2	Übergang zur komplexwertigen Differenzialgleichung für Biegewellen	393
12.3.3	Lösungsansatz zur komplexwertigen Biegewellengleichung	396
12.4	Allgemeine Lösung der Biegewellengleichung	398
12.5	Mitgangsmatrix eines Biegeschwingers	401
12.5.1	Anregung durch eine periodische Erregerkraft \underline{F}_1	402
12.5.2	Anregung durch eine periodische Erregerkraft \underline{F}_2	404
12.5.3	Anregung durch ein periodisches Erregermoment \underline{M}_1	405
12.5.4	Anregung durch ein periodisches Erregermoment \underline{M}_2	406
12.6	Übergang vom mehrschichtigen Biegeschwinger zum Vielschicht-Biegewandler	408
12.7	Der einseitig fest eingespannte Vielschicht-Biegewandler	416
12.7.1	Schaltungstechnische Darstellung eines einseitig fest eingespannten Biegewandlers für die Grundmode	421
12.7.2	Kanonische Schaltungsdarstellung eines einseitig fest eingespannten Biegewandlers	425
	Literatur	428

Teil V Praktischer Teil

13	Messplatz für piezoelektrische Biegewandler	431
13.1	Aufbau eines Messplatzes	431
13.2	Automatisierung des Messplatzes	434
13.2.1	Stabilisierung des Biegewandlers	435
13.2.2	Elektrische Ansteuerung des Biegewandlers	437
13.2.3	Erfassung der Auslenkung des Biegewandlers	437
13.2.4	Ansteuerung der Linearantriebe	437
13.2.5	Ansteuerung des Voice-Coil-Motors	438
13.2.6	Messdatenspeicherung	439
	Literatur	439

14 Messungen am realen Biegewandler und analytische Berechnungen im Vergleich	441
14.1 Morphologischer Aufbau des verwendeten Biegewandlers	441
14.2 Statische und quasistatische Messungen	442
14.2.1 Hysteresemessung und Ermittlung der piezoelektrischen Ladungskonstanten aus dem Hystereseverlauf	443
14.2.2 Biegecharakteristik	447
14.2.3 Kraft-Weg-Kennlinien	448
14.3 Dynamische Messungen	451
14.3.1 Experimentelle Ermittlung des Reibungsbeiwerts	452
14.3.2 Erste und zweite Eigenmode	455
14.3.3 Übertragungsverhaltens	459
Anhang: Logarithmisches Dekrement	465
Literatur	466
 Glossar	 469
Stichwortverzeichnis	493