

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xix
Vorwort	1
I. Theoretische Grundlagen	7
1. Grundlagen zur Piezoelektrizität	8
1.1. Geschichte	8
1.2. Piezoelektrischer Effekt	10
1.3. Kristallographie	20
1.4. Piezoelektrische Koeffizienten	25
1.5. Silizium als Substratmaterial	27
2. Piezoelektrische Materialien	29
2.1. Überblick der piezoelektrischen Materialien	29
2.2. Materialmatrizen für Aluminiumnitrid	31
2.3. Saat- und Wachstumsschichten	33
II. Entwurf	39
3. Entwurf mikromechanischer Systeme	40
3.1. Überblick	40

3.2.	Ein-Freiheitsgrad-System	41
3.2.1.	Statisches System	41
3.2.2.	Ungedämpft-dynamisches System	42
3.2.3.	Gedämpft-dynamisches System	44
3.3.	Zwei-Freiheitsgrad-System	47
3.3.1.	Ungedämpft-dynamisches System	47
3.3.2.	Gedämpft-dynamisches System	47
3.4.	Steifigkeit von Mikrosystemen	54
3.4.1.	Beanspruchungsarten	54
3.4.2.	Grundgleichungen für Federn	55
3.4.3.	Kombination von Federelementen	59
4.	Entwurf piezoelektrischer MEMS	65
4.1.	Longitudinale piezoelektrische Systeme	65
4.2.	Transversale piezoelektrische Systeme	70
4.2.1.	Allgemeine Modellierung eines Multimorphs . . .	70
4.2.2.	Modellierung piezoelektrischer Uni- und Bimorphe	73
4.3.	Netzwerkmodell mit konzentrierten Bauelementen	75
III.	Mikrotechnologie	79
5.	Technologien der Mikrotechnologie	80
5.1.	Einführung in die Mikrotechnologien	80
5.2.	Abscheideverfahren	81
5.2.1.	PVD	82
5.2.2.	CVD	85
5.2.3.	Oxidation	86
5.2.4.	Druckverfahren	87
5.3.	Strukturübertragung	89
5.4.	Strukturierung	92
5.4.1.	Nassätzen	93
5.4.2.	Trockenätzen	94

5.4.3.	Sonderverfahren	97
5.4.4.	Auswahl der Strukturierungsmethode	98
5.5.	Technologieabläufe für piezoelektrische Mikrosysteme . .	100
5.5.1.	Oberflächentechnologien	102
5.5.2.	Oberflächennahe Technologien	103
5.5.3.	Mischtechnologien	104
6.	Dünnschicht-AlN Technologie	106
6.1.	Einordnung der Qualität des Abscheideprozesses	106
6.2.	Abscheidung von piezoelektrischem Aluminiumnitrid . .	108
6.2.1.	Isolation zum Substrat	108
6.2.2.	Bestimmung der Kristallinität	110
6.2.3.	Oberflächenrauigkeit	111
6.2.4.	Wachstumsschichten	112
6.2.5.	Sputterverfahren	115
6.2.6.	Piezoelektrische Dünnschichten für Aktuatoren . .	119
6.2.7.	Piezoelektrische Dünnschichten für Sensoren . . .	121
6.3.	Strukturierung von piezoelektrischem Aluminiumnitrid .	123
6.4.	Prozessabläufe für piezoelektrische Schichtstapel	126
IV.	Piezoelektrische Mikrosysteme	131
7.	Piezoelektrische Unimorphe	133
7.1.	Analytischer Entwurf von Unimorphen	133
7.2.	Finite Element Modellierung eines Unimorphes	135
7.2.1.	Aufbau der Simulation	135
7.2.2.	Modellaufbau	137
7.2.3.	Modellanalyse	143
7.3.	Technologie der Unimorphe	146
7.4.	Charakterisierung der Unimorphe	148

8. Mikro-opto-elektromechanisches System	152
8.1. Entwurf des MOEMS	152
8.1.1. Systemspezifikation des MOEMS	152
8.1.2. Skizze des MOEMS Modells	153
8.1.3. Analytische Auslegung des MOEMS	155
8.1.4. FE Simulation des MOEMS	158
8.2. Technologie des MOEMS	162
8.3. Charakterisierung des MOEMS	163
8.3.1. Frequenzganganalyse des MOEMS	163
8.3.2. Großsignalanalyse des MOEMS	165
8.3.3. Charakterisierung der MOEMS-Sensorik	168
8.4. Zusammenfassung MOEMS	171
8.5. Applikationsdemonstration für MOEMS	172
9. Piezoelektrische Wake-Up Sensoren	177
9.1. Entwurf des WUPS	177
9.1.1. Systemspezifikation des WUPS	177
9.1.2. Skizze des WUPS Modells	178
9.1.3. Optimierung der Sensoren	181
9.1.4. FE Simulation des WUPS	185
9.2. Technologie des WUPS	189
9.3. Charakterisierung des WUPS	190
9.4. Applikationsdemonstration eines WUPS	193
10. Piezoelektrische Ultraschallwandler	196
10.1. Entwurf des PMUTs	196
10.2. Technologie des PMUTs	202
10.3. Charakterisierung des PMUTs	203
Schlusswort	207

Verzeichnisse	209
Literaturverzeichnis	209
Bildnachweis	219
Abbildungsverzeichnis	221
Tabellenverzeichnis	227