

Rafal Król

***Eine Reduktionsmethode zur Ableitung
elektromechanischer Ersatzmodelle für
piezoelektrische Wandler unter
Verwendung der Finite-Elemente-
Methode (FEM)***

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	III
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Piezoelektrizität	3
2.1 Piezoelektrisches Materialverhalten.....	3
2.2 Allgemeiner historischer Überblick	3
2.3 Piezo-, Pyro- und Ferroelektrizität	6
2.4 Piezokeramiken	7
3 Mathematische Grundgleichungen	11
3.1 Mechanische und elektrische Feldgleichungen.....	11
3.2 Lineare konstitutive Gleichungen	13
4 Eindimensionale Modellierung und Analyse des dynamischen Verhaltens von piezoelektrischen Systemen	23
4.1 Nichtparametrisches Modell.....	23
4.2 Mason-Modell	26
4.3 Redwood-Modell.....	28
4.4 KLM-Modell	29
4.5 BVD-Modell.....	30
4.6 Äquivalente elektromechanische Ersatzmodelle	32
4.7 Parameteridentifikation	34
5 Finite-Elemente-Methode (FEM)	39
5.1 Einführung in die allgemeine strukturmechanische Finite-Elemente-Methode..	39
5.2 Finite-Elemente-Methode für piezoelektrische Strukturen	41
5.3 Herleitung der FE-Formulierung für piezoelektrische Materialien.....	43
5.4 Kondensierte Darstellungsform.....	47
5.5 FE-Analyse von piezoelektrischen Materialien	48
5.5.1 Statische Finite-Elemente-Analyse.....	49
5.5.2 Modalanalyse.....	49
5.5.3 Harmonische Analyse.....	53

5.5.4	Dämpfung	54
6	Modale Beschreibung des Systems	57
6.1	Modale Beschreibung und modale Superpositionsmethode für mechanische Systeme	58
6.2	Modale Beschreibung und modale Superpositionsmethode für piezoelektrische FE-Modelle.....	63
6.3	Einfluss der Residualkorrekturen auf die Frequenzgänge von piezoelektrischen Modellen.....	67
6.4	Ableitung der Zustandsraumdarstellung aus der modalen Beschreibung	71
7	Parameterbestimmung für die Ersatzmodelle	75
7.1	Parameterbestimmung eines rein mechanischen Modells.....	76
7.2	Parameterbestimmung eines piezoelektrischen Ersatzmodells	76
8	Anwendungsbeispiel	83
8.1	Ultraschall-Drahtbonden	83
8.2	Erstellung des FE-Modells	86
8.3	Simulationsergebnisse	91
8.3.1	Statische Analyse.....	91
8.3.2	Modalanalyse und Ermittlung der Ersatzparameter	92
8.3.3	Harmonische Analyse.....	96
8.3.4	Transiente Analyse	99
8.4	Experimentelle Validierung	102
8.5	Diskussion der Ergebnisse.....	105
9	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	111
	Anhang	122
Werkstoffdaten für PIC-181		122
	Lebenslauf	123