

Inhalt

Symbole und Abkürzungen	X
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Piezoaktorik.....	4
2.1.1 Piezoelektrischer Effekt	4
2.1.2 Ferroelektrischer Effekt	6
2.1.3 Piezoelektrische Grundgleichungen.....	9
2.1.4 Blei-Zirkonat-Titanat	10
2.1.5 Piezokeramische Aktoren.....	12
2.1.6 Bauformen von Biegewandlern.....	13
2.1.7 Trimorph	16
2.1.8 Schädigungsarten in Piezoaktoren	17
2.2 Bruchmechanik und Lebensdauerkonzept.....	20
2.2.1 Linear elastische Bruchmechanik	20
2.2.2 Bruchmechanik in ferroelektrischer Keramik	22
2.2.3 Unterkritisches Risswachstum	24
2.2.4 Lebensdauer unter statischer und zyklischer Belastung.....	25
2.2.5 Festigkeits- und Lebensdauerverteilungen.....	27
2.2.6 „Klassisches“ und allgemeines empirisches Proofstest-Konzept	29
2.2.7 Empirischer Proofstest für keramische Werkstoffe	34
3 Experimentelle Durchführung	37
3.1 Untersuchte Biegewandler.....	37
3.2 Dauerversuchsanlage	40
3.2.1 Aufbau.....	40
3.2.2 Messprinzip	43
3.2.3 Messprotokoll.....	45
3.2.4 Probenhalterung	45
3.2.5 Betriebsparameter	47
3.3 Lebensdauerexperimente	47
3.3.1 Signalform der Ansteuerung	48
3.3.2 Ausfallkriterien	48

3.3.3	Lastparameter und Belastungsgrenzen	49
3.3.4	Lebensdauerexperimente	49
3.4	Biegewandlerdynamik	50
3.4.1	Dynamisches Auslenkungsverhalten: Auslenkungstransienten	50
3.4.2	Polarisation als Funktion der Betriebsfrequenz.....	51
3.4.3	Resonanzfrequenz.....	51
3.5	Experimente mit vorgeschädigten Biegewandlern	51
3.5.1	Serien-Trimorphe mit Vickers-Eindrücken	52
3.5.2	Serien-Trimorph mit einer gebrochenen Keramiklamelle.....	54
3.6	Schadensanalyse.....	54
3.7	Prooftest	55
4	Ergebnisse	56
4.1	Lebensdauerexperimente	56
4.1.1	Nomenklatur und Ergebnisdarstellung	56
4.1.2	Ausfallgrund	57
4.1.3	Lastparameter und Belastungsgrenzen	57
4.1.4	Lebensdauerverteilungen.....	60
4.2	Biegewandlerdynamik	67
4.2.1	Auslenkungstransienten.....	67
4.2.2	Polarisation und Kapazität als Funktion der Betriebsfrequenz.....	71
4.2.3	Resonanzfrequenz.....	71
4.3	Experimente mit vorgeschädigten Biegewandlern	73
4.3.1	Serien-Trimorphe mit Vickers-Eindruck.....	73
4.3.2	Serien-Trimorphe mit einer gebrochenen Keramiklamelle	75
4.4	Schadensanalyse.....	76
4.4.1	Schadensphänomen Querriss	76
4.4.2	Rissverteilung	78
4.5	Prooftest	80
5	Modellierung der Biegewandlerbelastung	81
5.1	Finite-Element-Modell.....	81
5.2	Statische Auslenkung.....	83
5.3	Modalanalyse	84
5.4	Biegewandlerdynamik bei trapezförmiger Ansteuerung	85
5.4.1	Auslenkungsverhalten (ohne Anschlag).....	85

5.4.2	Polarisation und maximale Auslenkung als Funktion der Betriebsfrequenz (ohne Anschlag)	87
5.4.3	Mechanische Spannungstransienten (mit Anschlag)	88
6	Diskussion	91
6.1	Mechanische Belastungssituation.....	91
6.1.1	Statische Auslenkung	91
6.1.2	Dynamischer Betrieb.....	92
6.1.3	Zusammenfassung.....	101
6.2	Schadensentwicklung	102
6.2.1	Schadensszenario	102
6.2.2	Rissausbreitung bei dynamischem Betrieb, $dc/dN-K_{I,max}$ -Kurve	102
6.2.3	Elektrodenzerstörung	111
6.3	Lebensdauerverteilungen und Zuverlässigkeit	114
6.3.1	Wahl der Versuchsbedingungen	114
6.3.2	Lebensdauerverteilungen und Einflussgrößen	116
6.3.3	Lebensdauer im Feldbetrieb und Belastungsgrenzen.....	121
6.4	Gültigkeit des Prooftest-Konzepts.....	124
6.4.1	Korrigierte Lebensdauerverteilungen.....	124
6.4.2	Verteilung kritischer elektrischer Felder.....	126
6.4.3	Verifizierung des Prooftest-Konzepts	129
7	Zusammenfassung	132
	Anhang	135
	Anhang A: Messung von Kapazität und Isolationswiderstand im Großsignalbetrieb.....	135
	Anhang B: Maximum-Likelihood-Schätzung der Weibull-Parameter.....	139
	Anhang C: Halbelliptischer Oberflächenriss nach Newman-Raju	141
	Literatur	143