

Dipl.-Ing. Bernhard Zickgraf, Neckarsulm

# **Ermüdungsverhalten von Multilayer-Aktoren aus Piezokeramik**

Reihe **18**: Mechanik/  
Bruchmechanik

Nr. **191**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1	Linear elastische Bruchmechanik . . . . .	8
3.2	Unterkritisches Rißwachstum . . . . .	10
3.3	Piezoelektrizität und Ferroelektrizität bei Keramiken . . . . .	14
3.4	Piezoelektrische Grundgleichungen . . . . .	18
3.5	Kopplungsfaktoren . . . . .	22
3.6	Bruchmechanik in Ferroelektrika . . . . .	23
3.6.1	Einfluß des elektrischen Felds . . . . .	23
3.6.2	Domänen und Rißwachstum . . . . .	24
3.6.3	Piezoelektrische Kopplung . . . . .	25
3.7	Impedanzmessungen . . . . .	26
3.7.1	Einleitung . . . . .	26
3.7.2	Impedanz einer Piezokeramik . . . . .	27
3.7.3	Bestimmung von $Q_M$ und $k_p$ . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Experimentelle Durchführung</b>	<b>32</b>
4.1	Multilayer-Aktoren . . . . .	32
4.1.1	Probenbeschreibung . . . . .	32
4.1.2	Versuchsaufbau . . . . .	34
4.1.3	Variation der Testparameter . . . . .	36
4.1.4	Zerstörungsfreie Probencharakterisierung . . . . .	37
4.1.4.1	Impedanzmessungen . . . . .	38
4.1.4.2	Schwingungsformen der Aktoren . . . . .	39

4.1.4.3	$d_{33}$ -Messungen . . . . .	40
4.1.4.4	Kapazitätsmessungen . . . . .	41
4.1.5	Vickers-Eindrücke und Bestimmung der Bruchzähigkeit . . . . .	42
4.1.6	Zerstörende Probencharakterisierung . . . . .	43
4.1.7	Fraktografie und Mikroskopie . . . . .	43
4.2	Modellaktoren . . . . .	45
4.2.1	Probengeometrie und Präparation . . . . .	46
4.2.2	Versuchsaufbau . . . . .	47
4.2.3	Kapazitätsmessungen . . . . .	48
4.2.4	Impedanzmessungen . . . . .	48
4.2.5	Belastungsparameter . . . . .	49
4.2.6	Schadensanalyse und Fraktografie . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>51</b>
5.1	Multilayer-Aktoren . . . . .	51
5.1.1	Kraft- und Wegsignale der Aktoren . . . . .	51
5.1.2	Lebensdauer der Aktoren . . . . .	56
5.1.3	$d_{33}$ -Werte . . . . .	58
5.1.4	Kapazität der Multilayer-Aktoren . . . . .	61
5.1.5	Bestimmung der Aktor-Schwingungsformen . . . . .	64
5.1.6	Auswertung der Impedanzmessungen . . . . .	66
5.1.6.1	Charge CH13 . . . . .	67
5.1.6.2	Charge CH16 . . . . .	71
5.1.6.3	Charge CH17 . . . . .	74
5.1.6.4	Zusammenfassung . . . . .	75
5.1.7	Zugversuch eines Aktors . . . . .	77
5.1.8	Versagenstypen . . . . .	80
5.1.9	Bruchbilder und Rißstrukturen . . . . .	82

5.1.9.1	Bruchflächen . . . . .	82
5.1.9.2	Schliffbilder . . . . .	84
5.1.10	Vickers-Eindrücke und Bruchzähigkeit . . . . .	89
5.2	Modellaktoren . . . . .	94
5.2.1	Erreichte Zyklenzahlen . . . . .	94
5.2.2	Schadensformen . . . . .	95
5.2.3	Impedanzmessungen . . . . .	103
5.2.3.1	Identifizierung von Schwingungsformen . . . . .	103
5.2.3.2	Impedanzänderungen während des Zyklierens . . . . .	104
5.2.4	Kapazitätsmessungen . . . . .	109
5.2.5	Fraktografie . . . . .	112
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>117</b>
6.1	Multilayer-Aktoren . . . . .	117
6.1.1	Lebensdauerrechnungen . . . . .	117
6.1.2	Kritische Zyklenzahlen . . . . .	122
6.1.3	Impedanzmessungen . . . . .	122
6.1.4	Kapazitätsmessungen . . . . .	123
6.1.5	Risse in den Multilayer-Aktoren . . . . .	124
6.2	Modellaktoren . . . . .	126
6.2.1	Ursachen der verschiedenen Rißformen . . . . .	126
6.2.1.1	Spitzenrisse . . . . .	127
6.2.1.2	Sektorrisse . . . . .	129
6.2.1.3	Unterkritische Risse . . . . .	130
6.2.1.4	Interface-Delaminationen . . . . .	131
6.2.1.5	Anschmelzende Elektrodenschichten . . . . .	133
6.2.1.6	Dielektrischer Durchbruch . . . . .	134
6.2.2	Einfluß der Aktorschäden auf das Schwingungsverhalten . . . . .	135

## VIII

6.2.3	Änderung der Dielektrizitätskonstante . . . . .	136
6.3	Vergleich Multilayer-Aktoren mit Modellaktoren . . . . .	137
6.4	Ausblick . . . . .	138
<b>Literatur</b>		<b>139</b>