

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Der Wanderwellenmotor	5
2.1.1	Aufbau und Funktionsprinzip	5
2.1.2	Eigenschwingungsformen einer Kreisplatte und Entstehung der Wanderwelle	6
2.1.3	Energie- und Informationsfluß	11
2.2	Der Piezoelektrische Effekt	15
2.2.1	Ferroelektrische Keramik	16
2.2.2	Mathematische Beschreibung	18
2.2.3	Der piezoelektrische Materialkopplungsfaktor	20
2.2.4	Der elektromechanische Kopplungsfaktor	21
2.3	Die piezoelektrische Finite-Elemente-Analyse	23
2.3.1	Theorie zur Finite-Elemente-Methode bei piezoelektrischen Materialien	24
2.3.2	Statische Finite Elemente Analyse	27
2.3.3	Numerische Modalanalyse	28
2.3.4	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Anregung	29
2.3.5	Numerische Verfahren zur Lösung der Gleichungssysteme	30
2.4	Kontinuumsmechanische Modelle des Stators	34
2.4.1	Diskretisierung der Statorgeometrie	36
2.4.2	Randbedingungen und Lasten	39
2.4.2.1	Mechanische Randbedingungen und Lasten	39
2.4.2.2	Elektrische Randbedingungen und Lasten	39
2.4.3	Werkstoffparameter	40
<b>3</b>	<b>Reduktion des kontinuumsmechanischen Ersatzmodells auf ein System mit wenigen Freiheitsgraden</b>	<b>41</b>
3.1	Anwendung elektrisch-mechanischer Analogien	41
3.2	Diskrete Ersatzmodelle zur Beschreibung piezoelektrischer Aktoren im quasistatischen Betrieb	44
3.3	Diskrete Ersatzmodelle zur Beschreibung piezoelektrischer Aktoren im dynamischen Betrieb	48
3.4	Mechanisches Ersatzmodell des zweisträngigen Stators	50
3.4.1	Bewegungsgleichungen und Übertragungsfunktionen des Statormodells	53
3.4.1.1	Bewegungsgleichungen bei Berücksichtigung der Querkopplung	54
3.4.1.2	Übertragungsfunktionen bei Berücksichtigung der Querkopplung	54
3.4.1.3	Bewegungsgleichungen bei Vernachlässigung der Querkopplung	59
3.4.1.4	Übertragungsfunktionen bei Vernachlässigung der Querkopplung	61
3.4.2	Parameterbestimmung	61
3.4.2.1	Vorgehensweise bei der experimentellen Bestimmung der Parameter des diskreten Ersatzmodells	62
3.4.2.2	Theoretische Bestimmung einzelner Parameter des diskreten Ersatzmodells mit Hilfe der FEM	69

3.5	Einbindung des Statormodells in ein Gesamtmodell des Motors .....	72
3.5.1	Modell der elektrischen Ansteuerung .....	73
3.5.2	Statormodell .....	73
3.5.3	Stator-Rotor-Kontaktmodell .....	74
3.5.4	Modell des Rotors .....	77
<b>4</b>	<b>Experimentelle und theoretische Ergebnisse .....</b>	<b>79</b>
4.1	Experimentelle Ergebnisse .....	80
4.1.1	Statoren des AWM-90 .....	80
4.1.1.1	Frequenzgänge .....	80
4.1.1.2	Admittanzen .....	82
4.1.1.3	Ersatzparameter .....	84
4.1.1.4	Laseroptische Vermessung der Schwingungsformen .....	87
4.1.2	Statoren des TWM-98 .....	91
4.1.2.1	Frequenzgänge .....	91
4.1.2.2	Admittanzen .....	93
4.1.2.3	Ersatzparameter .....	96
4.1.2.4	Laseroptische Vermessung der Schwingungsformen .....	99
4.1.2.5	Angleichung der Resonanzfrequenzen durch nachträgliche Bearbeitung des Stators .....	101
4.2	Simulationsergebnisse .....	102
4.2.1	FE-Simulationen zum Schwingungsverhalten des Stators vom AWM-90 .....	103
4.2.1.1	Modellvalidierung .....	103
4.2.1.2	Einfluß einzelner Geometrieparameter auf die Eigenmoden des Stators .....	105
4.2.1.3	Einfluß einer beschädigten Klebschicht auf die Symmetrie des Stators .....	109
4.2.1.4	Die Auswirkung der Verwendung einzelner Keramiksegmente anstelle des geschlossenen Rings auf das Schwingungsverhalten des Stators .....	111
4.2.1.5	Berechnung von erzwungenen Schwingungen des Stators .....	113
4.2.1.6	Berechnung der statischen Verformung aufgrund der Anpreßkraft des Rotors .....	116
4.2.2	FE-Simulationen zum Schwingungsverhalten des Stators vom TWM-98 .....	118
4.2.2.1	Berechnung der Eigenschwingungsformen des Stators .....	118
4.2.2.2	Berechnung von erzwungenen Schwingungen des Stators .....	120
4.2.3	Simulationen mit dem diskreten Ersatzmodell zum Übertragungsverhalten des AWM-90 .....	121
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>127</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>139</b>
A.1	Werkstoffparameter der verwendeten Materialien .....	139
A.1.1	Werkstoffdaten für SONOX® P88 .....	139
A.1.2	Werkstoffdaten für Messing CuZn37 .....	143

A.2 Blockschaltbilder des Gesamtmodells .....	144
A.2.1 Matlab-Datei zur Parameterdefinition des Motors AWM-90-A .....	149
A.3 Beschreibung der experimentellen Untersuchungen .....	150
A.3.1 Admittanzmessungen .....	151
A.3.2 Messung der Schwingungsform .....	156
A.3.3 Progamntechnische Realisierung der experimentellen Parameterbestimmung	158
A.4 Mit FEM berechnete Eigenschwingungsformen der Statoren des AWM-90 und des TWM-98 .....	159
A.4.1 Eigenschwingungsformen des Stators AWM-90 .....	160
A.4.2 Eigenschwingungsformen des Stators TWM-98 .....	162