

Entwicklungsgrundlagen für piezoelektrische Ultraschallmotoren am Beispiel eines linearen Antriebs mit gekoppelten Moden

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors–Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von:
Elmar Rothenhöfer
aus Leonberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Sandmaier

Tag der mündlichen Prüfung: 27.10.2009

Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	6
1.1	Motivation	6
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	6
2	PIEZOWANDLER UND DER PIEZOELEKTRISCHE EFFEKT	8
2.1	Ableitung der Zustandsgleichungen	9
2.2	Phänomenologische Werkstoffbeschreibung	11
2.2.1	Perovskit-Struktur	12
2.2.2	Weiche und harte piezokeramische Werkstoffe	13
2.3	Resonante piezoelektrische Wandler	14
2.3.1	Modellierung des resonanten Kleinsignalverhaltens	14
2.3.1.1	Charakteristische Frequenzen und Ersatzschaltbildparameter	17
2.3.1.2	Elektromechanischer Kopplungsfaktor	18
3	PIEZOELEKTRISCHE MOTOREN	20
3.1	Historie	20
3.2	Eigenschaften piezoelektrischer Motoren	21
3.3	Funktionelle Anforderungen an Resonatoren	22
3.4	Klassifizierung von Ultraschallmotoren	23
3.4.1	Resonatoren mit mehrphasiger Anregung	24
3.4.1.1	Prinzip der gekoppelten Moden	24
3.4.1.2	Wanderwellenprinzip	26
3.4.2	Resonatoren mit einphasiger Anregung und Reversierbarkeit	28
3.5	Grenzen der mechanischen Leistungssteigerung	31
4	ANALYSE ZWEIPHASIG ERREGTER PLATTENRESONATOREN UND DAMIT AUFGEBAUTER MOTOREN	33
4.1	Berechnung von Eigenformen durch Modalanalyse	33
4.1.1	Näherungslösungen zur Berechnung der Resonanzfrequenzen	34
4.1.2	Numerische Lösungen zur Berechnung der Eigenformen	34

4.2	Analyse der freien Schwingung bei elektrischer Anregung.....	37
4.3	Vollständige Analyse des Gesamtantriebs mit Reibkontakt.....	39
4.3.1	Anregungssignale für transiente Analysen	40
4.3.2	Analyseparameter und Kontaktmodellierung.....	41
4.3.3	Weiterführende Auswertungen der Struktur	44
5	KONSTRUKTIVE REALISIERUNG EINES POSITIONIERSYSTEMS	47
5.1	Mechanische Linearführungen	47
5.1.1	Verstelleinheit mit Kugelumlauführungen	47
5.1.2	Verstelleinheit mit Schrägrollenführungen	48
5.2	Resonatorhalterung.....	49
5.3	Aufbau piezoelektrischer Resonatoren.....	50
5.3.1	Kontaktierung und Auswahl geeigneter Leitungen	50
5.3.2	Reibmaterialien	51
5.3.3	Klebstoffe zur Verbindung der Reibelemente	52
5.3.4	Demontage von Reibkörpern bei beschädigten Resonatoren	52
6	EXPERIMENTELLE ANALYSE DES WANDLERVERHALTENS.....	53
6.1	Kleinsignalanalyse piezoelektrischer Resonatoren	53
6.1.1	Kleinsignalersatzschaltbild des keramischen Bimodenresonators	55
6.1.2	Admittanzmessung für Verbundresonatoren	56
6.2	Großsignalanalyse piezoelektrischer Resonatoren	60
6.2.1	Aufbau eines Prüfstands zur Charakterisierung komplexer Lasten	61
6.2.2	Freie Großsignal-Admittanzmessung am L1-B2-Resonator.....	63
6.3	Großsignalanalyse piezoelektrischer Ultraschallmotoren	64
6.3.1	Messung mit Rollenprüfstand	64
6.3.2	Messung mit blockierter Linearführungseinheit	66
6.3.3	Wahl des Betriebspunktes für Ultraschallresonatoren	67
7	ENTWICKLUNGSUMGEBUNG ZUR STEUERUNG UND REGELUNG.....	69
7.1	Grundkonzept der Entwicklungsumgebung.....	69
7.2	Schnittstellen zur Steuerung der Schaltungen.....	70
7.3	Erzeugung der zweiphasigen Anregung.....	71

7.3.1	Signalerzeugung durch numerische Oszillatoren	72
7.3.2	Signalerzeugung und Aufbereitung durch PWM-Module und Logik	74
7.4	Leistungsstellung mit Funktionsgenerator und Verstärkern.....	76
7.5	Leistungsstellung mit getakteten Wechselrichtern.....	79
7.5.1	Getakteter Wechselrichter mit numerischen Oszillatoren	80
7.5.2	Getakteter Wechselrichter mit integrierten PWM-Modulen.....	81
7.6	Filter und Transformatoren für getaktete Erregerspannungen.....	84
7.6.1	Einsetzbare Filterstrukturen.....	85
7.6.2	Auslegung von Filtern mit Kleinsignalersatzschaltbild	86
7.6.2.1	Filterung durch Serieninduktivität.....	86
7.6.2.2	Filterung durch vorgeschaltetes LC-Glied.....	88
7.6.2.3	Filterung durch LLC-Anordnung	90
7.6.3	Auslegung von Filtern auf Basis gemessenen Großsignalverhaltens.....	92
7.6.3.1	Abbildung des gemessenen Großsignalverhaltens.....	92
7.6.3.2	Großsignaluntersuchung von Filtern mit idealem Transformator	93
7.6.3.3	Großsignaluntersuchung von Filtern mit nicht-idealem Transformator	94
7.6.4	Aufbau der Filterplatine	103
7.7	Leistungsfähigkeit des Systems	104
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	105