



Physikalische Modellierung und Analyse thermisch und mechanisch bedingter Messabweichungen in faseroptischen Rotationsensoren

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing.(FH) Frank Schadt

geb. am 23.06.1976 in Erlenbach

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. (habil.) Jens Strackeljan

Prof. Dr.-Ing. Friedemann Mohr

Prof. Dr. Ing. Hans-Christian Möhring

Tag der Einreichung: 28.04.2012

Promotionskolloquium am: 04.10.2012

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	VIII
Kurzfassung.....	X
Abstract	XII
Inhaltsverzeichnis.....	XIV
Abkürzungen	XX
Symbolverzeichnis	XXI
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	1
1.3 Notation und Vereinbarungen.....	2
2 Einige Grundlagen Faseroptischer Gyroskope.....	4
2.1 Drehratensensoren	4
2.1.1 Ausführungen und Einsatz von Drehratensensoren	4
2.1.2 Einsatz in Navigationsapplikationen.....	5
2.1.3 Übliche Genauigkeitsmaße für Faseroptische Gyroskope	6
2.1.4 Genauigkeitsanforderungen.....	10
2.2 Faseroptische Grundlagen.....	11
2.2.1 Funktionsweise von Lichtwellenleitern	11
2.2.2 Lichtausbreitung in Glasfasern	14
2.2.3 Elastooptischer Effekt in Glasfasern.....	15
2.3 Grundlagen der Interferometrie	16
2.3.1 Michelsoninterferometer.....	16
2.3.2 Der Sagnac-Effekt	18
2.3.3 Faseroptische Gyroskope als Sagnac-Interferometer	20
2.3.4 Phasenmodulation.....	21
2.3.5 Ringresonatoren und Ringlaser.....	23
2.4 Ursachen von Messabweichungen in Fasergyroskopen	24
2.4.1 Nichtreziproke Phasenverschiebung in Faseroptischen Gyroskopen.....	24

2.4.2	Thermisch und mechanisch verursachte Messabweichungen in Faseroptischen Gyroskopen.....	26
2.4.3	Rauschmechanismen.....	28
2.5	Gängige Maßnahmen zur Genauigkeitssteigerung.....	29
2.5.1	Symmetrisierung der Belastung der Faser	29
2.5.2	Quadrupolspulen als Maßnahme zur Reduzierung des Einflusses von Temperatur- und Spannungsgradienten	29
2.5.3	Superstrahlungsdioden als Maßnahme gegen Rayleigh-Rückstreuung	30
2.6	Ausführungen von Faserspulen und deren Auswirkung auf mechanisch verursachte Abweichungen	31
2.7	Stand der Wissenschaft und Technik	32
3	Elastizitätstheoretische Grundlagen	34
3.1	Überblick	34
3.2	Einige Zusammenhänge der linearen Elastizitätstheorie.....	35
3.2.1	Vorbemerkungen und Vereinbarungen.....	35
3.2.2	Materialgleichungen	35
3.2.3	Kinematische Grundgleichungen.....	36
3.2.4	Bewegungsgleichung.....	36
3.2.5	Gleichgewichtsbedingungen.....	37
3.2.6	Ebene Probleme in kartesischen Koordinaten.....	37
3.2.7	Ebene Probleme in Polarkoordinaten.....	39
3.2.8	Lösung ebener Probleme mit Airyschen Spannungsfunktionen.....	40
3.2.9	Michell-Lösung für ebene Probleme in Polarkoordinaten	40
3.2.10	Dreidimensionale rotationsymmetrische torsionslose Belastung ..	41
3.3	Mechanisches Verhalten von Elastomeren	42
3.3.1	Anforderungen an Kleb- und Füllstoffe für Faserkreisel	42
3.3.2	Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang.....	43
3.3.3	Temperaturabhängigkeit des E-Moduls	44
3.3.4	Viskoelastizität von Elastomeren.....	45
3.3.5	Silikone.....	47
3.3.6	Die Querkontraktionszahl von Elastomeren	48

3.3.7	Haftung an Grenzflächen	48
3.4	Lineare Elastizitätstheorie transvers-isotroper Körper	49
3.4.1	Allgemeine Anisotrope Materialien.....	49
3.4.2	Orthotrope Materialien	50
3.4.3	Transversal-Isotrope Körper	51
4	Modellierung thermischer und mechanischer Einflüsse auf FOGs	53
4.1	Einführung und Übersicht.....	53
4.2	Datenflussdiagramm des gesamten Berechnungsvorgangs.....	54
4.3	Nichtreziproke Phasenverschiebung durch Brechzahlmodulation	55
4.3.1	Berechnung der nichtreziproken Phasenverschiebung.....	55
4.3.2	Drehratenabweichungen aufgrund laufender thermischer Wellen („Shupe-Effekt“)	57
4.3.3	Drehratenabweichungen aufgrund thermoelastischer Verformungen.....	59
4.3.4	Auswirkung der Längsdehnung	59
4.3.5	Drehratenabweichung bei zeitlich transients elastischer Verformung der Faserspule	60
4.4	Makroskopisches Verzerrungsfeld	62
4.4.1	Modulbeschreibung	62
4.4.2	Annahmen und Näherungen	63
4.4.3	Differentialgleichungssystem und Randbedingungen.....	64
4.4.4	Lasten und Randbedingungen.....	65
4.4.5	Behandlung des Gehäuses	66
4.4.6	Symmetrien des FOG	66
4.5	Numerische Berechnung der Drehratenabweichung	67
4.5.1	Numerische Integration der Faserverzerrungen	67
4.5.2	Geometrische Gesichtspunkte.....	68
4.5.3	Besonderheiten dreidimensionaler Verzerrungsfelder	69
4.5.4	Faserkoordinaten von Quadrupolspulen	69
5	Homogenisierung und Dehomogenisierung von Faserspulen	71
5.1	Grundzusammenhänge.....	71
5.1.1	Repräsentative Volumenelemente	71

5.1.2	Berechnung makroskopischer Spannungs- und Deformationsfelder	74
5.1.3	Numerische Integration von FE-Simulationsergebnissen	75
5.1.4	Makroskopische Materialgleichungen	76
5.1.5	Bekannte analytische Näherungslösungen zur Berechnung effektiver Materialparameter linearfaserverstärkter Verbundwerkstoffe	76
5.2	Homogenisierung linearfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit mehrschichtigen Fasern	76
5.2.1	Modulbeschreibung	76
5.2.2	Spezifisches Gewicht.....	78
5.2.3	Longitudinaler Elastizitätsmodul	78
5.2.4	Simulationsbasierte Bestimmung mechanischer Kennwerte.....	78
5.2.5	Simulationsbasierte Bestimmung thermischer Ausdehnungskoeffizienten.....	80
5.3	Dehomogenisierung	82
5.3.1	Zusammenhang zwischen makroskopischer und mikroskopischer Deformation	82
5.3.2	Faserverzerrungen	83
5.3.3	Bestimmung der Dehomogenisierungsmatrix.....	83
5.3.4	Simulationsbasierte Bestimmung von Dehomogenisierungskoeffizienten	84
5.4	Analytisch näherungsweise Homogenisierung und Dehomogenisierung	84
5.4.1	Näherungslösung zur Randbedingung RB1	85
5.4.2	Spannungs- und Verschiebungsmittelwerte	88
5.4.3	Randbedingung RB2.....	89
5.4.4	Dehomogenisierung.....	91
5.5	Zusammenfassung: Homogenisierung und Dehomogenisierung per FE-Simulationen	92
6	Anwendungen	93
6.1	Übersicht.....	93
6.2	Homogenisierung.....	93
6.2.1	Aufbau der Faserspule	93

6.2.2	FE-Modell.....	95
6.2.3	Simulationsergebnisse	96
6.2.4	Materialparameter.....	96
6.3	Dehomogenisierung	97
6.4	FK-Mil.....	97
6.4.1	Aufbau	97
6.4.2	Simulationsmodelle	98
6.4.3	Ablösen der Spule und Vergusschicht vom Gehäuse	99
6.4.4	Drehratenabweichung bei thermischen Transienten	100
6.4.5	Drehratenabweichung bei Vibration	102
6.5	FOG-2M	103
6.5.1	Aufbau	103
6.5.2	Simulationsmodell	103
6.5.3	Drehratenabweichung bei Vibration	104
6.6	Optimierungsmöglichkeiten.....	106
6.6.1	Optimierung mit Simulationsreihen.....	106
6.6.2	Allgemeingültige Regeln zur Senkung der mechanischen Querempfindlichkeit	108
6.6.3	Symmetriebedingungen in der Spule	108
6.6.4	Verguss und Klebstoff.....	110
6.7	Verifikation der analytischen Näherungslösung	111
6.7.1	Analytisch und simulationsbasiert bestimmte Materialparameter.	111
6.7.2	Spannungen und Randverschiebungen	111
7	Zusammenfassung.....	114
8	Ausblick	115
A	Anhang.....	116
A.1	Elastooptischer Effekt in Lichtwellenleitern.....	116
A.1.1	Lineare Polarisation	116
A.1.2	Ausbreitung von Licht in anisotropen Medien.....	117
A.1.3	Elastooptischer Effekt.....	118

A.1.4	Brechzahländerungen in zylindrischen Wellenleitern aufgrund des elastooptischen Effekts	119
A.2	Symmetrische Belastung längs der Faser	120
A.3	Effektiver Brechungsindex von Glasfasern	121
A.4	Berechnung anisotroper Materialparameter aus Simulationsergebnissen	122
Literaturverzeichnis		124
Lebenslauf		129