

# **Faser-Bragg-Gitter und Modeninterferenz in Mehrmodenfasern für Sensoren zur simultanen Messung von Temperatur und Dehnung**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

**Doktor-Ingenieur**  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

**Alexander Siekiera**  
aus Regensburg

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung :	28. Oktober 2015
Vorsitzender des Promotionsorgans :	Prof. Dr. P. Greil
Gutachter :	Prof. Dr.-Ing. B. Schmauß Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

**Alexander Siekiera**

**Faser-Bragg-Gitter und Modeninterferenz in  
Mehrmodenfasern für Sensoren zur simultanen  
Messung von Temperatur und Dehnung**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4284-9

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Fasernmoden und deren Ausbreitungseigenschaften . . . . .	5
2.1.1	Prinzip der Lichtführung in Glasfasern . . . . .	5
2.1.2	Modenanregung und Modenkopplung . . . . .	15
2.1.3	Dispersion . . . . .	19
2.2	Modeninterferenz (MI) in Fewmode-Fasern . . . . .	22
2.3	Faser Bragg Gitter (FBG) . . . . .	28
2.3.1	Grundlagen Photosensitivität . . . . .	28
2.3.2	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	31
2.3.3	Herstellungsmethoden . . . . .	36
2.4	Faseroptische Sensorik . . . . .	38
2.4.1	FBG-Sensor . . . . .	41
2.4.2	MI-Sensor . . . . .	48
2.4.3	Simultanmessung mehrerer Größen . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Analyse der spektralen Eigenschaften von FBGs</b>	<b>59</b>
3.1	Theorie der gekoppelten Moden . . . . .	59
3.2	FBG in Singlemode-Faser . . . . .	62
3.2.1	Analytische Lösung für uniforme FBGs . . . . .	63
3.2.2	Numerisches Lösungsverfahren für beliebige Brechzahlprofile . . . . .	64
3.3	FBG in Fewmode-Faser . . . . .	67
3.3.1	Transversal homogene Brechzahländerung . . . . .	67
3.3.2	Transversal inhomogene Brechzahländerung . . . . .	70

<b>4</b>	<b>Herstellung und Charakterisierung von FBGs</b>	<b>73</b>
4.1	FBGs in Standardfasern und Spezialfasern . . . . .	74
4.2	Aufbau der FBG Schreibstation . . . . .	76
4.2.1	UV-Excimerlaser . . . . .	76
4.2.2	Optisches System und Scan-Methode . . . . .	79
4.2.3	Phasenmaske . . . . .	82
4.3	Wasserstoff-Druckkammer zur Photosensibilisierung . . . . .	88
4.3.1	Aufbau der Wasserstoff-Druckkammer . . . . .	88
4.3.2	Diffusionsberechnung . . . . .	89
4.4	Messung der spektralen Eigenschaften . . . . .	92
4.4.1	FBG in Singlemode-Faser . . . . .	95
4.4.2	FBG in Fewmode-Faser . . . . .	96
4.5	Kennlinien der UV-induzierten Brechzahländerung . . . . .	97
4.5.1	Messmethode . . . . .	97
4.5.2	Ergebnisse für verwendete Fasertypen . . . . .	99
<b>5</b>	<b>FBG-MI-Sensor zur simultanen Messung von Temperatur und Dehnung</b>	<b>103</b>
5.1	Aufbau und Sensorprinzip . . . . .	104
5.1.1	Verwendete Fasern . . . . .	105
5.1.2	Modenanregung und Modenabtastung . . . . .	108
5.1.3	FBG in FMF . . . . .	112
5.1.4	Messwerte und Messgrößen . . . . .	115
5.2	Numerische Modellierung des Sensors . . . . .	116
5.3	Auswertung des Transmissionsspektrums des Sensors . . . . .	120
5.3.1	Auswertung der Braggwellenlänge des FBGs . . . . .	122
5.3.2	Auswertung des MI-Spektrums . . . . .	124
5.3.3	Auswertung des Spektrums bei Kombination von Modeninterferenz und FBG . . . . .	128
5.4	Ergebnisse des numerischen Sensormodells . . . . .	130
5.4.1	Empfindlichkeit des FBG-Sensors . . . . .	131
5.4.2	Empfindlichkeit des MI-Sensors . . . . .	132
5.4.3	Empfindlichkeit des kombinierten FBG-MI-Sensors . . . . .	137
5.4.4	Messbereich, Auflösung und Messunsicherheit . . . . .	139
<b>6</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>145</b>
6.1	Sensorherstellung für maximalen Kontrast des MI-Spektrums . . . . .	145

6.2	Messaufbau zur Charakterisierung des Sensors . . . . .	148
6.3	Kennlinie und Empfindlichkeit des FBG-Sensors . . . . .	153
6.4	Kennlinie und Empfindlichkeit des MI-Sensors . . . . .	156
6.4.1	Auswertung der Extrema des MI-Spektrums . . . . .	157
6.4.2	Auswertung der Phasenlage des MI-Spektrums . . . . .	159
6.5	Kennlinie und Empfindlichkeit des FBG-MI-Sensors . . . . .	160
6.5.1	Auswertung der Braggwellenlänge und der Extrema des MI-Spektrums . . . . .	161
6.5.2	Auswertung der Braggwellenlänge und der Phasenlage des MI-Spektrums . . . . .	163
6.6	Simultanmessung von Temperatur und Dehnung . . . . .	164
6.6.1	Kalibrierung des FBG-MI-Sensors . . . . .	165
6.6.2	Simultanmessung bei statischer Temperatur bzw. Deh- nung . . . . .	168
6.6.3	Simultanmessung . . . . .	171
6.7	Auflösung und Messunsicherheit . . . . .	173
6.8	Querempfindlichkeit . . . . .	176
6.8.1	Faserbiegung . . . . .	177
6.8.2	Doppelbrechung . . . . .	178
<b>7</b>	<b>Bewertung und Ausblick</b>	<b>181</b>
7.1	Bewertung des Sensorkonzepts und Vergleich zu alternativen Konzepten . . . . .	181
7.2	Mehrpunktmessung mit seriellem Sensor-Multiplex . . . . .	187
7.3	Reduzierung der Faserlänge zur Miniaturisierung . . . . .	189
7.4	Systemkonzepte . . . . .	191
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>195</b>
<b>A</b>	<b>Kombinierte Messunsicherheit des FBG-MI-Sensors</b>	<b>199</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>201</b>
	<b>Summary</b>	<b>213</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>217</b>