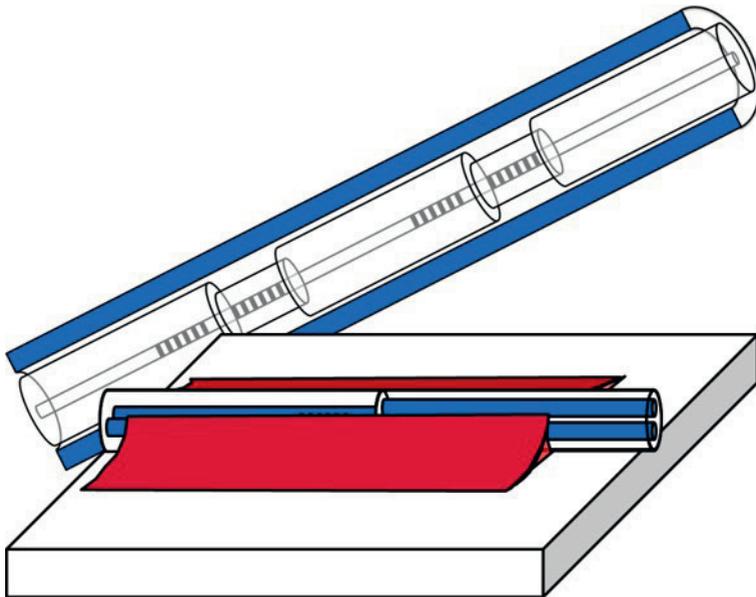
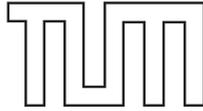

REPORTS ON MEASUREMENT AND SENSOR SYSTEMS

Faser-Bragg-Gitter-basierte Multiparametermessung
zur Anwendung in Hochleistungsgeneratoren

Barbara Hopf





Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik

Faser-Bragg-Gitter-basierte Multiparametermessung zur Anwendung in Hochleistungsgeneratoren

Barbara Hopf

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Alexander W. Koch
2. Prof. Dr. rer. nat. Johannes Roths

Die Dissertation wurde am 25.09.2018 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik am 30.12.2018 angenommen.

Reports on Measurement and Sensor Systems

Barbara Hopf

**Faser-Bragg-Gitter-basierte Multiparametermessung
zur Anwendung in Hochleistungsgeneratoren**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: München, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6739-2

ISSN 1617-6553

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Abstract

Deutsch

Zwei Konzepte zur dehnungskompensierten Temperaturmessung mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG) wurden für die Anwendung in Hochleistungsgeneratoren entwickelt und evaluiert. Reibungskraftunabhängige Temperaturmessungen konnten mit Unsicherheiten unter $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ für eine 10 m lange FBG-Messleitung im Temperaturbereich zwischen $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ sichergestellt werden. Ein Verfahren zur querkraftkompensierten Temperatur-Dehnungs-Entkopplung ermöglichte erstmalig Temperaturmessungen mit einem vollständig oberflächenverklebten FBG-Sensorelement im Temperaturbereich zwischen $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $110\text{ }^{\circ}\text{C}$.

English

Two concepts for strain compensated temperature measurements based on fiber Bragg gratings (FBG) have been developed for application in high power generators. Friction compensated temperature measurements were achieved in a temperature range between $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ with uncertainties less than $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ using a measuring cable of 10 m length. A technique for decoupling temperature and strain, while additionally compensating transversal forces, enabled temperature measurements in a temperature range between $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ by using a surface-attached FBG sensor element for the first time.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen einer kooperativen Promotion an der Technischen Universität München (TUM), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik (Betreuer TUM: Prof. Dr. A. W. Koch) in Kooperation mit der Hochschule für Angewandte Wissenschaften München (HM), Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik (Betreuer HM: Prof. Dr. J. Roths).

Gefördert wurde die Arbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsvorhabens „Faseroptisches HiBi-FBG-Sensorsystem zur Ausnutzungssteigerung von Stromgeneratoren“ (FHprofUnt, FKZ 03FH055PX3), für das eine Zusammenarbeit mit der Siemens AG, Corporate Technology (Ansprechpartner: Dr. Th. Bosselmann) bestand.

Mein Dank gilt allen Beteiligten, die mich in dieser Zeit unterstützt und zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, besonders meinen Betreuern Prof. Dr. A. W. Koch (Inhaber des Lehrstuhls für Messsystem- und Sensortechnik, TUM) und Prof. Dr. J. Roths (Laborleiter des Labors für Photonik, HM) für die exzellente Betreuung und ihre wissenschaftlichen Anregungen während der gesamten Promotionszeit.

Besonders gedankt sei den Projektpartnern der Siemens AG, Dr. Th. Bosselmann, Dr. M. Willsch und Dr. M. Villnow, für ihr stetes Vertrauen in meine Arbeit und die Zeit, die sie zum fachlichen Austausch bei uns im Labor verbracht haben.

Danke an die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Messsystem- und Sensortechnik der TUM, besonders Dr. M. Jakobi und R. von Grafenstein für ihren unermühtlichen Einsatz bei allen organisatorischen Fragen und Problemen.

Danke an alle Kollegen des Photoniklabors der HM, insbesondere an R. Kuttler für seine Assistenz in allen LabView-Programmieraufgaben und an meine Doktorandenkollegen L. Polz, M. Linder und F. Dutz sowie an alle Studenten, die mich unterstützten und deren Arbeiten ich betreuen durfte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Ausgangslage	1
1.2. Zielstellung	5
2. Theoretische Grundlagen	7
2.1. Lichtwellenleiter	7
2.1.1. Lichtführung in Stufenindexfasern	7
2.1.2. Stressinduzierte Brechungsindex- und Doppelbrechungsänderung	15
2.1.3. Polarisation und Polarisationserhaltung	20
2.2. Faser-Bragg-Gitter (FBG)	25
2.2.1. Funktionsprinzip	25
2.2.2. Sensoreigenschaften von FBG	29
2.2.3. FBG in polarisationserhaltenden Fasern	33
3. Faseroptische Temperaturmessung	41
3.1. Methoden der Multipunkt-Temperaturmessung	41
3.1.1. Faseroptische Messmethoden im Überblick	41
3.1.2. Auslegung einer FBG-Temperatursensorik	46
3.2. Faseroptische Multiparametermessung	49
3.2.1. Allgemeiner Matrixansatz	49
3.2.2. Sensorprinzipien im Vergleich	51
4. FBG-basierte Multiparametermessung	57
4.1. Sensorkonzepte zur Anwendung in Hochleistungsgeneratoren	57
4.2. Genauigkeitssteigerung: Iteratives Auswerteverfahren	64
5. Temperatur-Kraft-Entkopplung im Kapillaren-Design	67
5.1. Reibungseffekte von Fasern in langen Kapillaren	67
5.1.1. Einführung	67

5.1.2.	Experimenteller Aufbau und Durchführung	68
5.1.3.	Ergebnisse und Diskussion	71
5.2.	Hochgenaue Multiparametermessung mit iterativen Auswerteverfahren	73
5.2.1.	Einführung	73
5.2.2.	Aufbau und Durchführung	74
5.2.3.	Ergebnisse und Diskussion	80
6.	Multiparametermessung mit oberflächenverklebten PM-FBG	85
6.1.	Charakterisierung von PM-FBG	85
6.1.1.	Einführung	85
6.1.2.	Temperatur-, Dehnungs- und Kraftempfindlichkeiten	86
6.1.3.	3D-FEM-Modell mit experimentell bestimmten Materialparametern	95
6.2.	Kleberinduzierte Doppelbrechung: Einfluss der Sensorapplizierung auf das Messsignal	102
6.2.1.	Einführung	102
6.2.2.	Temperaturabhängige kleberinduzierte Doppelbrechung	103
6.3.	Querkraftkompensierte Multiparametermessung	115
6.3.1.	Messprinzip	115
6.3.2.	Aufbau und Durchführung	116
6.3.3.	Ergebnisse	123
7.	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	125
A.	Moden im zylindrischen Lichtwellenleiter	131
A.1.	Lösungen der Wellengleichung	131
A.2.	Eigenschaften von Besselfunktionen	134
B.	Photoelastischer Effekt	137
C.	Spektren von FBG: Theorie der gekoppelten Moden	143
D.	Übersicht faseroptische Temperaturmessung	147
D.1.	Verteilte faseroptische Messtechnik (DTS)	147
D.2.	Einzelpunkt Temperaturmessung	151
D.3.	Kombinierte Methoden zur Multiparameter-Messung	155
D.4.	Messunsicherheiten: Kondition der Sensitivitätsmatrix	157

Eigene Publikationen	159
Journale	159
Konferenzbeiträge	160
Patentanmeldungen	160
Literaturverzeichnis	161
Abbildungsverzeichnis	179
Tabellenverzeichnis	185
Abkürzungsverzeichnis	187
Symbolverzeichnis	189