

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik

# Spektroskopische Instrumente zur Demodulation von Faser-Bragg-Gitter-Sensorsignalen

Lars H. Hoffmann

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: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernhard Wolf  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander W. Koch  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus-Christian Amann

Die Dissertation wurde am 14.01.2008 bei der  
Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik am 30.04.2008 angenommen.



Reports on Measurement and Sensor Systems

**Lars Hoffmann**

**Spektroskopische Instrumente zur Demodulation  
von Faser-Bragg-Gitter-Sensorsignalen**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7298-2

ISSN 1617-6553

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)

## Kurzfassung

Faser-Bragg-Gitter (FBG) als Sensoren haben seit ihrer Entdeckung kontinuierlich hohes Interesse in Forschung und Entwicklung gefunden. Bei der Nutzung und Weiterentwicklung dieser Sensoren spielen die dazu notwendigen Auswertegeräte eine wichtige Rolle. Gitterspektrometer sind etablierte Geräte zur Auswertung von FBG-Sensoren. Allerdings sind insbesondere hinsichtlich Messabweichungen, dynamischem Verhalten und ihrem Einsatzbereich noch Defizite bei der aktuellen Generation solcher Messgeräte zu sehen.

Diese Arbeit zielt darauf ab, vorhandene Defizite von FBG-Messgeräten mit spektroskopischer Auswertung aufzudecken und innovative Lösungen zu entwickeln, um so das technische und kommerzielle Potential der Messtechnik ausschöpfen zu können. Daher wurden im Rahmen industrienaher Forschungsprojekte neue Konzepte erarbeitet und die Grundlagen auf dem Gebiet der spektroskopischen Demodulation von FBG-Sensoren erweitert.

So wurden beispielsweise die Einflussgrößen auf die Messunsicherheit in solchen Messsystemen untersucht. Mit diesen Erkenntnissen wurde eine um eine Größenordnung gegenüber dem bisherigen Stand der Technik geringere Messunsicherheit von unter 50 fm bei quasistatischer Messung realisiert.

Andere Quellen von Messabweichungen sind polarisationsabhängige Effekte im Messsystem. Diesbezüglich wurde erstmalig ein Faser-Ring-Depolarisator in Kombination mit FBG-Messtechnik eingesetzt. Dabei wurde experimentell gezeigt, dass damit etwa eine Halbierung der durch Polarisierungseffekte erzeugten Messabweichung im Vergleich zum Stand der Technik möglich ist.

Derzeitige FBG-Messgeräte sind für Schwingungsmessungen nur bedingt geeignet, da mit ihnen Aliasing nicht vermeidbar ist. Es wurde deshalb ein FBG-Auswertegerät konzipiert, mit dem acht Sensoren zur Schwingungsmessung im akustischen Frequenzbereich ausgewertet werden können. Dabei kann die Bragg-Wellenlänge mit einer Messunsicherheit von weniger als 5 pm bestimmt werden.

Zur Überwachung technischer Systeme ist es häufig erstrebenswert, möglichst viele Sensorsignale mit einem einzigen Auswertegerät erfassen zu können. Es wurde erstmalig ein 2D-CMOS-Detektor in einem Faser-Bragg-Gitter-Messsystem eingesetzt und damit die Kombination verschiedener Multiplexing-Konzepte demonstriert. Mit dem aufgebauten Demonstrator können bis zu 150 FBG-Sensoren mit 30 Hz abgefragt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird der Untersuchungsgegenstand im einleitenden Teil beschrieben und von anderen Arbeiten abgegrenzt. Die darauf folgende Zusammenstellung der Grundlagen zur Lichtausbreitung in Glasfasern, zur Funktion von FBGs als Sensoren und zu Gitterspektrometern bildet die Basis für die durchgeführten Untersuchungen und für die Ableitung der Erkenntnisse daraus.

## Abstract

Fiber Bragg gratings (FBG) as sensors have experienced great interest in research and development since their invention. Dedicated measurement systems are essential for utilizing and investigating these sensors. Spectroscopic instruments based on diffraction gratings are established devices for demodulation of FBG-sensors. However, when it comes to observational error, dynamic behavior or their possible fields of application, shortcomings in the current generation of these measurement systems are existent.

This work aims at disclosing shortcomings in FBG measurement systems based on spectroscopic demodulation and finding innovative solutions for overcoming these. Hence, the technical as well as commercial potential of FBG measurement technology can be exploited. To this end, new concepts were investigated in the scope of industrial research projects. Thereby fundamentals in the field of spectroscopic demodulation of FBG sensors were expanded.

For example impacts on measurement uncertainty in such systems were theoretically investigated. Based on the findings, the measurement uncertainty was reduced by one order of magnitude compared to the previous state of the art to below 50 fm in quasi-static measurement.

Other sources of observational error stem from polarization dependent effects within the measurement system. In this regard a fiber ring depolarizer was used in combination with FBG-measurement for the first time. It was experimentally shown that observational error caused by polarization effects can be reduced by approximately 50 % compared to the state of the art if such a device is used.

Current FBG measurement systems are only suitable for vibration measurements to a limited extend, since they can not avoid aliasing. Hence, a FBG demodulation system was conceptually designed to measure vibration in the acoustic frequency range with eight sensors at a time. By using this system the sensors' Bragg wavelengths may be detected with an uncertainty below 5 pm.

For the purpose of health monitoring of complex technical systems it is desirable to acquire as many sensors signals as possible with a single interrogation unit. For the first time a two-dimensional CMOS detector was employed in a FBG measurement system and a combination of different multiplexing concepts was demonstrated. The realized demonstrator can interrogate up to 150 sensors at a sample-rate of 30 Hz.

In the introductory part of this work the object of investigation is described and defined in contrast to previous work. The following summary of fundamentals regarding propagation of light in fibers, the working principle of fiber Bragg gratings as sensors and grating spectroscopes builds the basis of the executed investigations and conclusions drawn from them.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1	Aufbau der Arbeit . . . . .	10
1.2	Motivation und Zugang zur Problemstellung . . . . .	12
1.2.1	Anforderungen der Anwender und Messgerätehersteller . . . . .	14
1.2.2	Weshalb spektroskopische Messsysteme? . . . . .	16
1.2.3	Einführende Literaturübersicht . . . . .	19
1.3	Untersuchungsgegenstand . . . . .	22
1.3.1	Kernthemen . . . . .	23
1.3.2	Forschungsfragen . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Methoden</b>	<b>27</b>
2.1	Methoden . . . . .	27
2.1.1	Statistik und Fehlerrechnung . . . . .	27
2.1.2	Ermittlung der Bragg-Wellenlänge . . . . .	28
2.1.3	Theorie der gekoppelten Moden . . . . .	30
2.2	Übertragungsverhalten von Glasfasern . . . . .	31
2.2.1	Ideale Stufenindex-Monomode-Faser . . . . .	31
2.2.2	Polarisation und Doppelbrechung . . . . .	38
2.2.3	Dämpfungseigenschaften . . . . .	40
2.2.4	Wellenlängenabhängigkeit wichtiger Faserkenngrößen . . . . .	45
2.3	Faser-Bragg-Gitter als Sensoren . . . . .	48
2.3.1	Aufbau und Funktionsprinzip . . . . .	49
2.3.2	Das Faser-Bragg-Gitter als Sensor . . . . .	53
2.3.3	Multiplexing von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren . . . . .	58
2.4	Spektroskopische Signaldemodulation . . . . .	61
2.4.1	Beugungsgitter . . . . .	62
2.4.2	Eingangsspalt . . . . .	65
2.4.3	Detektoren . . . . .	67
2.4.4	Kenngrößen spektroskopischer Instrumente . . . . .	69
2.4.5	Abbildungsfehler bei konkaven Beugungsgittern . . . . .	71
2.4.6	Spektrometer-Grundkonfiguration . . . . .	74
2.4.7	Abtastung des Spektrums mit einem Zeilendetektor . . . . .	76
2.5	Breitbandige Beleuchtungsquellen . . . . .	78

## Inhaltsverzeichnis

2.5.1	Leuchtdioden . . . . .	78
2.5.2	Superlumineszenzdioden . . . . .	79
2.5.3	Passive Depolarisatoren für breitbandige Lichtquellen . . . . .	80
<b>3</b>	<b>Untersuchungen und Ergebnisse</b>	<b>85</b>
3.1	Durchgeführte Studien zur Thematik . . . . .	85
3.1.1	Faseroptische Sensorik in der Antriebstechnik . . . . .	86
3.1.2	Faseroptisches Messsystem für Telekommunikationssatelliten . . . . .	89
3.1.3	Faseroptische Sensorik in der Medizinrobotik . . . . .	91
3.2	Messunsicherheit und absolute Genauigkeit . . . . .	93
3.2.1	Auswirkungen des Detektorrauschens auf das Messergebnis . . . . .	94
3.2.2	Schmale Sensorantworten . . . . .	98
3.2.3	Auswirkungen von Abbildungsfehlern im Spektrometer . . . . .	101
3.2.4	Einfluss der Signalform . . . . .	103
3.2.5	Wellenlängenabhängige Effekte in der Glasfaser . . . . .	104
3.3	Veränderungen der Signalform . . . . .	104
3.3.1	Spektrale Welligkeit der Beleuchtungsquelle . . . . .	105
3.3.2	Polarisation der Quelle . . . . .	107
3.3.3	Polarisationsabhängigkeit der Auswerteeinheit . . . . .	112
3.3.4	Dynamische Veränderungen der Signalform . . . . .	113
3.4	Abtastrate und Filtercharakteristik . . . . .	115
3.4.1	Begrenzende Faktoren der Abtastrate . . . . .	117
3.4.2	Anti-Aliasing bei spektroskopischen FBG-Messsystemen . . . . .	119
3.5	Erweiterung des Einsatzbereiches . . . . .	121
3.5.1	Erweitertes Multiplexing mittels CMOS-Flächendetektor . . . . .	123
3.5.2	Ein low-cost FBG-Messsystem . . . . .	130
<b>4</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>135</b>
4.1	Diskussion der Messergebnisse . . . . .	135
4.1.1	Messunsicherheit und absolute Genauigkeit . . . . .	136
4.1.2	Veränderungen der Signalform . . . . .	138
4.1.3	Abtastrate und Filtercharakteristik . . . . .	139
4.1.4	Erweiterung des Einsatzbereiches . . . . .	141
4.2	Einsatzbereiche der Messsysteme . . . . .	143
4.3	Welcher Wellenlängenbereich ist der richtige? . . . . .	144
4.4	Ausblick . . . . .	145
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
	Verwendete Literatur . . . . .	153



*Inhaltsverzeichnis*

Eigene Publikationen und Vorträge . . . . . 163  
Studentische Arbeiten . . . . . 165