

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik

Untersuchungen zur Erfassung dynamischer Messgrößen mittels Faser-Bragg-Gitter-Messtechnik

Thorbjörn Christopher Buck

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. B. Wolf
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. A. W. Koch
2. Univ.-Prof. P. Lugli, Ph.D.

Die Dissertation wurde am 10.10.2011 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik am 27.02.2012 angenommen.

Reports on Measurement and Sensor Systems

Thorbjörn Christopher Buck

**Untersuchungen zur Erfassung
dynamischer Messgrößen mittels
Faser-Bragg-Gitter-Messtechnik**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1065-7

ISSN 1617-6553

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Abstract

Fiber optical sensors based on fiber Bragg gratings are increasingly used in applications that are not accessible to conventional electrical sensors, e.g. due to space limitations, the lack of possibility for multiplexing, EMC interference, etc.. Despite the many technological advantages of this sensor technology, measurement applications, which are based on the detection of dynamic quantities, such as vibration or acceleration measurements, are not yet state of the art.

This thesis aims at examining the technical hurdles related to the acquisition of dynamic measurands using fiber Bragg grating sensor technology, to describe the behaviour of existing measurement systems, and to offer new solutions in order to overcome the identified limitations.

The system behavior of fiber Bragg grating interrogators based on spectrometers can be completely described by means of the quantization theory. They show a limited low-pass behaviour for the acquisition of dynamic loads, which is an obstruction for the correct acquisition of dynamic measurands. Depending on the signal frequency and signal amplitude, these systems may even show a nonlinear behavior. Measurement systems based on tunable filters or light sources do not exhibit, unlike spectrometer-based measurement systems, an inherent low-pass behavior. It is shown that it is not possible to specify a well defined transfer function for these systems.

Two approaches for extending the reach of conventional fiber Bragg grating measuring systems into dynamic measurements are presented. For the first time the possibility of an optical low pass filter for the band-limited detection of dynamic fiber Bragg grating signals is discussed. An algorithm developed in the context of the work allows the detection of sub-sampling effects from spectrometrically detected fiber Bragg grating signals and thus an ex post validation of the signals regarding aliasing.

Intensity-based measurement systems allow the band-limited detection of dynamic fiber Bragg grating signals. For this class of measurement systems a comprehensive description regarding measurement errors and uncertainties is given. The measurement deviations can be attributed to the state and degree of polarization of the light guided in the fiber as well as to optical properties of the measurement system, fiber faults and the system calibration mechanism.

Within the scope of a research project initiated by the European Space Agency, a highly integrated intensity-based measurement system based on an Arrayed Waveguide Grating was developed. The system is intended for the use aboard the ARIANE launch vehicle during the launch phase for monitoring structural loads. The development of the measurement system is described and results of a test campaign are presented.

This work thus makes a contribution to the state of the art in measurement of time-varying fiber Bragg grating sensor signals.

Kurzfassung

Faseroptische Sensoren auf Basis von Faser-Bragg-Gittern kommen vermehrt in Anwendungen zum Einsatz, die konventionellen Sensoren beispielsweise auf Grund von zu geringer mechanischer Belastbarkeit, Bauraumbeschränkungen, der fehlenden Möglichkeit zur Multiplexierung, EMV-Störeinflüssen, etc. nicht zugänglich sind.

Trotz der vielfältigen technologischen Vorzüge dieser Sensortechnologie sind Messanwendungen, welche auf der Erfassung dynamischer Messgrößen basieren – beispielsweise Schwingungs- oder Beschleunigungsmessaufgaben – bisher durch diesen Sensortyp kaum erschlossen.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, die technischen Hürden bezüglich der Erfassung dynamischer Messgrößen mittels Faser-Bragg-Gitter-Messtechnik zu untersuchen, das Systemverhalten gängiger Messsysteme systematisch zu beschreiben sowie darauf aufbauend neue Lösungen anzubieten.

Das Systemverhalten spektrometerbasierter Faser-Bragg-Gitter-Messgeräte kann mittels der Quantisierungstheorie vollständig beschrieben werden. Sie weisen unter Umständen ein nichtlineares Systemverhalten – abhängig von Signalamplitude und Signalfrequenz – auf. Messsysteme auf Basis verstimmbarer Filter oder Lichtquellen zeigen im Unterschied zu spektrometerbasierten Messsystemen kein inhärentes Tiefpassverhalten, die Angabe einer Übertragungsfunktion ist nur eingeschränkt möglich.

Zwei in dieser Arbeit eingeführte Ansätze erweitern den Einsatzbereich konventioneller Faser-Bragg-Gitter-Messsysteme. Es wird erstmals die Möglichkeit eines optischen Tiefpassfilters für die bandbeschränkte Erfassung dynamischer Faser-Bragg-Gitter-Signale analysiert. Einen weiteren Ansatz stellt ein im Rahmen der Arbeit entwickelter Algorithmus dar, der die Detektion von Unterabtastungseffekten aus spektrometrisch erfassten Faser-Bragg-Gitter-Signalen und somit die ex post Bewertung der Signalqualität hinsichtlich des Auftretens von Spiegelfrequenzen erlaubt.

Ein weiterführender Lösungsansatz zur Erfassung dynamischer Größen ist die in einem von der europäischen Raumfahrtagentur initiierten Forschungsprojekt umgesetzte Technik der intensitätsbasierten Erfassung von Faser-Bragg-Gitter-Signalen. Sie erlaubt die bandbegrenzte Erfassung von dynamischen Faser-Bragg-Gitter-Signalen. Für diese Klasse von Messsystemen wird erstmals eine umfassende Beschreibung hinsichtlich Messabweichungen und Messunsicherheiten gegeben.

In einem experimentellen Teil wird die Realisierung eines hochintegrierten intensitätsbasierten Messsystems auf Basis eines Arrayed Waveguide Gratings für den Einsatz an Bord der ARIANE-Trägerrakete während der Startphase zur Überwachung dynamischer Strukturlasten beschrieben.

Mit der vorliegenden Arbeit wird somit ein Beitrag zur Erweiterung des Stands der Technik bei der Erfassung zeitlich veränderlicher Faser-Bragg-Gitter-Sensorsignale geliefert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	7
2.1	Lichtführung in Monomode-Glasfasern	7
2.1.1	Aufbau einer Monomode-Glasfaser	7
2.1.2	Jones-Formalismus	9
2.1.3	Transmissionseigenschaften von Glasfasern	12
2.2	Faser-Bragg-Gitter (FBG)	15
2.2.1	Faser-Bragg-Gitter	16
2.2.2	Mechanische Lasten an Faser-Bragg-Gittern	18
2.2.3	Faser-Bragg-Gitter als Sensoren	20
2.2.4	Herstellung	21
2.3	Faser-Bragg-Gitter als Sensoren für die Erfassung dynamischer Vorgänge	22
2.4	Messsysteme	25
2.5	Integriert optische Filterelemente	28
3	Spektrometer und Laser für FBG-Messsysteme	33
3.1	Übertragungsverhalten von Spektrometern	33
3.1.1	Übertragungsfunktion des idealisierten Systems	33
3.1.2	Dynamisches Verhalten ausgewählter Algorithmen	34
3.1.3	Untersuchungen zum nichtlinearen Verhalten mittels Klirranalyse	39
3.1.4	Interpretation der Ergebnisse für Schwerpunktsalgorithmen im Rahmen der statistischen Quantisierungstheorie	44
3.2	Detektion von Aliasing bei der Messwerterfassung mittels Spektrometern	51
3.2.1	Methode	52
3.2.2	Signalentstehung und Signalerfassung	53
3.2.3	Darstellung im Signalfrequenzbereich	54
3.2.4	Zeitliche Darstellung im Wellenlängenbereich	57
3.2.5	Numerische Simulation und experimentelle Verifikation	59
3.3	Optisches Tiefpassfilter für Spektrometer	65

Inhaltsverzeichnis

3.3.1	Abschätzung der Übertragungsfunktion ohne Berücksichtigung der zeitdiskreten Signalabtastung	68
3.3.2	Gesamtübertragungsfunktion des Systems	70
3.3.3	Numerische Validierung	72
3.4	Verstimmbare Laser und Messsysteme auf Basis verstimmbarer Filter	74
3.4.1	Dynamisches Verhalten	74
3.4.2	Übertragungsfunktion	77
4	Ratiometrische Messverfahren und Grenzen	79
4.1	Funktionsprinzip	79
4.2	Beispielsystem	83
4.3	Systematische Messabweichungen	84
4.3.1	Einfluss des Polarsationszustands	85
4.3.2	Einfluss von Hintergrundlicht	93
4.3.3	Messabweichung bedingt durch die Breite des Faser-Bragg-Gitters	100
4.4	Statistische Messunsicherheiten	103
4.5	Multiplex-Ansätze – gleichzeitige Erfassung mehrerer FBG-Signale	107
4.5.1	Darstellung der Kombination Filter / Multiplexer	109
4.5.2	AWG-basiertes Faser-Bragg-Gitter-Messsystem	111
4.6	Designparameter eines FBG-Messsystems auf Basis eines Arrayed Waveguide Gratings	114
5	Dynamisches FBG-Messsystem: Anwendungen und Messergebnisse	119
5.1	Projektbeschreibung	119
5.1.1	Motivation	119
5.1.2	Technische Anforderungen an ein faseroptisches Messsystem	121
5.2	Messgerätdesign	122
5.2.1	Komponentenauslegung	123
5.3	Systemaufbau	124
5.3.1	Optoelektronischer Aufbau	124
5.3.2	Elektronik	125
5.3.3	Datenverarbeitung	126
5.4	Systemcharakterisierung	127
5.4.1	Messaufbau	127
5.4.2	Spektrale Charakteristik	127
5.4.3	Auswertefunktion	129
5.4.4	Polarisationsabhängige Empfindlichkeit	129
5.4.5	Temperaturstabilisierung	131
5.4.6	Signalauswertung	132

5.5	Systemfunktion	134
5.5.1	Statische Systemantwort	134
5.5.2	Polarisationsabhängige Systemantwort	136
5.5.3	Dynamisches Systemverhalten	136
5.5.4	Messkampagne	138
5.5.5	Testergebnisse	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	143
6.1	Zusammenfassung	143
6.2	Ausblick	145
A	Literaturverzeichnis	147
A.1	Verwendete Literatur	147
A.2	Publikationen, Vorträge und Patentanmeldungen	162
A.2.1	Eigene Veröffentlichungen und Beiträge	162
A.2.2	Vorträge (ohne Publikation)	165
A.2.3	Patentanmeldungen	166