

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Herausgeber: B. Schmauß

Thomas Becker

Analyse und Modellierung intrinsischer und extrinsischer Einflüsse auf die phasenbasierte Dehnungsmessung mit optischen Polymerfasern

Analyse und Modellierung intrinsischer und extrinsischer Einflüsse auf die phasenbasierte Dehnungsmessung mit optischen Polymerfasern

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Thomas Becker

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.2020

Vorsitzender des
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß
Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Thomas Becker

**Analyse und Modellierung intrinsischer und
extrinsischer Einflüsse auf die phasenbasierte
Dehnungsmessung mit optischen Polymerfasern**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7690-5

ISSN 1866-6043

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

Kurzfassung:

Lichtwellenleiter sind in der Sensorik aufgrund ihrer dielektrischen Eigenschaften für bestimmte Anwendungsbereiche von besonderem Interesse. Durch ihre Immunität gegenüber elektromagnetischen Feldern bieten sich faseroptische Sensoren beispielsweise für die Installation in Hochspannungsanlagen und anderen Umgebungen mit starken elektromagnetischen Feldern an. Darüber hinaus eignen sie sich für den Einsatz an Orten, die einer erhöhten Gefahr für Blitzeinschläge ausgesetzt sind, wie etwa Windkraftanlagen. Bei Verwendung von elektrischen Leitungen kann ein Blitzeinschlag zu Kabelbrand und anschließend zu weiteren Schäden führen. Speziell optische Polymerfasern eignen sich aufgrund ihrer mechanischen Robustheit und ihrer großen Dehnbarkeit für den Einsatz in optischen Dehnungssensoren. Ein mögliches Messprinzip stellt hierbei die Phasenmessung einer intensitätsmodulierten Lichtwelle am Ende der optischen Polymerfaser dar. Anhand einer detektierten Phasenänderung kann auf eine aufgetretene Dehnung der Faser geschlossen werden. Aufgrund verschiedener Einflüsse besteht jedoch keine lineare Beziehung zwischen der vom Dehnungssensor gemessenen Phasenänderung und der tatsächlichen Dehnung der Faser. Werden diese Einflüsse nicht berücksichtigt, tritt bei der Dehnungsmessung ein systematischer Fehler auf. Die vorliegende Arbeit behandelt im Wesentlichen optische Einflüsse auf das Messergebnis eines solchen Dehnungssensors, welche sich in intrinsische und extrinsische Einflüsse unterteilen lassen. Intrinsische Einflüsse umfassen hierbei alle optischen Einflüsse, die sich bereits bei konstanten Umgebungsparametern auf das Übertragungsverhalten der Faser und damit auf die gemessene Phasenlage der modulierten Lichtwelle auswirken. Hierzu zählen unter anderem Modendispersion, Dämpfung und Streuung in der Faser sowie die winkelabhängige relative Empfindlichkeit des verwendeten optischen Empfängers. Zu den extrinsischen Einflüssen zählen variable Umgebungsparameter, die sich auf das optische Übertragungsverhalten der Faser und somit auf die gemessene Phasenlage auswirken. Hierzu zählen Änderungen der Umgebungstemperatur und die Dehnung der Faser. Das Ziel dieser Arbeit ist die systematische Erfassung der genannten Einflüsse, ihre Modellierung und die Simulation der Auswirkungen auf die relative Empfindlichkeit des Dehnungssensors. In Konsequenz lässt sich eine gemess-

sene Phasendifferenz exakter interpretieren und der systematische Messfehler deutlich reduzieren. Zu diesem Zweck wird ein Simulationsmodell entwickelt, das genannte Einflüsse berücksichtigt und die Impulsantwort eines optischen Übertragungssystems unter zusätzlicher Berücksichtigung der Eigenschaften der Lichtquelle und des Empfängers berechnet. Unterzieht man die Impulsantwort einer Fouriertransformation, können die relevanten Informationen aus dem Phasengang der Übertragungsfunktion abgeleitet werden.

Berücksichtigt das Simulationsmodell nur intrinsische Einflüsse, lässt sich die Entwicklung der Modulationsphase entlang der ungedehnten Faser berechnen und deren Abweichung von der Modulationsphase einer idealen Faser mittels der relativen Abweichung beschreiben. Bei der experimentellen Überprüfung der Simulationsergebnisse mittels einer Cutback-Messung ergibt sich für Faserlängen ≤ 12 m eine relative Abweichung im Bereich von 2–3 % und eine maximale Differenz von ≈ 0.35 % zwischen der simulierten relativen Abweichung und der experimentell ermittelten. Die intrinsischen Einflüsse tragen daher zu einer erhöhten relativen Empfindlichkeit des optischen Dehnungssensors bei.

Durch die zusätzliche Berücksichtigung des extrinsischen Einflusses der Dehnung kann das Simulationsmodell auch die relative Empfindlichkeit des Dehnungssensors berechnen. Die Dehnung führt zu einer verringerten relativen Empfindlichkeit des Dehnungssensors und wirkt sich somit konträr zu den intrinsischen Einflüssen aus. Abhängig vom verwendeten optischen Empfänger liegt die simulierte relative Empfindlichkeit im Bereich von ≈ 0.915 – 0.925 , womit sich der extrinsische Einfluss der Dehnung stärker auf die relative Empfindlichkeit auswirkt als die Summe aller intrinsischen Effekte. Bei der experimentellen Verifikation der Simulationsergebnisse zeigt sich eine maximale Differenz von ≈ 3.5 % zwischen der simulierten relativen Empfindlichkeit des Dehnungssensors und der experimentell ermittelten. Die leichte Diskrepanz kann jedoch durch den Mangel an akkuraten Werten für die photoelastischen Konstanten und die Poissonzahl für optische Polymerfasern erklärt werden.

Die Summe aller betrachteten Einflüsse hat nicht zuletzt durch die konträre Auswirkung intrinsischer und extrinsischer Einflüsse unerwartet geringe Auswirkungen auf die relative Empfindlichkeit des Dehnungssensors, die sich darüber hinaus gut mit dem entwickelten Simulationsmodell beschreiben lässt. Enorm

wichtig ist jedoch die Verwendung eines optischen Empfängers mit großem winkelbezogenen Akzeptanzbereich, da die optische Polymerfaser bei Dehnung ihr Streuverhalten ändert und die relative Empfindlichkeit sonst aufgrund der Änderung der Zusammensetzung der detektierten Moden ebenfalls von der Dehnung abhängig wird und sich in Konsequenz kaum vorhersagen lässt.

Abstract:

Optical waveguides are of special interest for certain sensor applications because of their dielectric properties. Due to their immunity against electromagnetic fields fiber-optic sensors can be employed in high voltage systems and other areas exposed to strong electromagnetic fields. Furthermore they can be installed in places which are prone to lightning strikes which can lead to cable fire and further damage in case of electrical wires. This is the case for wind power plants for instance. Especially polymer optical fibers are qualified for optical strain sensors because of their large possible strain range and their mechanical robustness. A possible strain measurement technique is the measurement of the phase of an intensity-modulated light wave at the end of a polymer optical fiber. When the fiber is strained, a phase shift can be observed. However, as a result of different influences there is no linear relation between the strain of the fiber and the resulting phase shift measured by the strain sensor. These influences lead to a systematic measurement error if they are not considered properly.

The present thesis essentially covers optical influences on the measurement result of such a strain sensor which can be grouped in intrinsic and extrinsic influences. Intrinsic influences cover all optical influences on the the transmission behavior of the fiber and therefore on the measured phase of the modulated light wave which are present at constant environmental conditions. These include modal dispersion, attenuation and scattering in the fiber as well as the angle dependent relative sensitivity of the optical receiver. Extrinsic influences are variable environmental conditions which affect the transmission behavior of the fiber and the modulation phase respectively. These include temperature changes and the strain applied to the fiber.

The aim of this thesis is a systematic examination of the mentioned influences, their modeling and the simulation of their impact on the responsivity of the strain sensor. As a result, a measured phase shift can be interpreted more accurately and the systematic measurement error can be significantly reduced. For this purpose a simulation model is developed which respects the mentioned influences and computes the impulse response of an optical transmission system under the further consideration of the characteristics of the light source and the optical receiver. If

the impulse response is transferred to the frequency domain by means of a Fourier transform, the required information can be obtained from the phase response of the transfer function.

As long as the simulation model considers only intrinsic influences, the development of the modulation phase along the fiber can be computed and its deviation from the modulation phase of an ideal fiber can be described by the relative deviation. The experimental verification of the simulation results via a cutback measurement shows a relative deviation in the range of 2–3 % for fibers up to a length of 12 m and a maximum difference of $\approx 0.35\%$ between the simulated relative deviation and the one obtained from the measurement. Therefore the intrinsic influences lead to an increased responsivity of the strain sensor.

The additional consideration of the extrinsic influence of strain allows for the simulation of the responsivity of the strain sensor. The strain leads to a decreased responsivity of the strain sensor and acts contrary to the intrinsic influences. Depending on the optical receiver the simulated responsivity is in the range of ≈ 0.915 – 0.925 which means that the extrinsic influence of strain outweighs the impact of all intrinsic influences on the responsivity. The experimental verification shows a maximum difference of $\approx 3.5\%$ between the simulated sensor responsivity and the one obtained from the measurement results. However, the slight discrepancy can be explained by the lack of precise values for the photoelastic constants and the Poisson's ratio for polymer optical fibers.

Not least because of the contrary impact of intrinsic and extrinsic influences, the sum of all considered influences has an unexpectedly small impact on the responsivity of the sensor which is furthermore well described by the simulation model. However the application of an optical receiver with a broad angular acceptance range is of tremendous importance, since the light scattering in polymer optical fibers changes under strain. Therefore the set of detected modes changes with the strain for optical receivers with a narrow angular acceptance range which leads to a strain dependence of the responsivity itself rendering it hardly predictable.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Phasenbasierter Dehnungssensor	5
2.1. Variationsmöglichkeiten	6
2.1.1. Modulationsfrequenz und Lichtquelle	7
2.1.2. Bestimmung der Phasendifferenz	8
2.1.3. Ausführung der Referenzstrecke	9
2.2. Bisherige Ergebnisse	10
3. Inhalt und Ziel der Arbeit	13
3.1. Aufbau der Arbeit	13
3.2. Thematische Abgrenzung der Arbeit	14
3.3. Nicht-optische Einflüsse	15
3.4. POFToolBox	17
4. Der Dehnungssensor als optisches Übertragungssystem	19
4.1. Definition des optischen Übertragungssystems	20
4.2. Ideales Übertragungssystem	22
4.3. Reales Übertragungssystem	24
4.3.1. Abweichung des realen Phasengangs.	25
4.3.2. Ableitung der Übertragungsfunktion	26
4.3.2.1. Beschreibung im kontinuierlichen Zeitbereich.	26
4.3.2.2. Beschreibung im diskreten Zeitbereich	28
4.3.3. Transformation in den Frequenzbereich	29
4.3.4. Auswirkungen der optischen Pfade auf Amplitude und Phase des zu übertragenden Signals.	31

4.4. Verhalten des Dehnungssensors	37
4.4.1. Systematischer Längenfehler	38
4.4.2. Relative Empfindlichkeit des Dehnungssensors.	39
5. Intrinsische Einflüsse	43
5.1. Strahlenkategorien einer Multimodefaser	45
5.2. Analytisches Modell	48
5.2.1. Definition der Lichtquelle	49
5.2.2. Modale Leistungsverteilung innerhalb der Faser	52
5.2.2.1. Winkeltransformation beim Fasereintritt	53
5.2.2.2. Fresnelverluste bei der Einkopplung.	54
5.2.2.3. Angeregte Strahlenkategorien	57
5.2.2.4. Flächige Quelle	63
5.2.3. Herleitung der optischen Impulsantwort	66
5.2.4. Verifizierung mittels Raytracing.	69
5.3. Erweitertes Fasermmodell	72
5.3.1. Beschreibung des Modells	74
5.3.1.1. Überblick über das Modell	74
5.3.1.2. Ausbreitung der optischen Leistung in der Faser	77
5.3.1.3. Experimentelle Ermittlung der Zellstreumatrizen	78
5.3.1.4. Implementierungsdetails	91
5.3.1.5. Vor- und Nachteile des Modells	99
5.3.2. Simulation des Phasen- und Amplitudengangs	101
5.3.2.1. Lichtquelle	101
5.3.2.2. Winkelabhängige relative Empfängerempfindlichkeit. . .	103
5.3.2.3. Reflexionen an den Faserstirnflächen	104
5.3.3. Experimentelle Ermittlung des Phasen- und Amplitudengangs. .	107
5.3.4. Ergebnisse	109
5.3.4.1. Grundlegende Verifizierung des erweiterten Fasermodells	110
5.3.4.2. Ergebnisse der Simulationen	111
5.3.4.3. Experimentelle Ergebnisse	122
5.3.4.4. Zusammenfassung	126

6. Extrinsische Einflüsse	129
6.1. Axiale Dehnung der Faser	130
6.1.1. Einflüsse auf die Modulationsphase	130
6.1.1.1. Geometrische Verformung	130
6.1.1.2. Einfluss auf den Brechungsindex.	132
6.1.2. Experimentelle Ermittlung der relativen Empfindlichkeit	137
6.1.3. Ergebnisse	140
6.1.4. Untersuchung der modalen Leistungsverteilung	142
6.1.5. Zusammenfassung.	146
6.2. Temperaturabhängiges Verhalten der Faser	147
6.2.1. Einflüsse auf die Längenmessung.	147
6.2.1.1. Thermische Expansion.	147
6.2.1.2. Thermooptischer Effekt	148
6.2.1.3. Auswirkungen auf die Modulationsphase.	149
6.2.2. Einflüsse auf die Dehnungsmessung	152
6.2.2.1. Zusätzliche Einflüsse.	152
6.2.2.2. Experimentelle Beobachtung einer getemperten Faser	153
6.2.3. Resultierende Probleme in der Praxis	155
6.3. Nicht untersuchte extrinsische Einflüsse	156
7. Zusammenfassung und Ausblick	157
7.1. Intrinsische Einflüsse auf das Übertragungsverhalten der Faser	158
7.2. Extrinsische Einflüsse auf das Übertragungsverhalten der Faser	159
7.3. Fazit und Ausblick	161
A. Optische Impulsantwort	165
A.1. Zeitkontinuierliche optische Impulsantwort	165
A.2. Zeitdiskrete optische Impulsantwort	166
B. Zeitdiskrete Fourier-Transformation	169
C. Auswirkungen der Modendispersion auf Amplitude und Phase des Gesamtsignals in einer Multimodefaser	173
C.1. Auswirkung auf die Amplitude	173
C.2. Auswirkung auf die Phase	179

C.3. Vergleich mit einer realen Faser	185
D. Berechnung der lokalen Extrema der Amplitude des Gesamtsignals in einer Multimodefaser	187
<hr/>	
E. Zeitdiskrete Fourier-Transformation für Signale mit nicht-äquidistanten Zeitintervallen	191
<hr/>	
Literaturverzeichnis	193
<hr/>	
Abkürzungsverzeichnis	203
<hr/>	
Symbolverzeichnis	205
<hr/>	
Abbildungsverzeichnis	217
<hr/>	
Formelverzeichnis	221
<hr/>	
Danksagung	229
<hr/>	