

Entwicklung eines praxistauglichen POF-basierten Messsystems mittels digitaler I-OFDR zur Dehnungsdetektion

Development of a practicable POF-based measuring system using digital I-OFDR for strain detection

Korbinian Königsbauer, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland, korbinian.koenigsbauer@bam.de

Wosniok Aleksander, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland, aleksander.wosniok@bam.de

Nils Nöther, Systems GmbH, Berlin, Deutschland, nils.noether@fibristerre.de

Maria-Barbara Schaller, Gesellschaft für Geomechanik und Baumesstechnik mbH (GGB), Rötha, Deutschland, schaller@ggb.de

Kurzfassung

Es wird ein faseroptisches Messsystem vorgestellt, welches auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung eine ortsauflösende Detektion von signifikant großen Dehnungen bei Bauvorhaben im von Anwendern geforderten Größenordnungsbereich von 3 % bis 10 % ermöglicht. Mit dem Verfahren der digitalen inkohärenten optischen Frequenzbereichsreflektometrie (I-OFDR) werden materialspezifische Vorteile robuster perfluorierter polymeroptischer Fasern (PF-POF) erschlossen. Für den angestrebten industriellen Einsatz für die Zustandsüberwachung im Bereich des Tunnel- und Spezialtiefbaus soll die spezifische Rückstreuung in der PF-POF hochauflösend gemessen werden. Diese Veröffentlichung zeigt in ersten Projektergebnissen die Eignung des digitalen I-OFDR für eine Dehnungsdetektion von bis zu 10%.

Abstract

A fiber-optic measurement system is presented which, based on Rayleigh backscatter measurement, enables distributed detection of significantly large strains in construction projects in the range of 3 % to 10 % required by end users.

The method of digital incoherent optical frequency domain reflectometry (I-OFDR) is used exploiting material-specific advantages of robust perfluorinated polymer optical fibers (PF-POF). For the intended industrial application for structural health monitoring in the field of tunnel construction and specialised civil and underground engineering, the specific backscatter increase in the PF-POF is to be measured with high resolution. This publication shows in first project results the suitability of the digital I-OFDR for strain detection up to 10%.

1 Einleitung

Größer werdende Städte und Gemeinden zwingen Bauvorhaben zunehmend auf bautechnisch anspruchsvolle Gegebenheiten auszuweichen. Ein Monitoring solcher Bauvorhaben ist notwendig, um die wachsenden Anforderungen auch auf geologisch schwierigem Gebiet umzusetzen. Das trifft vor allem für den Tunnel- und Spezialtiefbau zu. Die kontinuierliche und lückenlose Deformationsüberwachung in solcher rauen Umgebung kann praxisnah mittels verteilter faseroptischer Sensoren realisiert werden. Diese Art der Sensoren zeichnet sich durch ihre geringen Abmessungen, Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störfelder und Einsetzbarkeit unter hohem Druck sowie in einer explosionsgefährdeten oder korrosiven Umgebung aus.

Bei meist etablierten faseroptischen Messsystemen werden als verteilte Sensoren dämpfungsarme Standardglasfasern, die eine ortsauflösende Messung entlang dutzender Kilometer erlauben, eingesetzt. Die Maximaldehnung gängiger Glasfasern darf allerdings im Normalfall den Wert von etwa 1-2 % nicht überschreiten, was den Einsatz im thematisierten Anwendungsbereich stark beschränkt.

Wie bereits in [1] gezeigt, können dagegen durch die sensorische Verwendung von polymeroptischen Fasern (POFs), Dehnungen weit über 10 % erfasst werden. Ein

weiterer Vorteil von POFs ist ihre einfache Handhabung und schnelle kostengünstige Konfektionierung. Die am häufigsten eingesetzten Standard-POFs weisen einen homogenen Stufenprofilindex-Kern aus PMMA (Polymethylmetacrylat) auf. Dagegen bietet die normalerweise für spezielle Anwendungen verwendete perfluorierte Kunststofffaservariante entscheidende Vorteile für die Sensorik. Die perfluorierte POF (PF-POF) basiert auf einem dämpfungsarmen Fluoropolymer CYTOP und erlaubt somit größere Messreichweiten. Ihr Dämpfungsminimum im zweiten optischen Fenster um 1300 nm in Verbindung mit ihrer Gradientenindex-Struktur macht sie kompatibel zu Standard-Multimode-Glasfasern samt denen dazu gehörigen kostengünstigen Komponenten des Telekommunikationssektors.

Weitere technische und preisliche Vorteile eines ortsauflösenden faseroptischen Messsystems zur Erfassung von starken Dehnungszuständen können mittels des Verfahrens der inkohärenten optischen Frequenzbereichsreflektometrie (I-OFDR) [1-3] erschlossen werden. Im Vergleich zu der bereits kommerziell erhältlichen und für die faseroptische Sensorik häufig verwendeten optischen Zeitbereichsreflektometrie (OTDR), bietet I-OFDR Vorteile in den Punkten räumliche Auflösung sowie geringere Messzeiten [2]. Beide über die Fourier-Transformation zueinander

äquivalenten Verfahren basieren auf der Messung von ortsabhängigen Änderungen der Intensität der Rayleigh-Rückstreuung entlang der Sensorfaser. Die hier thematisierte Messung im Frequenzbereich erfolgt bei der zwecks Erfassung der Übertragungsfunktion schrittweise vorgenommenen Amplitudenmodulation (AM) der inkohärenten Dauerstrichlaserdiode. Durch Kalibrierung, Anwendung von Fensterfunktionen und die schnelle Fourier-Transformation (FFT) kann aus der Übertragungsfunktion die ortsabhängige Rückstreuintensität zur Untersuchung von Dehnungen gebildet werden. Hierbei können zwei Effekte zur lokalen Quantifizierung von Dehnungsänderungen genutzt werden: die dehnungsabhängige Erhöhung des Rückstreuprofils und die Verschiebung von lokalen Maxima im Rückstreuprofil (Streuzentren). Diese Maxima entstehen durch die Ablenkung an den für die PF-POF charakteristischen Verunreinigungen. [Vgl. 4].

Über OFDR wurde in der Vergangenheit bereits geforscht und berichtet [5].

Bei dem weiterzuentwickelnden digitalen I-OFDR-Verfahren wird der sonst eingesetzte vektorielle Netzwerkanalysator (VNA) durch eine digitale Schaltung des Projektpartners fibrisTerre ersetzt. Dadurch kann ein portables und kostengünstiges Messsystem bereitgestellt werden. Die aktuelle Version des Evaluierungsboards ermöglicht eine Ortsauflösung von 1 m. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden erste Projektergebnisse vorgestellt, welche zeigen werden, dass sich das digitale I-OFDR-Messsystem für eine Dehnungsdetektion von bis zu 10 % eignet. Dieser Dehnungsbereich ist laut Anwendern ausschlaggebend bei vielen Monitoringaufgaben im Bereich des Tunnel- und Spezialtiefbaus.

2 Grundlagen des Messverfahrens I-OFDR

Die materialspezifischen Vorteile robuster PF-POF können mittels des ortsauflösenden Verfahrens der digitalen I-OFDR [1-3] erschlossen werden. Das Verfahren I-OFDR setzt eine inkohärente Lichtquelle voraus, um den Interferenzeinfluss im Messsignal zu minimieren. Als Laserlichtquelle wurde hier ein Fabry-Pérot-Laser gewählt. Das optische Spektrum der Laserdiode ist in **Bild 1** dargestellt.

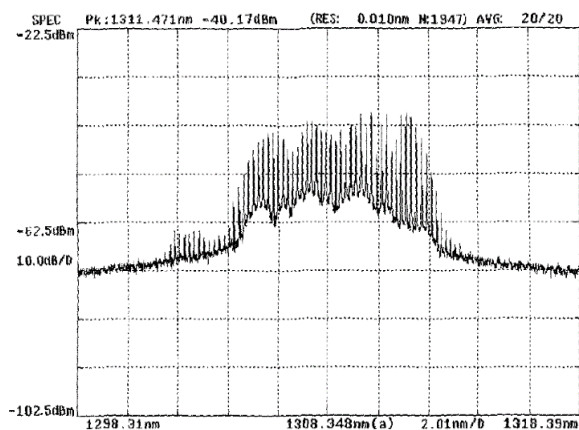


Bild 1 Optisches Leistungsspektrum des Fabry-Pérot-Laser aufgezichnet mit ADVANTEST Q8347 Optical Spectrum Analyzer.

Mit einem ausreichend breiten Emissionsspektrum bei geeignetem Arbeitspunkt ist diese gut inkohärent und lässt sich mit hoher optischer Leistung durch externe AM über einen elektrooptischen Intensitätsmodulator (EOM) betreiben. Ferner wird ein elektrisches Anregungssignal durch einen VNA sequenziell als harmonisches Signal für mehrere Frequenzpunkte synthetisiert. Anschließend dient dieses als Trägersignal für die AM des optischen Signals der Dauerstrichlichtquelle. Dieses optische Signal wird in die getestete Faser über einen Zirkulator eingekoppelt und anschließend durch den Effekt der Rayleigh-Streuung zurückgestrahlt. Das rückgestreute Signal wird erneut über den Zirkulator auf einen Photodetektor (PD) gelenkt und in ein elektrisches Signal gewandelt, welches wiederum von dem VNA ausgelesen wird. **Bild 2** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines I-OFDR-Messsystems.

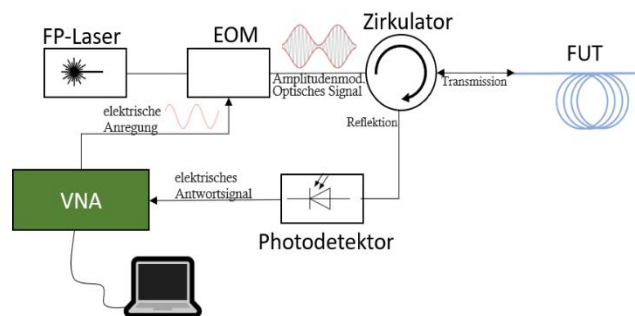


Bild 2 Faseroptisches Messprinzip zur Dehnungsmessung mittels I-OFDR.

Aus dem elektrischen Antwortsignal kann die Übertragungsfunktion im Frequenzraum $H(j\omega)$ aufgestellt werden. Durch geeignete Signalverarbeitung kann aus $H(j\omega)$ auf die Impulsantwort $h(t)$ im Zeitbereich geschlossen werden. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in der Faser kann aus $h(t)$ die ortsabhängige Impulsantwort $h(z)$ berechnet werden. Diese ist direkt proportional zur rückgestreuten Leistung $P(z)$ in Abhängigkeit vom Weg z . $h(z)$ liefert somit ein ortsabhängiges Rückstreuprofil äquivalent zur Leistung, welches zur Detektion ortsabhängiger Dehnungsänderungen genutzt werden kann.

3 Digitale Signalverarbeitung und Hardwareimplementierung

Für das Verfahren der digitalen I-OFDR wird ferner der VNA durch eine digitale Schaltung, ein Evaluierungsboard zu sehen in **Bild 3**, ersetzt. Diese digitale Schaltung reduziert die Gesamtsystemkosten und macht das System robuster und feldtauglicher.

Die Signalerzeugung und die Signalerfassung des Boards zum Messen von $H(j\omega)$ kann einfach über eine Ethernet-Schnittstelle programmiert und ausgelesen werden. Zuerst wird dazu das elektrische Anregungssignal für die Modulation mit einem Digital-Analog-Wandler (D/A-Wandler) durch das Verfahren der direkten digitalen Synthese (DDS)

generiert. Die hardwaretechnischen Begrenzungen der Modulationsfrequenzen sind dabei maßgeblich für die maximal messbare Sensorfaserlänge sowie die Ortsauflösung des digitalen I-OFDR-Systems.



Bild 3 Digitale Schaltung als ein kostengünstiger und feldtauglicher Ersatz für einen VNA im digitalen I-OFDR-Verfahren.

Hierbei spielt auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in der Faser c_0/n_{gr} eine Rolle. Wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit und n_{gr} die effektive Gruppenbrechzahl der optischen Faser beschreibt. Die DDS erzeugt harmonische Anregungssignale im Modulationsschritt Δf von der minimalen Modulationsfrequenz $f_{m,min}$ bis zur maximalen Modulationsfrequenz $f_{m,max}$. Die maximal messbare Sensorfaserlänge z_{max} wird ferner durch den Modulationsschritt Δf begrenzt:

$$z_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0}{n_{gr}} \cdot \frac{1}{\Delta f} \quad (1)$$

Die Ortsauflösung δz hingegen ist durch die maximale Modulationsfrequenz gegeben:

$$\delta z = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0}{n_{gr}} \cdot \frac{1}{f_{m,max}} \quad (2)$$

Nach der amplitudenmodulierten Anregung wird über einen Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) die rückgestreute Antwort der Faser in Betrag und Phase gemessen. Durch die Auswerteeinheit über einen FPGA (Field Programmable Gate Array) können die Messwerte sehr schnell schmalbandig gefiltert werden. Das führt zu einer guten Rauschunterdrückung. Aus dem gemessenen Betrag- und Phasewerten kann die komplexe Übertragungsfunktion für die diskreten Frequenzpunkte des Anregungssignals $H(j\omega)$ gebildet werden. Um von $H(j\omega)$ auf $h(z)$ zu schließen wird an einem externen Computer folgende Signalverarbeitung durchgeführt. Zuerst wird die Übertragungsfunktion $H'(j\omega)$ auf den reinen Anteil der Messfaser $H(j\omega)$ reduziert. Dafür müssen mittels einer

Kalibrierung alle übrigen Anteile $H_{cal}(j\omega)$ vermessen und anschließend herausgerechnet werden:

$$H'(j\omega) = H(j\omega) \cdot H_{PD}(j\omega) \cdot H_{VNA}(j\omega) \cdot H_{EOM}(j\omega) \dots \quad (3)$$

$$H_{cal}(j\omega) = H_{PD}(j\omega) \cdot H_{VNA}(j\omega) \cdot H_{EOM}(j\omega) \dots \quad (4)$$

$$\Rightarrow H(j\omega) = \frac{H'(j\omega)}{H_{cal}(j\omega)}$$

Die bandbegrenzte Messung im Frequenzbereich kann zusätzlich den sogenannten Leckeffekt verursachen. Dieser Effekt führt ferner zu Überschwingern in der Impulsantwort $h(z)$ und trägt somit zur Herabsetzung der Messgenauigkeit bei. Um den Leckeffekt zu vermeiden, muss eine geeignete Fensterfunktion $W_{Window}(\omega)$ mit der Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ multipliziert werden. Für die Messungen hat sich eine Kaiser-Bessel-Fensterfunktion mit einem Faktor $\alpha = 7$ als geeignet herausgestellt.

Das digitale I-OFDR-Messsystem weist momentan eine Ortsauflösung von 1 m auf. Um die Anzahl der Abtastpunkte zwischen den Messpunkten zu erhöhen, wird durch das sogenannte Zero-Padding die numerische Auflösung im Zeitbereich interpoliert. Hierzu wird das Signal $H(j\omega)$ mit Nullen erweitert. Mithilfe der inversen schnellen Fourier-Transformation (IFFT) kann die mittels Frequenzbereichsanalyse ermittelte Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ eine Antwort in Form von zeitaufgelösten Rückstreuprofilen $h(t)$ liefern:

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}(H(j\omega)) \quad (5)$$

Die zeitabhängige Impulsantwort $h(t)$ kann über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in der Faser in die ortsabhängige Impulsantwort $h(z)$ des Rückstreuprofiles umgerechnet werden.

$$z = \frac{1 \cdot c_0}{2 \cdot n_{gr}} \cdot t \quad (6)$$

$h(z)$ ist direkt proportional zu der ortsabhängigen rückgestreuten Leistung $P(z)$. Mit $h(z)$ können nun Dehnungen entlang der Faser untersucht werden.

4 Verteilter polymeroptischer Fasersensor

Als Sensorfaser nutzen wir zurzeit die FGR050055MR PF-POF des japanischen Herstellers Asahi Glass Co., Ltd. (AGC). Der hier genutzte perfluorierte Sensorfasertyp weist einen dämpfungsarmen Faserkern von 55 μm basiert auf dem Fluoropolymer CYTOP auf. Die bei der Betriebswellenlänge von 1310 nm gemessene optische Dämpfung

beträgt 30 dB/km, was eine für die Anwendungen geforderte Messreichweite von ein paar hundert Meter ermöglicht. Das Rückstreuprofil der Faser ist nicht gleichförmig, sondern weist zufällig verteilte Streuzentren entlang der Faser auf. Die Streuzentren sind permanent und entstanden während der Herstellung der Faser durch Verunreinigungen, Schwankungen der Brechzahl oder Abweichungen des Faserkerndurchmessers. Diese Streuzentren sind verantwortlich für die Intermodenkopplung und sind somit die Ursache der hohen optischen Bandbreite und der relativen Unabhängigkeit der Faser von der Art der Einkopplung und können auch für eine verteilte Längenänderungsmessung genutzt werden.

5 Dehnungsversuch

In einem ersten Versuch wurde die PF-POF um 10 % gedehnt. Zur Durchführung des Laborexperiments wurden zuerst 2 m Faser im Abschnitt zwischen 104 m und 106 m fixiert. Die Faser hat eine Gesamtlänge von etwa 110 m. Die PF-POF wurde in 0.2 mm Schritten bis 20 cm, was relativ 10 % entspricht, gedehnt. Zu jedem Dehnungsschritt wurden jeweils 200 Rückstreuprofile mit der digitalen I-OFDR aufgenommen und anschließend der Mittelwert gebildet. Die Änderung der rückgestreuten Leistungen im gedehnten Bereich wurde in **Bild 4** dargestellt.

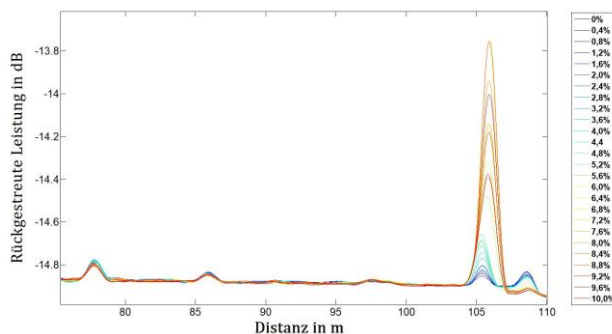


Bild 4 Rückstreuprofile einer PF-POF für 0 % bis 10 % Dehnung im Bereich von 75 m bis Faserende.

Die lokalen Erhöhungen im Rückstreuprofil unter Dehnungseinfluss sind deutlich zu detektieren und das Messsystem braucht dafür nur wenige Sekunden. Es fällt auf, dass die Erhöhungen nicht konstant mit einer Dehnungserhöhung einhergehen. Eine Qualifizierung der Dehnung über das Rückstreuprofil ist jedoch bis jetzt schwierig. Da die Faser ab 6 % nicht mehr in ihrem elastischen Bereich befindet, gibt es auch keine gleichmäßige Dehnung über den eingespannten Bereich. Jedoch ist eine klare Detektion einer Dehnung dennoch möglich, da sich auch ab 6 % bis 10 % ein klarer Trend zu größer werdenden Streuzentren zeigt. Bei dem Vergleich der digitalen I-OFDR mit kommerziell erhältlichen OTDRs zeigen sich, wie zuvor beschrieben, deutliche Vorteile in der Messzeit. Es wurde die PF-POF einmal mit dem digitalen I-OFDR-Messsystem und einmal mit einem kommerziellen OTDR-Messgerät gemessen. Dabei hat sich gezeigt, dass das digitale I-OFDR eine etwa

9-fache Messzeitverkürzung bei einer ähnlich guten Performanz liefert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die oben vorgestellten Forschungsergebnisse zum Verfahren der digitalen I-OFDR zeigen, dass lokale Dehnungen im Bereich bis zu 10 % entlang einer etwa 110 m langen PF-POF klar zu detektieren sind. Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der Sensorfaser kann die genaue Quantifizierung von lokalen Dehnungsänderungen künftig durch Einbeziehung zweier physikalischen Effekte, der dehnungsabhängigen Erhöhung der Rückstreuprofile sowie der Verschiebung von Streuzentren, erfolgen.

Die Untersuchung hinsichtlich der spektralen Eigenschaften der Laserquelle ermöglichten eine Optimierung der Interferenzeigenschaften des digitalen I-OFDR-Aufbaus unter Nutzung einer Multimode-Fabry-Pérot-Laserdiode.

Die erreichte signifikante Verbesserung der Systemperformance in puncto Messzeit eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten verglichen mit einer klassischen OTDR-Messung. Wird beispielsweise mit einer OTDR eine Messstrecke vermessen, so lassen in der gleichen Zeit mit der I-OFDR Messsignale einiger Sensorfasern abfragen, was in einer Steigerung der Messlänge resultiert.

Für die geplante Anwendung der PF-POF als verteilter Dehnungssensor im Tunnel- und Spezialtief werden zurzeit die Quereinflüsse von Temperatur und Feuchte auf Rückstreuanänderung, optische Dämpfung und Laufzeiten untersucht.

Weitere Entwicklungen im Projekt zielen auf die bevorstehende Hardware-Entwicklung bezüglich Realisierung einer von Anwendern geforderten Ortsauflösung von 20 cm. Dabei soll die Bandbreite der Signalgenerierung und -akquise beim Einsatz hochfrequenter D/A- bzw. A/D-Wandler auf einige hundert MHz erhöht werden.

7 Literatur

- [1] S. Liehr, M. Wendt, K. Krebber: Distributed perfluorinated POF strain sensor using OTDR and OFDR techniques: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 7503, 2009.
- [2] S. Liehr, N. Nöther, K. Krebber: Incoherent optical frequency domain reflectometry and distributed strain detection in polymer optical fibers, Meas. Sci. Technol. 21(1), 017001, 2009.
- [3] S. Liehr, M. Wendt, K. Krebber: Distributed strain measurement in perfluorinated polymer optical fibres using optical frequency domain reflectometry, Meas. Sci. Technol. 21(9), 2010.
- [4] O. Ziemann, J. Krauser, Peter E. Zamzow, et al.: POF-Handbuch: Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme. Deutschland, Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 110.

- [5] R. Engelbrecht, S. Werzinger, M. Koepfel, et al.: Review of Optical Frequency Domain Reflectometry Methods for Optical Fiber Sensors, POF 2017 – Proceedings 2017.

8 DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) durchgeführt, Förderkennzeichen: KK5009701SY0. Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken auch den Projektpartner*innen von fibrisTerre und GGB für die gute Zusammenarbeit.