



Faseroptische Sensoren für den Einsatz im Monitoring: ein Überblick

Wolfgang R. Habel
Fritz K. Brunner

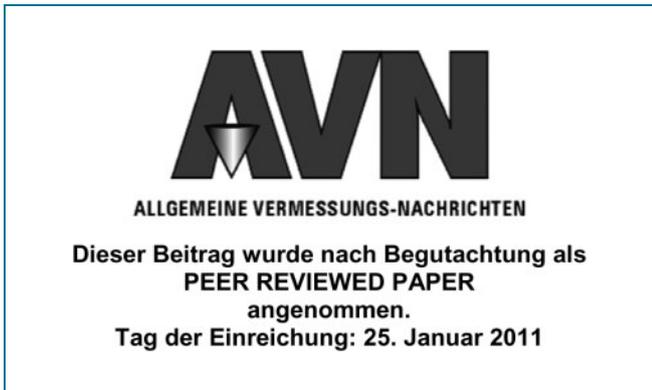
Fiber optic Sensors for Monitoring: an Overview

Die herausragenden Eigenschaften faseroptischer Sensoren beim Monitoring geotechnischer Strukturen werden diskutiert und ihre Vor- und Nachteile zusammengefasst. Es werden die Grundlagen der wichtigsten faseroptischen Sensoren (Rückstreu-, Faser-Bragg-Gitter-, Fabry-Perot-Sensoren, Mach-Zehnder-Interferometer sowie Sensoren auf Basis der Niedrig-Kohärenz-Interferometrie) aufbereitet.

Schlüsselbegriffe: Monitoring, faseroptische Sensoren, Faser-Bragg-Gitter, interferometrische Sensoren.

The outstanding properties of fiber optic sensors are discussed, and the advantages and disadvantages of these sensors for monitoring are summarised. The foundations of the most important fiber optical sensors (based on back scattering, fiber Bragg gratings, Fabry-Perot sensors, Mach-Zehnder interferometers, low coherence interferometry) are presented.

Keywords: Monitoring, fiber optic sensors, fiber Bragg grating, interferometric sensors.



1 Einleitung

Seit der Verfügbarkeit optischer Fasern geht die rasante Entwicklung der faseroptischen Sensoren (FOS) einher. Über ihre Anwendungen in der Bautechnik wird seit nunmehr 25 Jahren berichtet. In den 80er-Jahren waren es singuläre (Test-)Einsätze an Brücken und in ausgewählten Stahlbeton- und Spannbeton-Bauteilen, vornehmlich in Deutschland und bei europäischen Nachbarn. Am Beginn der 90er-Jahre kamen optische Fasersensoren zum Erforschen des Verhaltens von speziellen Werkstoffdesigns für das Bauwesen hinzu, wobei einige Objekte des Ingenieurbaus auch in Nordamerika und in Japan mit faseroptischen Sensoren ausgestattet wurden, z. B. der Eiffelturm in Paris, die Eder-Staumauer in Nordhessen, das Stade de France in Paris oder die Beddington Trail Bridge in Calgary. Im letzten Jahrzehnt hat sich die Zahl der Anwendungen der faseroptischen Sensorik fast unüberschaubar vergrößert

und weitere Einsatzbereiche, beispielsweise der Tunnel- und Rohrleitungsbau, die Geländeüberwachung und das Monitoring unterirdischer Bauwerksteile, z. B. Gründungen, kamen hinzu. Innovative Firmen haben sich gegründet, um den Transfer der wissenschaftlichen Entwicklungen zu forcieren und die neuen Produkte zu vermarkten. Die meisten dieser jungen Firmen konnten sich weltweit etablieren und tragen wesentlich zum Bekanntheitsgrad neuer Sensorlösungen und deren Anwendungsmöglichkeiten bei.

Faseroptische Sensoren werden inzwischen nicht mehr nur am Messobjekt „angeschraubt“ oder nachträglich in eine Struktur eingebunden, beispielsweise ähnlich der schwingenden Saite oder einem induktiven Wegaufnehmer, sondern ihr Einbau ist häufig integraler Bestandteil der Planungsunterlagen und erfolgt folgerichtig bereits in der Erstellungsphase des Bauwerks, bzw. die Sensoren werden bereits während der Bauteilfertigung integriert. Mit Integration erreicht man einen optimalen Verbund des sensitiven Elements mit dem Werkstoff sowie eine „geplante“ Kabelführung – und damit eine strukturgerechtere Sensorlösung. In diesen Fällen kann man durchaus von werkstoff- bzw. bauteilintegrierter Sensorik – oder besser von „intelligenten“ Strukturen – sprechen. Die Bauteile informieren bei Online-Betrieb des Sensorsystems den Betreiber bzw. den Überwacher, wenn sie sich nicht mehr betriebsgemäß verhalten, oder wenn Schädigungen eingetreten sind. Ohne die Sensorik wären solche Schädigungen nicht oder zu spät erkennbar. Messergebnisse bilden häufig die Grundlage für den bautechnischen Entwurf, liefern die Eingangsparameter für Berechnungsverfahren und dienen der Überprüfung getroffener Berechnungsannahmen [FECKER, 1997]. Eine

zuverlässige Messwerterfassung durch Überwachung von Bauwerk und Baugrund im Sinne der Beobachtungsmethode nach DIN 1054:2003-01 und DIN 4020:2003-09 ist somit eine zentrale Aufgabe. Aber auch kritische Areale, beispielsweise nicht zuverlässig stabile Hänge oder Randzonen von Tiefbaustellen, erfordern eine messtechnische Überwachung. Somit sind sowohl kurzzeitige Messungen, z. B. zur Beurteilung dynamischer Einwirkungen, als auch das Monitoring über große Zeiträume aus umweltschutz- und sicherheitsrelevanten Gründen von großem Interesse. Bei den besonderen Anforderungen, die spezielle geotechnische Problemstellungen an die Messtechnik stellen, sind faseroptische Sensoren eine sinnvolle Ergänzung oder sogar Alternative zur konventionellen Messtechnik. Die Anwendung der faseroptischen Sensorik hat aber nicht nur wegen messtechnischer Grenzen bei konventionellen Messverfahren Bedeutung, sondern ist auch bei besonderen Umgebungsbedingungen, z. B. Blitzgefährdung elektrischer Systeme in exponierten geologischen Lagen, angesagt, weil der erforderliche Aufwand für zuverlässige Messungen beim Einsatz elektrischer Messverfahren sehr hoch sein kann.

Faseroptische Sensoren nutzen unterschiedliche physikalische, chemische oder mechanische Prinzipien und ermöglichen damit die Erfassung einer großen Anzahl von Messgrößen. Die faseroptische Sensorik hat sich zu einer eigenständigen Wissenschaftsdisziplin entwickelt und ist jedes Jahr weltweit Anlass für zahlreiche Konferenzen und Workshops.

In diesem Heft werden in den Fachbeiträgen Beispiele gezeigt, die die große Palette der Möglichkeiten der faseroptischen Sensorik vorstellen. In diesem einleitenden Beitrag sollen einige grundlegende Auskünfte gegeben werden. Eine knappe Klassifizierung der faseroptischen Sensoren sowie Einführung in die physikalischen Grundlagen der Sensorprinzipien soll den Überblick erleichtern. Anliegen der Autoren dieses Beitrags ist es vor allem, dem interessierten Anwender notwendige Vorkenntnisse für die Entwicklung messtechnischer Konzepte und die Auswahl geeigneter Sensorprinzipien für die jeweilige bautechnische Fragestellung bereitzustellen.

2 Messtechnische Anforderungen

Die Anforderungen an die Messtechnik kann man in die Kategorien

- allgemeine und messtechnische,
- mechanische und ökonomische Anforderungen
- sowie Anforderungen aus der Umgebung unterteilen (SCHALLERT u. a., 2004). Bei Verwendung faseroptischer Sensoren (FOS) kommen noch spezifische Anforderungen hinzu:
- hohe Zuverlässigkeit insbesondere bei eingebetteten Sensoren,
- hohe Langzeitstabilität bei Bauwerksmonitoring (> 20 Jahre),
- bekannte Drift- und Hysterese-Eigenschaften der Sensoren,
- falls erforderlich, ein definierter Nullbezug,
- hohe Abtastrate bei Kurzzeitmessungen,



Abb. 1: Fixierung (Aufspannen) der Sensorfaser in einer oberflächennahen Aussparung (Foto: BAM)

- gute Multiplexfähigkeit zur Schaffung von Sensornetzwerken,
- Eignung für den Einsatz unter Baustellenbedingungen (ausreichende Robustheit).

Die mechanischen Anforderungen an die Sensoren ergeben sich aus deren Ankopplung an das entsprechende Messobjekt, um einen sicheren Verbund zu gewährleisten. Hierbei muss unterschieden werden zwischen

- Bauwerk-/Bauteilmontage (z. B. Befestigung an Bauteiloberflächen, s. Abb. 1),
- Bauteileinbettung (Einbau im Inneren eines Bauteils, z. B. Befestigung an der Bewehrung, s. Abb. 2) oder
- Integration in einen Werkstoff (s. Abb. 3) bzw. Einbau in den Boden (s. Abb. 4).

Die Montage am Bauteil oder Bauwerk kann mit kommerziellen Materialien und Verfahren wie Klebstoffen, Schrauben, Bolzen oder durch Schweißen erfolgen. Hier-



Abb. 2: Fixierung von Sensorträgern in einer Pfahlbewehrung (Foto: BAM, Rammpfahl-Herstellung: Centrum Pfähle GmbH Hamburg)

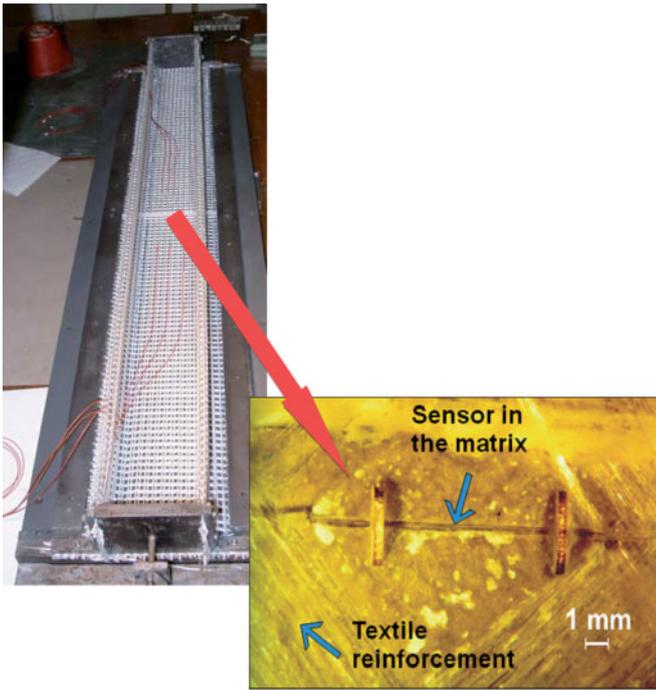


Abb. 3: Textilbewehrtes Betonprofil (RWTH Aachen) mit eingebettetem faseroptischen Sensor (Foto: BAM)

bei muss sichergestellt sein, dass die Verbindungsmittel zwischen Messobjekt und Sensor die Messgrößen sicher übertragen können (z.B. Anpassung der Steifigkeiten). Kriecheffekte der Sensoren und des Verbindungsmittels müssen insbesondere bei Langzeitmessungen bekannt sein.

Die Einbettung eines faseroptischen Sensors in ein Bauteil kann beispielsweise in Aussparungen erfolgen, die nach der Montage geschlossen werden. Bei der Integration in einen Werkstoff ist der dauerhaft gute mechanische Kontakt zwischen Sensor und Messobjekt (z. B. Werkstoffmatrix) wesentlich. Oft stellt die natürliche Inhomogenität von Baustoffen gehobene Anforderungen beispielsweise an die minimale Messbasis der Sensoren zum Ausgleich von lokalen Dehnungsunterschieden. Durch die Applika-



Abb. 4: Einbau eines faseroptischen Sensors in einen Hang für Permanent-Monitoring (Foto: Prof. Bin Shi, Nanjing Univ., China)

tion auf ein Trägermaterial können bei eingebetteten Sensoren deren Abmessungen deutlich verkürzt werden. Die Länge des Trägermaterials bestimmt dabei die Messbasis. Weiterhin müssen bei Einbettung von Sensoren deren Rückwirkungen auf das Messobjekt beachtet und in jedem Fall minimiert werden. Grundlage dafür ist die Kenntnis der mikromechanischen Abläufe in der Trennschicht Werkstoff – Messelement, die zu Schubspannungen und Verformungen oder zu Querbeanspruchungen der verwendeten Sensoren führen können.

3 Grundlagen faseroptischer Sensorsysteme

Die Sensorwirkung entsteht durch die gezielte Veränderung der Eigenschaften der optischen Strahlung, die durch Lichtwellenleiter (LWL) geführt wird. Die Veränderung der optischen Größe wird dann auf die Einwirkung der Messgröße kalibriert, wodurch die Messaussage erreicht wird. Faseroptische Sensoren lösen nicht jedes Messproblem; ihr Einsatz sollte dann erfolgen, wenn

- für eine spezielle Messaufgabe kein bewährtes System zur Verfügung steht, das die Messgrößenerfassung erlaubt,
- klare Verbesserungen in den Messaussagen erreicht werden können,
- die Anwendung elektromagnetisch unbeeinflussbarer Sensoren bzw. Sensorsysteme gefordert wird oder
- vergleichsweise wirtschaftlichere Lösungen erzielt werden können.

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die wesentlichen Vor- und Nachteile faseroptischer Sensoren zusammengefasst.

Die besonderen Einsatzgebiete sowie die große Anzahl an erfassbaren Messgrößen machen faseroptische Sensoren für die Bautechnik insbesondere für das Monitoring über lange Strecken und große Zeiträume in rauer Umgebung sehr interessant.

Das durch den LWL transportierte Licht wird entweder in diesem direkt durch die Messgröße in seinen optischen Eigenschaften verändert (intrinsische Sensoren) oder aus dem LWL ausgekoppelt und dann am (externen) sensitiven Element verändert, wieder in den LWL eingekoppelt und zur Auswerteeinheit transportiert (extrinsische Sensoren). Hierbei dient der LWL nur der Übertragung des Lichts. Bei intrinsischen Sensoren wirkt der gesamte LWL (verteilte Sensoren) oder einzelne Bereiche (quasi-verteilter Sensor) als sensitives Element.

Die gebräuchlichste Art der Klassifizierung von faseroptischen Sensoren ist eine Einteilung nach deren physikalischem Prinzip, d. h. nach der sensorischen Veränderung bestimmter Lichteigenschaften. Die wesentlichen durch äußere Einflüsse veränderbaren optischen Eigenschaften sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tab. 1: Vorteile faseroptischer Sensoren

| Eigenschaft | Bemerkungen |
|--|---|
| Immunität gegenüber elektromagnetischen Feldern und ionisierender Strahlung | Einsatz im Umfeld von Hochfrequenz-, Hochspannungs-, Starkstrom- und Kernkraftanlagen |
| hohe Eigensicherheit, da keine elektrische Energie am Sensor erforderlich ist | Einsatz in blitz- und explosionsgefährdeter Umgebung (Wasserbauwerke, z. B. Staudämme, Gasspeicher) |
| Widerstandsfähigkeit gegenüber Erschütterungen, chemischen Angriffen und extremen Umwelteinflüssen | Einsatz an Wasserbauwerken, in chemisch aggressiver Umgebung und bei extremen Temperaturen |
| geringe Abmessungen ($d < 0,5 \text{ mm}$) und geringes Gewicht | ⇒ nahezu keine Rückwirkung auf das Messobjekt, gute Integrierbarkeit in Werkstoffe |
| große Entfernungen zwischen Messort und Auswertelektronik möglich | ⇒ optimale Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten |
| verteilte Messungen über große Entfernungen mit einer Faser | ⇒ großflächige und räumlich ausgedehnte Überwachung ⇒ Bildung von Sensornetzwerken |
| eine Vielzahl von Messstellen durch Multiplexen erfassbar | |
| langzeitig Dehnungswerte $> 200 \text{ mm/m}$ bei Einsatz polymerer Fasern möglich | ⇒ Verformungsmessungen an Rutschhängen, in Senkungsgebieten, im Bergbau oder Monitoring von großen Rissen möglich |
| flexible Anpassung des Sensors an die spezielle Messaufgabe | ⇒ Erfassung mehrerer Messgrößen am gleichen Ort |

Tab. 2: Nachteile faseroptischer Sensoren

| Eigenschaft | Bemerkungen |
|---|---|
| aufwändigere Signalwandlung (opto-elektrisch) | ⇒ erhöhter Geräte- bzw. Auswerteaufwand |
| Mehrdeutigkeit der Messsignale bei interferometrischen Sensoren | |
| Kompensation von Temperatureinflüssen erfordert besondere Beachtung | |
| keine standardisierten optischen Ausgangssignale in Abhängigkeit vom physikalischen Prinzip | ⇒ unterschiedliche Auswerteverfahren |
| erhöhter Aufwand zur Erringung der Robustheit gegenüber rauen Baustellenbedingungen | ⇒ erhöhter Aufwand bei Installation und Reparatur |

Tab. 3: Merkmale faseroptischer Sensorprinzipien

| Nutzbare Parameter der optischen Strahlung | Sensorische Wirkungsweise | Messmethodik |
|--|--|---|
| Intensität | Änderung der Transmissionseigenschaften durch Absorption, Streuung | Lichtleistungs- bzw. Dämpfungsmessung |
| Wellenlänge | Änderung der Lichtwellenlänge durch verschiedene physikalische Effekte | Spektralmessung |
| Phase | Änderung der Phasenbeziehung zweier kohärenter Lichtwellen | Interferometrische (Intensitäts-)Messung |
| Polarisation | Änderung der Polarisation durch z. B. Doppelbrechung u. a. physikalische Effekte | Interferometrische (Intensitäts-)Messung |
| Laufzeit | Verlängerung / Verkürzung der durchlaufenen optischen Wegstrecke | Messung der Laufzeitdifferenz zwischen Anfang und Ende der Wegstrecke |

4 Funktionsprinzipien faseroptischer Sensoren

In diesem Kapitel werden übersichtsweise die wichtigsten Typen faseroptischer Sensoren sowie ihre Funktionsweise beschrieben. Der motivierte Leser findet die physikalischen und mathematischen Details in der entsprechenden Fachliteratur, z. B. [LÓPEZ-HIGUERA, 2002], [MEASURES, 2001] oder [THYAGARAJAN et al., 2007] bzw. in den Beiträgen dieses Heftes der AVN.

Eine installierte optische Faser erfährt durch das Messobjekt bzw. die Umgebung eine Längenänderung ΔL der Faser durch eine mechanische Dehnungs- oder Temperaturänderung ΔT . Im Allgemeinen tritt eine Kombination beider Effekte auf

$$\Delta L = L\varepsilon + L\alpha\Delta T \tag{1}$$

wobei L die Länge der Faser, ε die Dehnung in Richtung der Faser und α der thermische Ausdehnungskoeffizient sind. Zur Messung von ε ist daher eine entsprechende Kompensation für ΔT vorzusehen.

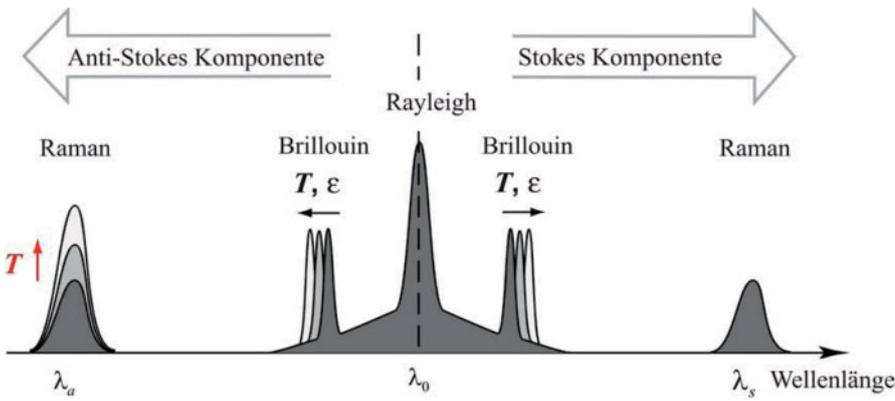


Abb. 5: Spektrum des rückgestreuten Laserlichtes mit den Stokes- und Anti-Stokes-Komponenten

Wenn sich eine optische Strahlung, ein Laserpuls oder breitbandiges Licht in einer Faser fortpflanzt, so erfährt diese Strahlung unterschiedlichste Änderungen. Ein Teil dieser Strahlung wird infolge von Inhomogenitäten im Glas des Lichtwellenleiters selbst zurückgestreut. Im Spektrum eines solchen rückgestreuten Lichts lassen sich verschiedenen Komponenten [Rayleigh, Brillouin und Raman] unterscheiden (Abb. 5).

Diese an sich schwachen Signale lassen sich aber durch die Verwendung eines entsprechenden Lasers verstärken und für unterschiedlichste Sensoren ausnutzen, z. B. verteilte Dehnungs- und Temperaturmessungen. Die Position, an der das Rückstreusignal entsteht, wird aus der Laufzeit des Laserpulses berechnet. Auf diese Weise kann die örtliche Verteilung der Temperatur und der Dehnung entlang einer Faser an jeder beliebigen Stelle (mit einer gewissen Unsicherheit in der Ortsangabe) bestimmt werden. Die großen Vorteile dieser Methode sind die Verwendung von Standardfasern und die mögliche große Länge (mehrere km) der Faser. Durch die zeitliche Mittelung des Signals kann eine Auflösung von z. B. $5 \mu\epsilon$ für die Dehnung und $0,3^\circ\text{K}$ für die Temperatur mit zirka 1 m Positionsunsicherheit und besser erreicht werden. Es gibt viele Anwendungen, wofür diese Messmethode besonders gut geeignet ist, z. B. die Leckageortung von Wassereintrüben bei Dämmen (verteilte Temperaturmessung) oder die Detektion von lokalen Rutschungszonen an Hängen (verteilte Dehnungsmessung). Geotextilien mit integrierten optischen Fasern sind beispielsweise ein neues, vielversprechendes Messmittel in der Geotechnik.

Es werden aber auch gezielt „sensitive“ Zonen in optische Fasern eingebracht oder sensitive Faseranordnungen „konstruiert“. Das bekannteste Beispiel für gezielt er-

zeugte sensitive Zonen im Lichtwellenleiter ist der Faser-Bragg-Gitter-Sensor (FBG-Sensor). Ein ähnliches Beispiel ist der Fabry-Perot-Interferometer-Sensor (FPI-Sensor). Diese sind allerdings lokale faseroptische Sensoren – im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen verteilten Sensoren.

Im Falle des FBG-Sensors wird in die optische Faser eine regelmäßige Struktur brechzahlveränderter Bereiche (Gitterebenen) eingebracht. Der Abstand der Gitterebenen wird als Λ_B bezeichnet und beträgt üblicherweise $0,3 \mu\text{m}$ bis $0,5 \mu\text{m}$. Wird breitbandiges Licht, z. B. von einer LED erzeugt, und in die Faser eingekoppelt, dann wird an den Gitterebenen nur ein diskreter Lichtanteil mit der Wellenlänge λ_B rückgestrahlt, die sog. Bragg-Wellenlänge. Die Bragg-Wellenlänge ergibt sich aus der Beziehung $\lambda_B = 2n \cdot \Lambda_B$. Der mechanische Sensoreffekt tritt ein, wenn die Faser verformt wird und somit sich die Größe Λ_B verändert. Ebenso wirkt auch eine thermische Ausdehnung der Glasfaser. Da die Brechzahl n der Glasfaser sowohl thermisch als auch mechanisch empfindlich ist, entsteht zusätzlich eine Überlagerung mechanischer und thermischer Einflüsse (Abb. 6). Eine Temperaturkompensation ist daher notwendig, wenn nur mechanische Dehnung gemessen werden soll.

Die Sensorlänge beträgt üblicherweise einige Millimeter. Ein besonderer Vorteil der FBG-Technologie ist, dass viele FBG-Sensoren mit unterschiedlichen Gitterkonstanten $\Lambda_{B,i}$ zu einer durchgehenden Faser zusammengeschlossen werden können. Bei Verwendung unterschiedlicher $\Lambda_{B,i}$ ist trotz simultaner Messung die Unterscheidung der einzelnen Sensoren leicht möglich. Die Abb. 7 und 8 zeigen Varianten für die Applikation von Dehnungssensoren.

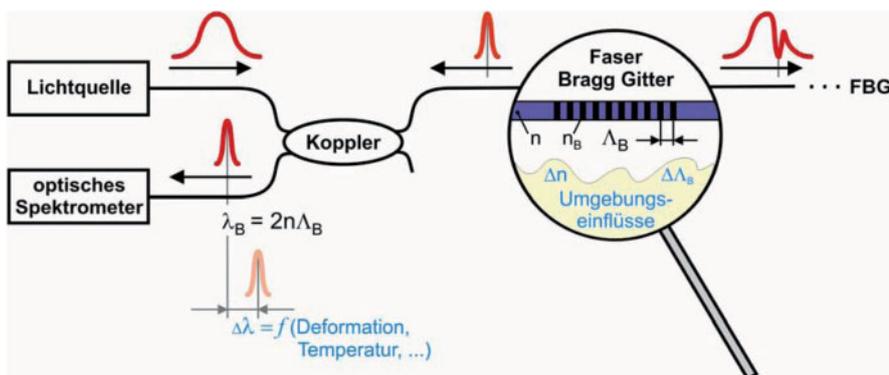


Abb. 6: Faseroptischer Bragg-Gitter-Sensor



Abb. 7: Direkt auf die Oberfläche applizierte optische Faser mit eingeschriebenem Bragg-Gitter als Dehnungssensor (Foto: BAM)

Der lokale FPI-Sensor kommt besonders dann zum Einsatz, wenn sehr geringe Dehnungsänderungen bzw. sehr hohe Messfrequenzen aufgelöst werden müssen. Ein FPI-Sensor besteht im Prinzip aus einer Kapillare, in der zwei Glasfasern derart geführt werden, dass eine Lücke von wenigen μm entsteht (Abb. 9). Die beiden Fasern sind an beiden Enden der Kapillare fixiert (Abb. 9 links). Die Änderung des Abstands zwischen den beiden Fasern bei Deformation der Kapillare ist interferometrisch sehr präzise messbar [Habel et al., 2007].

Eine Sonderbauform ist die flexible Variante des FPI-Sensors (Abb. 9 rechts), bei der nur eine der beiden Fasern an der Kapillare fixiert ist. Das andere Ende, meist die Zuleitungsfaser, bleibt gleitfähig. Dies führt zu einer geringen Steifigkeit der Sensoranordnung gegenüber der zu messenden Verformungen. Dadurch werden hohe dynamische Messauflösungen, z.B. für Schallemissionsmessungen an großen Beton-Gründungspfählen, erreicht [SCHILDER, 2010]. Zwei weitere konstruktive Varianten werden in Abb. 10 gezeigt.

Eine praktisch weit verbreitete Sensorkonfiguration basiert auf dem Prinzip des Mach-Zehnder-Interferometers (MZI). Dieses Interferometer hat eine besonders einfache Struktur (Abb. 11), da die beiden Umlenkprismen des konventionellen Designs durch die Verwendung von optischen Fasern wegfallen. Eine steuerbare Längenänderung kann durch die Verwendung eines Phasenschiebers PM im Messarm erzeugt werden. Diese Variante des MZI kommt beim Nieder-Kohärenz-Interferometer zur Anwendung, das im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

Die Nieder-Kohärenz Interferometrie hat durch die Entwicklung der langarmigen Dehnungssensoren SOFO von Smartec besondere Bedeutung erlangt [GLIŠIĆ und INAUDI, 2007]. Niederkohärentes Licht wird von einer LED mit einer Kohärenzlänge $\Delta\lambda$ von $30\mu\text{m}$ erzeugt und durch einen optischen Koppler (K2) aufgespalten (Abb. 12). Die beiden Signale breiten sich im Sensor längs der Referenzfaser (RF) und der Messfaser (MF) aus. Von den verspiegelten Enden dieser Fasern reflek-



Abb. 8: Auswahl an kommerziell verfügbaren FBG-Patches, bei denen das Bragg-Gitter in einer Trägerstruktur eingebettet ist, die mit dem Bauteil in unterschiedlicher Weise verbunden werden kann.

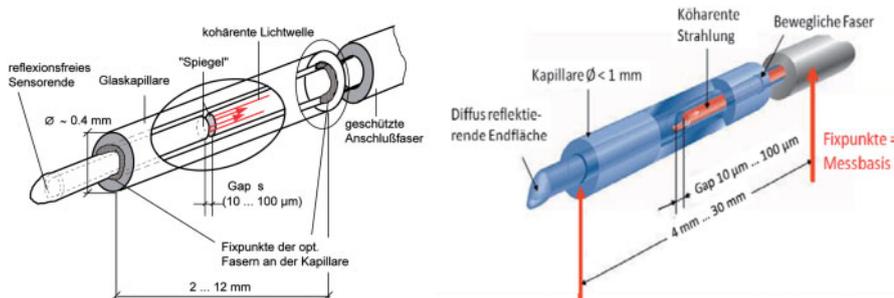


Abb. 9: Faseroptischer Fabry-Perot-Interferometer-Sensor (FPI); steife Variante (links) und bewegliche Variante (rechts).

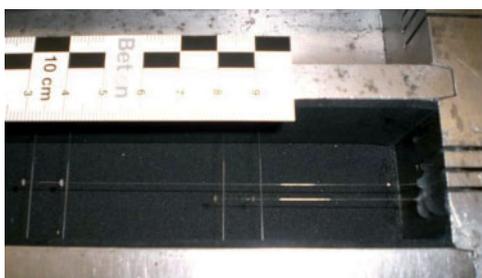


Abb. 10: Konstruktive Varianten faseroptischer Fabry-Perot-Interferometer-Sensoren: Einbettbares Miniatur-Distometer (links, Foto: BAM) in Anlehnung an Abb. 9 und Dehnungsaufnehmer für rauen Einsatz (rechts, Foto: Rocktest Ltd., Canada).

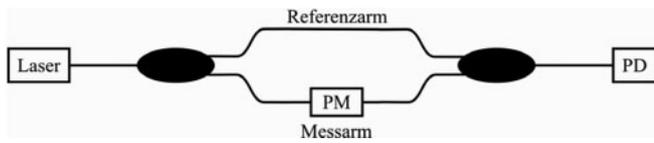


Abb. 11: Mach-Zehnder-Interferometer, PD ist die Photodiode, PM der Messarm mit der Phasenmodulationseinheit

tiert, werden beide Lichtanteile vom gleichen Koppler wieder vereinigt, wobei wegen der geringen Kohärenzlänge keine Interferenz auftreten kann, sofern $\Delta\lambda < 2\Delta L_I$ ist. ΔL_I ist der Wegunterschied beider Fasern im Messinterferometer. Nun wird das Signal wieder von einem Koppler (K3) aufgespalten und breitet sich längs einer Referenzfaser und einer variierbaren Messtrecke aus (Abb. 12). An der Photodiode entsteht Interferenz nur durch einen Abgleich beider Signale (Verschiebung des Spiegels) und kann dann zur Messung der Distanz ΔL_I benutzt werden. Der Vorteil der Verwendung von Interferometrie mit niedriger Kohärenz gegenüber Interferometrie mit hoher Kohärenz besteht darin, dass absolute Messungen möglich sind, denn die absolute Information trägt die Spindel des verschiebbaren Spiegels im Auswertinterferometer. Daher ist es nicht erforderlich, eine permanente Verbindung zwischen Auswerteeinheit und Sensor aufrecht zu erhalten. Durch die gemeinsame Führung von RF und MF im Messinterferometer werden Temperatureinflüsse kompensiert.

Die Tandemkonfiguration wird im SOFO-Static System von Smartec verwendet [GLIŠIĆ und INAUDI, 2007]. Die motorgetriebene Verschiebung des Spiegels braucht etwa 6 s, was für statische Messungen ausreichend schnell ist. Eine Längenänderung kann mit SOFO-Static mit einer Standardabweichung von $2\ \mu\text{m}$ gemessen werden. Mit der Verwendung eines faseroptischen Multiplexers können mehrere Sensoren sequentiell gemessen werden.

Für dynamische Messungen wurde SOFO-Dynamic entwickelt [GLIŠIĆ et al., 2007]. Im Prinzip wird das Auswertinterferometer durch ein Mach-Zehnder-Interferometer (MZI) ersetzt. Die Interferenz im MZI wird mit einem Phasenmodulator, der mit 50 kHz betrieben wird, erzeugt. Mit dem SOFO-Dynamic kann laut Herstellerangabe eine Auflösung von 10 nm mit 1 kHz erreicht werden. Da die SOFO-Dynamic-Auswerteeinheit jedoch die Referenzwerte verliert, wenn es vom SOFO-Sensor getrennt wird, kann es das SOFO-Static nicht ersetzen, sondern stellt eine wertvolle Ergänzung zu diesem dar.

5 Ausblick

Der Ausblick auf die faseroptische Sensorik fällt außerordentlich optimistisch aus. Nicht nur aus Sicht der jährlich wachsenden Anzahl der veröffentlichten Beiträge, sondern auch wegen der Gründung immer neuer kleiner Firmen, die faseroptische Sensoren herstellen oder vertreiben. In der Geotechnik gewinnen polymere faseroptische Sensoren (POF) für Verformungsmessungen mit Dehnungen bis zu 300 mm/m (30%) und mehr weiter an Bedeutung. Es werden bereits „Reichweiten“ von 500 m erreicht; höher transparente Polymere und empfindlichere Messgeräte lassen eine weitere Erhöhung der Übertragungsentfernung erwarten. Auch ist der Einsatz polymerer Fasern mit eingeschriebenen Bragg-Gittern zu erwarten. Diese Messtechnik wird gerade für begrenzte Areale im geotechnischen Umfeld hohe Akzeptanz finden.

Beim kommerziellen Einsatz werden grundsätzlich Richtlinien und Hinweise für einen fachgerechten Umgang und eine zuverlässige Applikation nachgefragt. Im jungen Gebiet der faseroptischen Sensorik sind erste Standards entwickelt worden bzw. werden fertiggestellt, so zum Bei-

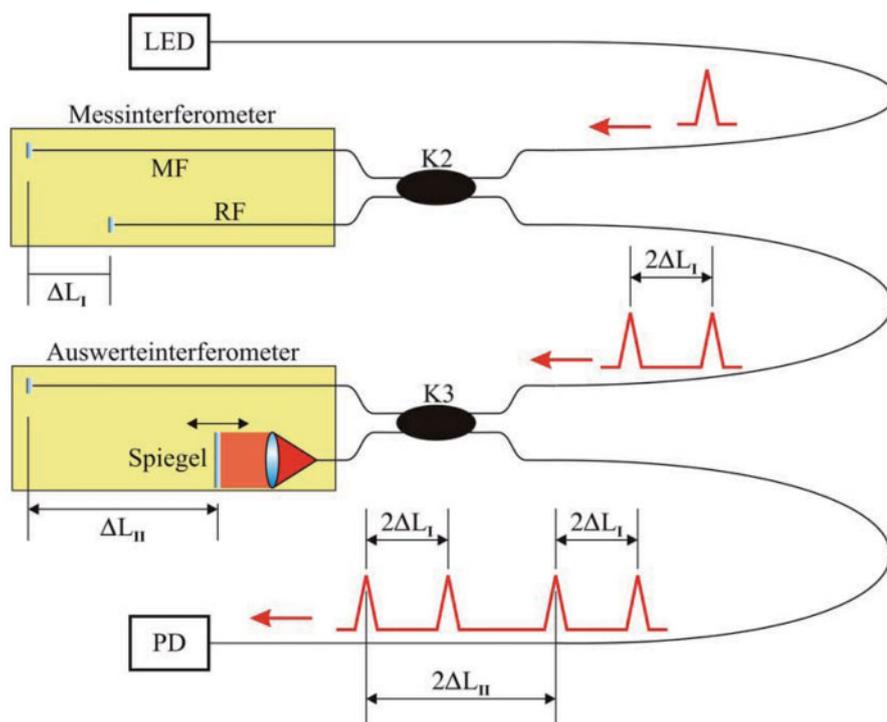


Abb. 12: Schematische Darstellung des Tandem-Interferometers mit niederkohärentem Licht einer LED und die dabei entstehenden Signale

spiel die seit Juli 2010 verfügbare VDI/VDE-Richtlinie 2660 zur Herstellung, Charakterisierung und Anwendung faseroptischer Bragg-Gitter-Sensoren. Diese Richtlinie soll helfen, bislang immer wieder vorkommende Unklarheiten bei der Definition von Kenngrößen und deren Angabe in Datenblättern zu vermeiden. Ebenso soll der DTS-Standard SEAFOM-MSP-01 die Beurteilung der Leistungsfähigkeit verteilter DTS-Systeme vereinheitlichen. Der internationale generische Standard zur Fasersensorik IEC 61757 wird zurzeit überarbeitet und fertiggestellt. Umfassende Regelwerke für die Anwendung faseroptischer Sensoren sind aber noch die Ausnahme; in zahlreichen internationalen Gremien, z. B. COST TD 1001 oder ISHMII, wird bereits darauf hingearbeitet.

Literatur

- [1] DIN 1054:2003-01, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH Berlin
- [2] DIN 4020:2003-09, Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH Berlin
- [3] DIN EN 61757-1:1999-09, LWL-Sensoren – Teil 1: Fachgrundspezifikation, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH Berlin
- [4] DORE, G.; DUPLAIN, G., 1997, Monitoring pavement response during spring thaw using fiber-optic sensors, 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, Williamsburg, VA, USA
- [5] FECKER, E., 1997, Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 204 S.
- [6] GLISIC, B., INAUDI, D., NAN, C., 2002, Pile monitoring during axial compression, pullout and flexure test using fibre optic sensors, 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), www.smartec.ch
- [7] GLISIC, B., INAUDI, D., 2007, Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, Ltd., 276 S.
- [8] ISHMII: <http://www.ishmii.org/>
- [9] LOPEZ-HIGUERA, J. M. (Ed.), 2002, Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, John Wiley & Sons, Ltd., 828 S.
- [10] MEASURES, R. M., 2001, Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, Academic Press, 716 S.
- [11] SCHALLERT, M., KREBBER, K., HOFMANN, D., HABEL, W. R., STAHLMANN, J., 2004, Auswahl geeigneter Fasersensorprinzipien für Anwendungen in der Geotechnik, In: Messen in der Geotechnik 2004, Braunschweig: Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 77, S. 309-328.
- [12] SCHILDER, C., KOHLHOFF, H., HOFMANN, D., HABEL, W., 2010, Structure integrated fibre optic AE sensor for concrete pile testing and monitoring, Proc. of the Photonics 2010 – Int. Conf. on Fiber Optics and Photonics, Viva Books, New Delhi, et al.; p. 281 und CD-ROM. ISBN 978-81-309-1719-1
- [13] SEAFOM-MSP-01, 2010, Measurement Specification for Distributed Temperature Sensing (DTS), Document No: SEAFOM-MSP-01, SEAFOM Measurement Specification Working Group. <http://www.seafom.com/>
- [14] THYAGARAJAN, K., GHATAK, A., 2007, Fiber Optic Essentials, John Wiley & Sons, Ltd., 242 S.
- [15] VDI/VDE-Richtlinie 2660, 2010, Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter, Grundlagen, Kenngrößen und deren Prüfung, Beuth-Verlag Berlin, entwickelt im VDI-Fachausschuss 2.17: <http://www.vdi.de/3693.0.html>

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. WOLFGANG R. HABEL

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
 Fachgruppe 8.1: Mess- und Prüftechnik; Sensorik
 Unter der Eichen 87, 12205 Berlin
 E-Mail: wolfgang.habel@bam.de

o. Univ. Prof. Dr. FRITZ K. BRUNNER

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
 Technische Universität Graz
 Steyrergasse 30, A-8010 Graz
 E-Mail: fritz.brunner@tugraz.at