



Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie?

Fritz K. Brunner, Graz

Kurzfassung

Wegen ihrer herausragenden Eigenschaften werden faseroptische Sensoren (FOS) immer häufiger für Messaufgaben, so auch in der Baumesstechnik, eingesetzt. In erster Linie werden Längenänderungen, die oft noch wegen der temperaturinduzierten Effekte korrigiert werden müssen, gemessen. Zuerst wird die Lichtausbreitung in einer optischen Faser betrachtet. Anschließend daran werden ganz kurz die physikalischen Grundlagen der wichtigsten faseroptischen Messmethoden für Längenänderungen zusammengefasst. Es werden zwei unterschiedliche Realisierungen der Niedrig-Kohärenz Interferometer im Detail für das Monitoring eines Bauwerks und eines Rutschhanges vorgestellt. Die Kombination vom ingenieurgeodätischen Monitoring mit den eingebetteten FOS Messungen könnte einen Paradigmenwechsel für die Ingenieurgeodäsie bedeuten.

Schlüsselwörter: Faseroptische Sensorik, Ingenieurgeodäsie, Paradigmenwechsel

Abstract

Fiber optical sensor technology: A topic for engineering geodesy?

The unique features of fiber optical sensors (FOS) make them useful for many measurement tasks including those in civil engineering. Here distance changes are measured which often need to be corrected for temperature induced effects. This paper starts with the light propagation in an optical fiber, leading to a brief review of the most important FOS methods for the measurement of length changes. Two different realisations of low-coherence interferometers are presented for the monitoring of a civil engineering structure and a landslide. The combination of continuous measurements using embedded FOS with monitoring data from geodetic measurements could mean a fundamental change of paradigm in engineering geodesy.

Keywords: fiber optical sensors, engineering geodesy, paradigm shift

1. Einleitung

Beim letzten Österreichischen Geodätentag wurde überzeugend die wachsende Bedeutung des Monitorings als exklusive Aufgabe der Ingenieurgeodäsie betrachtet [1]. Der Einsatz von faseroptischen Sensoren für Monitoringaufgaben nimmt ständig zu. Daher wurde ein Jahr später in zwei eingeladenen Beiträgen zum Internationalen Ingenieurvermessungskurs die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Sensoren (FOS) betrachtet ([2], [3]). Die wachsende Bedeutung von FOS für das Monitoring kann zum Beispiel bei den jährlichen Veranstaltungen von ISHMII (International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure) verfolgt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch ein neues Fachgebiet CIVIONICS identifiziert, welches die Kombination von Civil Engineering und Photonics bedeutet.

In diesem Beitrag werden fast voraussetzungslos einige Grundeigenschaften der FOS gebracht und dann die wichtigsten Messmethoden mit FOS von Längenänderungen zusammengefasst. Zwei Realisierungen von nieder-kohärenter Interferometrie werden ausführlicher betrachtet, da diese Messsysteme bei interes-

santen Monitoringaufgaben von IGMS (Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz) eingesetzt werden.

Es stellt sich die Frage, welche Bedeutung die ingenieurgeodätischen Messungen in Zukunft haben, wenn FOS hochpräzise Daten der Verformungen von Bauwerken oder geotechnischen Objekten liefern. Die Zukunft liegt in der Kombination beider Messmethoden, was ausführlich diskutiert werden soll. Ein Paradigmenwechsel zeichnet sich dadurch für die Ingenieurgeodäsie ab, indem die bisherige, natürliche Grenze ingenieurgeodätischer Messungen, gegeben durch die Oberfläche der Objekte, in der gemeinsamen Auswertung mit den FOS Messungen aufgehoben wird. Die Bedeutung dieser Entwicklungen soll diskutiert werden.

2. Faseroptische Sensorik

In diesem Kapitel werden einige Grundlagen der faseroptischen Sensorik vereinfacht zusammengestellt. Der motivierte Leser findet die physikalischen und mathematischen Details in der entsprechenden Fachliteratur, z. B. [4], [5] oder [6].

Die Faseroptik hat fundamentale Bedeutung für die Kommunikationssysteme auf Grund der

herausragenden Übertragungseigenschaften. Schon sehr früh wurde entdeckt, dass die Faseroptik viele Vorteile auch für die Sensorik bietet: FOS haben ein kleines Volumen, können direkt in das Objekt eingebettet werden, die Daten können in der Faser auch über sehr lange Distanzen übertragen werden, hochfrequente Messungen sind möglich, viele Sensoren können auf eine Faser verteilt aufgebracht werden und sie sind immun gegen elektromagnetische Störungen. Gerne wird das faseroptische Monitoring mit dem menschlichen Nervensystem verglichen.

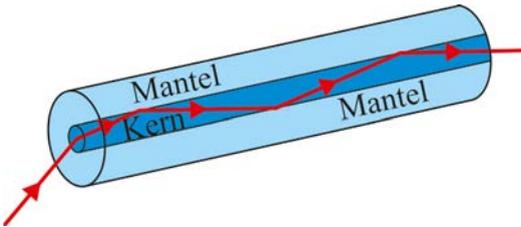


Abb. 1: Lichtausbreitung in einer optischen Faser

Die optische Grundlage für die Faseroptik ist die Totalreflexion, die an der Grenze zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes auftritt, allerdings nur für den Strahl, der aus dem optisch dichteren Medium auf die Grenze zum optisch dünneren Medium trifft. Der häufigste verwendete Fasertyp besteht aus einem Kern und einem Mantel, der auch beschichtet wird, Abb. 1. Abhängig vom Durchmesser des Kerns und den benutzten Wellenlängen bezeichnet man die Faser als Einmoden (9µm) oder Vielmoden (62,5µm) Faser. Der Durchmesser des Mantels kann variieren, z. B: 125 µm.

Viele der bekannten optischen Elemente können auch mit Faseroptik gebaut werden. Für die

nachstehenden Betrachtungen ist der 50 : 50 (3 dB) Strahlteiler wesentlich (Abb. 2), der auch zum Mischen von zwei Lichtsignalen verwendet wird.

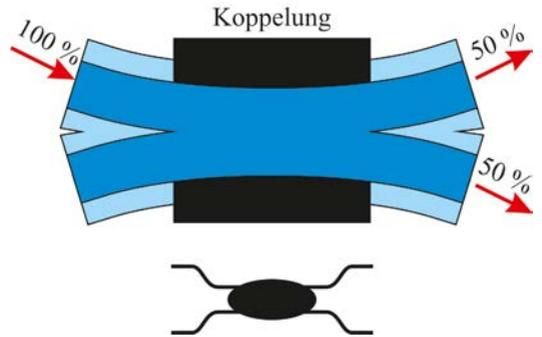


Abb. 2: Faseroptischer Strahlteiler (3 dB, oben) mit entsprechendem Symbolbild (unten)

Eine gemessene Längenänderung ΔL der Faser kann durch Änderung der angreifenden Kräfte oder Temperaturänderungen ΔT erzeugt werden. Zumeist tritt eine Kombination beider Effekte auf

$$\Delta L = L\varepsilon_1 + L\alpha\Delta T \quad (1)$$

wobei L die Länge der Faser, ε_1 der Strain in Richtung der Faser und α der thermische Ausdehnungskoeffizient ist. Zur Messung von ε_1 ist daher eine entsprechende Kompensation für ΔT vorzusehen.

Wenn sich ein Lichtpuls in einer Faser fortpflanzt, so wird ein Teil dieser Strahlung von den Inhomogenitäten des Materials, eigentlich des Brechungsindex, zurückgestreut. Im Spektrum des rückgestreuten Lichtes lassen sich verschiedenen Komponenten (Rayleigh, Brillouin und Raman) unterscheiden, Abb. 3.

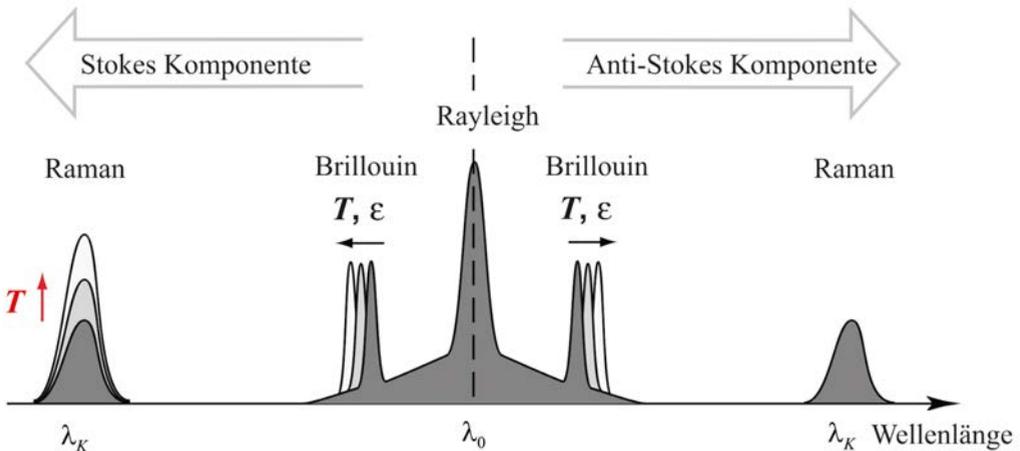


Abb. 3: Spektrum des rückgesteuerten Laserlichtes mit den Stokes und Anti-Stokes Komponenten [Quelle: Smartec]

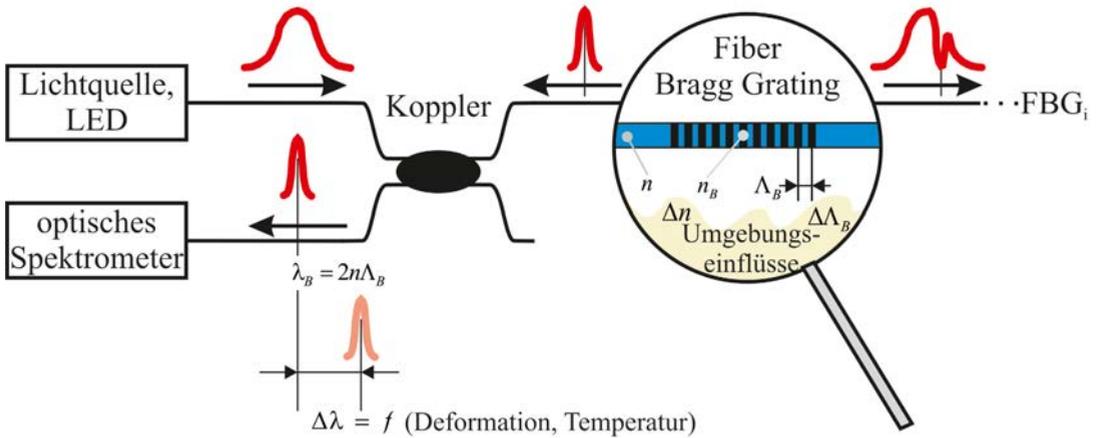


Abb. 4: Faseroptischer Bragg Gitter (FBG) Sensor

Diese schwachen Signale lassen sich aber durch die Verwendung eines entsprechenden Lasers verstärken. Die Position der Rückstreuung kann durch die Laufzeit des Laserpulses bestimmt werden. Somit kann die örtliche Verteilung der Temperatur und des Strains entlang der Faser 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 den Strain und $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ für die Temperatur mit zirka 1 m Positionsgenauigkeit erreicht werden. Es gibt viele Anwendungen, wofür diese Messmethode besonders gut geeignet ist, z. B. die Leckageortung von Wassereinbrüchen bei Dämmen. Die Verbindung von Geotextilien mit eingewebten optischen Fasern ist ein neues, vielversprechendes Messmittel in der Geotechnik.

Für eine andere Messmethode wird in die optische Faser eine regelmäßige Struktur mit der Wellenlänge Λ_B eingebrannt, die faseroptisches Bragg Gitter (FBG) genannt wird. Breitet sich breitbandiges Licht, von einer LED erzeugt, längs der Faser aus, dann wird durch das FBG ein Lichtanteil mit der Wellenlänge λ_B rückge-

strahlt, der im funktionalen Zusammenhang mit der Gitterperiode Λ_B steht. Damit wird eine durch mechanische oder thermische Einflüsse erzeugte Änderung von Λ_B messbar, Abb. 4. Eine Temperaturkompensation ist notwendig, wenn nur der mechanische Strain gemessen werden soll.

Die Sensorlänge beträgt üblicherweise einige Millimeter. Ein besonderer Vorteil der FBG Technologie ist, dass viele Sensoren zu einer durchgehenden Faser zusammengeschlossen werden können. Bei Verwendung unterschiedlicher $\Lambda_{B,i}$ ist trotz simultaner Messung die Unterscheidung der einzelnen Sensoren leicht möglich.

Am IGMS wird die FBG Technologie zur Messung der Strainverteilung in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit der Firma Getzner verwendet. Der Kraftfluss zwischen Schiene und Schwelle wird durch eine elastische Zwischenlage gedämpft. Häufig werden aber diese Zwischenlagen zerstört. Für eine ausführliche Untersuchung der Gründe dafür werden in einige Zwischenlagen jeweils 9 FBG Sensoren eingebettet, [7].

Natürlich können alle bekannten optischen Interferometer in Faseroptik ausgeführt werden, wobei sich immer Vorteile bei der Realisierung

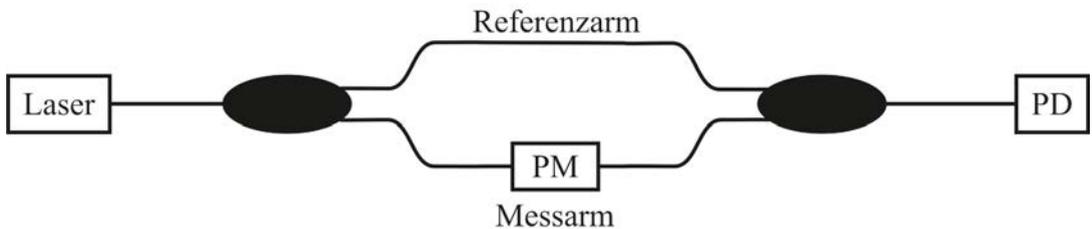


Abb. 5: Mach-Zehnder Interferometer, PD ist die Photodiode, Messarm mit Phasenmodulationseinheit PM

ergeben, da vor allem die Luftwege durch die Faseroptik ersetzt werden. Speziell soll das Fabry-Perot Interferometer (FPI) erwähnt werden, das bei der präzisen Messung von Strain in Bauteilen, z. B. Rotorblätter von Windanlagen, mit großem Erfolg eingesetzt wird. Ein FPI Sensor besteht im Prinzip aus einer Kapillare, in der zwei Glasfasern geführt werden, um eine Lücke von wenigen μm zu erzeugen. Die Änderung des Abstandes zwischen den beiden Fasern ist interferometrisch sehr präzise messbar, [3].

Das Mach - Zehnder Interferometer (MZI) hat eine besonders einfache Struktur, Abb. 5, da die beiden Umlenkprismen des konventionellen Designs durch die Verwendung von 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 Kapitel separat beschrieben wird.

3. Nieder - Kohärenz Interferometrie

3.1 Grundlagen und SOFO

Die Nieder - Kohärenz Interferometrie hat durch die Entwicklung der langarmigen Strain Sensoren SOFO von Smartec besondere Bedeutung erlangt, [8]. Nachstehend werden zwei IGMS Projekte, bei denen SOFO Sensoren verwendet werden, vorgestellt. Daher erscheint es sinnvoll, die in der Ingenieurgeodäsie weniger bekannte Nieder - Kohärenz Interferometrie etwas ausführlicher darzustellen.

Niederkohärentes Licht wird von einer LED mit einer Kohärenzlänge $\Delta\lambda$ von $30\ \mu\text{m}$ erzeugt und wird durch einen optischen Koppler (K2) aufgespalten. Die beiden Signale breiten sich im Sensor längs der Referenzfaser und der Messfaser aus, Abb. 6. Von den verspiegelten Enden dieser Fasern reflektiert, werden beide Lichtteile vom gleichen Koppler wieder vereinigt, wobei wegen der geringen Kohärenzlänge keine Interferenz auftreten kann, sofern $\Delta\lambda/2 < \Delta L_I$ ist. Dabei

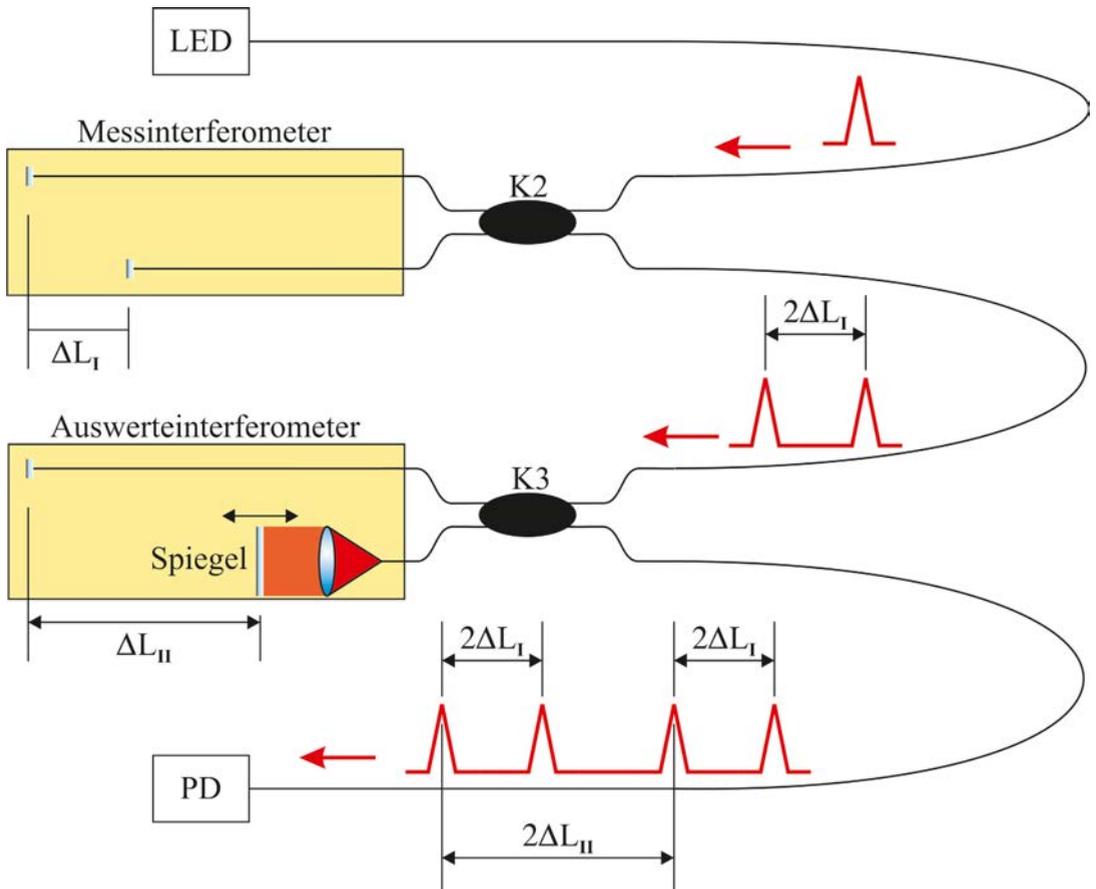


Abb. 6: Schematische Darstellung des Tandem - Interferometers mit nieder-kohärentem Licht einer LED (links) und die dabei entstehenden Signale (rechts)

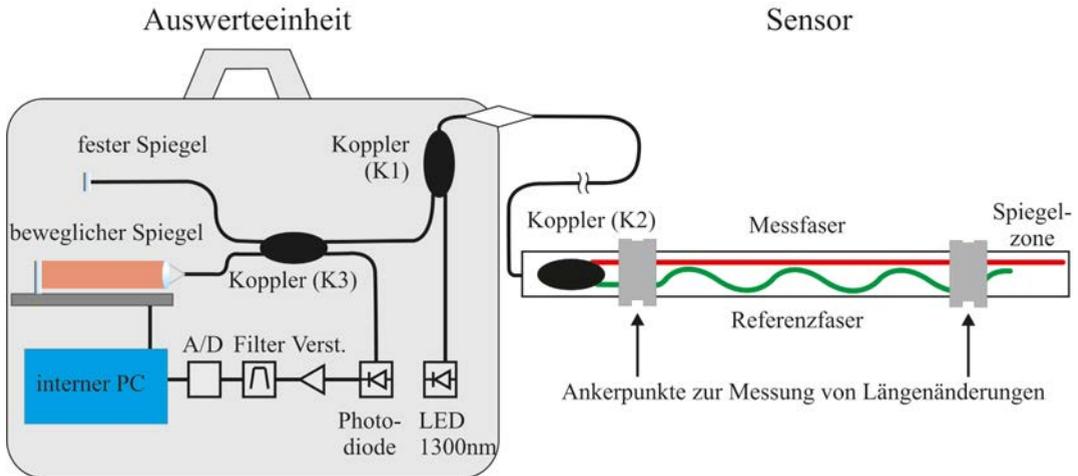


Abb. 7: Realisierung des Tandem-Interferometers als SOFO – Static von Smartec, [8]

ist ΔL_I der Wegunterschied beider Fasern im Messinterferometer I. Nun wird das Signal wieder von einem Koppler (K3) aufgespalten und breitet sich längs einer fixen Referenzfaser (verspiegelt) und eine Strecke, deren Länge variiert werden kann, aus, Abb. 6. An der Photodiode kann Interferenz nur durch einen Abgleich beider Signale entstehen (Variation von ΔL_{II} durch Verschiebung des Spiegels) und dann zur Messung der Distanz ΔL_I benutzt werden. Als Messsignal ergibt sich durch die Variation von ΔL_{II} ein Interferenzbild mit drei Spitzen für die Intensität. Die zentrale Spitze bedeutet, dass beide Arme im Auswerteferometer gleich lang sind ($\Delta L_{II} = 0$). Die seitlichen Spitzen entsprechen den Spiegelpositionen, wo die Längendifferenz im Auswerteferometer identisch ist mit der Längendifferenz im Messinterferometer ($\Delta L_{II} = \Delta L_I$). 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 Auswerteferometer. Daher ist es nicht erforderlich, eine permanente Verbindung zwischen Auswerteeinheit und Sensor aufrecht zu erhalten.

Wie bereits beschrieben, besteht jeder SOFO Sensor aus zwei Glasfasern, Abb. 7. Die vorgespannte Messfaser wird mit zwei Ankerpunkten am Messobjekt fixiert und folgt daher den Verformungen von z. B. einem Bauwerk. Zusätzlich ändern sich der Brechungsindex und die Länge dieser Faser aufgrund von Temperaturänderungen. Mit Hilfe der zweiten, losen Referenzfaser ist es möglich, diesen Temperatureinfluss automatisch zu kompensieren. Die Sensoren werden

von der Fa. Smartec gefertigt und sind mit Längen von bis zu 10 m verfügbar.

Die Tandemkonfiguration wird im SOFO - Static System von Smartec verwendet, siehe Abb. 7. Die motorgetriebene Verschiebung des Spiegels braucht etwa 6 s, was für statische Messungen ausreichend schnell ist. Das SOFO - Static wurde für Langzeitbeobachtungen konzipiert, wofür absolute Distanzänderungen gemessen werden können, auch wenn das Gerät zwischendurch abgeschaltet wird. Eine Längenänderung kann mit SOFO - Static mit einer Standardabweichung von $2 \mu\text{m}$ gemessen werden. Dieser Wert wurde in vielen Projekten erhärtet [8] und auch durch Labormessungen von IGMS bestätigt [9]. Damit ergibt sich z. B. für eine Sensorlänge von 5 m die relative Präzision von $4 \cdot 10^{-7}$. Mit der Verwendung eines faseroptischen Multiplexers können mehrere Sensoren sequentiell gemessen werden.

Für dynamische Messungen wurde von Smartec SOFO - Dynamic entwickelt [8]. Im Prinzip wird das Auswerteferometer durch ein Mach-Zehnder Interferometer ersetzt. Die Interferenz im MZI wird mit einem Phasenmodulator, der mit 50 kHz betrieben wird, erzeugt. Es können mehrere Sensoren simultan gemessen werden, indem das Licht der LED aufgespalten wird und jeder Sensor ein eigenes MZI hat. Laut Herstellerangabe kann mit dem SOFO - Dynamic eine Auflösung von 10 nm mit 1 kHz erreicht werden. Messungen im Labor und beim Feldeinsatz von IGMS haben diese Werte voll bestätigt und gezeigt, dass diese Angaben sogar als sehr konservativ einzuschätzen sind. 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.

3.2 Zwei Beispiele

An Hand von zwei Beispielen von eingebetteten SOFO Sensoren sollen deren Eigenschaften und Vorteile besprochen werden. Die beiden Beispiele zeigen auch die Verbindung mit der Ingenieurgeodäsie.

a) Betonplatte. Zur Erweiterung einer Straße im Gebirge wurde eine monolithische Hängebrücke gebaut. Die 150 m lange Betonplatte (ohne Dehnungsfugen) wird mit 30 Ortbetonpfählen mit dem felsigen Boden verbunden. Aufgrund der alpinen Lage der monolithischen Betondecke sind interne Temperaturänderungen zwischen Sommer und Winter von mehr als 40 K möglich. Bei freier Ausdehnung und geradem Straßenverlauf würde sich das Betondeck um ca. 7 cm ausdehnen. Dies würde Probleme, insbesondere im Übergangsbereich zwischen Hangbrücke und Straße, bringen, die durch wartungsintensive Arbeiten behoben werden müssten. Durch die Verankerung mit 30 Ortbetonpfählen und aufgrund des geschwungenen Trassenverlaufs sollten die Deformationen aber wesentlich geringer sein. Zur Untersuchung des tatsächlichen Verhaltens wurde ein Monitoringprogramm entworfen, das aus traditionellen geodätischen Messungen (Präzisionspolygonzug, Präzisionsnivellement), geotechnischen Messungen (Inklinometermessungen), faseroptischen Messungen (SOFO - Static) und Temperaturmessungen bestand [9], [10]. Die Bewegungen der gesamten Betonplatte sind kleiner als 5 mm im Beobachtungsintervall gemessen worden.

8 SOFO Sensoren von 5 m Länge wurden beim Bau der Betondecke einbetoniert. Die Anzahl der Sensoren war durch das Budget diktiert. Ein Sensor wurde schon bei der Fertigstellung der Brücke zerstört, zwei weitere Sensoren wurden seither unbrauchbar. 5 eingebettete SOFO Sensoren sind nach fünf Jahren noch voll nutzbar, wie kürzlich festgestellt werden konnte. Alle Messungen haben die Standardabweichung von 2 μm für die SOFO - Static Messungen bestätigt.

b) Rutschhang. GPS Überwachungsmessungen am Rutschhang Gradenbach haben starke Beschleunigungen der Hangbewegung mit einem abrupten Stopp dieser Beschleunigungen gezeigt [11]. Dieses Phänomen tritt häufig bei tiefen Massenbewegungen auf und ist für die Vorhersage von Hangbewegungen besonders kritisch. Daher wird die Massenbewegung Gra-

denbach von der TU Wien (Prof.Dr. E. Brückl) auf Mikroseismik untersucht. Zusätzlich wurde von IGMS eine faseroptische Strainrosette in den Hang eingebettet. Die Strainrosette besteht aus drei SOFO Sensoren, die 5 m lang sind und einen Orientierungsunterschied von 120° haben. Die SOFO Sensoren wurden ungefähr 2 m unterhalb der Oberfläche eingegraben. Mit SOFO - Dynamic wurde ein umfangreicher Funktionstest der Strainrosette mit Hammerschlagseismik durchgeführt, wobei die erreichbare Auflösung für SOFO - Dynamic mit ungefähr 1 nm festgestellt wurde [11]. Mit SOFO - Static werden die lokalen Deformationen regelmäßig erfasst. Die Position der Strainrosette wird im GPS Netz mitbestimmt. Zusätzlich wurde im Bereich der Strainrosette ein lokales Monitoringnetz aufgebaut und dieses wird zu bestimmten Epochen mit terrestrischen geodätischen Messungen vermessen. Die neu entwickelte Strainrosette eignet sich auch mit großen Vorteilen für andere Monitoringaufgaben in der Geotechnik, siehe [11].

4. Die Rolle der ingenieurgeodätischen Messungen

Die beiden Projekte haben gezeigt, dass faseroptische Sensoren direkt in ein Bauwerk beim Bau eingebettet oder in ein bereits existierendes Objekt nachträglich eingebettet werden können. Die erreichbare Präzision dieser faseroptischen Messungen ist 2 μm , also wesentlich höher als es mit geodätischen Messungen machbar ist. Aber die FOS geben nur sehr lokale Informationen, während die geodätischen Messungen globale Informationen über das Objekt liefern. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass die geodätischen Präzisionsmessungen meistens nur epochenweise ausgeführt werden, wogegen die faseroptischen Messungen kontinuierlich durchgeführt werden können.

Die Analyse der Monitoringmessungen führt auf die Parameterschätzung der hybriden geodätischen Messungen, die allerdings zeitlich und räumlich inhomogen vorliegen. Um nun auch die Messungen mit den eingebetteten faseroptischen Sensoren in die Parameterschätzung aufnehmen zu können, muss eine (geometrische) Verbindung zwischen diesen beiden Messsystemen hergestellt werden, wofür ein Modell des Objektes zu erstellen ist. Ein Finites Element Model (FEM) ist dafür bestens geeignet, wobei bestimmte Nodalpunkte des Modells mit den Endpunkten der SOFO Sensoren und den geodätischen Netzpunkten übereinstimmen sollten [9], [10]. Für die Berechnung mit dem FEM müssen Kräfte und Materialeigenschaften fest-

gelegt werden. Da diese im Allgemeinen nicht ausreichend bekannt sind, werden diese durch iterative Abstimmungen der FEM Berechnungen und der Parameterschätzung bestimmt.

Die externen geodätischen Messungen – auch wenn sie weniger präzise sind als die FOS Messungen – liefern eine wichtige Schranke für die internen Messungen mit eingebetteten FOS und den notwendigen Modellen, vor allem, um die Daten der beiden unterschiedlichen Messungen zu vereinen. Erst diese Kombination liefert neue Informationen über das Objekt und das Materialverhalten. Die angesprochene Berechnungsmethode wurde (erstmal) für die Auswertung der Messungen der monolithischen Betondecke entwickelt [9], [10]. Diese integrale und iterative Auswertemethode wird IAM bezeichnet [10].

5. Ein Paradigmenwechsel?

Dieses Kapitel möchte ich in der Ich-Form schreiben, um den persönlichen Charakter der zum ersten Mal vorgestellten Ansichten zu betonen.

In [12] wurde bereits ein „Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen“ besprochen. Es wurden die folgenden vier Wechselzonen erkannt: (1) Extraktion von Geometrie, (2) Kalibrierung eines Strukturmodells, (3) Zeit – kontinuierliche Aufgaben und (4) Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Die Frage stellt sich: Sind das bereits echte Paradigmen-

wechsel oder Weiterentwicklungen? Die Wechselzone (2) ist sehr eng verbunden mit den in diesem Beitrag vorstellten faseroptischen Messungen und der Modellierung der Messungen. Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings darin, dass die Messungen mit FOS mit eingebetteten Sensoren geschehen.

Die Messungen der heutigen Ingenieurgeodäsie mit dem beachtlichen Leistungsspektrum sind aber durch die Oberflächen der Erde und Objekte eingeschränkt. Daher umfassen auch die unbekannt Parameter der Parameterschätzung keine objektinternen Informationen, keine Kräfte und keine Materialeigenschaften. Wie im vorhergehenden Kapitel argumentiert wurde, ändert sich diese Situation durch die Hinzunahme der Messungen mit in ein Objekt eingebetteten Sensoren, siehe Abb. 8, wobei FOS große Vorteile bieten und bereits eine durchaus beachtliche Reife erreicht haben. Die Verbindung der klassischen ingenieurgeodätischen Messungen mit den Messungen mit eingebetteten FOS kann mit Hilfe eines FEM geschehen. Mit dem FEM werden das Verhalten der Objektstruktur und das Objektmaterial modelliert. Es führt schlussendlich auf die integrierte Analyse (IAM) aller Messungen, [9] und [10]. Damit verschwindet die bisherige Grenze der Ingenieurgeodäsie.

Jetzt möchte ich die Definition eines Paradigmas bringen, die von Thomas S. Kuhn [13]

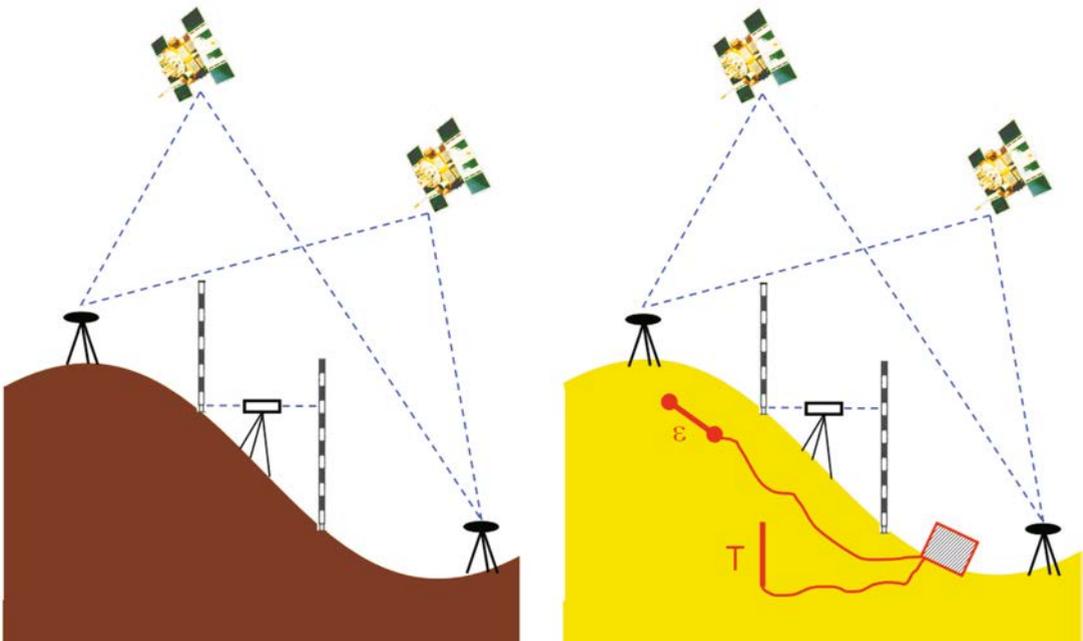


Abb. 8: Die Grenze der Erdoberfläche für ingenieurgeodätische Messungen (links) verschwindet durch die Verwendung von eingebetteten faseroptischen Messungen (rechts)

stammt. Er schreibt: „Unter Paradigma verstehe ich allgemein anerkannte wissenschaftliche Leistungen, die für eine gewisse Zeit einer Gemeinschaft von Fachleuten maßgebende Probleme und Lösungen liefern“ [13, Seite 10]. Die Ingenieurgeodäsie klassifiziere ich als angewandte Wissenschaft. Dann bedeutet das Fallen der Oberfläche als jahrtausend lange Grenze der Messungen und Informationen durch die Hinzunahme von Messungen mit in ein Objekt eingebetteten Sensoren einen echten Paradigmenwechsel in der Ingenieurgeodäsie. Es würde unser Fachgebiet stärken und es noch intensiver mit den Bauingenieurwissenschaften verbinden. Ich möchte abschließend betonen, dass dafür noch weitere Forschungsarbeiten notwendig sind. Aber es wird sich lohnen.

Literaturverzeichnis

- [1] Wunderlich, T., Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit, *Öst. Z. f. Verm. & Geoinf.* 94 (2006): 50 – 62.
- [2] Inaudi, D., Glišić, B., Overview of Fiber Optic Sensing Technologies for Structural Monitoring, In Brunner F.K. (Hg.) „Ingenieurvermessung 07“, Wichmann Verlag (2007): 271 – 279.
- [3] Habel, W., Dantan, N., Hofmann, D., Krebber, K., Schallert, M., Ausgewählte Anwendungsbeispiele faseroptischer Sensoren im Ingenieurbau und in der Geotechnik, In Brunner F.K. (Hg.) „Ingenieurvermessung 07“, Wichmann Verlag (2007): 281 – 294.
- [4] López-Higuera, J.M. (Ed.), Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, John Wiley & Sons, Ltd (2002).
- [5] Measures, R.M., Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, Academic Press (2001).
- [6] Thyagarajan K., Ghatak, A., Fiber Optic Essentials, John Wiley & Sons, Ltd (2007).
- [7] Woschitz, H., Entwicklung eines Rail Strain Pads unter Verwendung von Faser-Bragg Gitter Sensoren, In Wunderlich T. (Hg.) „Ingenieurvermessung 10“, Wichmann Verlag (2010): in Vorbereitung.
- [8] Glišić, B., Inaudi, D., Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, Ltd (2007).
- [9] Lienhart, W., Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Series "Engineering Geodesy – TU Graz", Shaker Verlag Deutschland (2007).
- [10] Lienhart, W., Brunner, F.K., Integrierte Auswertung von inhomogenen Überwachungsdaten am Beispiel einer monolithischen Brücke, In Brunner F.K. (Hg.) „Ingenieurvermessung 07“, Wichmann Verlag (2007): 295 – 309.
- [11] Brunner, F.K., Woschitz, H., Langarmige eingebettete Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhanges, 24. Christian Veder Kolloquium „Stabilisierung von Rutschhängen, Böschungen und Einschnitten“, Mitt. Gruppe Geotechnik, TU Graz, 35 (2009): 263-278.
- [12] Heunecke, O., Niemeier, W., Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen: Konzepte, Herausforderungen, Trends, In Ingensand H. (Hg.) „Ingenieurvermessung 04“, Verlag ETH Zürich (2004): 131 – 142.
- [13] Kuhn, S. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp Verlag (1976).

Anschrift des Autors

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

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Fritz K. Brunner

- 1943 Wien
- 1972 Promotion zum Dr.techn. an der TH Wien
- 1969-74 Hochschulassistent an der TH Wien
- 1974-82 Lecturer an der School of Surveying, University of New South Wales
- 1981 AvHumboldt-Stipendiat an der Universität Stuttgart
- 1982-86 Gruppenleiter bei Wild Heerbrugg AG, Schweiz
- 1986 Berufung als Professor und Direktor an die School of Surveying, University of New South Wales
- 1990 Verleihung der Friedrich Hopfner Medaille der Österreichischen Geodätischen Kommission
- 1992 DFG Gastprofessor an der UBW München
- 1994 Verleihung des AvHumboldt Forschungspreises
- 1994 Berufung als Professor für Ingenieurgeodäsie an die Technische Universität Graz
- 1995 Korrespondierendes Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission
- 1995-99 Präsident der Sektion 1 "Positioning" der IAG
- 2001-07 Präsident der Österreichischen Geodätischen Kommission 