



## Faseroptische Erweiterung des geodätischen Messlabors der TU Graz

Helmut Woschitz, Graz

### Kurzfassung

Das geodätische Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz wurde 1990 eröffnet und seitdem stetig erweitert. Die wichtigsten Einrichtungen (Vertikalkomparator, Horizontalkomparator und Kreiselmesskammer) werden für Forschungsaufgaben und Serviceleistungen für die Wirtschaft verwendet.

Seit einigen Jahren bilden faseroptische Messsysteme einen neuen Schwerpunkt des Instituts, wobei der Fokus vor allem auf Dehnungs- und Temperaturmessungen liegt. Die Möglichkeit der Einbettung der Sensoren, und damit Informationen aus dem Inneren von Objekten zu erhalten, ist für die Ingenieurgeodäsie besonders interessant, da sie das klassische geodätische Messspektrum erweitern. Mittlerweile existieren verschiedenste kommerzielle faseroptische Systeme, die statische oder dynamische Messungen erlauben. Die Länge der Sensoren kann bis zu mehrere Meter betragen. Die Erfassung ihrer Längenänderungen ist mit Auflösungen im mm-Bereich sowie Abtastraten im kHz-Bereich möglich. Internationale Normen für faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessungen werden zurzeit aber erst erstellt, weshalb es anhand der gegebenen Informationen oft schwierig ist, die Leistungsfähigkeit der Systeme zu beurteilen.

Ein eigenes faseroptisches Labor befindet sich am IGMS im Aufbau, um detaillierte Untersuchungen, aber auch Sensoranfertigungen für Sonderanwendungen, durchführen zu können. Eine Testeinrichtung für faseroptische Sensoren wurde entwickelt, die die Bestimmung der statischen Kennlinie faseroptischer Messsysteme erlaubt. Eine weitere Einrichtung dient zur Untersuchung des Temperaturverhaltens der Systeme. Die neuen Testeinrichtungen werden vorgestellt und damit erzielte Ergebnisse exemplarisch gezeigt. Diese Laboruntersuchungen sind essentiell für die Qualitätsbeurteilung der Daten zu, da es im Feld kaum Möglichkeiten für eine unabhängige Verifikation gibt.

**Schlüsselwörter:** Faseroptische Dehnungsmessung, Testeinrichtungen, Hystereseeffekte, SOFO Sensoren, FBG Sensoren, geodätisches Messlabor

### Abstract

The geodetic metrology laboratory of the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems (EGMS) at the Graz University of Technology was established in 1990 and since then several calibration and testing facilities were set up.

Fiber optic sensing is one of the new research topics of EGMS. For engineering surveying, fiber optic strain and temperature sensing are of special interest. The sensors may be embedded in the structures and thus a new type of information is available, completing geodetic measurements. Today, a variety of fiber optic systems and sensors is commercially available, both for static and dynamic applications. The length of the sensors may be up to several metres with typical measurement resolutions in the  $\mu\text{m}$ -range and sampling rates up to several kHz.

However, there are no commonly used international standards for fiber optic sensing and thus it is difficult to evaluate system performance and state the uncertainty of measurement results. Therefore we established a separate fiber optic laboratory which is used for the investigation of fiber optic sensors and systems. A testing facility for the investigation of linearity was developed as well as a facility for studying temperature effects. These new facilities are described in the paper and some results are shown, demonstrating the importance of independent laboratory testing.

**Keywords:** fiber-optic strain measurements, laboratory testing facilities, hysteresis of SOFO sensors, FBG sensors, geodetic metrology laboratory

### 1. Einleitung

In der Ingenieurgeodäsie werden Deformationsmessungen seit etwa 100 Jahren durchgeführt. Daher hat das ingenieurgeodätische Monitoring einen hohen Reifegrad erreicht und liefert großräumige Informationen mit Millimeter-Genauigkeiten. Die Messungen liegen aber zumeist nur niederfrequent vor und können auch nur an der

Oberfläche der Objekte (z.B. Bauwerke, geotechnische Strukturen) durchgeführt werden.

Für mehrere Fachgruppen sind aber auch Informationen aus dem Inneren der Objekte wichtig, weshalb sich in den letzten Jahren mit dem „Structural Health Monitoring“ (SHM) ein neues Fachgebiet etabliert hat. Neben Langzeitbeobachtungen sind vor allem auch dynamische Messungen wichtig, um z.B. die vorhandenen

FEM Modelle der Bauwerke verifizieren zu können bzw. diese zu kalibrieren (Anpassung der oft unzureichend bekannten Materialparameter). Ohne Messungen sind treffsichere Aussagen über das Verhalten der Bauwerke und deren Integrität nicht möglich. Verwendet werden hierzu verschiedenste Sensortypen, die auch in die Bauwerke integriert werden.

Aber auch die Leistungsfähigkeit moderner Totalstationen und GNSS-Systeme wurden von diesen Gruppen erkannt und mittlerweile werden diese geodätischen „Sensoren“ auch von mehreren fachfremden Gruppen eingesetzt – und damit oft erstaunliche Ergebnisse erzielt.

Im Gegenzug dazu können auch die Tätigkeitsfelder der Ingenieurgeodäsie durch Hinzunahme direkter Dehnungs- und Temperaturmessungen erweitert werden, womit sich auch für unsere Berufsgruppe neue Aufgabengebiete erschließen lassen. Faseroptische Sensoren scheinen dafür besonders attraktiv, da sie sich leicht in Objekte integrieren lassen und damit die gewünschten Informationen aus dem Inneren liefern. Weitere Vorteile sind die möglichen großen Sensorlängen, hohen Messpräzisionen, Abstraten von mehreren 100 Hz oder darüber, die simultane Messung von vielen Sensoren auf einer Faser, die damit verbundene einfache Installation (nur ein Anschlusskabel für viele Sensoren), die optischen Messprinzipien (keine Spannungsversorgung der individuellen Sensoren, Messung in explosionsgefährdeten Bereichen) und die elektromagnetische Unempfindlichkeit der Signale (große Anschlusslängen, keine Signalstörungen).

Deshalb hat sich die faseroptische Sensorik in anderen Fachgruppen schon stark etabliert. In Österreich wird sie aber noch kaum eingesetzt. In der letzten Zeit ist aber auch im geodätischen Umfeld verstärktes Interesse feststellbar und einige wenige Kollegen aus der Praxis arbeiten schon aktiv mit faseroptischen Messsystemen.

Verglichen mit unseren gewohnten geodätischen Methoden ist die Präzision, die mit faseroptischen Dehnungssensoren erreicht werden kann, zumindest um den Faktor 10 besser, selbst wenn kalibrierte Totalstationen verwendet werden (siehe z.B. Woschitz, 2010a). Weiters werden durch die Einbettung der Sensoren in das Objekt präzise Informationen aus dem Inneren der Objekte zugänglich (Brunner und Woschitz, 2011). Die kombinierte Auswertung von geodätischen und objektintegralen Messungen erfordert neue Analysemethoden (siehe z.B. Li-

enhardt, 2007) und auch diese bieten neue Möglichkeiten.

Mittlerweile gibt es am Markt verschiedene kommerzielle faseroptische Systeme für Dehnungs- ( $\epsilon$ ) und Temperaturmessungen ( $t^\circ$ ) mit typischen Auflösungen von  $\Delta\epsilon \approx 1 \mu\epsilon$  (i.e.  $1 \mu\text{m/m}$ ) und  $\Delta t^\circ \approx 0.1 \text{ K}$ . Herausfordernd ist aber, dass es aufgrund der hohen Präzision der faseroptischen Systeme kaum möglich ist, im Feld unabhängige in-situ Messungen zur durchgreifenden Kontrolle der Resultate durchzuführen, insbesondere dann nicht, wenn die Sensoren in das Objekt integriert sind. Es bleibt oft nur die Möglichkeit, sich auf die Herstellerangaben und die versprochene Leistungsfähigkeit zu verlassen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es derzeit noch kaum internationale Normen für die faseroptische Sensorik gibt und daher die Datenblätter verschiedener Hersteller oft unterschiedlichen Informationsgehalt aufweisen. Erschwerend ist zudem, dass manche Begriffe von den Herstellern zwar verwendet, aber durchaus unterschiedlich interpretiert werden. Es ist daher für den Anwender schwierig, die gewünschte Information zu extrahieren. Einen ersten Schritt bildet die deutsche VDI/VDE 2660 Richtlinie für Faser-Bragg-Gitter Sensoren (VDI, 2010), nach der bereits erste Geräte spezifiziert werden. Zurzeit sind Bestrebungen im Gange, auch neue internationale Normen für die verschiedenen Techniken der faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessung zu erstellen (siehe Habel, 2012).

Bis diese Normen aber erstellt und in der Praxis etabliert sind, kommt den unabhängigen Untersuchungen der Instrumente, wie z.B. den Prototypenuntersuchungen in einem Messlabor, eine zentrale Rolle bei der Beurteilung der Qualität zu. In den letzten Jahren haben wir daher im IGMS Messlabor mehrere Test- und Prüfeinrichtungen aufgebaut. Die Anforderungen an diese werden in dieser Arbeit diskutiert und deren Aufbau vorgestellt. Die mit diesen Anlagen erzielten Ergebnisse belegen eindeutig den Bedarf an solchen Einrichtungen und unabhängigen Geräteüberprüfungen.

## 2. Faseroptische Messsysteme für Dehnungs- und Temperaturmessung

### 2.1 Überblick

Die Entwicklung von Faseroptischen Sensoren (FOS) und den zugehörigen Messsystemen ist eng mit der rasanten Entwicklung in der Telekommunikationsindustrie (Glasfasernetzwerke) der letzten Jahrzehnte verbunden. Mittlerweile

gibt es zahlreiche sehr weit entwickelte Messsysteme, die kommerziell erhältlich sind und in manchen Anwendungsbereichen wegen ihrer Vorteile gegenüber klassischen Sensoren (siehe Abschnitt 1) nicht mehr wegzudenken sind.

Das Kernelement aller Sensoren bildet die Glasfaser, deren prinzipieller Aufbau in Abbildung 1 dargestellt ist. Sie besteht aus dem lichtführenden Kern und dem diesen umgebenden Mantel, wobei sich der Brechungsindex dieser beiden aus Glas bestehenden Elemente geringfügig unterscheidet. Daher tritt an der Grenzfläche unter bestimmten Bedingungen Totalreflexion auf, was zur Lichtführung im Kern verwendet wird.

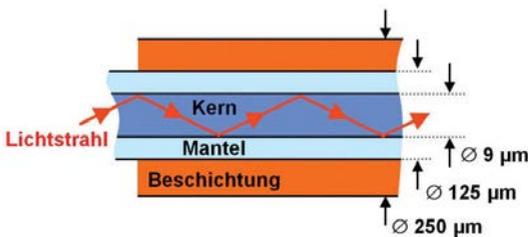


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau einer Stufen-Index-Faser

Um die Glasfaser bei mechanischer Beanspruchung gegen Bruch zu schützen, wird der Mantel noch von einer dünnen Beschichtung umgeben. Verschiedene Kunststoffe, aber auch andere Materialien (z.B. organisch modifizierte Keramiken) finden dabei Verwendung. Die Eigenschaften der Beschichtung (z.B. Temperaturbeständigkeit, Dehnungsübertragung auf die Glasfaser) sind für die Sensorik von großer Bedeutung.

Für die Sensorik können nun unterschiedliche physikalische Prinzipien verwendet werden, die hier nicht näher erläutert werden (siehe z.B. Udd und Spillman, 2011 oder Yu und Yin, 2002). Prinzipiell unterscheidet man aber zwischen a) Einzelpunktsensoren (Abbildung 2a), wo nur ein Sensor pro Anschlussfaser möglich ist, b) quasi-verteilten Sensoren (Abbildung 2b), bei denen auf jeder Anschlussfaser mehrere (z.B. 125 bei einigen Standardsystemen) Sensoren – auch unterschiedlichen Typs (z.B. Dehnungs-, Temperatur-, Neigungs- oder Beschleunigungssensoren) – möglich und gleichzeitig erfassbar sind, und den c) verteilten Sensoren. Bei den letztgenannten wird die Faser selbst als Sensorelement verwendet (Abbildung 2c), womit Dehnungs- oder Temperaturmessungen mit einer Ortsauflösung von einem Meter bis zu einer Entfernung von etwa 30 km zur Auswerteeinheit (RU, reading unit) erfassbar sind. Dies entspricht

einem System mit 30 000 Einzelsensoren. Allerdings sind bei den verteilten Systemen wegen der geringen Rückstreuereffekte, die zur Messung genutzt werden, und den dadurch bedingten längeren Integrationszeiten (z.B. 1 – 30 min) zurzeit nur statische Messungen möglich. Hingegen können bei den Einzelpunkt- und den quasi-verteilten Systemen auch dynamische Messungen (einige 100 Hz bis mehrere kHz) durchgeführt werden und die mögliche Anzahl an messbaren Sensoren kann auch bei diesen Systemen mit zusätzlichen Messkanälen beträchtlich gesteigert werden.

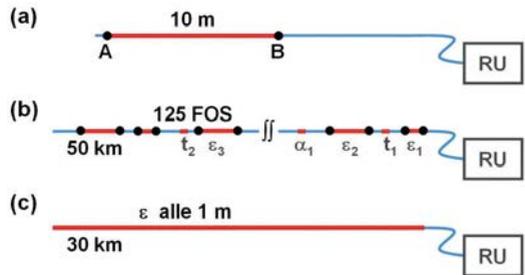


Abb. 2: Typen von faseroptischen Sensoren: (a) Einzelpunktsensoren, (b) quasi-verteilte Sensoren und (c) verteilte Sensoren

## 2.2 Dehnungssensoren für die Bauwerksüberwachung

Für repräsentative Dehnungsmessungen ist es wichtig, dass die Glasfaser fest mit dem Objekt verbunden ist. Zusätzlich sollte die Glasfaser noch gegen mechanische Beanspruchung (Faserbruch) und gegen Wasser (erhöhte Dämpfung) geschützt sein. Daher ist – obwohl es mittlerweile eine beachtliche Zahl von Herstellern von FOS gibt – der prinzipielle Aufbau der Dehnungssensoren zumeist doch sehr ähnlich. Die Glasfaser wird zwischen den beiden Ankerpunkten A und B eingespannt, und zwischen diesen beiden Punkten wird ein integraler Dehnungswert erfasst.

In Abbildung 3a bildet ein in die Faser integriertes Faser-Bragg-Gitter (FBG, dargestellt als  $—//—$ ) das Sensorelement. Da Glas ein dispersives Medium ist, ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtwelle im Glas mit der Temperatur (Brechungsindexänderung von  $\Delta n \approx 10 \text{ ppm/K}$  bei  $\lambda \approx 1500 \text{ nm}$ ), weshalb die erfassten Messwerte um die Temperatur zu korrigieren sind. Im Falle des FBG-Sensors erfolgt dies im Post-Processing anhand der Werte eines separaten FBG- $t^\circ$ -Sensors, der außerhalb der Messstrecke lose und damit vom Objekt ent-

koppelt angebracht ist, sodass er auf Dehnungsänderungen nicht reagieren kann. Beim SOFO Sensor (Abbildung 3b) wird die Temperaturkorrektur schon während der Messung mithilfe einer zweiten Glasfaser durchgeführt, wobei diese Referenzfaser wiederum lose und damit insensitive gegenüber Dehnungen ist.

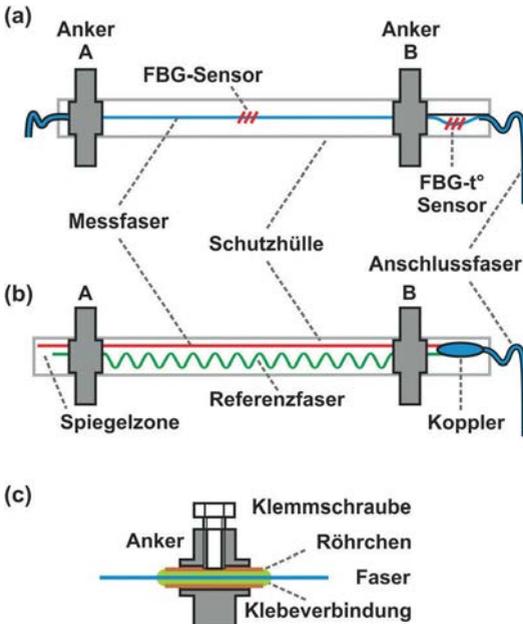


Abb. 3: Schema eines (a) FBG Sensors und eines (b) SOFO Sensors zur Dehnungsmessung sowie (c) eine mögliche Verbindungsvariante zwischen Faser und Anker

Die Messfaser wird in der Regel vorgespannt eingebaut, um auch negative Dehnungen erfassen zu können. Daher ist zur Verbindung der Faser mit dem Anker-element – vor allem aus Produktionsgründen – die Verwendung einer Zwischenhülle sinnvoll (Abbildung 3c). In dieser kann in einem ersten Verarbeitungsschritt die Klebeverbindung zur Faser ordentlich aushärten, bevor die Faser vorgespannt wird. Damit werden z.B. Hystereseeffekte reduziert.

Bei Sensoren für verteilte Systeme entfallen in der Regel die Ankerpunkte. Die Faser ist daher direkt mit der Schutzhülle verbunden und deren Übertragungsverhalten bestimmt im Wesentlichen die Sensoreigenschaften. Für die Temperaturkorrektur wird wieder eine lose Faser parallel geführt.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch zwei kommerzielle 0.25 m lange Dehnungssensoren und

zwar einen quasi-verteilten FBG Sensor (Sylex, Typ SC-03), Abbildung 4a, und einen Einzelpunktsensor vom Typ SOFO (Smartec, Roctest), Abbildung 4b. Die Anker sind in Abbildung 4c ( $\varnothing$  20 mm) und Abbildung 4d ( $\varnothing$  15 mm) vergrößert dargestellt, was den äußerlich doch unterschiedlichen Aufbau zeigt. In Abbildung 4d sind auf der linken Seite die beiden Fasern des SOFO Sensors durch die transparente Schutzhülle hindurch sichtbar.

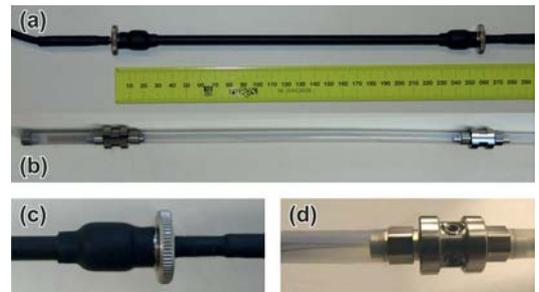


Abb. 4: Foto eines (a) FBG und (b) eines SOFO Sensors mit den entsprechenden Vergrößerungen der Anker (c) und (d)

Die möglichen Sensorlängen variieren herstellerbedingt und können zwischen einigen Zentimetern bis etwa 10 m liegen. Für FBG-Sensoren wird als zuverlässiger Dehnungsbereich oft  $\pm 5\,000\ \mu\epsilon$  ( $\pm 0.5\%$ ) angegeben. Dies deckt sich mit Werten in der Literatur, wo für Langzeitbeobachtungen (20 Jahre Messzeit, 0.1 % Ausfallwahrscheinlichkeit) angegeben wird, dass die größte auftretende Dehnung maximal etwa 1.4 % betragen sollte (Kashyap, 2010, S.432).

### 2.3 Am IGMS vorhandene faseroptische Messsysteme

Für Überwachungsaufgaben sind insbesondere Systeme mit einer hohen Langzeitstabilität interessant. Aber auch die dynamische Erfassung von Bauwerksdeformationen hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zur Erfüllung dieser Messaufgaben sind am IGMS die in Tabelle 1 angeführten faseroptischen Auswerteeinheiten verfügbar.

Die SOFO-Static RU wurde von der Fa. Smartec für Langzeitbeobachtungen entwickelt und bietet insbesondere bei Verwendung sehr langer Sensoren Vorteile, da ihre hohe Präzision unabhängig von der Sensorlänge ist. Für dynamische Messungen ist aber ein separates Instrument (SOFO-Dynamic RU) notwendig, das mit denselben Sensoren betrieben werden kann. Wesentlicher Vorteil der SOFO Systeme ist die durch das

	SOFO-Static	SOFO-Dynamic	MuST si425
			
Messgröße	Längenänderung	Längenänderung	Dehnung / Temperatur
Anwendung	statisch	dynamisch	statisch und dynamisch
Bezug der Messung	absolut	relativ	absolut
Messfrequenz	0.1 Hz	1000 Hz	250 Hz
Messbereich Gerät	50 mm	± 5 mm	50 nm <sup>1)</sup>
Präzision	2 µm	< 0.01 µm	1 pm <sup>2)</sup>
Drift	keine	0.003 µm/s (< 0.5 µm/d)	keine
Temperaturkorrektur	sensorintegraler Bestandteil	sensorintegraler Bestandteil	Post-Processing
Sensoranzahl pro Kanal	1	1	1 – 32 <sup>3)</sup>
Kanalanzahl	20 pro Multiplexer	2, 4 oder 8	4 (16 mit Multiplexer)
Sensorenängen	0.25 – 10 m	0.25 – 10 m	0.005 – ca. 2 m <sup>4)</sup>
typ. Dehnungsbereich der Sensoren	-0.5 % + 1.0 %	-0.5 % + 1.0 %	-0.5 % + 0.5 %
Linearität Sensor	0.2 %	0.2 %	<sup>4)</sup>
Messprinzip	Niederkohärenzinterferometrie	Interferometrie	FBG, time-of-flight

<sup>1)</sup> optische Wellenlänge – entspricht bei Verwendung von nur einem Sensor etwa 42 000 µε für die Dehnungsmessung oder einem messbaren Temperaturbereich von weit über 1000°C

<sup>2)</sup> entspricht 0.8 µε für die Dehnungsmessung bzw. 0.1 K für die Temperaturmessung

<sup>3)</sup> abhängig von den auftretenden Dehnungen, siehe Text

<sup>4)</sup> variiert bei den Angaben der verschiedenen Sensorhersteller, wird aber oft nicht angegeben

**Tab. 1:** Wesentliche Spezifikationen der am Institut vorhandenen FOS-Systeme (Herstellerangaben)

Messprinzip im Sensor realisierte Temperaturkorrektur. Allerdings können beide Systeme nur mit Einzelpunktsensoren arbeiten, weshalb die Sensoranzahl auf die Kanalanzahl des Gerätes beschränkt ist (SOFO-Dynamic) oder aber längere Messzeiten in Kauf genommen werden müssen (z.B. 10 min beim SOFO-Static mit drei Multiplexern). Sollen mit vielen Sensoren gleichzeitig Dehnungen erfasst werden, so ist ein quasi-verteiltes System wie es die MuST si425 darstellt, von Vorteil. Aktuell am Markt erhältliche Systeme erlauben bis zu 512 FBG Sensoren pro Kanal. Die Anzahl der damit messbaren Sensoren kann aber durchaus geringer sein, wenn bei den einzelnen Sensoren große und stark unterschiedli-

che Dehnungen auftreten. Grund hierfür ist, dass sich die Spektren der einzelnen Sensoren nicht überlagern dürfen, um die Signale eindeutig den einzelnen Sensoren zuordnen zu können. Bei Sonderanwendungen mit Dehnungen im mehrere 10 000 µε Bereich kann es sogar vorkommen, dass nur ein einziger Sensor pro Kanal sinnvoll erfassbar ist. Für eine optimale Verteilung der Sensoren sind daher gewisse Vorinformationen über den Dehnungsverlauf notwendig.

Das Funktionsprinzip der drei Systeme wurde bereits in Brunner (2009) sowie Woschitz und Brunner (2011) zusammengefasst, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

### 3. Beispiel aus der Praxis

Für die Untersuchung des Deformationsverhaltens von elastischen Eisenbahnzwischenlagen ( $150 \times 160 \times 7 \text{ mm}^3$ ) wurde eine auf faseroptische Sensoren basierende Messzwischenlage (RASP, Rail Strain Pad) entwickelt, wobei während des Herstellerprozesses 9 FBG Sensoren in die Materialmatrix integriert wurden. Der Aufbau eines RASP ist schematisch in Abbildung 5 gezeigt.

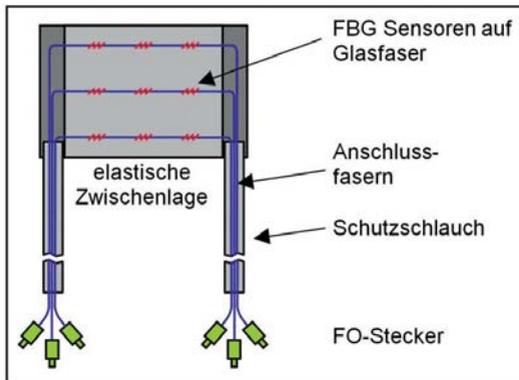


Abb. 5: Schematischer Aufbau eines RASP

Die Entwicklung wurde ausführlich in Woschitz (2010b) beschrieben. Hier soll aber dennoch kurz erwähnt werden, dass es mit keiner anderen bekannten Technologie möglich ist, mit mehreren Sensoren gleichzeitig genaue Messungen aus dem Inneren dieses sehr kleinen Objektes durchzuführen, ohne dieses dadurch zu stören.

Mit mehreren Messzwischenlagen wurden intensive Untersuchungen auf einem Kraftprüfstand durchgeführt. Dabei wurden auch Zugüberfahrten simuliert, wie sie für einen späteren Feldeinsatz erwartet wurden. Abbildung 6 zeigt das am Kraftprüfstand erfasste Signal eines Personenzuges (Taurus, 4 Personenwagen,  $v = 58 \text{ km/h}$ ) im Vergleich mit dem auf einer Teststrecke bei realem Zugverkehr gemessenen Signal. Dabei wurde dasselbe RASP verwendet und gezeigt wird das Signal desselben FBG Sensors. Für diesen Vergleich wurde das RASP mit den größten im Feld aufgetretenen Dehnungen ausgewählt, da hier die Problematik besonders gut zu erkennen ist. Dargestellt werden – wie später argumentiert wird – die rohen optischen Signale (optische Wellenlängen des durch den FBG Sensor zurückreflektierten Lichts).

Im Vergleich zwischen den beiden Messsignalen ist zunächst auffallend, dass das Grundniveau um ca.  $\Delta\lambda_B \approx 19 \text{ nm}$  versetzt ist, was einer Dehnung der Zwischenlage im Bereich des Sensors von etwa  $16000 \mu\epsilon$  entspricht. Weiters

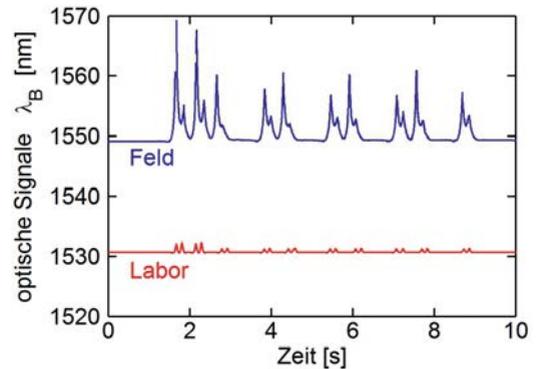


Abb. 6: Signal eines Personenzuges, erfasst mit demselben RASP am Kraftprüfstand (rot) und im Feld auf einer Teststrecke (blau)

fallen sofort die großen Signalamplituden im Feld auf, die mit  $21 \text{ nm}$  ( $17500 \mu\epsilon$ ) etwa 13 mal größer sind als jene, die am Prüfstand bei Simulation desselben Zugs aufgetreten sind. Ursachen dafür könnten die Verschiebung der Zwischenlage im Feld und eine dadurch verursachte atypische starke Deformation des RASPs sowie die ungleichförmige, wesentlich stärkere Kompression des RASPs bei der Überfahrt sein. Der extrem enge Radius der Teststrecke sowie eine mögliche Hohllage der Schwelle sind mögliche Ursachen dafür.

Die im Feld im Bereich des Sensors aufgetretene Gesamtverformung beträgt etwa  $31000 \mu\epsilon$ , wenn man die Standarddehnungsempfindlichkeit der Glasfaser ( $\Delta\lambda_B/\Delta\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ) zur Berechnung verwendet. Solch große Verformungen treten in der faseroptischen Sensorik üblicherweise nicht auf, weshalb für derart große Verformungen auch keine Erfahrungswerte vorliegen. Es ist daher unklar, ob die Standardwerte zur Berechnung der Dehnung in diesem Deformationsbereich überhaupt anwendbar sind. Es ist hier auch festzuhalten, dass die aufgetretene Dehnung etwa die Hälfte der Bruchdehnung einer Glasfaser beträgt und die Faser bei der Liegedauer im Feld eigentlich schon hätte gebrochen sein müssen. Daher wurde die Messzwischenlage ausgebaut und erneut am Prüfstand getestet, wobei deren einwandfreie Funktion festgestellt wurde.

Eine Evaluierung solch unerwarteter Signale im Feld ist aber praktisch nicht möglich, weshalb Laboruntersuchungen dieser Systeme eine wesentliche Rolle in der Qualitätssicherung zukommt. Die Notwendigkeit von Test- und Prüfeinrichtungen ist anhand dieses Beispiels leicht nachvollziehbar.

#### 4. Faseroptisches Labor

Für Forschungsarbeiten ist neben den kommerziellen faseroptischen Messgeräten auch eine Auswahl an optischem und faseroptischem Zubehör notwendig. Deshalb wurde am IGMS in den letzten Jahren ein eigenes faseroptisches Labor eingerichtet. Im Rahmen von Sonderanwendungen können damit eigene Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden, aber auch einzelne Messsysteme lassen sich nachbauen, damit beobachtete Effekte besser studiert werden können. Aus den damit gewonnenen Erfahrungen resultieren schlussendlich Empfehlungen für die Anwender in der Praxis. Das faseroptische Labor wird auch im Bereich der Lehre bei den Studierenden eingesetzt, die dort die für den praktischen Einsatz notwendigen Erfahrungen lernen.

Ein Kerngerät des faseroptischen Labors ist ein Spektrum-Analysator. Mit diesem Instrument können die Spektren optischer Signale detailliert analysiert werden, und zwar in einem zumeist größeren Wellenlängenbereich im Vergleich zu jenem der Messgeräte. Für die Messwerteerfassung selbst ist dieses Gerät jedoch ungeeignet, da es dafür zu langsam und zu teuer ist. Die damit durchführbare unabhängige Evaluierung der kommerziellen Messgeräte macht es dennoch zu einem wertvollen Gerät.

Exemplarisch soll hier das Signal des zuvor in Abschnitt 3 auffälligen FBG Sensors eines RASPs gezeigt werden. Abbildung 7a zeigt das Spektrum des FBGs bei unbelastetem RASP. Dieses ist typisch für einen Standard FBG Sensor und weist in diesem Fall eine Bandbreite (FWHM) von 0.16 nm auf. Die rote Linie markiert jene Wellenlänge, die mit der MuST si425 erfasst wurde. Diese sollte – sofern zwischen den Wellenlängen beider Geräte kein Offset besteht – im Maximum der Spektralkurve liegen.

Abbildung 7b zeigt das Spektrum desselben FBG-Sensors, wobei hier das RASP in der Teststrecke eingebaut ist. Das Spektrum ist nun wesentlich breiter und weist mehrere markante lokale Maxima auf. Die Ursache hierfür liegt in der direkten Einbettung der Glasfaser in der Materialmatrix und den damit fehlenden, wohldefinierten, Ankerpunkten. Aus weiteren Untersuchungen ist bekannt, dass das Dehnungsverhalten innerhalb der Messzwischenlagen stark nichtlinear ist. Dadurch treten im Bereich des FBG-Sensors unterschiedlich starke Dehnungen auf, wodurch es, vereinfacht betrachtet, zur Ausbildung mehrerer kurzer FBG-Sensoren mit ähnlicher Wellenlänge kommt. Die Überlagerung der einzelnen

Spektren ist in Abbildung 7b zu sehen. Solange aber bei den Messungen immer derselbe Peak detektiert wird, kann das Dehnungsverhalten der Zwischenlage dennoch präzise erfasst werden.

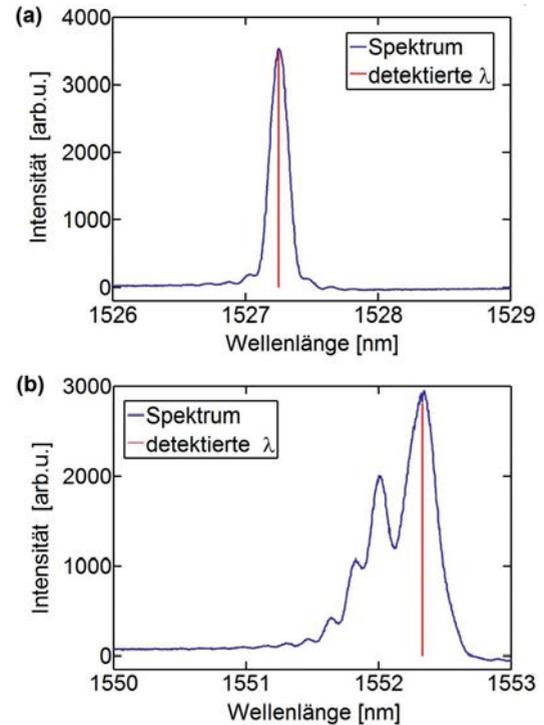


Abb. 7: Spektren eines in ein RASP integrierten FBG Sensors im (a) unbelasteten Zustand und (b) im belasteten Zustand, eingebaut in der Teststrecke

An dieser Stelle muss klar festgehalten werden, dass alternative Einbaumethoden wegen der kleinen Dimension der Zwischenlage und den Eigenschaften des Materials nicht möglich waren und alternative Messtechnologien in diesem Anwendungsfall nicht eingesetzt werden können. Es ist jedoch wesentlich, die möglichen Einflussfaktoren einer Messung zu kennen und damit die für die Analyse und Qualitätsbeurteilung notwendigen Informationen bereitzustellen. Mit dem neuen faseroptischen Labor ist dies möglich und es wird auch bei weiteren Anwendungen und Forschungsarbeiten die notwendigen Grundlagen liefern.

#### 5. Testeinrichtungen im IGMS Messlabor

##### 5.1 Geodätisches Messlabor

Das  $33 \times 6.5 \text{ m}^2$  große Messlabor des IGMS ist voll klimatisiert und weist eine konstante Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  auf (Temperaturstabilität:  $\pm 0.5\text{K}$ ). Eine

der Haupteinrichtungen ist der Horizontalkomparator zur Kalibrierung von EDM-Geräten, dessen wesentlichste mechanische Komponente ein 30 m langer Betonbalken mit einem Querschnitt von  $0,4 \times 0,6 \text{ m}^2$  ist. Dieser liegt zwangsfrei auf teflonbeschichteten Neoprengleitlagern auf der vom Gebäude getrennten Fundamentplatte des Labors auf (Reithofer und Schlauf, 1992) und wurde 1989 im Zuge der Errichtung des Messlabors betoniert.

Die Lage der Komparatorbank ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt, da sie bei den nachfolgend beschriebenen Testeinrichtungen eine zentrale Rolle spielt.

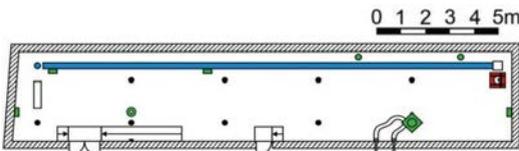


Abb. 8: Lage der 30 m langen Komparatorbank (blau) im Messlabor

## 5.2 Sensorbasis von 1 m Länge

### 5.2.1 Aufbau

Durch Temperaturänderungen werden typischerweise Driften in den Messwerten verursacht, die oftmals ein Vielfaches der Messpräzision betragen können und von einer Bewegung des Objektes kaum getrennt werden können. Um daher bei Feldeinsätzen vor dem Start der Messung sinnvolle Akklimatisationszeiten einhalten zu können, sind Informationen über das Temperaturverhalten der Instrumente notwendig. Datenblätter geben aber oft keine Auskunft. Daher ist es sinnvoll, das Aufheiz- und Akklimatisationsverhalten der Instrumente im Zuge von z.B. Prototypentests zu untersuchen. Diese dauern typischerweise einige Stunden bis einige Tage. Während dieser Zeit dürfen die an die Instrumente angeschlossenen Dehnungssensoren ihre Länge nicht ändern.

Für diese Untersuchungen wurden zwei jeweils 1 m lange Sensoren (ein SOFO und ein FBG Sensor) in der Mitte der Komparatorbank montiert, siehe Abbildung 9.

Für die Montage wurden speziell konstruierte Adapter auf einer dreipunktgelagerten Grundplatte aus Stahl verwendet, um mögliche Eigenbewegungen, die infolge geringer Temperaturschwankungen (kürzeste Regelzyklen der Klimaanlage ca. 10 min) auftreten können, so gering wie möglich zu halten. Daher wurde

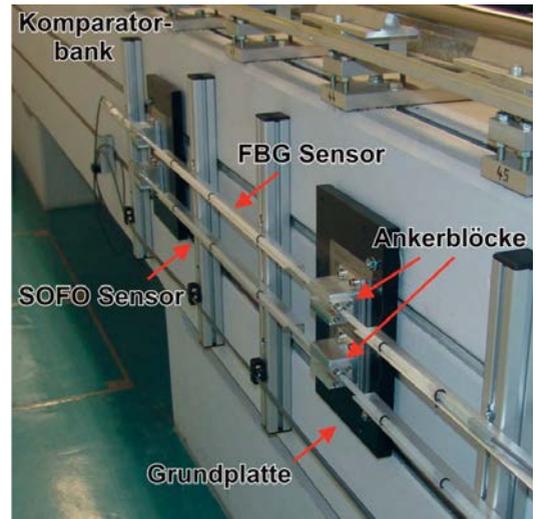


Abb. 9: Auf der Komparatorbank montierte 1 m-Sensorbasis

auch die Komparatorbank als Träger der Einrichtung gewählt, da diese wegen ihrer großen Masse eine hinreichend große Trägheit hat, und somit von Temperaturschwankungen weitgehend unbeeinflusst ist. Beide Sensoren wurden um 2 mm vorgespannt, um auch negative Dehnungen durch z.B. langfristiges Schrumpfen der Komparatorbank erfassen zu können. Um einen unkontrollierten Durchhang und damit verbundene Effekte zu vermeiden, liegen die Sensoren zwischen den beiden Ankerpunkten sowie im Bereich der Anschlussfasern flächig auf.

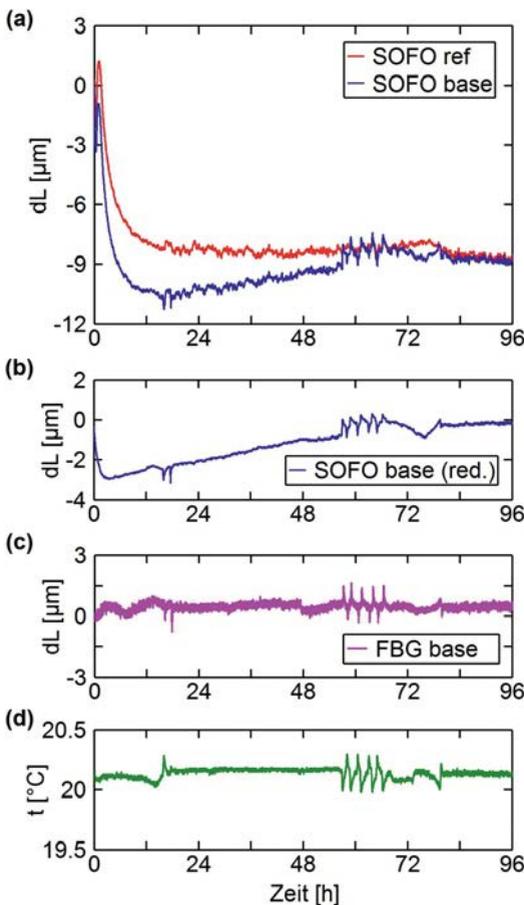
Konzipiert wurde die 1 m - Sensorbasis für die Untersuchung des SOFO-Static und der MuST si425, was infolge der Präzision dieser beiden Instrumente (siehe Tabelle 1) eine notwendige Stabilität von etwa  $0,5 \mu\text{m}$  für die Ankerpunkte bedeutet. Diese ist mit vertretbarem Aufwand realisierbar.

### 5.2.2 Beispiel: Aufheizeffekt

Die 1 m-Sensorbasis wurde zunächst aber für die Untersuchung des Aufheizeffektes der SOFO-Dynamic RU verwendet. Da die Präzision des Gerätes ( $< 0,01 \mu\text{m}$ ) aber wesentlich besser als die vermutete Stabilität der Sensorbasis ist, sollte es damit auch möglich sein, mögliche Eigenbewegungen des SOFO Sensors der Sensorbasis zu detektieren. Daher wurde mit vier Tagen eine wesentlich längere Versuchsdauer veranschlagt, als zur reinen Bestimmung der Aufheizzeit notwendig gewesen wäre. Der Hersteller gibt für dieses Instrument eine Drift von  $0,003 \mu\text{m/s}$  (nach einer einstündigen Aufwärm-

zeit) an bzw.  $0.5\ \mu\text{m}/\text{Tag}$  bei Verwendung eines Referenzsensors (siehe unten). Das im Labor hinreichend akklimatisiert Gerät wurde unmittelbar vor Messbeginn (eine Minute) eingeschaltet. Abbildung 10 zeigt die Daten (Längenänderungen  $dL$ ) des Referenzsensors und des Sensors der 1 m-Sensorbasis sowie die Labortemperatur.

Da es sich beim SOFO-Dynamic infolge des interferometrischen Messprinzips um ein relativ messendes Instrument handelt, beginnen die Zeitreihen in Abbildung 10a bei null. In den ersten 1.5 Stunden (Abbildung 10a) kommt es zu einer Art Einschwingvorgang mit Abweichungen von etwa  $3\ \mu\text{m}$  zwischen den beiden Sensoren. Danach, bis etwa zur Stunde 18, ähnelt sich



**Abb. 10:** Aufheizeffekte des SOFO-Dynamic, dargestellt anhand (a) der Messdaten des Referenzsensors (SOFO ref) und des SOFO Sensors der 1 m-Sensorbasis (SOFO base) sowie der (b) driftreduzierten Daten des SOFO Sensors; im Vergleich dazu die (c) Daten des FBG Sensors der 1 m-Sensorbasis sowie die (d) atypisch großen Temperaturschwankungen im Labor während des Versuchs

das Verhalten beider Sensoren sehr stark und es kommt bei beiden zu einer Verkürzung von etwa  $10\ \mu\text{m}$ . Danach bleiben die Werte des Referenzsensors annähernd stabil, die Werte der 1 m-Sensorbasis hingegen driften für zwei Tage mit  $+1\ \mu\text{m}/\text{d}$ , und danach mit etwa  $-0.4\ \mu\text{m}/\text{d}$ .

Beim Referenzsensor handelt es sich um einen Sensor ohne Anker, bei dem die beiden Fasern lose in der Schutzhülle liegen. Dieser ist daher insensitive auf Dehnungen und zeigt rein die (temperaturbedingten) Drifterscheinungen des SOFO-Dynamic. Die Grundidee ist es, damit die Daten der übrigen Sensoren zu reduzieren und damit deren Driften zu eliminieren. Da aber zusätzliche Driftanteile durch die ungleiche Temperaturverteilung in den Armen der zur Messung verwendeten Mach-Zehnder Interferometer verursacht werden, und ein solches für jeden Messkanal notwendig ist, können dadurch die Driften nicht vollständig eliminiert werden.

Abbildung 10b zeigt die driftreduzierten Daten des SOFO Sensors der 1 m-Sensorbasis (SOFO base - SOFO ref). Vor allem in den ersten 3 Stunden wirken sich die unterschiedlichen Driften aus, sodass in den reduzierten Daten eine Restlängenänderung von  $3\ \mu\text{m}$  verbleibt. Die für den Bereich danach festgestellten Driften von zunächst  $+1\ \mu\text{m}/\text{d}$  (von Stunde 3 bis 68) bzw.  $-2.7\ \mu\text{m}/\text{d}$  und  $+6.4\ \mu\text{m}/\text{d}$  (zwischen Stunde 69 und 79) verbleiben aber in den Daten, da in diesem Bereich der Referenzsensor kaum drifft. Ab Stunde 80 bleiben die Werte dann mit  $+0.2\ \mu\text{m}/\text{d}$  annähernd stabil. Simultan zu den Messungen mit dem SOFO-Dynamic wurde auch der FBG Sensor der 1 m-Sensorbasis mit der aufgewärmten MuSt si425 erfasst. In diesen Daten können aber keine vergleichbaren Driften festgestellt werden (siehe Abbildung 10c, dargestellt sind jeweils die Mittelwerte von 100 Einzelmessungen). Daher können die zuvor festgestellten Driften des SOFO-Dynamic eindeutig dem entsprechenden Kanal des SOFO-Dynamic zugeordnet werden.

Bei allen Messungen sind insbesondere die sprungartigen Abweichungen am dritten Tag, aber auch jene gegen Ende des ersten Tages, auffallend. Beim SOFO Sensor betragen sie etwa  $\pm 0.7\ \mu\text{m}$ , beim FBG Sensor sind sie mit  $\pm 1.0\ \mu\text{m}$  leicht größer. Diese sind eine Folge der mit  $\pm 0.15\text{K}$  im Versuchszeitraum atypisch großen Temperaturänderungen, Abbildung 10d.

Da sowohl beim SOFO als auch beim FBG Sensor in etwa dieselben Abweichungen auftreten, die Werte des SOFO-Referenzsensors hingegen annähernd stabil sind, sind diese

Bewegungen wahrscheinlich auf Instabilitäten der Sensorbasis zurückzuführen. Die Bewegungen sind mit den Temperaturen negativ korreliert, was auf eine thermische Bewegung der Anker auf der Grundplatte deutet. Montagebedingt sind die Ankerblöcke auf der Grundplatte leicht exzentrisch angebracht (30mm pro Ankerblock), was aber nur etwa 1/4 der festgestellten Bewegungen erklären kann. Auch die bekannte Resttemperaturabhängigkeit des SOFO Sensors ( $0.5 \text{ ppm/K}$  für  $\Delta L \approx 40 \text{ mm}$ , den Längenunterschied zwischen Mess- und Referenzfaser) ist zu klein, um die festgestellten Effekte verursachen zu können. Es ist daher davon auszugehen, dass die 1 m-Sensorbasis eine noch nicht bekannte thermische Abhängigkeit aufweist und daher ihre Stabilität derzeit nicht besser als etwa  $1 \mu\text{m}$  ist. Eine zusätzliche thermische Abschottung sollte vorerst Abhilfe schaffen und die Effekte zumindest reduzieren. Erschwerend bei der Untersuchung der Ursachen ist es jedenfalls, dass eine unabhängige Verifikation mit anderen Messmitteln in diesem Genauigkeitsbereich kaum durchführbar ist.

Zur näheren Untersuchung der Driften des SOFO-Dynamic wurden mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dabei zeigte es sich, dass die Aufheizeffekte in den ersten drei Stunden gut reproduzierbar sind. Hingegen weisen die Drifterscheinungen ein eher zufälliges Verhalten auf und unterscheiden sich sowohl im Betrag als auch im Vorzeichen. Als Ursache werden nicht reproduzierbare thermische Ausgleichsströmungen im Inneren des SOFO-Dynamic vermutet, die die Referenzarme der Mach-Zehnder Interferometer unterschiedlich stark beeinflussen und damit für die Driften verantwortlich sind.

Ein weiterer Erfahrungswert aus Feldmessungen soll an dieser Stelle ebenfalls erwähnt werden. Während einer 14 Tage dauernden Messkampagne mit variierenden Umgebungsbedingungen traten Driften von bis zu  $0.2 \text{ mm}$  auf, die auch in diesem Fall durch den Referenzsensor nicht vollständig eliminiert werden konnten. Es ist aber nicht möglich – ohne weitere Annahmen zu treffen – zu entscheiden, ob es sich bei den verbleibenden Längenänderungen um tatsächliche Bewegungen oder nur um Drifteffekte handelt. Auch dies zeigt, dass das SOFO-Dynamic für dynamische und daher eher kurze Untersuchungen konzipiert wurde. Bei längeren Messkampagnen, wo nicht nur kurzzeitig auftretende Phänomene untersucht werden sollen, empfiehlt es sich daher, in periodischen Abständen zusätzliche Messungen mit dem langzeitstabilen

SOFO-Static durchzuführen und die Driften auf diese Weise zu reduzieren.

Auch aus der in diesem Abschnitt geführten Diskussion ist klar zu erkennen, dass Laboruntersuchungen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse wesentlich für die Interpretation der Ergebnisse und die möglichen (sinnvollen) Einsatzbereiche der Instrumente sind.

### 5.3 Testeinrichtung zur Bestimmung statischer Kennlinien

#### 5.3.1 Aufbau

Für die Durchführung von Linearitätsuntersuchungen wurde eine weitere Anlage konzipiert. Herausfordernd dabei ist die hohe Präzision der faseroptischen Instrumente, die hohe Anforderungen an die Stabilität der Anlage und das Vergleichsmesssystem stellt. Daher wurde zunächst ein Prototyp der Anlage realisiert, um Erfahrungen in diesem Genauigkeitsbereich zu sammeln. Abbildung 11 stellt diese Anlage schematisch dar.

Die Prüfanlage wird auf den Schienen des Horizontalkomparators aufgebaut, wodurch bis zu  $30 \text{ m}$  lange Sensoren direkt (ohne Umlenkung der Sensoren) überprüft werden können. Diese

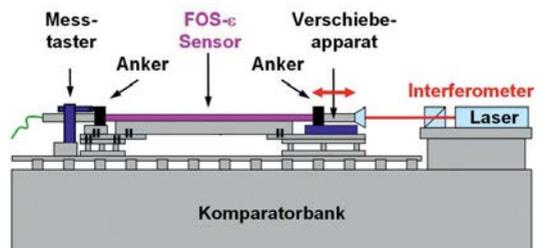


Abb. 11: Schematische Darstellung der Testeinrichtung zur Überprüfung der Linearität

Länge ist insbesondere für Untersuchungen der immer öfter eingesetzten verteilten faseroptischen Sensorensysteme interessant. Beim Prototyp wurde die Sensorlänge aus praktischen Gründen zunächst auf  $5 \text{ m}$  beschränkt. Bei der Montage wird ein Anker fix, der andere auf einem Verschiebeapparat und damit beweglich montiert. Die Bewegung wird simultan mit dem faseroptischen Messsystem und mit einem Laserinterferometer als Referenzsystem erfasst. Beim Aufbau wurde das Abbe'sche Komparatorprinzip streng eingehalten, um größere Cosinus-Fehler zu vermeiden. Die Stabilität des fix montierten Ankers wird während der Dehnung des Sensors mit zwei unabhängig gelagerten Messtastern ( $0.1 \mu\text{m}$  Auflösung) überprüft. Die Genauigkeit der gesamten Anlage beträgt ca.  $0.5 \mu\text{m}$ .

### 5.3.2 Beispiel: SOFO-Dynamic

Bei einer ersten Untersuchung des SOFO-Dynamic wurde ein 5 m langer SOFO Sensor zweimal in 0.5 mm bzw. 1 mm Schritten über den gesamten Messbereich (10 mm, Tabelle 1) gedehnt und wieder entlastet. Abb. 12 zeigt den Vergleich zwischen den mit dem SOFO-Dynamic (dL) und den mit dem Interferometers ( $\Delta L_{\text{SOLL}}$ ) bestimmten Verschiebungen.

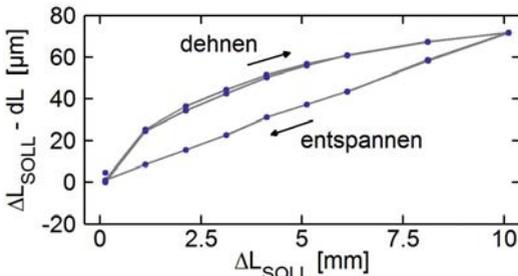


Abb. 12: Hystereseeffekte eines SOFO Sensors, gemessen mit der SOFO-Dynamic RU

Deutlich ist eine Hysterese (bis zu  $25\mu\text{m}$  zwischen Hin- und Rückweg) zu erkennen, die sehr gut reproduzierbar ist und dem Sensor zuzuschreiben ist. Sie liegt aber durchwegs im Bereich der vom Hersteller angegebenen Linearität (0.2%) des Sensors. Weiters ist ein Maßstab von etwa 0.7% zu erkennen. Dieser stammt im Wesentlichen vom SOFO-Dynamic, was aus Linearitätsuntersuchungen desselben Sensors mit dem SOFO-Static ableitbar ist. Für Sonderanwendungen, wo dynamisch große Verformungen erfasst werden sollen, wird der Maßstab jedenfalls zu berücksichtigen sein.

Die Ursache der Hystereseeffekte ist noch unklar und wird durch weitere Untersuchungen zu klären sein.

### 5.3.3 Beispiel: MuST si425

Eine ähnliche Untersuchung wurde mit der MuST si425 mit einem Sylex Sensor (Typ SC-03) durchgeführt. Der FBG basierte Sensor ist 0.5 m lang und hat standardmäßig einen Arbeitsbereich von  $\pm 5000\mu\epsilon$ . In der gewählten Ausführung wurde die Faser um  $2000\mu\epsilon$  vorgespannt, womit sich eine Verkürzung von 1 mm erfassen lässt, bevor die Faser lose durchhängt. In der Untersuchung wurde der Sensor dreimal in 0.5 mm Schritten gedehnt und wieder entspannt, siehe Abbildung 13.

Wie auch beim SOFO Sensor ist hier eine deutliche Hysterese (bis zu  $15\mu\text{m}$  zwischen Hin- und Rückweg) zu erkennen, jedoch mit gegenläufigem Umlaufsinn. Ebenso ist ein Maßstab

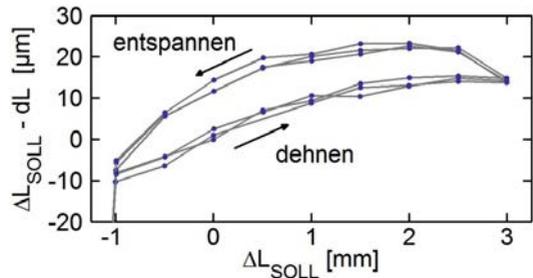


Abb. 13: Hystereseeffekte eines FBG Sensors, gemessen mit der MuST si425

zu erkennen, der wie zuvor 0.7% beträgt. Die Funktionsprinzipien der beiden faseroptischen Messsysteme sind allerdings fundamental unterschiedlich, und auch der Aufbau der Sensoren sowie der Typ der jeweils verwendeten Glasfaser und deren Beschichtung sind unterschiedlich. Daher werden weitere Untersuchungen mit einem größeren Stichprobenumfang zeigen, ob es sich dabei um einen Zufall handelt oder um einen bisher nicht bekannten systematischen Effekt.

### 5.4 Modifikation der Testeinrichtung

Die Ursache der in den beiden vorangegangenen Beispielen gezeigten Hystereseeffekte ist unklar. Sie könnte aber in einem visko-elastischen Verhalten der Schutzhülle des Sensors, der Verbindungsstelle zwischen Glasfaser und Anker oder dem Kriechen der Beschichtung der Glasfaser liegen.

Um die möglichen Effekte getrennt voneinander untersuchen zu können, sollten in die Testeinrichtung nicht nur vorkonfektionierte Sensoren, sondern auch blanke Fasern, die ja das eigentliche Sensorelement bilden, eingespannt werden können. Dies ist bei dem in Abschnitt 5.3 vorgestellten Prototypen der Test- und Prüfeinrichtung nicht ohne weiteres möglich. Zudem zeigten sich bei den Untersuchungen infolge des hohen Aufbaus auch geringe Bewegungen des „fixen“ Ankerpunktes, die in den vorangegangenen Abschnitten über die Werte der Mess-taster korrigiert wurden. Um die Stabilität der Anlage zu verbessern, den Messablauf zu automatisieren und eben auch ungeschützte Sensoren (blanke Glasfasern) überprüfen zu können, wurde ein neues, verbessertes Gesamtkonzept erstellt. Prinzipielle Überlegungen und Konstruktionsdetails sind in Presl (2009) enthalten.

Diese neue Anlage wurde mittlerweile gebaut und wird derzeit gerade getestet. Es ist daher zu früh, sie schon in diesem Beitrag vorzustellen. Jedenfalls ist sie mit den möglichen großen Sen-

sorlängen (bis 30m) und einem Verschiebeweg des bewegten Ankers von 0.3m einzigartig.

## 6. Resümee

Neue Entwicklungen in der faseroptischen Messtechnik und immer größere Chargen bei der Sensorherstellung lassen für die Zukunft eine Optimierung der Eigenschaften wie z.B. den gezeitigen Hystereseeffekten erwarten.

Einschlägige Normen sind, obwohl es mittlerweile eine größere Anzahl an kommerziellen faseroptischen Messsystemen und faseroptischen Sensoren gibt, entweder nicht vorhanden oder noch nicht genügend etabliert. Die von den Herstellern bereitgestellten Spezifikationen erlauben es daher oftmals nicht, unterschiedliche Geräte miteinander zu vergleichen; zu unterschiedlich sind oft die Inhalte und zu inhomogen die Bedeutung der verwendeten Begriffe. Derzeit sind jedoch internationale Bestrebungen im Gange (IEC 86C WG2), entsprechende Normen zu erstellen und europaweit werden Anstrengungen unternommen (COST TD1001), die Grundlagen für neue Faseroptische Systeme und Sensoren mit noch höheren Reproduzierbarkeiten zu erarbeiten (siehe Habel, 2012).

Bis die Regelwerke erstellt und etabliert sind, bleibt dem Anwender nur, sich anderwärtig Informationen zu beschaffen. Dafür sind unabhängige Institutionen wesentlich, die mit den Messsystemen und Sensoren Prototypentests durchführen und die praxisrelevanten Informationen bereitstellen. Oft sind es Universitätsinstitute, die sich dieser Aufgabe annehmen und damit einen wichtigen Beitrag für die Etablierung neuer Technologien liefern. Die Messpräzisionen, die mit faseroptischen Systemen möglich sind, stellen jedoch auch hohe Ansprüche an die Test- und Prüfeinrichtungen, speziell, wenn diese zur Evaluierung des Langzeitverhaltens verwendet werden sollen. Dies zeigte sich auch bei den in den letzten Jahren im IGMS Messlabor aufgebauten Einrichtungen. Mit diesen konnten zwar schon wichtige Erkenntnisse für den praktischen Einsatz der Instrumente gewonnen werden, Stabilitäten im sub- $\mu\text{m}$  Bereich oder im 0.01K Bereich – die für bestimmte Untersuchungen zumindest kurzzeitig vorherrschen sollten – sind jedoch nicht leicht zu erreichen. Oftmals sind die Anlagen basierend auf den gesammelten Erfahrungen zu adaptieren, insbesondere auch um neue, zuvor nicht offenkundige, Funktionalitäten zu realisieren. Diese Entwicklungsschritte hat auch die vorgestellte statische Test- und Prüfeinrichtung für faseroptische Dehnungssensoren durchlaufen. Eine verbesserte und erweiterte Version der Anlage steht nun nach mehrjähriger

Entwicklungszeit kurz vor ihrer operativen Inbetriebnahme. Intensive Untersuchungen sind damit geplant, worüber in naher Zukunft berichtet werden wird.

## Referenzen

- [1] Brunner FK (2009): Faseroptische Sensorik. Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie. Öst. Z. f. Vermessung & Geoinformation 97: 335-342
- [2] Brunner FK, Woschitz H (2011): Über die Erweiterung des ingenieurgeodätischen Monitorings. Allg. Vermessungs-Nachrichten 118: 212-218
- [3] Habel WR (2012): Advances in Developing Standards for Fibre-Optic Sensors. In Boller C (ed.) Structural Health Monitoring 2012: CD-Proc. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 3.-6.07.2012, Dresden, 9 Seiten
- [4] Kashyap R (2010): Fiber Bragg Gratings. 2nd ed., Academic Press, San Diego, 614 Seiten
- [5] Lienhart W (2007): Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Series "Engineering Geodesy – TU Graz", Shaker Verlag, Aachen, 269 Seiten
- [6] Presl R (2009): Entwicklung eines automatisierten Messsystems zur Charakterisierung faseroptischer Dehnungssensoren. Unpubl. Diplomarbeit, FH Oberösterreich, 148 Seiten
- [7] Reithofer A, Schlauf S (1992): Geodäsie-Messlabor der TU Graz. In Matthias HJ, Grün A (Hrsg.) Ingenieurvermessung 92, Beiträge zum 11. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Bd. 1: II 17/1-8
- [8] Udd E, Spillman WB (2011): Fiber Optic Sensors, an Introduction for Engineers and Scientists. 2nd ed., Wiley, New Jersey, 498 Seiten
- [9] VDI (2010): Experimentelle Strukturanalyse – Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter – Grundlagen, Kenngrößen und deren Prüfung. Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE Richtlinie 2660, Beuth Verlag, Berlin, 43 Seiten
- [10] Woschitz H (2010a): Entwicklung einer langarmigen faseroptischen Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhanges. Österr. Z. f. Vermessung & Geoinformation 98: 29-39
- [11] Woschitz H (2010b): Entwicklung eines Rail-Strain-Pads unter Verwendung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. In Wunderlich T (Hrsg.) Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München 2010. Wichmann: 171-182
- [12] Woschitz H, Brunner FK (2011): Dynamic strain measurements using embedded fiber optic sensors. Österr. Z. f. Vermessung & Geoinformation 99: 191-196
- [13] Yu FTS, Yin S (2002): Fiber Optic Sensors. Marcel Dekker Inc., New York, 494 Seiten

## Anschrift des Autors

Dr. Helmut Woschitz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.

E-Mail: [helmut.woschitz@tugraz.at](mailto:helmut.woschitz@tugraz.at)