

Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren

Anwendungen von Lichtwellenleitersensoren zur Überwachung der Bauwerke

Dr. D. Inaudi, Phd. Phys., Smartec SA, Grancia
N. Casanova, Dipl. Ing. ETH/SIA, Istituto Meccanica dei Materiali SA, Grancia

Einführung

Der Bereich „Konstruktion und Instandhaltung“ der Bauwerke beträgt in den meisten europäischen Ländern zwischen 10 % bis 20 % der öffentlichen Investitionen. In den letzten zehn Jahren konnte dabei ein Umdenken festgestellt werden, wobei mehr im Bereich der **Instandhaltung bez. Sanierung** investiert wird als in jenem der Errichtung neuer Bauten.

Dazu kommt, dass mit Ausnahme der Hochgeschwindigkeits-Bahnstrecken die meisten Verbindungsnetze im Bahn- und Strassenverkehr fertiggestellt und in Betrieb sind. Die steigende Nutzung der Infrastruktur von Güter- und Personenverkehrswegen, erhöht durch das Zusammenwachsen der Europäischen Gemeinschaft, stellt diese öffentlichen Infrastrukturen auf eine harte Probe. Viele Brücken und Tunnels, die vor Jahrzehnten gebaut worden sind, müssen repariert werden, da die heutige Nutzung die vor Jahren geplante Kapazität der Brücke übersteigt. Neben den direkten Kosten und den dazugehörigen Investitionen, welche die Abnutzungen der täglichen Belastung mit sich zieht, kommen ferner Verkehrstaus und Unfälle hinzu, die zusätzliche Kosten verursachen. Die verantwortlichen Behörden für den öffentlichen Verkehr stehen ausserdem vor der Aufgabe, einerseits die Instandhaltearbeiten mit einem limitierten Budget durchzuführen, andererseits die Sicherstellung einer „normalen“ Benutzung des Strassenabschnittes während dieser Arbeiten zu gewährleisten. Diese Aufgabe ist bei weitem komplexer als die Erschaffung neuer Strukturen und fordert daher neue Lösungen.

Die Überwachung der intakten Strukturen ist mit Sicherheit eines der geeignesten Instrumente und gewinnt daher immer mehr an Wichtigkeit im Bereich der Bauwesentechnologie. Die Überwachung wird jedoch oft und zu unrecht mit einem Sicherheitsinstrument verwechselt. Dies trifft jedoch im Falle von hoch potentiellen Gefahrengütern wie Dämmen, Staumauern und nuklearen Anlagen zu. Was die meisten anderen Bauten anbelangt, ist das Sicherheitsrisiko sehr begrenzt und glücklicherweise werden kaum Kollapsen verzeichnet. Für all diese Bauten sollte die **Überwachung als Instrument der Bauwerksverwaltung** verstanden werden, das über eine oder mehrere vernetzte Konstruktionen Auskunft gibt. In dem heute genannten Informationszeitalter sollte die Strukturüberwachung den Graben zwischen der gewissermassen toten Materie der Baustoffe und der frenetischen Informationstechnologie füllen.

Ein typisches Strukturüberwachungssystem setzt sich aus einem Netzwerk von Sensoren zusammen, das die relevanten **Parameter des Zustandes** des Objektes und dessen Umgebung misst. Die häufigsten relevanten Parameter bei öffentlichen Bauten wie Brücken, Tunnels, Dämmen, Staumauern, geotechnischen Installationen, Kraftwerken, Hochhäusern und historischen Denkmälern, sind in der Regel:

Physische Einflüsse: Position, Verformungen, Inklinationen, Druckkräfte, Beschleunigungen, Schwingungen.

Thermodynamische Einflüsse: Temperaturen.

Chemische Einflüsse: Feuchtigkeit, pH-Werte, Chlorid- oder Sulfatgehalt.

Umgebungsbedingte Einflüsse: Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, Sonnenstrahlung, Niederschläge, Schneebelastungen, Ebbe und Flut, Verschmutzungskonzentration.

Konventionelle Sensoren, die auf mechanischen und/oder elektronischen Wndlern basieren, können die meisten dieser Parameter messen. In den letzten Jahren haben die Lichtwellenleitersensoren einen langsam doch stetigen Einzug in das Sensoren-Panorama gehalten. Nach der anfänglich euphorischen Phase, als die Lichtwellenleitersensoren drohten, den ganzen Markt zu überschwemmen, stellt sich heute heraus, dass diese Technologie, im Vergleich zu den mehr getesteten, konventionellen Sensoren, attraktiv ist, insbesondere wenn eine erhöhte Leistungsfähigkeit verlangt wird. Diese Sensoren gewährleisten **verbesserte Qualität der Messungen** und ermöglichen, die bisher manuellen Verfahren und operationellen Schätzungen durch **automatische Messungen** zu ersetzen oder zu ergänzen. Darüber hinaus kommt eine **einfache Installation** und Instandhaltung sowie **niedrige Unterhaltskosten** hinzu.

Heute ist die Technik im Gebiet der Lichtwellenleitersensoren soweit ausgereift, dass sie erfolgreich im routinierten Gebrauch eingesetzt werden kann und jedem Vergleich mit konventionellen Instrumenten standhält [1].

Verschiedene Typen von Lichtwellenleitersensoren

Europa offeriert eine grosse Palette an Lichtwellenleitersensoren zur Strukturüberwachung [2, 3, 4, 5], sowohl im akademischen als auch im industriellen Bereich. Anders als in den USA, wo sich die meisten Bemühungen bzw. Messungen auf Verformungen zu konzentrieren scheinen, entwickelt und produziert Europa eine grosse Auswahl für nahezu alle unterschiedlichen Arten von Messungen und Applikationen. In dieser Übersicht konzentrieren wir uns auf die Sensoren der Bauwerksüberwachung, die einen industriellen Level oder zumindest die Stufe eines führenden Versuchs erreicht haben.

Die nachstehende Tabelle fasst die Sensorentechnologien, die in den nächsten Kapiteln besprochen werden, zusammen.

	Gemessene Parameter	Stadium	Vertreiber in Europa (siehe Text für Details)	Anzahl installierter Sensoren bis heute (Größenordnung)
SOFO	Verformungen	Kommerziell	IMAC-EPFL, SMARTEC SA (CH)	1000+
Microbend	Verformungen	Kommerziell	DehaCom (F),	Hunderte
Bragg gratings	Verformungen, Temperatur	Feldtests	Stabilos- und Cosmos-Projekte, EMPA (CH), LETI (F)	+/- 500 +/- 100
Fabry Perot	Verformungen	Feldtests	BAM (D)	+/- 100
Raman	Verteilte Temperaturmessung	Kommerziell	York Sensors (UK)	+/- 10
Brillouin	Verteilte Temperatur und Verformung	Feldtests	MET-EPFL, Cortaillod (CH)	AESA +/- 5
Hydrogel	Feuchtigkeit, Wassereinbruch	Feldtests	Universität Strathclyde (UK)	+/- 5

Tab. 1: Lichtwellenleitersensoren zur Strukturüberwachung in Europa

SOFO: Verformungssensoren

Das **SOFO Messsystem** zur Strukturüberwachung durch Lichtwellenleitersensoren ist das Resultat einer engen Zusammenarbeit zwischen Industrie und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) [6, 7, 8] und wird heute durch die Firma SMARTEC SA vertrieben.

Das System mit Lichtwellenleitersensoren zur Bestimmung von Verformungen beruht auf dem Prinzip der Interferometrie in niederer Kohärenz und misst die Längendifferenz zwischen 2 Fasern. Die messende Faser ist vorgespannt und wird mechanisch an zwei verankerte Punkte montiert, um Deformationen zu messen, während die Referenzfaser wie eine Spirale frei ist und als Ausgleich der Temperatur eingesetzt wird. Die **0,2 bis 10 m langen Faser** sind zusammen in einem Rohr installiert (Sensor) und können auf bereits existierenden oder auf neuen Bauwerken eingebaut werden. Die **Präzision von $\pm 2/1000$ mm ohne Kalibrierung**, die jahrelange Stabilität und die Möglichkeit, automatische und Fernmessungen durchzuführen, stellen die wichtigsten Eigenschaften dieses Messsystems dar. Diese Eigenschaften ermöglichen, die Qualität, die Sicherheit und den Unterhaltungsplan von Bauwerken zu überwachen.

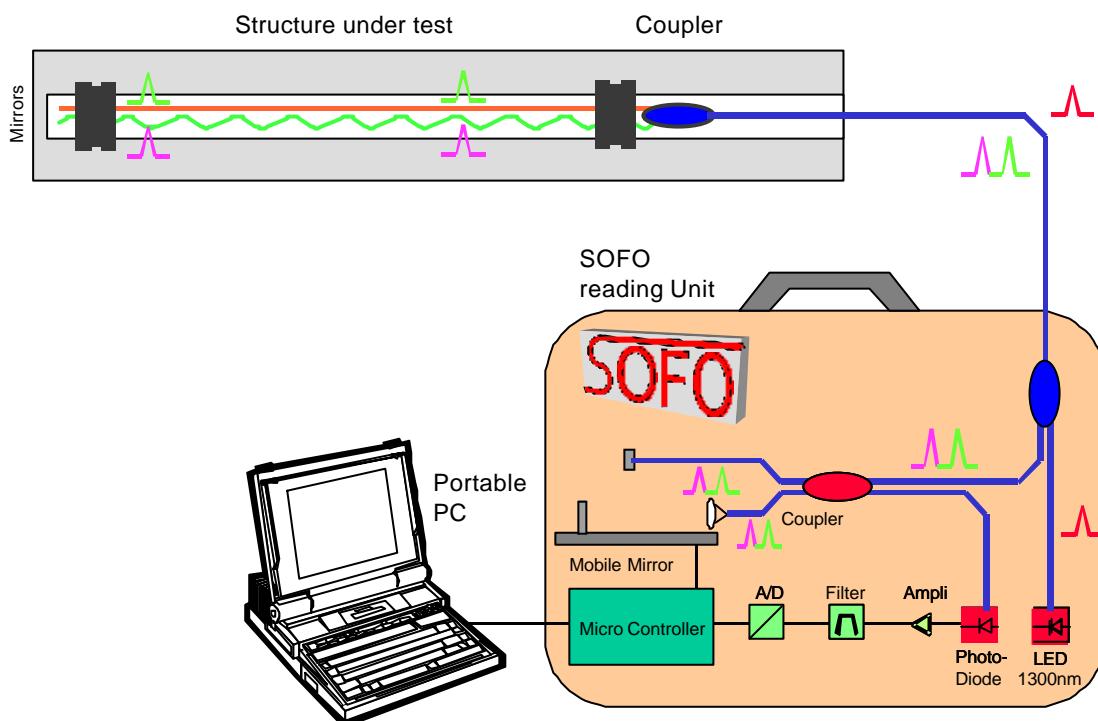


Abb. 1: SOFO-Messsystem

Bis heute sind insgesamt mehr als 60 Bauwerke wie beispielsweise Brücken, Tunnels, Pfähle, Staumauern, Dämme, historische Denkmäler, Atomkraftwerke und Prüflabormodelle erfolgreich mit dem SOFO Messsystem ausgerüstet worden.

SOFO Applikationsbeispiel: Versoix-Brücke (GE)

Die Versoix-Autobahnbrücke zwischen Genf und Lausanne (A9) besteht aus zwei Zwillingsbrücken mit je einer aufgelegten Betonplatte auf zwei vorgespannten Trägern. Im Jahre 1996 musste diese Brücke wegen der Verkehrszunahme erweitert werden.

Das Erweiterungskonzept wird hier wie folgend dargestellt:

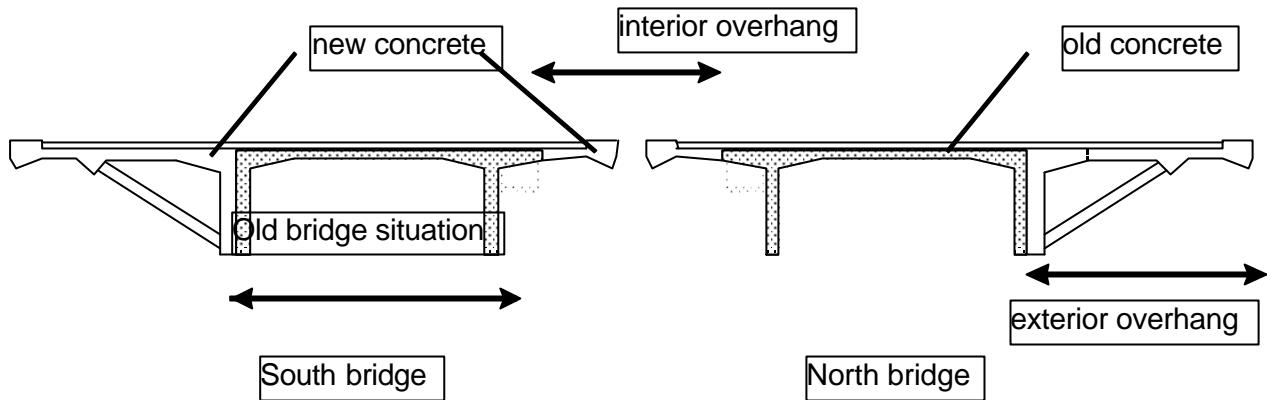


Abb. 2: Erweiterungskonzept für die Versoix-Brücke (GE)

Wegen des ungewöhnlichen Bauverfahrens entschloss sich der Projektleiter für ein Überwachungssystem mittels Glasfasersensoren für die kurz- und langfristige Kontrolle von 2 Spannweiten einer der beiden Zwillings-Brücke [9]. Die Gruppe IMAC der EPFL wurde mit den Überwachungsarbeiten beauftragt.

Wichtige Parameter, die gemessen werden mussten, sind die **differenzierten Verformungen vom alten und neuen Beton, Schwinden, Krümmung und Torsion** der Brücke wegen Lastveränderungen.

Aufgrund des Programms der Finiten-Elemente wurde gezeigt, dass für jede Spannweite einer zweifeldtrigen Brücke mindestens 4 Krümmungsmessungen notwendig sind, um eine gute räumliche Auflösung der Krümmung zu erhalten (2 Gleichungen mit 5Polynomgrad). Mit der doppelten Integration der Krümmungen kann man nachträglich die Durchbiegung ausrechnen. Darum wurden in die Brücke etwa 100 Glasfasersensoren (etwa 8 pro Zelle, siehe Abb. 4) eingeführt. 12 Schnitte (sogenannte Zellen) der Brücke wurden somit ausgerüstet [10, 11].

Hier wird eine solche Zelle dargestellt (Schnitt).

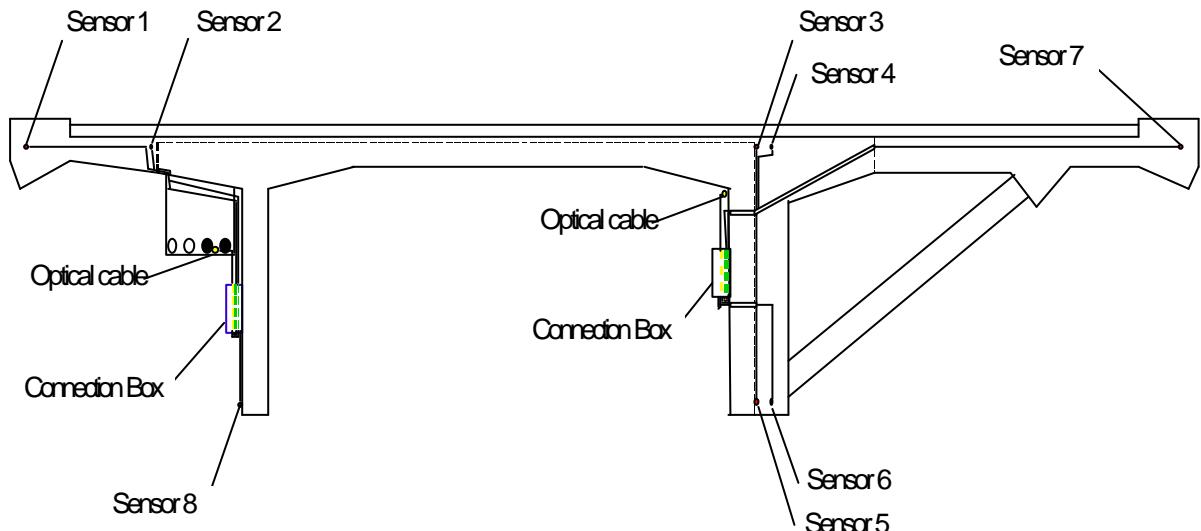


Abb. 3: Schnitt der Brücke, SOFO-Sensoren bei der Versoix-Brücke (GE)

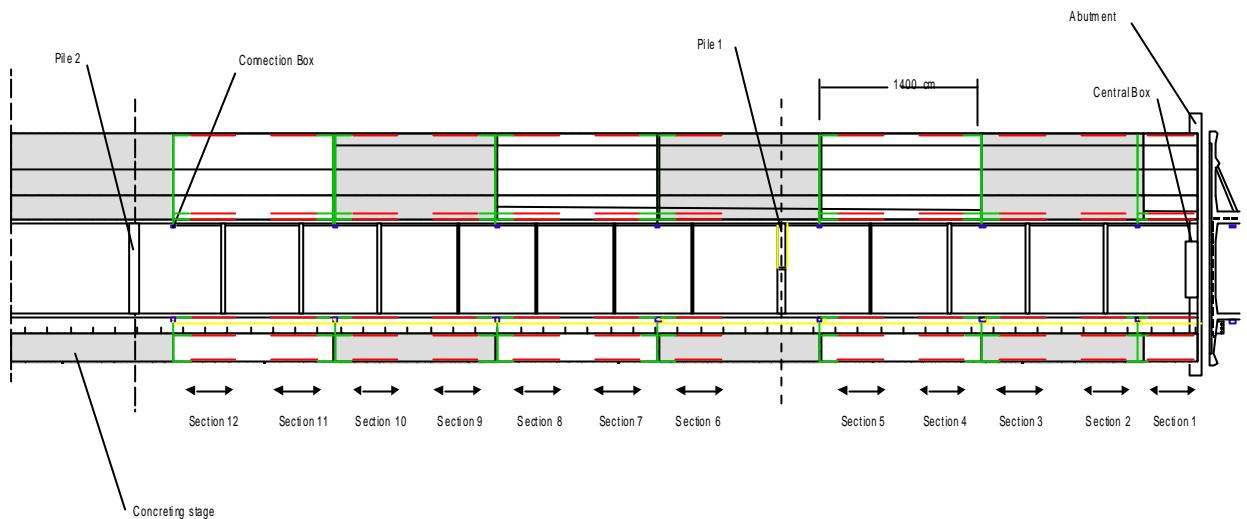


Abb. 4: Situation der Brücke, SOFO-Sensoren bei der Versoix-Brücke (GE)

Die Installation der Sensoren erfolgte ohne Verspätung und planmäßig.
Die Sensoren wurden zum Teil an der Armierung vom neuen Betonteil befestigt, zum Teil in Schlitten im alten Beton injiziert.



Abb. 5: Installation eines SOFO-Sensors bei der Versoix-Brücke (GE)



Abb. 6: Betonierung bei der Versoix-Brücke (GE)

In der Folge werden die ersten Resultate der Messungen über das Schwindverhalten gezeigt.

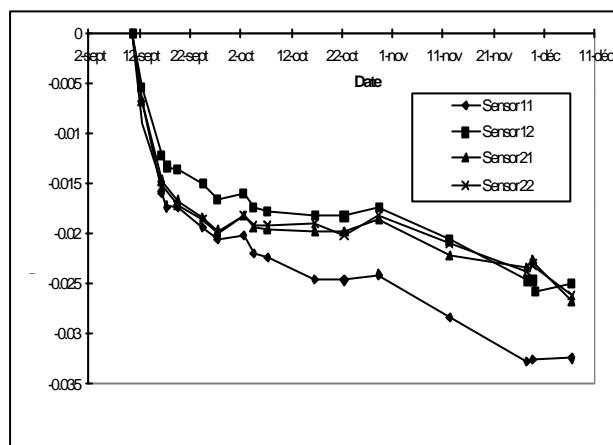


Abb. 7: Sensorenmessungen der ersten Betonierungsetappe

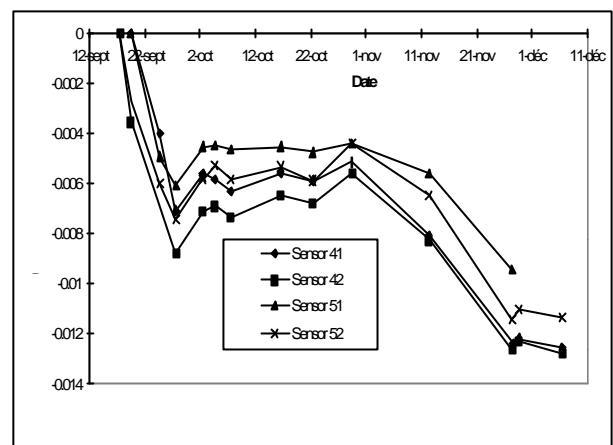


Abb. 8: Sensorenmessungen der zweiten Betonierungsetappe

Das unterschiedliche Verhalten der 2 Diagramme (**Schwinden** von 0.02 % bzw. 0.005%) entspricht den verschiedenen klimatischen Bedingungen bei der Betonierung und den verschiedenen Mischungen. Es ist auch ersichtlich, dass in der 2. Etappe (Abb. 8) **Risse** entstanden sind: die Schwindmessungen sind plötzlich kleiner geworden, was einer "Entspannung" des Betons entspricht. Die Risse konnten frühzeitig festgestellt werden, aber wurden erst nach einigen Tagen ersichtlich. In den ersten Tagen wurde das automatische und kontinuierliche Messsystem angewendet.

Die Sensoren, die im alten und im neuen Beton installiert wurden, konnten miteinander verglichen werden, was aufzeigte, dass eine gute **Haftung** vorhanden war (sie weisen dasselbe Verhalten auf) [12] (siehe Abb. 9).

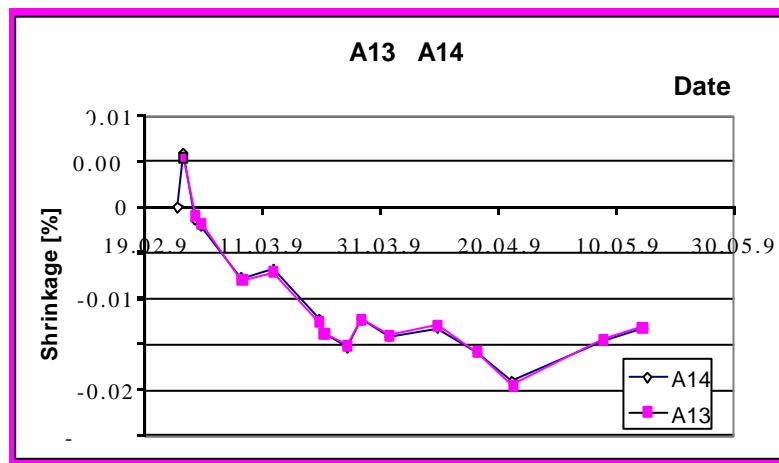


Abb. 9: Vergleich Verformungen im alten und Verformungen im neuen Beton

Im Mai 1998 und nach der Beendigung der Bauarbeiten wurden **Belastungsversuche** auf der Brücke durchgeführt, bei denen die vertikale Durchbiegung gemessen wurde.

Die Abbildung 10 zeigt die vertikale Durchbiegung, die nach den Messungen mit SOFO-Sensoren gerechnet wurde, verglichen mit den mit Invar (Messuhren) unter der Brücke gemessenen Verformungen. Der Lastfall A bestand in 6 Lastwagen im zweiten Feldträger (Position 73.00 in der Abbildung 10).

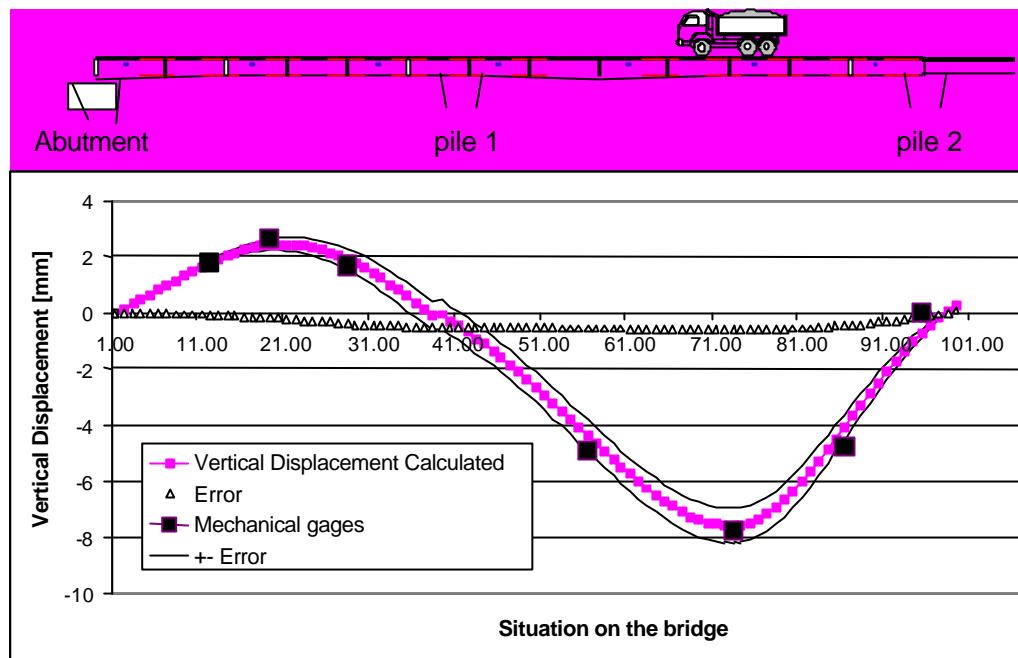


Abb. 10: Durchbiegung während des Belastungsversuchs, Fall A

Der geschätzte Fehler der Berechnung ergibt sich durch die Auflösung von 5 μm vom SOFO-System.

Der Algorithmus (**Vertical Displacement Calculated**) findet im Fehlerintervall die richtige Position der Stützen und die durch Invar (Messuhren, IBAP-EPFL) gemessenen Verformungen [12].

SOFO Applikationsbeispiel: Überwachung von Hybrid-Strukturen in den ersten Phasen nach der Herstellung

Die Herstellung von Hybridstrukturen im Bauwesen, wie Verbundbrücken (Stahl-Beton), aber auch sanierte Bauwerke (Interaktion Alt-Neu), ist sehr üblich.

Der Beton wird vom „jungen Alter“ („**very early age**“) und von seinen Verformungen (wie der **thermischen Expansion** und unterschiedlichen **Schwindverhalten**) beeinflusst, die durch die Hydratationsprozesse verursacht werden.

Da der neue Beton am alten haftet und mit ihm zusammenwirkt, werden diese ersten Verformungen vom neuen Beton in den alten eingebracht und die Hybrid-Struktur wird schon unter **Spannung** gesetzt, bevor sie fertiggestellt ist. Diese Spannungen können **Risse** im neuen Beton verursachen, welche zur Undichte des Betons, Beschleunigung der Korrosion der enthaltenen Stahlarmierung und Zerstörung des Betons führen. Langfristig könnte dies sogar zur Ablösung der neuen Schicht führen, was dann die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit sowie die Lebensdauer des Bauwerkes beeinträchtigen und die Kosten für die Wartung und Sanierung erhöhen könnte [13].

Aus diesen Gründen hat die Gruppe ISS der EPFL 14 Prüfkörper hergestellt, die sich aus altem und neuem Beton zusammensetzen. Diese Prüfkörper wurden mittels SOFO-Sensoren sowohl auf die Entwicklung der ersten Verformungen als auch auf Kriech- und Relaxationsverformungen, die Interaktion zwischen den Materialien und die durch statische Belastung verursachten Verformungen überprüft.

Von 2 Prüfkörpern (A4B und AA3) wird hier besprochen (siehe Abb. 11 und Abb. 12). Die alte Schicht wurde etwa 3 Monate vor dem neuen Beton einbetoniert und die Mischung des Materials wurde so gewählt, dass der alte Beton einem etwa 40 Jahre alten Beton entsprach. 2 Tage vor der Betonierung der neuen Schicht wurde die Oberfläche mit Hochwasserdruck bearbeitet, um eine bessere Haftung zu gewährleisten.

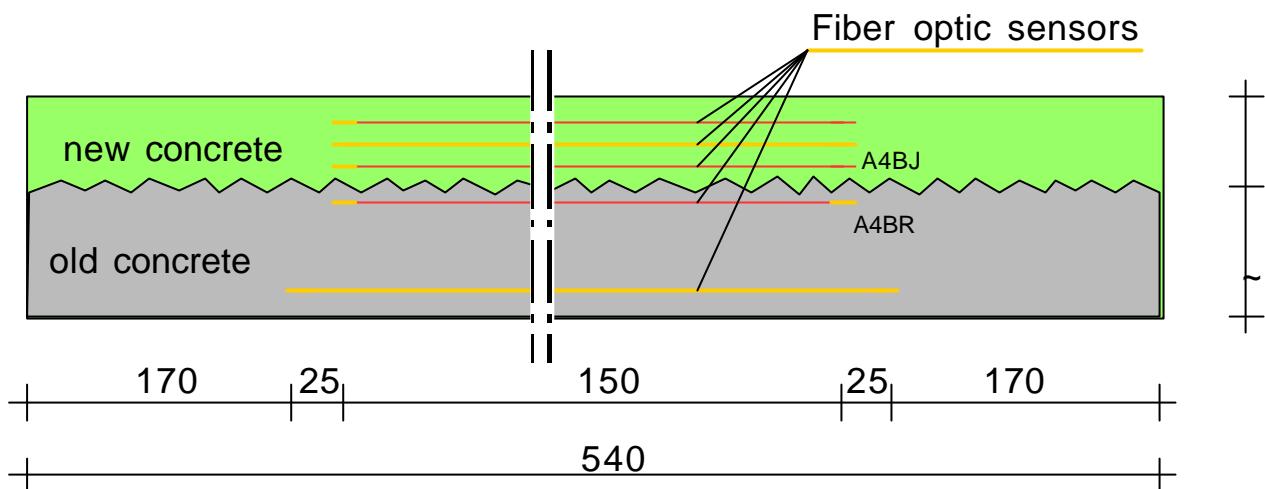


Abb. 11: Prüfkörper A4B mit Glasfasersensoren A4BV, A4BR, A4BJ, A4BM und A4BH

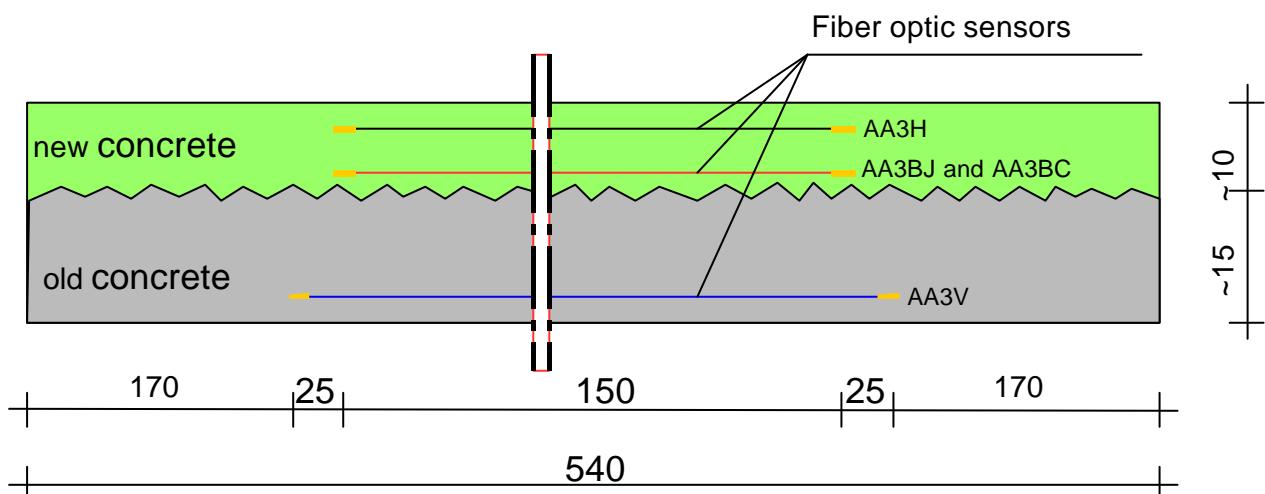


Abb. 12: Prüfkörper AA3 mit Glasfasersensoren AA3V, AA3BC, AA3BJ und AA3H

Dank der kleinen Steifigkeit der angewendeten Sensoren war es möglich, die Verformungen der Prüfkörper schon in den ersten Phasen nach der Betonierung zu messen. Beide, die **thermische Expansion** und das **Schwinden**, konnten klar beobachtet werden. In der nächsten Abbildung ist der Verlauf der Messungen beim Prüfkörper AA3 ersichtlich.

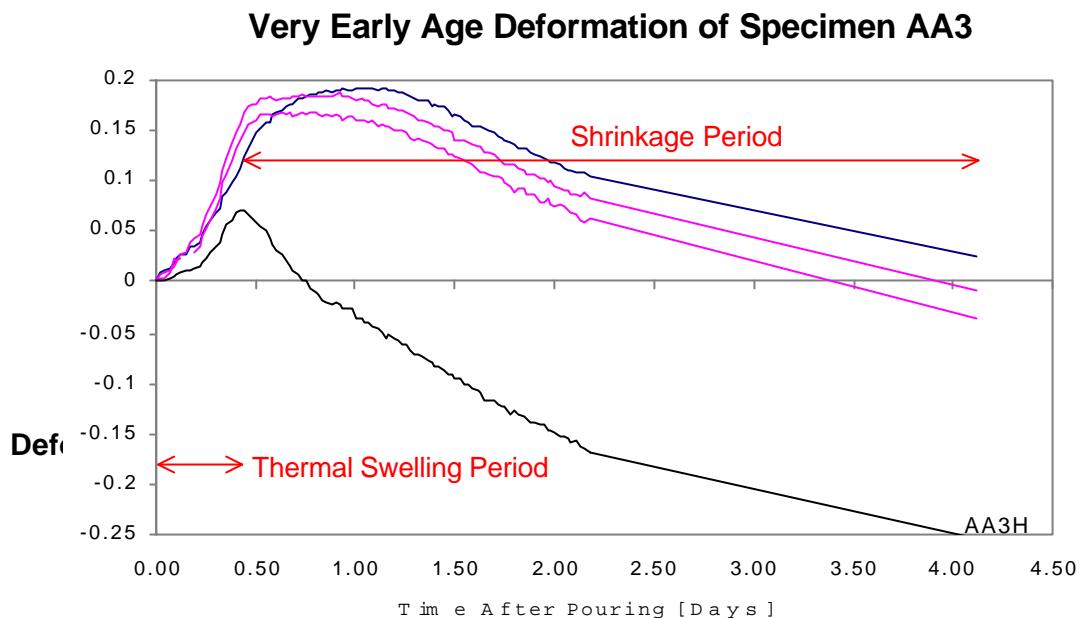


Abb. 13: Verformungen vom Prüfkörper AA3 in den ersten Phasen nach der Betonierung, gemessen mit den Sensoren AA3V, AA3BC, AA3BJ und AA3H

In dieser Abbildung sind 3 verschiedene Darstellungen ersichtlich.

Die Kurve des Sensors AA3V beschreibt das Verhalten der unteren (alten) Schicht.

Die Messungen der Sensoren AA3BC und AA3BJ weisen ungefähr dasselbe Verhalten wie AA3V auf, aber zeigen deutlich, dass sie sich dort im neuen Beton ganz nah beim alten Beton befinden, wo die Temperatur während der Hydratationsprozesse am höchsten ist (der alte Beton wirkt als Abdichtung). Deswegen sind dort die Verformungen grösser als in der Nähe der Oberfläche der Prüfkörper, erreichen früher die maximalen Werte, bleiben dann während des langsamen Abkühlens praktisch konstant und verhalten sich wie die der unteren Schicht.

Die dritte Darstellung betrifft die Messungen des Sensors AA3H, der sich im neuen Beton knapp unter der Oberfläche befindet. Sein Verhalten ist völlig anders als die bereits beschriebenen. Die maximalen Werte werden gleichzeitig mit der maximalen Hydratationstemperatur erreicht, dann sinken sie wegen der Abkühlung und des Schwindens des Betons.

Da der alte Beton mit dem neuen verbunden ist, verursacht die Abkühlung bzw. das Schwinden des neuen Betons interne Spannungen in den Prüfkörpern, so dass sich auch der Sensor AA3V nach Erreichen der maximalen Hydratationstemperatur langsam verkürzt.

Dank dieser Messungen konnten andere Darstellungen bearbeitet und untersucht werden. In der Folge wird das Verhalten des Prüfkörperschnittes abgebildet, wobei auch die Krümmungseffekte festzustellen sind.

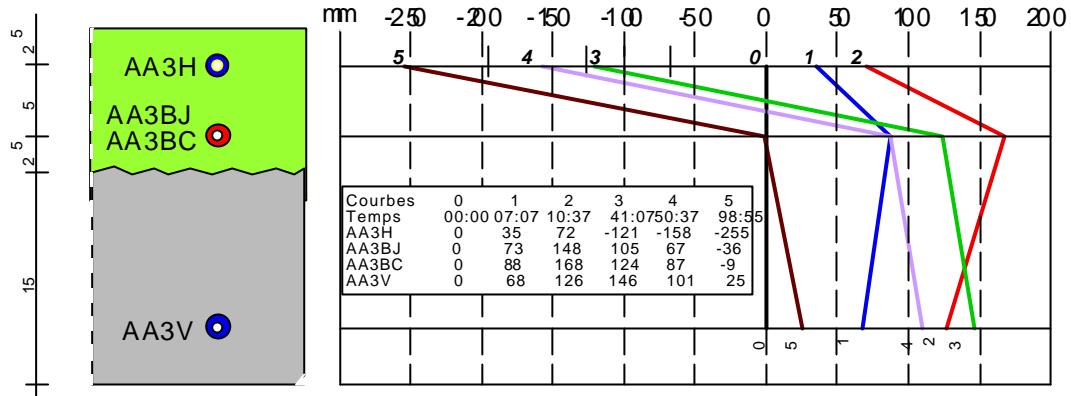


Abb. 14: Position der Sensoren und Verformung des AA3-Prüfkörperschnittes

Da der Sensor AA3BC an einer Armierung befestigt wurde, der Sensor AA3BJ jedoch frei installiert in der Struktur war, konnte während der ersten Phasen der Sensor AA3BC die Verformungen des alten Betons, und der Sensor AA3BJ die Verformungen des neuen Betons messen.

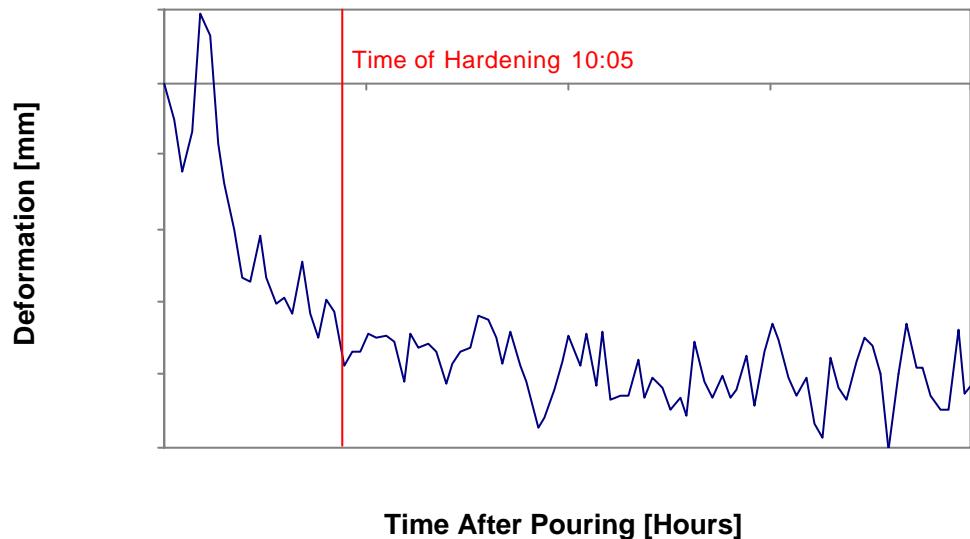


Abb. 15: Bestimmung der Erstarrungszeit des neuen Betons

Wegen der verschiedenen thermischen Expansionskoeffizienten der zwei Betontypen und des Schwindens vom neuen Beton, sehen diese gemessenen Verformungen in den ersten Phasen anders aus. Nach der Erhärtung des Betons wird die Verformungsdifferenz zwischen den Sensoren konstant. Die Haftung ist gewährleistet und die **Erstarrung** fand statt (siehe Abb. 15).

In der Publikation [13] über diese Versuche kann man auch ermitteln, wie die Interaktion zwischen altem und neuem Beton evaluiert werden kann.

Microbending-Verformungssensoren

Eine Alternative zu anderen Lichtwellenleitersensoren, hilfreich bei der Messung von **Längsvariationen**, basiert auf der **Microbending**. Dieses System besteht aus einem **geschlungenen Lichtwellenleiter** (bis zu 10 m lang) mit einem oder mehreren anderen Lichtwellenleitern oder mit einem metallischen Draht entlang seinen aktiven Seiten [14]. Wenn sich dieses umschlungene Lichtwellenleiter-Paar ausdehnt, induziert es die Umschlingung der Wellenleiter von einem anderen Paar und verursacht die Flucht von einem Teil des Lichtes aus den Fasern. Bei der Messung der Intensität des restlichen übermittelten Lichtes ist es darum möglich, die Verformung der Struktur, auf welcher der Sensor (**optische Saite** genannt) montiert ist, zu umgehen.

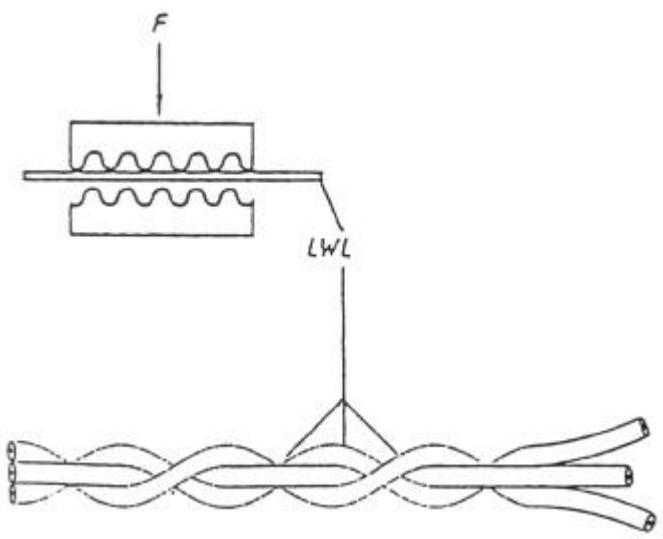


Abb. 16: Microbending-Prinzip [DehaCom]

Ein solches System, das auf diesem Prinzip beruht, wurde in den letzten Jahren von der Firma Sicom und in der letzten Zeit von der Firma DehaCom in Frankreich vermarktet. Dieses System war eines der ersten mit Lichtwellenleitersensoren, die zur Überwachung von Bauwerken angewendet und in verschiedenen Brücken, Tunnels und Hochhäusern installiert wurden. Der **Messbereich** ist 0,5% der Sensorenlänge. Die erreichte **Auflösung** ist 30 μm für die kurzfristige Anwendung (weniger als ein Tag) und 100 μm für den Dauerbetrieb. Es wurde auch ein Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) vorgeschlagen, welches die Intensität des reflektierten Lichtes misst. Ein solches System würde die Messung von verteilten Verformungen ermöglichen. Microbending-Verformungssensoren sind sehr einfach konzipiert, auch wenn sie noch ein Problem darstellen, was die Kompensation der Temperatur, die Abweichungen der Intensität, die Kalibrierung des Systems und das nicht lineare Verhältnis zwischen Lichtintensität und der Verlängerung betrifft. Dieser Typ von Sensor scheint uns aber sehr geeignet für **kurzfristige und dynamische Überwachungen**, sowie für den Einsatz als Alarmsystem.

Bragg-Gitter: Extensometersensoren

Bragg-Gitter sind periodische Veränderungen in dem **Refraktionsindex** vom Faserkern, die durch eine geeignete Exposition der Faser zum UV-Licht erreicht werden können. Das erstellte Gitter hat eine Länge in der Größenordnung von 10 mm. Wenn weisses Licht in die Faser dieses Gitters injiziert wird, wird die Wellenlänge reflektiert, die der Bragg-Gitter-Periode entspricht, während die restlichen Wellenlängen unzerstört durchgehen.

Da die Periode des Gitters von der **Temperatur und der Dehnung abhängig** ist, ist es möglich,

diese Parameter durch die Analyse des Spektrums des reflektierten Lichtes zu messen [15]. Normalerweise wird dies mit einem regulierbaren Filter (wie Fabry-Perot Etalon) oder mit einem Spektrometer durchgeführt.

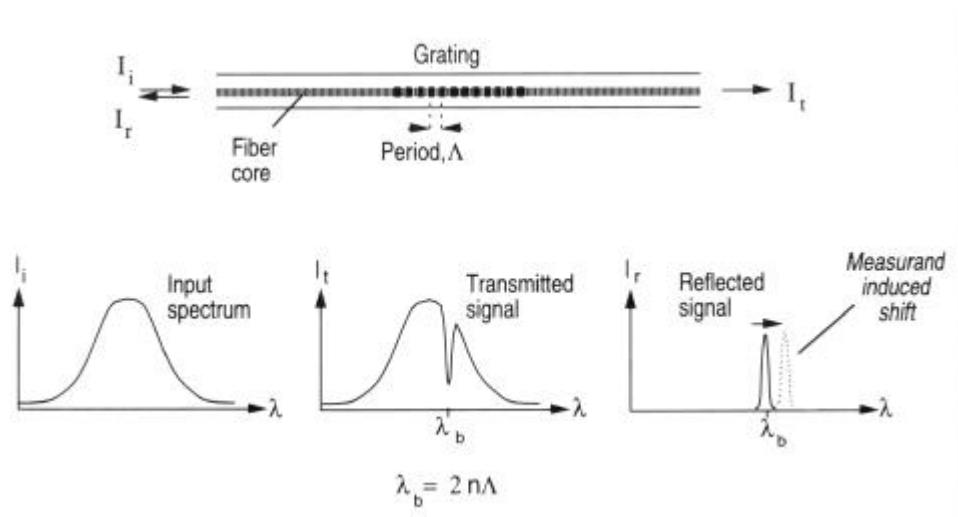


Abb. 17: Bragg-Gitter-System [15]

Die **Auflösungen** in einer Größenordnung von $1 \mu\text{e}$ und $0,1^\circ\text{C}$ können mit einem sehr guten Demodulator erreicht werden. Wenn Dehnung- und Temperaturänderungen gleichzeitig zu erwarten sind, ist es nötig, ein freies Referenzgitter anzuwenden, das nur die Temperatur misst: diese Messung wird nachträglich angewendet, um die Dehnungswerte zu korrigieren. Es gibt schon Systeme, die solche Messungen gleichzeitig durchführen können, die jedoch in der Praxis noch nicht geprüft worden sind.

Ein grosses Interesse bei der Anwendung des Bragg-Gitters besteht in der Möglichkeit vom **Multiplexage**. Verschiedene Gitter können in derselben Faser und an verschiedenen Stellen reguliert werden, sodass verschiedene Wellenlängen reflektiert werden können. Dies erlaubt Messungen von Dehnungen an verschiedenen Stellen desselben Kabels; z. B. können 4 bis 16 Gitter an einer einzelnen Faser gemessen werden. Es ist zu bemerken, dass die Anzahl der Gitter proportional zum dynamischen Bereich der Messung ist, da die Gitter die Lichtquelle teilen müssen, welches für die Beleuchtung angewendet wird. Aufgrund ihrer Länge können Bragg-Gitterfaser an der Stelle von konventionellen Dehnungsmessstreifen angewendet und klebend an einer glatten Oberfläche installiert werden [16]. Mit einem speziellen Housing können auch für die Messung von Verformungen über eine Länge von mehr als 100 mm im Beton durchgeführt werden.

Eine grosse Zahl von **Forschungs- und Entwicklungsprojekten** sind überall auf der Welt im Gange und Europa stellt keine Ausnahme dar [17]. Zwei europäische Projekte (STABILOS [18] und COSMUS) sind in der Anwendung dieser Technologie bei den Messungen von Verformungen in **Tunnelbau, Minen und anderen Geostrukturen** fokussiert. Genauer wurden diverse Bragg-Gittersensoren im Mont Terri Tunnel (Kanton VD) installiert. Die LETI-Gruppe in Frankreich hat diese Technologie zur Überwachung von Schlüsselausgängen angewendet [19] und wird das System in nuklearen Industrien [20] einsetzen, während die EMPA (Eidgen. Materialprüfungsanstalt) diese Sensoren in der Staumauer von Luzzone [21] und in einer Hängebrücke (vgl. 5.5.1) installiert hat. Auch die Universität von Kantabrien in Spanien entwickelt Sensoren für die elektrische Strom-Industrie, inklusive **Dehnungssensoren** und **Beschleunigungssensoren** (die auf anderen Technologien beruhen) [22]. Eine komplette Zusammenfassung von Pierre Ferdinand über die Anwendung von Bragg-Gittern in Europa wird unter den Referenzen geführt [17].

Bragg Applikationsbeispiel: Storchen-Brücke in Winterthur

Die Storchen-Brücke ist eine Hängebrücke, die 1996 in Winterthur gebaut wurde.

Die grösste Innovation besteht in der Installation eines Paars Hängeseile aus Kunststofffasern an der Stelle von konventionellen Hängeseilen aus Stahl.

Die hohe Festigkeit, der gute Korrosionswiderstand und der sehr gute Widerstand gegen Ermüdung von CFK sind die wesentlichen Vorteile. Es handelt sich um ein Design, das die Bedürfnisse einer langzeitigen Überwachung der Eigenschaften von den Hängeseilen erfüllt. Die zwei 35 m langen Kabel sind von der Gruppe der EMPA mit 7 Bragggittersensoren ausgerüstet [23].

Drei von diesen Sensoren wurden an die einzelnen Schlitze der CFK-Kabel geklebt, während die anderen 4 an die Dummykabel lose befestigt und für die Temperaturkompensation und die Anzeigung der langzeitigen Abweichungen angewendet wurden. Diese Dummy-Kabel wurden bis zu einem Dehnungsniveau zweimal so hoch wie die erwartete Dehnung in der Verkabelung vorgespannt.

Der Demodulator basiert auf einem Spektrometer und ist fähig, verschiedene Messungen während mehrerer Tage auszuführen. Die Ungenauigkeit der Messungen vom ganzen Messsystem wurde während 2 Prüfjahren auf 8 $\mu\epsilon$ evaluiert. Die Abbildung 18 zeigt die gemessenen Verformungen in den ausgerüsteten Kabeln während des Baus und während des ersten Lebensjahrs der Brücke. Die Resultate entsprechen den Vergleichsmessungen, die mit konventionellen Dehnungsmessstreifen durchgeführt wurden.

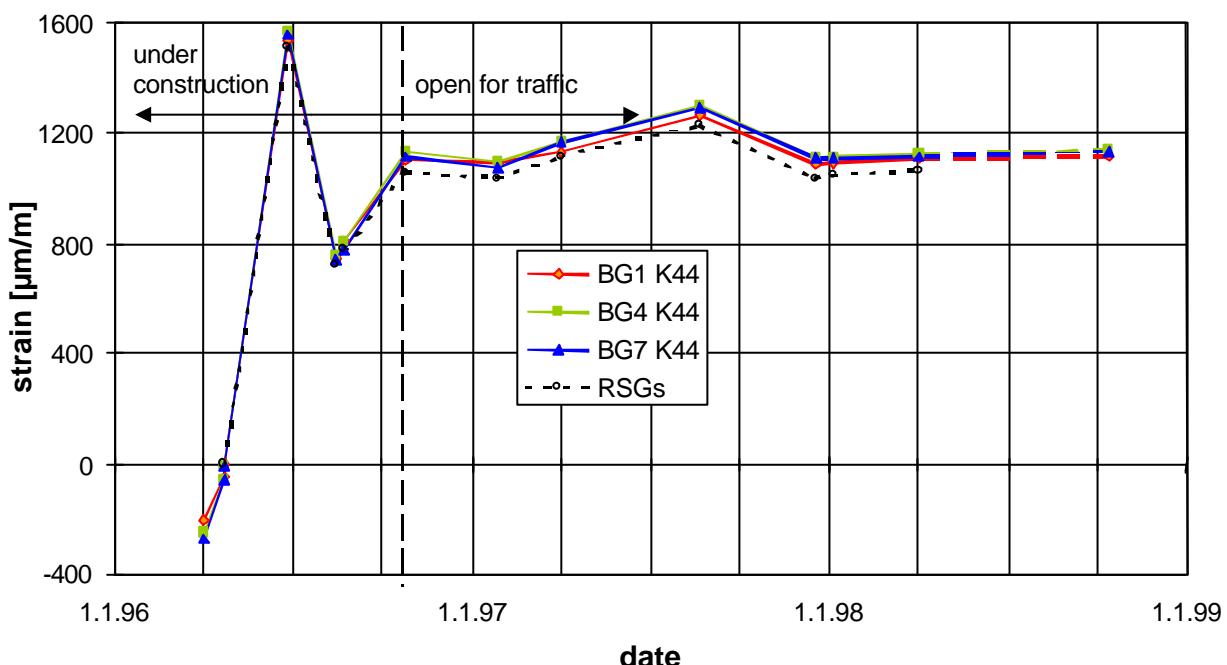


Abb. 18: Verformungen in den Kabeln [23]

Fabry Perot: Extensometer-Sensoren

Externe **Fabry-Perot Interferometer** (EFPIs) bestehen aus einem Rohr aus Silizium, das 2 geschnittene, optische Lichtwellenleiter enthält, die vis à vis zueinander stehen und durch wenige Mikrons oder 10er Mikrons voneinander getrennt sind. Wenn man Licht durch eine Faser sendet, erhält man ein **Interferenz-Signal**. Dies ergibt sich, da sich das hineinkommende Licht an der Trennschicht zwischen Glas und Luft resp. zwischen Luft und Glas reflektiert.

Diese Interferenz kann zur Nachbildung der Änderungen der Faserlänge mittels kohärenter oder niederkoherenter Techniken demoduliert werden. Da die zwei Fasern am Rohr nahe den Ausgängen fixiert und mit einem Abstand von 10 mm befestigt sind, korrespondieren die Änderungen des Luftzwischenraumes zum **Mittelwert der Dehnungsänderungen** zwischen den zwei Verankerungspunkten [2, 15].

Im Gegensatz zu der restlichen Welt wird dieser interessanten Technologie im Europa wenig Beachtung geschenkt. Eine Ausnahme stellt die Gruppe BAM in Berlin dar, die diese Sensoren zur Überwachung der Verformungen von Mörteln in den ersten Phasen [24] anwendet und sie zur Überwachung einer Brücke in Charlottenburg installiert hat [25].

Raman: verteilte Temperaturmessungen

Die **Ramandiffusion** ist das Resultat einer nicht-linearen Interaktion zwischen dem sich in der Faser fortpflanzenden Licht und dem Silizium (Mittel).

Wenn ein intensives Lichtsignal in die Faser hineingelassen wird, werden 2 Komponenten im zurückkommenden Spektrum aufgezeigt, welche **Raman-Stockes** und **Raman-Anti-Stockes** genannt werden und Frequenzverschiebungen aufweisen.

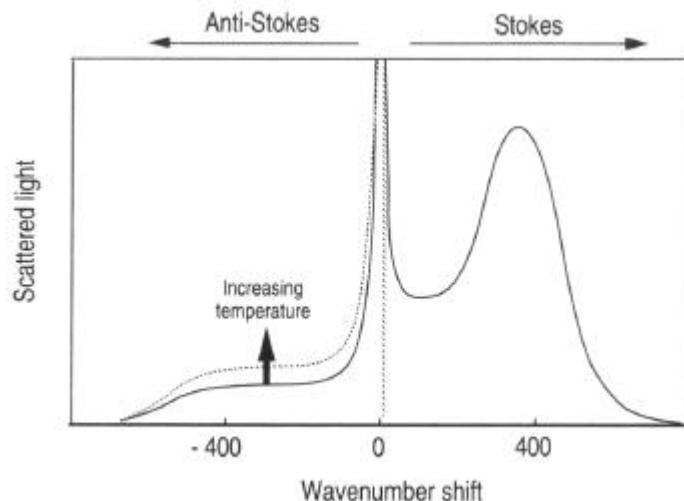


Abb. 19: Raman-System [15]

Die relative Intensität dieser 2 Komponenten ist von der lokalen **Temperatur** der Faser abhängig. Wenn man die Intensität der zurückkommenden Signale als Funktion der Zeit in der Faser aufgenommen wird, ist es möglich, ein Temperaturprofil über die ganze Länge der Faser zu erhalten [26]. Ein solches System, das auf der Ramandiffusion beruht, wird in UK bei der Firma York Sensors vermarktet.

Die **Auflösung** ist in der Größenordnung von 1°C und die **räumliche Auflösung** bei einer Multimodefaser beläuft sich auf weniger als 1 m über eine Messung von bis zu 10 km.

Ein neues System mit Singlemodefasern könnte wahrscheinlich den Bereich auf ca. 30 km mit einer räumlichen Auflösung von 8 m und einer Temperaturauflösung von 2°C erweitern.

Brillouin: verteilte Temperaturmessungen

Die Sensoren für die **Brillouin-Diffusion** sind eine interessante Möglichkeit zur Überwachung von verteilten Temperaturen und Spannungen [27].

Systeme, die Messungen von Spannungs- oder Temperaturänderungen in bis zu 50 km langen Fasern mit einer räumlichen **Auflösung** von 1 m erlauben, können heute ein grosses Entwicklungspotential in der Praxis erleben. Was die Temperaturmessungen anbelangt, ist das Brillouin-System in Konkurrenz mit dem System der Raman-Diffusion, hingegen hat es praktisch keine Konkurrenz im Bereich der Spannungen.

Die Brillouin-Diffusion ist das Resultat der Interaktion zwischen **optischen Wellen** und **Schallwellen** in der Faser.

Thermisch erregte Schallwellen (Phononen - Schallquanten) erzeugen eine periodische Modulation vom **Refraktionsindex**.

Die Brillouin-Diffusion erfolgt, wenn das sich in der Faser fortpflanzende Licht gegen das bewegende Gitter zurückdiffraktiert wird, was zu einer Erhöhung der verschobenen Frequenzkomponente - wie beim Dopplereffekt - führt. Dieser Effekt wird „**Spontane Brillouin-Diffusion**“ genannt.

Schallwellen können auch mit der Einführung in die Faser von 2 gegenseitigen Wellen mit einer Frequenzdifferenz gleich wie die Brillouinverschiebung erzeugt werden.

Durch elektrische Einschnürung wird die bewegende Schallwelle beschleunigt, was zu einer Erhöhung der enthaltenen Phononen führt. Dieser Effekt wird „**Erregte Brillouin-Verstärkung**“ genannt.

Wenn das Probesignal aus einem kurzen Lichtimpuls besteht und seine Intensität in Funktion der gebrauchten Zeit („roundtrip time“) und Frequenzverschiebung gezeigt wird, ist es möglich, ein Profil der Brillouinverschiebung über die ganze Länge der Faser zu erhalten.

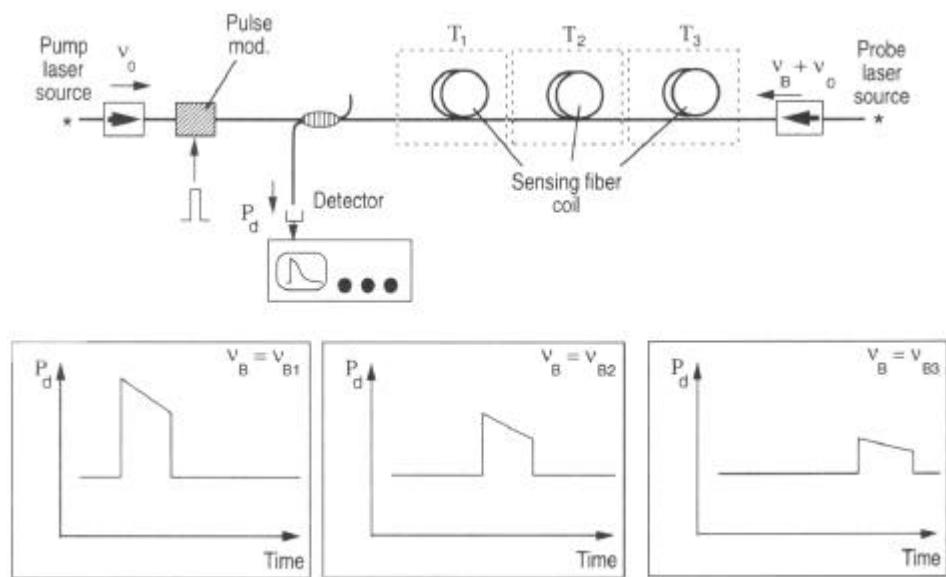


Abb. 20: Brillouin-System [15]

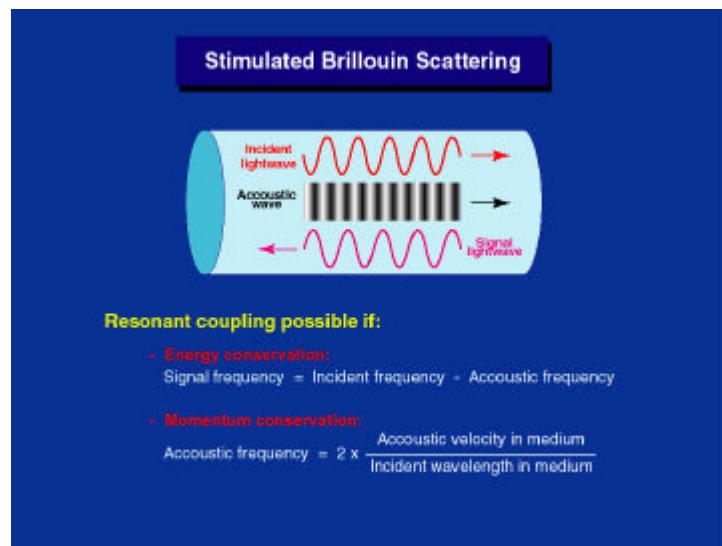


Abb. 21: Brillouin-System [LASBI]

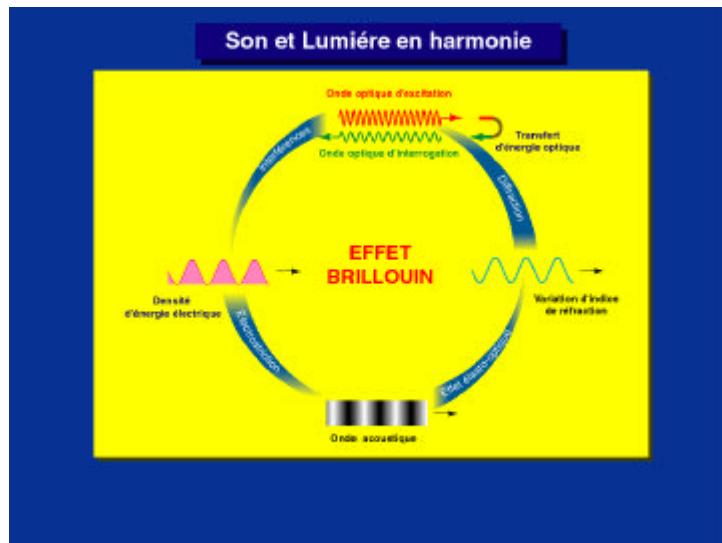


Abb. 22: Brillouin-System [LASBI]

Das Interessanteste bei der Brillouin-Diffusion zur Anwendung in der Sensoristik ist die Abhängigkeit der Temperatur und Spannung von der **Brillouinverschiebung** [28], die das Resultat der Schallgeschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit von der Dichtenänderung im Glas darstellt. Die Messung der Brillouinverschiebung kann durch spontane oder erregte Diffusion erreicht werden. Ein Nachteil bei der Anwendung der spontanen Brillouin-Diffusion besteht in der sehr tiefen, detektierten Signalstärke, was eine spezielle Bearbeitung des Signals und relativ lange Integrationszeiten verlangt.

Ein industrialisiertes System beruhend auf der spontanen Brillouindiffusion wird von der Firma ANDO (Japan) vermarktet.

Systeme, die auf dem Prinzip der erregten Brillouinverstärkung beruhen, haben den Vorteil, dass man mit relativ starken Signalen arbeiten kann, jedoch auch den Nachteil, dass eine sehr stabile Frequenzdifferenz den zwei gegenseitigen Wellen gewährleistet werden muss, damit bedeutende

Signale erzeugt werden. Dies verlangt deswegen eine **Synchronisation** der zwei angewendeten Laser, welche die zwei Signale in die zwei entgegengesetzten Fasereintritte hineinführen.

Das MET (Laboratoire de métrologie der EPFL) hat ein eleganteres System entwickelt [29], das darin besteht, einen integrierten optischen Modulator anzuwenden. Dies erlaubt, beide Wellen aus einer einzigen Quelle zu erzeugen, sodass die Frequenzdifferenz stabil bleibt. Die Firma AESA Cortaillod vermarktet heute ein System namens LASBI mit den erwähnten Eigenschaften.

LASBI hat folgende Eigenschaften: Messungen bis über 10 km Kabel mit einer räumlichen Auflösung von 1 m oder Messungen bis über 50 km mit einer räumlichen Auflösung von 10 m; die Auflösung beträgt 20 μe für die Spannungen und 1°C für die Temperatur. Diese Werte sind den theoretischen Grenzen des Brillouin-Systems sehr nah. Das System ist tragbar und kann bei Feldmessungen angewendet werden.

Da die Brillouin-Frequenzverschiebung von der Temperatur und den Spannungen der Faser abhängig ist, wird das Systemkonzept die Sensitivität des Messsystems bestimmen. Um die Temperatur zu messen, genügt es, Standardkabel der Telekommunikationen einzusetzen. Die Kabel sind so konzipiert, dass die Glasfaser die Verlängerungen des Kabels nicht aufnehmen kann. Die Faser bleibt somit locker und die gemessene Frequenzverschiebung kann nur von **Temperaturveränderungen** verursacht werden. Wenn die Frequenzverschiebung für eine bestimmte Temperatur bekannt ist, ist es möglich, die absoluten Temperaturwerte in jedem Punkt der Faser zu berechnen.

Die verteilte Messung von **Spannungen** verlangt hingegen ein spezielles Sensorenkonzept. Eine mechanische Verbindung zwischen Sensor und Struktur über die ganze Länge der Faser muss gewährleistet werden. Um den Einfluss der Temperatur zu lösen, ist es außerdem nötig, eine Referenzfaser neben dem Sensor zu installieren, mit der man die Temperatureinflüsse ausgleichen kann. Ähnlich wie für die Temperatursensoren ist es möglich, die absoluten Spannungswerte in jedem Punkt der Faser zu berechnen, wenn die Frequenzverschiebung für eine bestimmte Spannung bekannt ist.

Brillouin: Anwendung bei der Luzzzone-Staumauer

Die verteilte Temperaturmessung ist zur Überwachung von Massivbauten sehr interessant.

Die Gruppe der MET der EPFL setzte das LASBI-System zur Überwachung der Temperaturentwicklung vom neuen Beton der Luzzzone-Staumauer ein [30].

Die **Luzzzone-Staumauer** wurde letztthin um 17 m erhöht, um die Kapazität des Stausees zu vergrössern. Die Bauarbeiten erfolgten mit 3 m Schichten. Die Überwachung betraf den letzten einbetonierte Block an den Felsfundationen.

Ein Brillouin-Sensor bestehend aus einem Standard-Telecom-Kabel wurde als Serpentine im Frischbeton installiert. Die **Temperaturmessungen** fingen sofort nach der Betonierung an und erfolgten während länger als 6 Monaten.

Das System hat sich als sehr zuverlässig erwiesen, auch in schwierigen Umweltverhältnissen wie es bei dem Bau einer Staumauer (Pulver, Schnee, grosse Temperaturgradienten,...) der Fall ist.

Die Abbildung 25 zeigt die Temperaturverteilung des Betons 15 und 55 Tage nach der Betonierung. Vergleiche mit lokalen Temperaturwerten, die mit konventionellen Thermofühlern gemessen wurden, zeigen, dass sie innerhalb des Fehlerbereichs der Systeme liegen.

Dies Beispiel zeigt, wie es einfach ist, eine grosse Menge von Messwerten mit einem relativ einfachen Sensor zu ermitteln. Der Einsatz vom Brillouin-System ist besonders sinnvoll zur

Überwachung von Massivbauten, wo konventionelle Systeme eine lange Verkabelung benötigen würden.

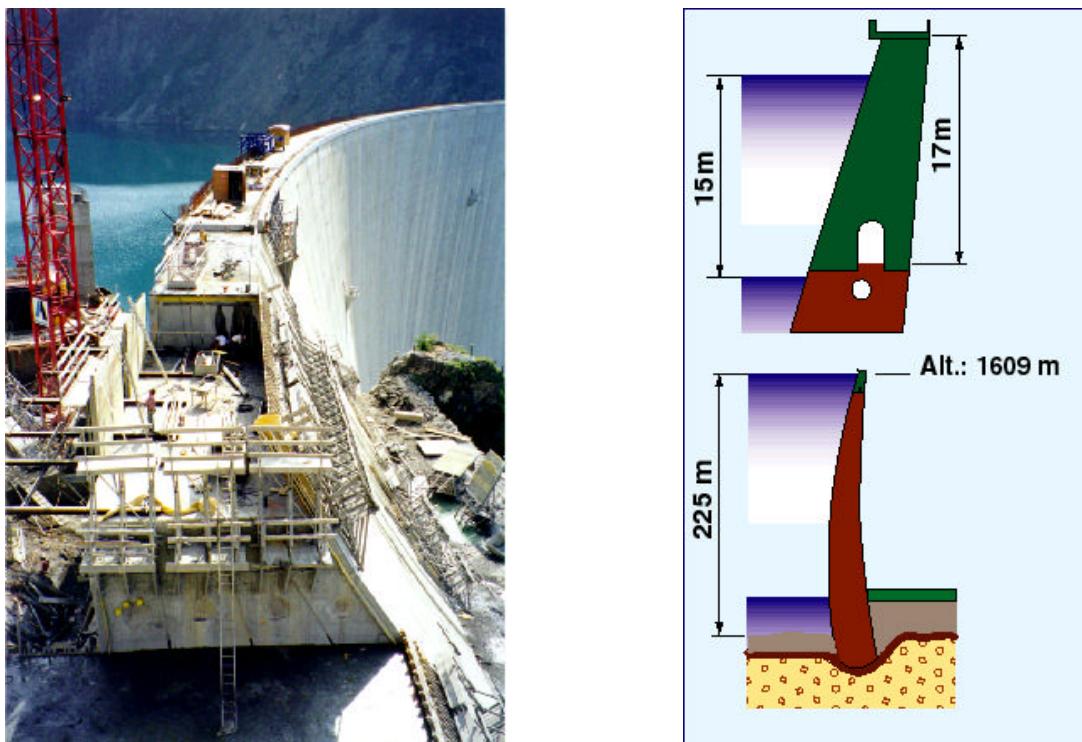


Abb. 23: Bild und Schnitt des Luzzzone-Staudamms

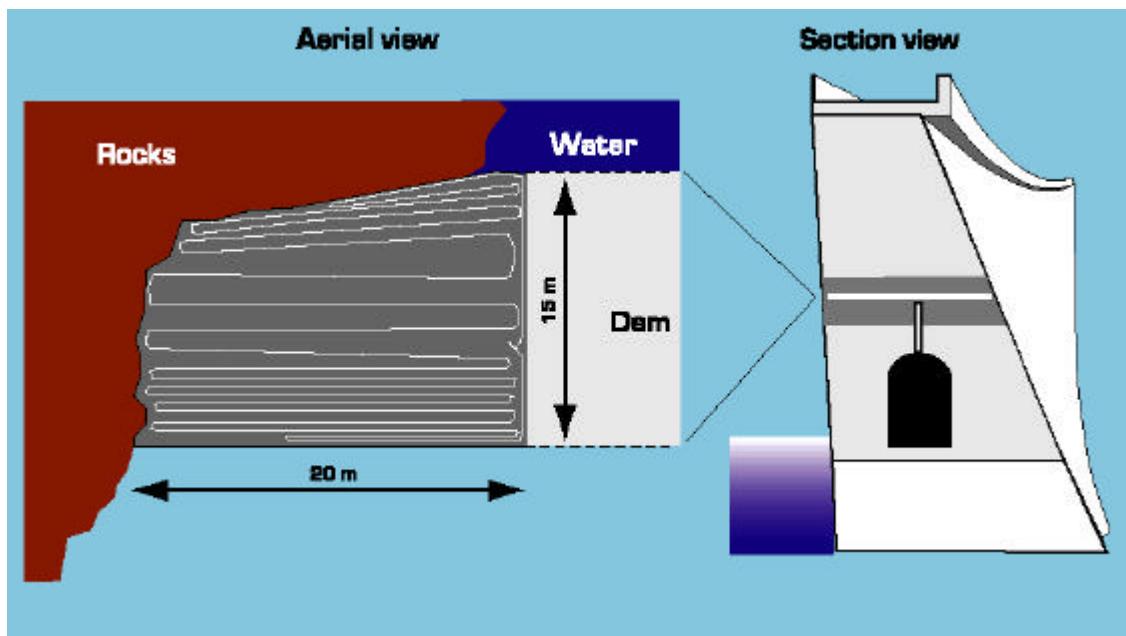


Abb. 24: Schnitt des Luzzzone-Staudamms

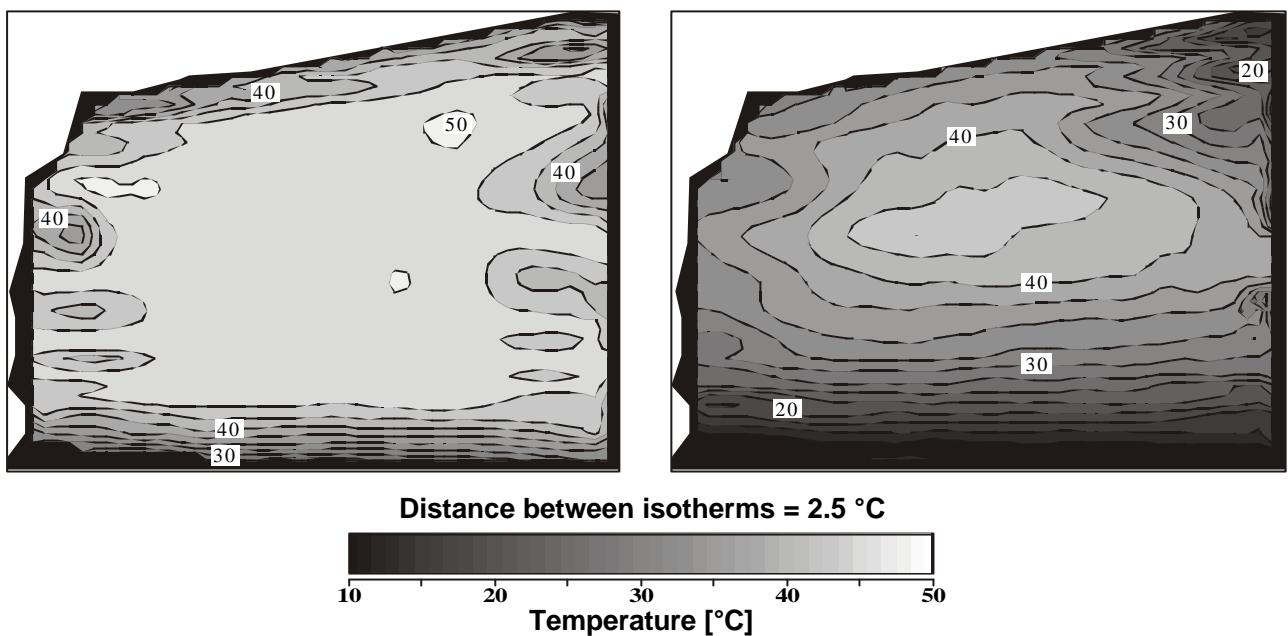


Abb. 25: Messungen beim Luzzzone-Staudamm mit LASBI, 15 und 55 Tage nach der Betonierung [30]

Hydrogel-Sensoren für die verteilte Feuchtigkeitsbestimmung

Zahlreiche Zerstörungen von Materialien wie Beton und Stahl sind chemisch bedingt. Es ist deshalb interessant, die Präsenz und das Gehalt von besonders gefährdenden **chemischen Elementen** wie Chlorid und Feuchtigkeit, sowie die pH-Veränderungen zu überwachen.

Die Messung von chemischen Parametern mit Glasfasersensoren ist noch nicht so verbreitet wie die der physischen Parameter und der Temperatur. Deswegen scheint es uns interessant, die Entwicklung eines Feuchtigkeitssensors anzuführen, der ein spezielles **Hydrogel** enthält, das die Feuchtigkeitsänderung in Formänderung umwandeln kann [31]. Das erlaubt somit, die schwierigere Bestimmung eines chemischen Parameters durch die Bestimmung einer einfacheren Spannungs- oder Verformungsänderung zu ersetzen.

Ein erster Sensor, entwickelt an der Universität in Strathclyde, beruht auf einem Hydrogel, das schmilzt, wenn es sich in einer feuchten Umgebung befindet. Seine Expansion erzeugt eine Mikrokrümmung in der Glasfaser, die durch einen gewöhnlichen OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) gemessen werden kann.

Das System hat ein grosses Anwendungspotential im Bereich der Messung und Bestimmung von **Wassereintritt** und **Feuchtigkeit** in breiten Bauwerken und dort, wo eine Inspektion schwierig ist. In einer ersten Anwendung wurde ein solcher Sensor in einem Vorspannkabel installiert. Mit dem Sensor hat man festgestellt, dass die Injizierung des Kabels unvollkommen war [32].

Mit einem anderen Typ von Hydrogel erwartet man, dass mit diesem Sensor auch andere chemischen Parameter wie z.B. pH-Veränderungen, die mit der Karbonatisierung verbunden sind, bestimmt werden können.

Zusammenfassung

Die Überwachung neuer oder existierender Bauwerke mittels Lichtwellenleitersensoren ist heute ein interessantes **Hilfsgerät zur wirksamen Verwaltung von Konstruktionen**. In vielen Fällen sind die derzeit angewendeten Methoden (wie z.B. die Triangulation, Wasserpegel oder mechanische Extensometer) schwierig und mühsam in der Anwendung und erfordern die Anwesenheit einer Fachperson oder mehrerer Fachleute. Die Komplexität und die daraus entstehenden hohen Kosten haben eine Einschränkung der periodisch durchzuführenden Kontrollen zur Folge. Die erhaltene räumliche Auflösung ist im allgemeinen schwach und nur bei der Feststellung von Anomalien im allgemeinen Verhalten wird man eine detailliertere und genauere Analyse vornehmen. Es besteht also ein reales Bedürfnis nach Verfahren, die eine automatische und permanente Überwachung im Inneren der Struktur mit höchster Präzision und mit einer befriedigenden räumlichen Auflösung ermöglichen [1].

In dieser Hinsicht hat sich das Konzept der intelligenten Struktur („**Smart Structure**“) in vielen Bereichen des Ingenieurwesens, insbesondere in den Bereichen der Aeronautik und der Verbundbaustoffe, als wirksam erwiesen. Diese Strukturart ist mit einem internen Netz von Glasfasersensoren ausgestattet, das die Überwachung unterschiedlicher kritischer Parameter (wie z.B. Deformation, Temperatur, Druck, Eindringen von chemischen Substanzen, usw.) für die Sicherheit oder für eine wirksame Planung der Unterhaltsarbeiten ermöglicht.

Diese meisten Glasfasersensoren weisen gegenüber herkömmlichen Messmethoden erhebliche Vorteile auf. Erwähnt seien hier die hohe Präzision, die niedrigen Kosten der Messungen, das grosse Spektrum von messbaren Parametern, die Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur, elektromagnetischen Feldern (Hochspannungsleitungen, Züge, Gewitter) und gegen Korrosion. Weitere Vorteile sind die kleinen Abmessungen, die Flexibilität bei der Anwendung und die grosse Menge an Informationen, die gewonnen werden können. Zusätzlich ist es zu bemerken, dass der grosse Markt im Bereich der Glasfasertelekommunikation ein interessantes Potential darstellt, das zur Senkung der Preise der verschiedenen Sensoren-Komponenten führen wird.

Die Anwendung des Konzeptes der intelligenten Struktur im Bauwesen erschliesst neue Wege auf dem Gebiet der kurz- und langfristigen Überwachung bedeutender Bauwerke wie Brücken, Tunnels, Staumauern, Landepisten, grösseren Überdeckungen, Geostrukturen, Fels- und Bodenmechanik, usw.

Darum wurde in den letzten Jahren eine grosse Menge von Glasfasersensoren entwickelt. Viele davon konnten sogar industrialisiert werden. Der Erfolg dieser neuen Technologien besteht darin, dass jede von ihnen eine Nische fand, in der sie zweckmässiger oder komplementär zu den konventionellen Technologien angewendet werden können [1].

In der nächsten Zukunft ist es zu erwarten, dass die Messsysteme mit Glasfasersensoren ihre Präsenz auf dem Markt und im Gebiet der Sensorik verstärken werden.

Referenzen

- [1] D. Inaudi, *Application of Civil Structural Monitoring in Europe Using Fiber Optic Sensors*, 1998
- ** [2] Udd, E., *Fiber Optic Sensors*, Wiley, 1991 (**Eine Einführung in die Glasfaseroptik**)
- * [3] Udd, E., *Fiber optic smart structures*, Wiley, New York, 1995 (**Eine Übersicht über Anwendungen von Glasfasersensoren zur Überwachung von Bauwerken**)
- [4] D. Inaudi, *Fiber optic smart sensing, Optical Measurement techniques and applications*, P. K. Rastogi editor, Artech House, pp. 255-275, 1997
- [5] *Proceedings of the Optical Fiber Sensor (OFS) series*. The latest being: "12th International Conference on Optical Fiber Sensors", Williamsbourgh USA, October 1997, OSA 1997 Technical Digest Series Vol. 16.
- [6] D. Inaudi, A. Elamari, L. Pflug, N. Gisin, J. Breguet, S. Vurpillot, *Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures*, Sensor and Actuators A, Vol. 44, pp. 125-130, 1994
- [7] D. Inaudi, *Field testing and application of fiber optic displacement sensors in civil structures*, 12th International conference on OFS '97- Optical Fiber Sensors, Williamsbourgh, OSA Technical Digest Series, Vol. 16, pp. 596-599, 1997
- [8] D. Inaudi, N. Casanova, P. Kronenberg, S. Marazzi, S. Vurpillot, *Embedded and surface mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring*, Smart Structures and Materials Conference, San Diego, SPIE Volume 3044, pp. 236-243, 1997
- [9] S. Vurpillot, N. Casanova, D. Inaudi, P. Kronenberg, *Bridge spatial deformation monitoring with 100 fiber optic deformation sensors*, Smart Structures and Materials Conference, San Diego, SPIE Volume 3043, pp. 51-57, 1997
- [10] D. Inaudi, S. Vurpillot, A Scano, *Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurements of a bridge*, Smart Structures and materials Conference, San Diego, SPIE Volume 2719, 1996
- [11] D. Inaudi, S. Vurpillot, N. Casanova, P. Kronenberg, *Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors*, Smart Materials and Structures Journal, Vol. 7, pp. 199-208, 1998
- [12] D. Inaudi, N. Casanova, G. Martinola, S. Vurpillot, P. Kronenberg, *SOFO: Monitoring of Concrete Structures with Fiber Optic Sensors*, Weimar, 1998
- [13] B. Glisic, D. Inaudi, *Monitoring of Hybrid Structure at the Very Early Age using Fibre Optic Sensors*, 1999, to be published
- [14] L. Falco, O. Parriaux, *Structural metal coatings for distributed fiber sensors*, Opt. Fiber Sens. Conf. Proc., pp. 254, 1992
- * [15] A. Kersey, *Optical Fiber Sensors, Optical Measurement techniques and applications*, P. K. Rastogi editor, Artech House, pp. 217-254, 1997 (**Eine Kurzbeschreibung der wichtigsten Typen von Glasfasersensoren, speziell aber vom Typ Bragggitter**)
- [16] S. T. Vohra, B. Althouse, G. Johnson, S. Vurpillot and D. Inaudi, *Quasi-Static Strain Monitoring During the {Push| Phase of a Box-Girder Bridge Using Fiber Bragg Grating Sensors*, European Workshop on Optical Fibre Sensors, Peeblos Hydro, Scotland, July 1998
- ** [17] P. Ferdinand et al., *Application of Bragg grating sensors in Europe*, 12th International conference on OFS '97- Optical Fiber Sensors, Williamsbourgh, OSA Technical Digest Series, Vol. 16, pp. 14-19, 1997 (**Vollständige Beschreibung der Entwicklung von Bragggittersensoren und ihrer Anwendung in Europa**)
- [18] P. Ferdinand et al., *Mine Operating Accurate Stability Control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating technology: the Brite-EURAM STABILOS Project*, OFS 10 Glasgow, 1994 pp. 162-166. Extended paper: Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 1303-1313, 1995

- [19] M. Bugaud, P. Ferdinand, S. Rougeault, V. Dewynter-Marty, P. Parneix, D. Lucas, *Health Monitoring of Composite Plastic Waterworks Lock Gates using in-Fiber Bragg Grating Sensors*, 4th European Conference on Smart Structures and Materials, July 1998, Harrogate, UK
- [20] P. Ferdinand et al., *Potential Applications for Optical Fiber Sensors and Networks within the Nuclear Power Industry* in Optical Sensors, J. M. Lopez-Higuera ed., Universidad de Cantabria
- [21] R. Brönnimann, Ph. Nellen, P. Anderegg, U. Sennhauser *Packaging of Fiber Optic Sensors for Civil Engineering Applications*, Symposium DD, Reliability of Photonics Materials and Structures, San Francisco, 1998, paper DD7.2
- [22] J. M. Lopez-Higuera, M. Morante, A. Cobo, *Simple Low-frequency Optical Fiber Accelerometer with Large Rotating Machine Monitoring Applications*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 7, pp. 1120-1130, July 1997
- [23] U. Sennhauser, R. Brönnimann, P. Mauron, Ph. Nellen, *Reliability of Optical Fibers and Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring*, Fiber Optic Sensors in Civil Engineering, NJIT Workshop, Newark, May 3-6 1998
- [24] W. Habel et al., *Non-reactive Measurement of Mortar Deformation at Very Early Ages by Means of Embedded Compliant Fiber-optic Micro Strain Gages*, 12th Engineering Mechanics ASCE Conference, La Jolla USA, May 1998
- [25] W. Habel, D. Hofmann, *Determination of Structural Parameters Concerning Load Capacity Based on Fiber Fabry-Perot-Interferometers*, Proc. SPIE, Vol. 2361, 1994, pp. 176-179
- [26] Dakin, J. P. et al., *Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector*, Proc. IEE Colloq. on Distributed Optical Fiber sensors, 1986
- [27] T. Karashima, T. Horiguchi, M. Tateda, *Distributed Temperature sensing using stimulated Brillouin Scattering in Optical Silica Fibers*, Optics Letters, Vol. 15, pp. 1038, 1990
- [28] M. Niklès, L. Thévenaz, P. Robert, *Brillouin Gain Spectrum Characterization in Single-Mode Optical Fibers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 10, pp. 1842-1851, October 1997
- [29] M. Niklès et al., *Simple Distributed temperature sensor based on Brillouin gain spectrum analysi*, Tenth International Conference on Optical Fiber Sensors OFS 10, Glasgow, UK, SPIE Vol. 2360, pp. 138-141, Oct. 1994
- * [30] L. Thévenaz, M. Niklès, A. Fallay, M. Facchini, Ph. Robert, *Truly Distributed Strain and Temperature Sensing Using Embedded Optical Fibers*, Smart Structure and Materials Conference, San Diego USA, March 1998, SPIE Vol. 3330, pp. 301-314 (**Diese Publikation ist eine Übersicht über die grosse Anzahl Anwendungen von Brillouin-Sensoren**)
- [31] W. C. Michie et al., *A fiber Optic/Hydrogel Probe for distributed Chemical Measurements*, OFS 10 Glasgow, 1994, pp. 130-133.
- [32] W. C. Michie, I. McKenzie, B. Culshaw, P. Gardiner, A. McGown, *Optical Fiber Grout Flow Monitor for Post Tensioned Reinforced Tendon Ducts*, Second European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow, October 1994, SPIE Vol. 2361, pp. 186-189.