

# Sofo: Bauwerksüberwachung mit Glasfasersensoren

Autor(en): **Kronenberg, Pascal / Casanova, Nicoletta**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **115 (1997)**

Heft 47

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79349>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Zunahme der Stärke und Häufigkeit lässt sich für die Schweiz aber nicht nachweisen. Wenn heute also von einer bedrohlichen Zunahme der Naturkatastrophen gesprochen wird, ist das weniger auf die erwähnten Veränderungen zurückzuführen als auf den Umstand, dass sich der menschliche Lebensraum ständig ausweitet und damit vermehrt mit gefährlichen Naturereignissen interferiert. Das gilt namentlich für Gebiete, die Murgängen und Hochwasser ausgesetzt sind. Die Aufgaben, die

sich daraus für die Schweiz ergeben, sind zwar gross, aber nicht unlösbar. Einen guten Ausgangspunkt für ihre Bewältigung liefern das neue Wasserbaugesetz und das neue Waldgesetz, die eine umfassende Gefahrenzonenplanung fordern.

Adresse des Verfassers:  
 Daniel Vischer, Prof. Dr.-Ing., Experte NFP 31, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zentrum, 8092 Zürich

Der Artikel stellt die gekürzte Fassung eines Referats dar, das der Autor am 18. September 1997 bei Basler & Hofmann, Zürich, zur Eröffnung der Ausstellung «Der Wald schützt auch Dich» hielt. Die Ausstellung mit 18 thematischen Bildtafeln in Baumform entstand für das Jahresthema 1997 «Naturgefahren, Schutzwald, Mensch» des Internationalen Tags des Waldes und wurde durch den Interkantonalen Rückversicherungsband der kantonalen Gebäudeversicherungen und das Buwal unterstützt.

Pascal Kronenberg, Lausanne, Nicoletta Casanova, Grancia

## Sofo: Bauwerksüberwachung mit Glasfasersensoren

**Im Zeitalter zunehmender Besorgnis bezüglich der Sicherheit und der Langlebigkeit von Bauwerken haben sich Überwachungssensoren von einem akademischen Spielzeug zu einem unerlässlichen Arbeitsinstrument entwickelt. Der Beitrag illustriert ein neuentwickeltes faseroptisches Messsystem, mit dem der Verformungszustand von Bauwerken (insbesondere Brücken, Stau-mauern oder im Grundbau) bequem und zuverlässig überwacht werden kann.**

Im Bauwesen erfordert eine konsequente Sicherheitspolitik die periodische Überwachung wichtiger Bauwerke. Die derzeit benutzten Methoden (wie z.B. die Triangulation, Wasserpegel, Schwingungskabel oder mechanische Extensometer) sind oft mühsam und langwierig in der Anwendung und erfordern die Anwesenheit von Fachleuten. 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 generellen Verhalten wird man eine detailliertere und genauere Analyse vornehmen. Es existiert also ein reales Bedürfnis an einem Instrument, das eine automatische und permanente Überwachung im Inneren der Baustruktur mit höchster Empfindlichkeit und mit einer befriedigenden räumlichen Auflösung ermöglicht.

In dieser Hinsicht hat sich das Konzept des intelligenten Bauwerks (Smart

Structure) in vielen Bereichen des Ingenieurwesens, insbesondere der Aeronautik und bei Verbundwerkstoffen bewährt [1]. Ein intelligentes Bauwerk ist mit einem internen Netz von Sensoren ausgestattet, das die Überwachung unterschiedlicher, sicherheitskritischer Parameter (wie z.B. Verformung, Temperatur, Druck, Vorhandensein von chemischen Substanzen usw.) erlaubt. Ihre Auswertung ermöglicht dann, rechtzeitig effiziente Gegenmassnahmen einzuleiten. Diese können eine aktive Korrektur der Struktur sein, beispielsweise mittels hydraulischer Pressen oder durch die Einleitung von Unterhaltungsarbeiten, unter gewissen Umständen genügen aber auch passive Eingriffe, bei Kunstbauten kann als Beispiel dafür die Einschränkung der zulässigen Last genannt werden (Bild 1).

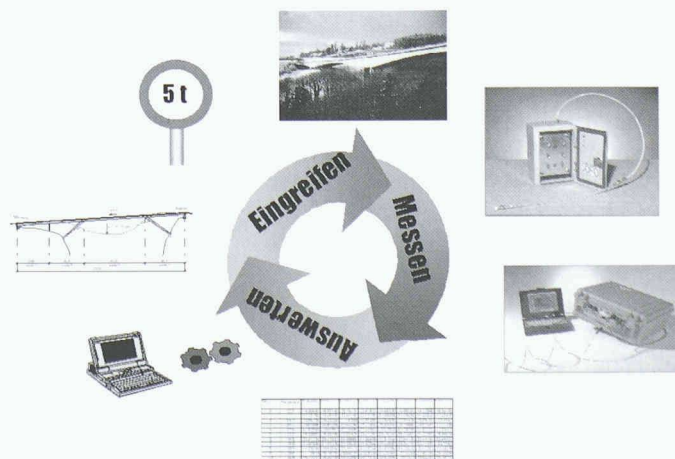
Glasfasersensoren weisen gegenüber herkömmlichen Messmethoden erhebliche Vorteile auf. Erwähnt seien hier das

Dieser Artikel ist eine überarbeitete und aktualisierte Version des am 6. Dezember 1995 in IAS (Nr. 26) erschienenen Textes mit dem Originaltitel «Sofo: Surveillance d'ouvrages par senseurs à fibres optiques» [9]. Der Artikel wurde damals zu Ehren des 60. Geburtstags von Professor L. Pflug publiziert.

grosse Spektrum an messbaren Parametern, die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Felder (Hochspannungsleitungen, Eisenbahnen, Gewitter) und gegen Korrosion, die kleinen Abmessungen, die Flexibilität in der Anwendung, die niedrigen Kosten und die grosse Menge an Informationen, die gewonnen werden kann.

Die Anwendung des Konzepts der Smart Structure erschliesst neue Wege auf dem Gebiet der langfristigen Überwachung von bedeutenden Bauwerken wie Brücken, Tunnels, Talsperren, Landepisten, grossen Platten sowie in der Fels- und Bodenmechanik. In dieser Hinsicht wurden am IMAC<sup>1</sup> der ETH Lausanne Abklärungen und die Entwicklung eines Systems zur Bauwerksüberwachung unternommen, das sich auf die Eigenschaften optischer Fasern abstützt.

1  
 Konzept des intelligenten Bauwerks (Smart Structure)





## Beschreibung des Messsystems

Das Messsystem Sofo<sup>2</sup> basiert auf dem Prinzip der Interferometrie in niedriger Kohärenz (siehe Kasten: Wie funktioniert das Sofo-System?) und wird bei der Verformungsmessung eingesetzt. Entsprechend seiner Funktionsweise eignet es sich für die Messung geringer Verformungen, die sich auch über mehrere Jahre erstrecken kann.

Die Entwicklung des Systems fand im Rahmen eines KTI<sup>3</sup>-Forschungsprojekts am IMAC statt, in Zusammenarbeit mit dem LMS<sup>4</sup>, dem IMM<sup>5</sup> und weiteren Partnern (Kasten: Dank).

Das System besteht aus einer tragbaren und wasserdichten Leseinheit, die über einen externen PC/Notebook kontrolliert wird und einer Reihe von Glasfasersensoren, die für die Installation in verschiedenartigsten Bauwerken und Materialien geeignet sind:

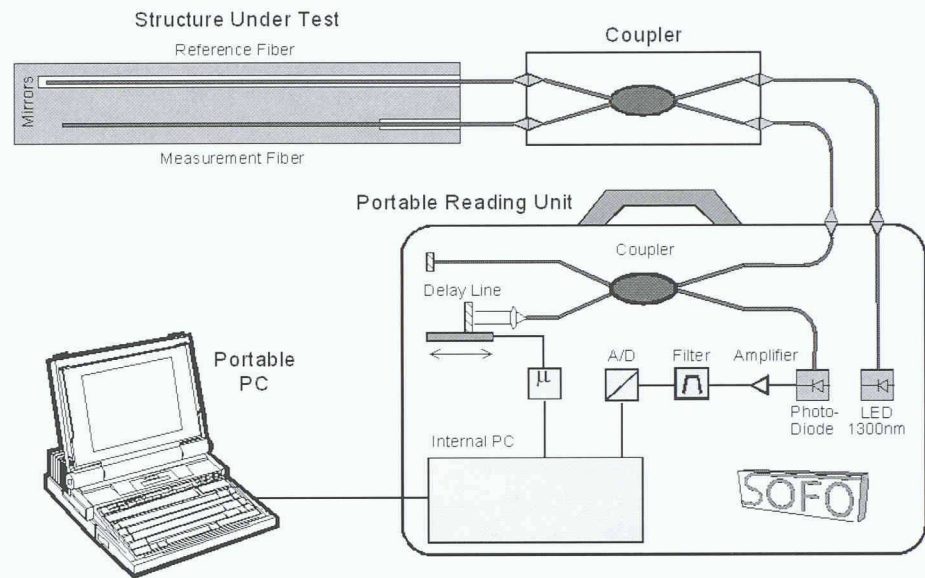
- Bauwerke aus Beton, Metall und Holz oder Verbundmaterialien
- Untertagebau (Felsen)
- Verankerungs- und Vorspannkabel
- Neuartige Baustoffe

Allen Sofo-Sensoren gemeinsam ist deren absolute Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen, elektromagnetischen Feldern und Korrosion sowie ihre Schockresistenz (Vibrator beim Betonieren) [2].

## Mit Sofo realisierte Versuche

### Vorgespannte Betonplatte

Dieser Versuch ist für unser Institut von historischem Interesse, da die Methode Sofo hier erstmals zum Messen der Verformung eines Bauelements angewendet wurde. Sechzehn Glasfasersensoren einfacher, aber robuster Bauweise wurden im Inneren einer frei gelagerten, vorgespannten Stahlbetonplatte (20×5×0,5 m) eingelegt [3]. Diese Platte, die sich in den Räumlichkeiten von IMM in Lugano befindet, ist dank einer pneumatischen Lagerung vom Boden losgelöst. Sie ist als vibrationsfreie Unterlage für Versuche gedacht, bei denen grössere Versuchsobjekte mittels verschiedener optischer Verfahren, wie der holografischen Interferometrie, der Speckle-Interferometrie oder der hochauflösenden Moirétechnik analysiert werden können. Seit ihrem Betonieren am 16. Februar 1993 überwachen Glasfasersensoren das Schwindverhalten der Platte über ihre gesamte Länge. Auf der Grafik (Bild 3), welche die von einem 20 m langen Glasfasersensor gemessene Verformung der Platte zeigt, wird das Schwinden während der ersten drei Monate nach dem



2

Betriebsprinzip des Interferometers in niedriger Kohärenz

Betonieren klar verdeutlicht. Die Platte verkürzte sich dabei um etwa 0,3‰, was auf 20 m etwa 6 mm ergibt. In der Folge stabilisierte sich die Platte und folgte nur noch den Temperaturschwankungen.

Dieser erste Versuch, der zurzeit noch aktiv ist, hat gezeigt, dass es auch mit anfänglich sehr bescheidenen Mitteln möglich ist, Glasfasersensoren zur langfristigen Verformungsmessung von Betonstrukturen einzusetzen.

### Autobahnbrücke über die Venoge

Diese Stahl-Beton-Verbundbaubrücke der A1 im Westen Lausannes wurde 1995 durch eine Fahrbahn erweitert, um dem ständig wachsenden Verkehrsaufkommen in diesem Flaschenhals gerecht zu werden. An ihr wurde unter Beihilfe des ICOM-EPFL und des Kantons Waadt zum ersten Mal ausserhalb Laborbedingungen unser Messsystem eingesetzt [4]. Dreissig Verformungssensoren aus Glasfasern wurden in die Druckplatte einbetoniert und messen in drei Abschnitten die Verformungen des Betons auf einer Breite von 5,7 m und über eine Länge von 1 bis 2 m. Das Verhalten des jungen Betons und die Verformung unter Last konnten so quantifiziert werden. Die am IMAC hergestellten Glasfasersensoren waren rasch, und ohne den Bauablauf zu stören, eingelegt. Dies ist um so bemerkenswerter, wenn man bedenkt, dass die Installation der Sensoren in der Bauplanung ursprünglich nicht vorgesehen war. Die Glasfasersensoren haben das Betonieren nicht nur nicht behindert, sondern haben sie auch unbeschadet überstanden und gute Messergebnisse geliefert.

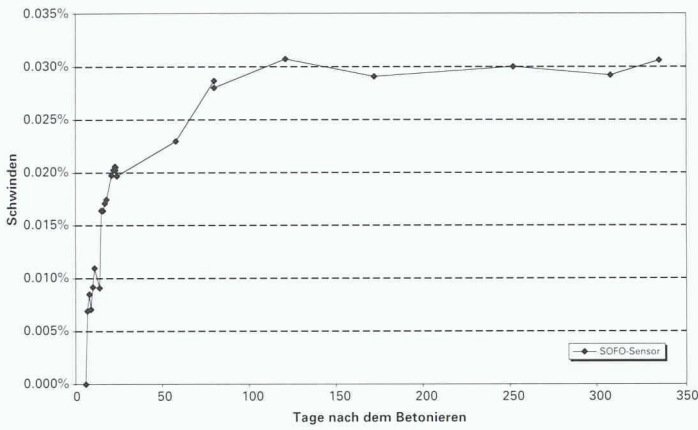
Die Messungen mit Glasfasersensoren haben u.a. die Ermittlung des Quellens und

Schwindens während der Festigungsphase des Betons einer Verbundbaubrückenplatte erlaubt (Bild 4). Dieser erste Feld-einsatz des Messsystems war sehr positiv und bewies, dass die Sensoren und die Leseinheit auch im harten Baustellenalltag zuverlässig funktionieren. Das Messen des Betonquellens darf darüber hinaus als Neuheit in der Bauwerksüberwachung gewertet werden.

### Wie funktioniert das Sofo-System?

Vom physikalischen Prinzip her gesehen beruht das System auf der Interferometrie in niedriger Kohärenz (Bild 2). Das infrarote Licht einer LED wird in eine Monomodefaser vom Typ Telecom geführt und durch einen Koppler in zwei Fasern übertragen, die in der zu überwachenden Struktur installiert sind (Sensor). Die erste Faser - Messfaser genannt - ist an der Struktur mechanisch befestigt und verfolgt deren Verformungen. Die zweite Faser - Referenzfaser genannt - ist lose in einem Rohr, parallel zur Messfaser installiert. Ein am Ende jeder Faser platzierter Spiegel reflektiert das Licht in den Koppler zurück, der beide Strahlen zusammenführt und sie zum Analysator weiterleitet (Leseinheit). Der Analysator besteht aus zwei Fasern, deren Längenunterschied von einem mobilen Spiegel exakt kontrolliert wird. Beim Verschieben des Spiegels erzielt man nur dann eine Modulation des von der Photodiode empfangenen Signals, wenn der Längenunterschied zwischen den Fasern im Analysator den Unterschied zwischen den in der Struktur installierten Fasern kompensiert, und zwar mit einem Fehler, der geringer ist als die Kohärenzlänge der Quelle (in unserem Fall einige Hundertstel Millimeter). Bei jeder Messung wird eine neue Kompensationsposition erhalten, die der Verformung der Struktur im Vergleich zu früheren Messungen entspricht. Das Gerät kann zwischen zwei Messungen vom Bauwerk getrennt und zur Überwachung anderer Strukturen benutzt werden.





3  
Messung des Schwindverhaltens der Platte während des ersten Jahres mittels einer 20 m langen, optischen Faser

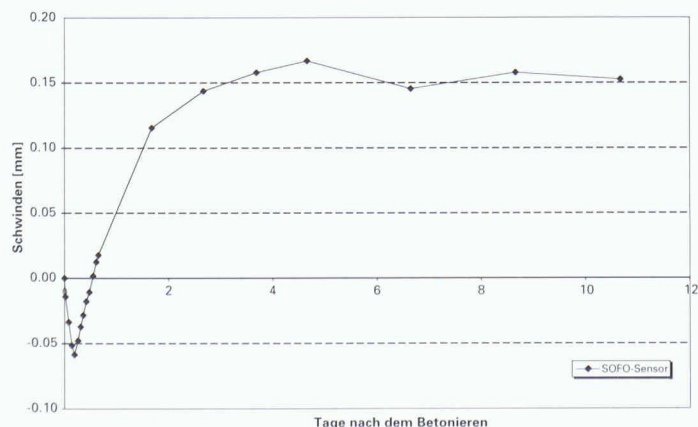
**Bestimmung der Biegelinie durch doppelte Integration der Krümmungspolynome**

Zurzeit besteht ein grosses Interesse an Durchbiegungsmessungen bei Brücken unter kurzzeitigen Extremlasten (Belastungsversuch) oder betreffend ihres Langzeitverhaltens (Kriechen). Um die Glasfasersensoren auf diesem Gebiet auch einsetzen zu können, wurde ein Algorithmus entworfen, der die Durchbiegung eines Balkens anhand der Messungen generiert, die an den in längs und zueinander parallel ausgerichteten Ebenen liegenden Glasfasersensoren erhoben werden [5].

Der Algorithmus basiert auf der Wechselwirkung zwischen Durchbiegung und Krümmung eines durchgebogenen prismatischen Elements. Plaziert man einen Sensor auf der der Biegerichtung zugewandten Seite und einen zweiten auf der gegenüberliegenden Seite einer geeigneten Balkenzelle, kann man, unter Anwendung dieses mathematischen Modells, mit drei Zellen pro Balkenelement<sup>7</sup> (bei gleichmässiger Belastung, sonst mehr Zellen) dessen Krümmungspolynom ermitteln. Wenn man die gefundenen Krümmungspolynome nun zweimal integriert und mittels der Formänderungsbedingungen (Neigung, Durchbiegung) an den Schnittstellen zusammenfügt, erhält man

die Biegelinie des ganzen Balkens. Jetzt braucht es bloss noch mindestens zwei geeignete Randbedingungen (beispielsweise Setzungen der Auflager), um die Biegelinie dem absoluten (äusseren) Referenz-Koordinatensystem anzupassen. Damit kennt man nun die genaue, absolute Durchbiegung des Balkens über seine ganze Länge (Bild 5). Anders ausgedrückt genügen 12 Sensoren (6 Zellen) und zwei Randbedingungen, um die exakte Biegelinie eines gleichmässig belasteten Zweifeldträgers zu bestimmen.

Die Bestätigung dieses Modells wurde am IMAC im Rahmen von Diplomarbeiten an einem mit 12 Glasfasersensoren (6 Zellen) ausgerüsteten Holzbalken erbracht. Auf der Grafik (Bild 6) können wir die auf den Glasfasern basierende, berechnete Verformung mit den anhand der mechanischen Messuhren ermittelten Messpunkte vergleichen. Die Übereinstimmung ist für den einfachen Balken mit zentraler Punktlast (mittlere Abweichung kleiner als 1%) sehr gut und weniger gut für den Zweifeldträger mit verteilter Last (mittlere Abweichung um 20%). Es bleibt anzumerken, dass bloss die beiden seitlichen Auflager als Randbedingungen eingesetzt wurden. Beim Zweifeldträger bietet somit die gefundene Lage des mittleren Auflagers einen weiteren Kontrollpunkt.



4  
Verformungsmessung des jungen Betons der Fahrbahnplatte der Verbundbaubrücke. Die Quell- und Schwindphasen sind klar ersichtlich

Es ist interessant zu erwähnen, dass das benutzte Modell wenig fehleranfällig ist: Eine Monte-Carlo-Simulation ergab beim verteilt belasteten Zweifeldträger (und somit ohne Messredundanz, d.h. bei 6 Messzellen), ausgehend von den zu erwartenden Messfehlern, für die Durchbiegung eine typische Standardabweichung von weniger als 0,4 mm bei einer maximalen Balkenauslenkung von 7 mm. Liegt eine Messredundanz vor, verringert sich der Fehler noch zusätzlich. Somit ist die erwähnte Abweichung zwischen den Messuhren und den mittels des Sofo-Systems ermittelten Werten beim getesteten Zweifeldträger definitiv nicht nur auf Messfehler zurückzuführen. Es ist möglich, dass der Unterschied zwischen den beiden Messtechniken durch ungenaue Hypothesen bezüglich der Randbedingungen (Setzungen der Auflager) oder durch im Modell nicht berücksichtigte strukturelle Singularitäten (Scherverformungen unter hoher Querkraft) zustande gekommen ist.

Anhand einer Parallelstudie konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Modell auch unter Rissbildung (Beton) gut funktioniert. Ein entsprechender Versuch wurde am IMM in Zusammenarbeit mit Bouyges an einem vorgespannten Balken aus Reaktivpulverbeton (RPB)<sup>8</sup> mit Mikrobewehrung (Stahlfasern) unternommen. Das Modell hat sich somit als praxistauglich erwiesen.

**Autobahnbrücke über die Versoix**

Die aus den frühen siebziger Jahren stammende Versoix-Brücke ist eine doppelt geführte, dreihundert Meter lange, vorgespannte und offene Betonkastenbrücke, welche die A1 vor die Tore Genfs führt. Im Frühling 1996 wurde an ihr eine Fahrbahnplatten-Erweiterung in Angriff genommen, die in Zukunft die geäusserten Sicherheitsbedenken (keine Pannestreifen) ausräumen soll.

Das vorgestellte Berechnungsmodell zur Bestimmung der Biegelinie eines Balkens konnte dank dieses Projekts umfassend in die Praxis übertragen werden. Neben der vertikalen und horizontalen Durchbiegung wird hier auch die Torsion dieses asymmetrischen, in einer Kurve liegenden Kunstbaus untersucht [6].

Das IMAC wurde während der Projektierungsphase vom verantwortlichen Ingenieurbüro beauftragt, ein Überwachungskonzept auf Basis von Glasfasersensoren auszuarbeiten. Das Pflichtenheft verlangte, dass die Messungen dazu dienen sollten, einerseits die Interaktion zwischen dem bestehenden und dem neuen Beton besser zu kennen, andererseits aber auch dazu, die Biegelinien unter verschiedenen Lastfällen mit dem erwähnten Berech-



nungsmodell zu ermitteln. Diese Zielsetzungen führten uns dazu, ein komplexes, gegen 100 Glasfasersensoren umfassendes 3D-Netzwerk zu entwerfen.

Leider konnte das Überwachungssystem nicht über die ganze Brückenlänge installiert werden. Budgetrestriktionen zwangen uns, die Ausrüstung auf die ersten beiden Brückenfelder (von total 6) zu fünf bzw. sieben 4m-Messzellen zu beschränken. Acht parallele Sensoren pro Messzelle erlauben uns dagegen, dank Redundanz präzise Angaben bezüglich der Krümmungsebene zu machen (Bild 7).

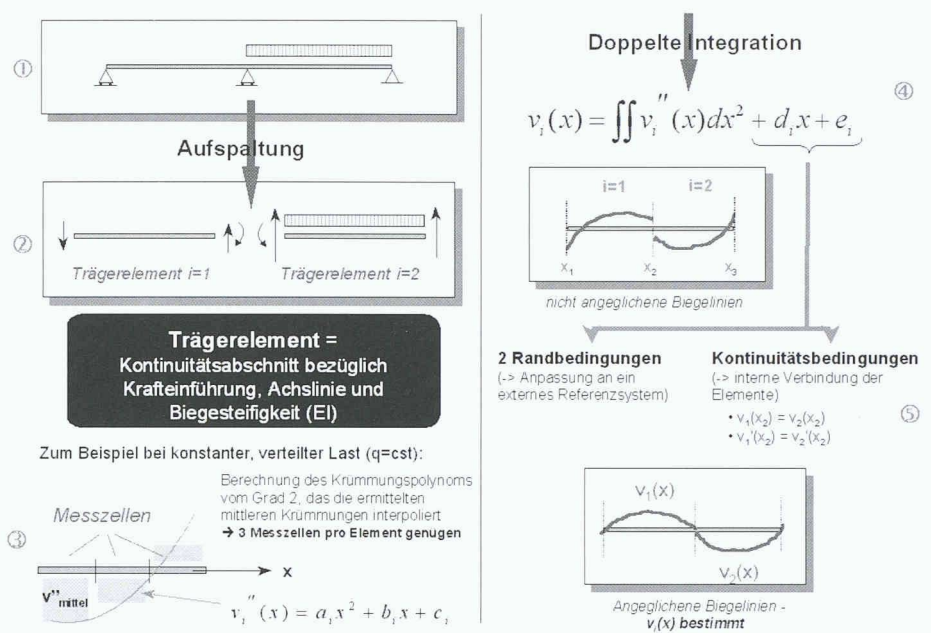
Ein zentraler Punkt während der Installationsphase war die Bedingung, den Baustellenbetrieb nicht zu behindern. Es war deshalb wichtig, ein exaktes Timing einzuhalten; vor allem dann, wenn es darum ging, als letzte Arbeitsgruppe vor dem Betonieren die Sensoren noch rechtzeitig in die Bewehrung einzubringen. Es bleibt anzufügen, dass weder die Eisenleger noch die Betoniererequipe über den Einsatz von Glasfasersensoren informiert waren (Bild 8).

Bei Einreichung dieses Artikels wurde die von uns ausgerüstete Brücke gerade fertiggestellt und wieder dem Verkehr übergeben und die zweite Brücke in Angriff genommen. Alle vorhandenen Messresultate beziehen sich somit auf Verformungen, die sich während der Bauphase ereignet haben (Interaktion alter neuer Beton, Schwinden des frischen Betons, Spannung der Vorspannkabel, Aussentemperatureinfluss usw.). Immerhin konnten aus den Messungen bereits wertvolle Informationen herausgelesen werden. Sie werden den verantwortlichen Ingenieuren helfen, während den Arbeiten an der zweiten Brücke deren Verhalten besser vorzusehen und anhand von Korrektur-eingriffen die an der ersten Brücke entdeckten Probleme zu beheben.

Es bleibt zu erwähnen, dass dieses Brückenprojekt eine Vorreiterstellung im Bereich der Bauwerksüberwachung durch Glasfasersensoren innehat. Dem Entwurf und der Installation des Netzwerks wurde deshalb besondere Sorgfalt gewidmet. So sind beispielsweise alle Glasfasersensoren über optische Verlängerungen an einen zentralen Messschrank im Widerlager gekoppelt, von wo aus sie problemlos abgefragt werden können. Es ist auch vorgesehen, später (Ende 1997) per Modem eine Fernüberwachung einzurichten.

**Emosson-Staumauer**

Das Emosson-Projekt hatte zum Ziel, einen optischen Rocmeter auf Basis des Sofo-Prinzips zu entwickeln, der einen klassischen Stangenextensometer ersetzen kann [7]. Dieses Forschungsprojekt wurde



**5** Funktionsweise des angewandten Algorithmus, mit dem die exakte Biegelinie eines Balkens anhand der mit den Glasfasersensoren gemessenen Krümmung ermittelt werden kann

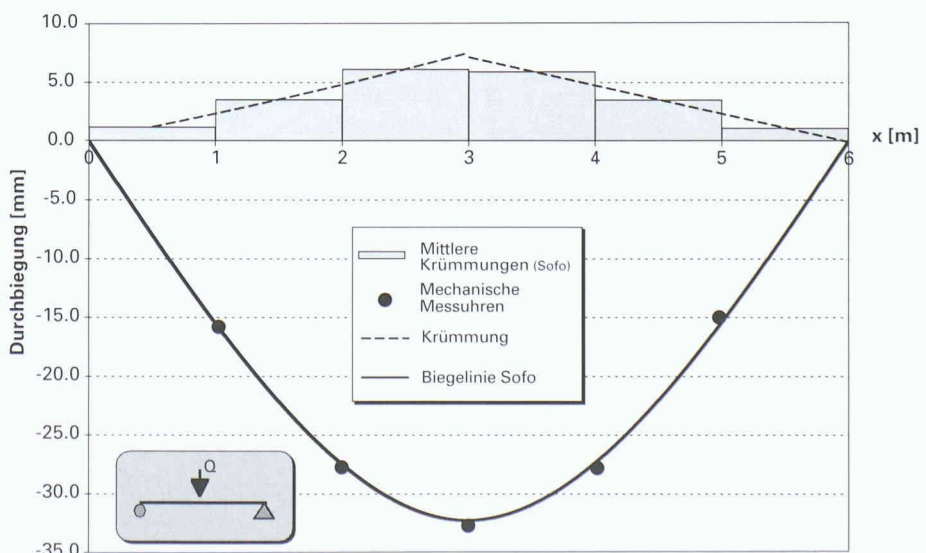
im Herbst 1996 auf Anfrage der Emosson Elektrizitäts AG lanciert und sieht im wesentlichen den Austausch von zwei 30 bzw. 39 m langen Rocmetern vom Typ Huggenberger vor. Anschliessend wird eine einjährige Messperiode folgen, die dem Vergleich und zur Bestätigung der Resultate dienen soll. Die entsprechenden Rocmeter befinden sich in der auf 1900 m ü.M. liegenden, 180 m hohen und 550 m langen Emosson-Bogenstaumauer (Baujahr 1972).

Die hauptsächlich Schwierigkeiten bei der Entwicklung des Sensors haben sich vor allem durch die vorgegebenen geometrischen Umstände des Bohrlochs ergeben. Dies bedeutete einerseits, dass

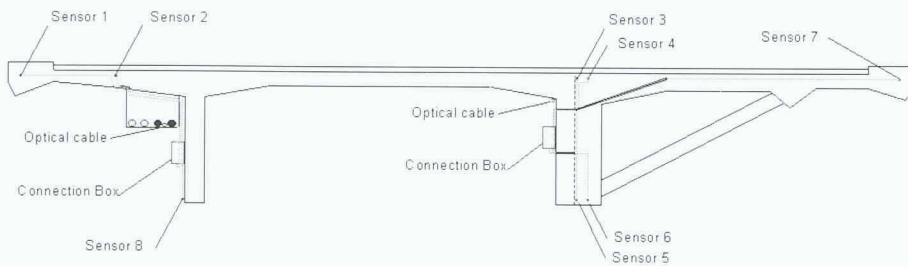
der Sensor der Länge sowie dem Querschnitt des vorhandenen Bohrlochs entsprechen musste, andererseits mussten die Verankerungsteile kompatibel zum Bajonetverschluss des Stangenextensometers sein. Die Herausforderung bestand somit darin, einen äusserst schlanken Sofo-Sensor zu entwerfen, der ohne Abänderung des bestehenden Sensorenkontextes eingesetzt werden konnte (Bild 9).

Nach ersten missglückten Versuchen, die auf ein Kriechen des Umhüllungsrohrs zurückzuführen waren, haben wir inzwischen entsprechende Korrekturen am Sensordesign vorgenommen und sind nun daran, eine zweite Messreihe zu starten.

**6** Resultat des Algorithmus für einen einfachen Balken mit zentraler Punktlast. Vergleich der durch die Sofo-Sensoren ermittelten Biegelinie mit den fünf mechanischen Messuhren







7

Glasfasersensoren-Setup der Versoix-Autobahnbrücke. Gegen 100 Sofo-Sensoren wurden zu einem 3D-Netzwerk versponnen, um u.a. die Durchbiegung zu ermitteln

### Weitere Projekte

Im Sinne einer Diversifikation wurde das Sofo-Messsystem von Beginn an in zahlreichen weiteren potentiellen Einsatzgebieten angewendet und getestet.

Im Fels- und Grundbau: Die Ausrüstung von 20 m langen Felsankern mit Sofo-Sensoren zur Bestimmung ihrer Ausdehnung unter Last. Dieser Versuch hat die Machbarkeit des Einsatzes von Glasfasersensoren in Zugankern nachgewiesen. Mehr als die Hälfte der Sensoren haben die Installation, die Injektion und das Spannen sowie 6 Monate Feldversuch überstanden.

Die Installation von Glasfasersensoren in einer Spritzbeton-Schicht zum Messen der Verformung des Stützgewölbes eines Tunnels: Fasern mit einer äusseren 0,9 mm Nylonhülle haben das Betonieren schadlos überstanden. Diese Tatsachen haben uns sehr zuversichtlich gestimmt, was die Langzeitüberwachung von Tunnelverkleidungen durch das Sofo-System angeht.

Die Messung der vertikalen Verformung in Pfählen: Das LMS hat mehrere Machbarkeitsstudien unternommen, um die Installation von langen Deformations-

8

Sofo-Sensor bei seiner Installation im Bewehrungsnetz



sensoren in Bohrpfählen im Hinblick auf einen Austausch klassischer Extensometer zu überprüfen [8].

Die Messung der internen Verformung einer Stahl-Beton-Verbunddecke von 14x2 m unter Biegung im Hinblick auf die Bestimmung der Spannungsverteilung: Dieser Versuch wurde in Zusammenarbeit mit dem ICOM<sup>9</sup> realisiert und hat erlaubt, den Gleitfaktor zwischen den beiden Materialien sowie die Folgen des teilweise verhinderten Schwindens zu bestimmen (Rissbildung).

Laborversuch in Zusammenarbeit mit dem MCS<sup>10</sup> der EPFL an einem mit vier Sofo-Sensoren ausgestatteten Betonplattenstreifen zur Ermittlung seiner internen Verformung unter zyklischer Belastung ( $f=4,5$  Hz). Die Sensoren konnten bis zum Bruch der Platte (bei etwa 17 Millionen Zyklen) aufschlussreiche Daten vermitteln. In einer Nebenstudie versuchten wir ausserdem, anhand einer geeigneten statistischen Auswertung eines fortlaufend gemessenen Sensors eine «pseudodynamische» Verformungsmessung zu erhalten. Es war somit möglich, trotz Messzeiten von über 10 Sekunden präzise Angaben über die dynamischen Maximalverformungen der Platte zu machen.

In Kunstbauten: In der Autobahnbrücke der Lutrive (A12 / VD) aus dem Jahre 1972 wurden Sofo-Sensoren über eine Kragarmlänge installiert, um die Durchbiegung beziehungsweise die Torsion desselben unter variablem Temperaturgefälle zu analysieren. Dieses Projekt wurde durch das kantonale Baudepartement mitfinanziert, das in der Brücke strukturelle Unregelmässigkeiten vermutete.

In der Bauphase der neuen Moesa-Eisenbahnbrücke wurde mittels Sofo-Sensoren die horizontale Verformung gemessen, die sich während der Brückenverschiebung ergab.

In Kernkraftwerken: Die Entwicklung eines Hochtemperatur-Deformationsensors auf Sofo-Basis, der zur Anwendung im

KKW-Bereich bestimmt ist. Die Studie wurde von Electricité de France in Auftrag gegeben und beinhaltete die Entwicklung und den Test eines Sofo-Sensors, der im Rahmen einer Unfallsimulation in einem Reaktorhüllenmodell mit Temperaturen bis 180°C eingesetzt wurde. Die typischen Eigenschaften dieses Sensors (Temperaturunempfindlichkeit, Fernüberwachung) kamen dabei besonders zur Geltung.

### Vorgesehene Entwicklungen

Zurzeit sind verschiedene Entwicklungsprojekte im Gange, die sich zum Teil auch im Rahmen von Doktorarbeiten abspielen (Projekt Sofo 2001).

Auf Seite des Messgeräts wird die Forschung in Richtung dynamischer Messung, mit welcher die herkömmlichen Sofo-Sensoren fortlaufend gemessen werden können, sowie in Richtung Multiplexing vorangetrieben. Dank dem Multiplexverfahren kann eine höhere Dichte von Messpunkten, die vom Apparat ohne manuellen Eingriff abgelesen werden können, erreicht werden. Im weiteren soll die bereits erwähnte Fernüberwachung verwirklicht werden.

Was die Glasfasersensoren anbelangt, sind wir auf eine Diversifikation ausgerichtet. Einerseits sollen die Verformungssensoren neue Impulse bekommen (feine Sensoren z.B. für Mörtelschichten, lange Spezialsensoren für die Geotechnik, aber

### Technische Merkmale des Sofo-Systems

- Auflösung: 2 µm, unabhängig der Messlänge
- Linearität: ≤ 0,2%
- Messbereich: +1,0% Verlängerung, -0,5% Verkürzung, max. 150 mm
- Messlänge: von 5 cm bis über 100 m
- Entfernung Sensor-Leseinheit: max. 2 km
- Abweichung: unter der Messgrenze
- Keine Abgleichung notwendig
- Anzahl der Messpunkte je Faserpaar: 1 (>10 im Multiplexing-Verfahren)
- Mehrere Sensoren können über einen optischen Umschalter (optical switch) vollautomatisch gemessen werden.
- Messzeit pro Sensor: weniger als 10 s
- Tragbar
- Stromversorgung: Netz 220 V, wiederaufladbare interne Batterie (ca. 500 Messungen), Autobatterie
- Gehäuse: abgedichtet, 460x390x170 mm
- Gewicht: 13 kg (mit Batterie)
- Betriebssoftware: Windows95-kompatibel, vollautomatische und unbewachte Durchführung und Verarbeitung von Messreihen, komfortables Datenmanagement (Verwaltung der Messreihen von mehreren Sensoren und Bauwerken in einer Datenbank), Möglichkeit, Resultate für weitere Analysen zu exportieren.





9

Installation eines faseroptischen, 30 m langen Extensometers in der Emosson-Staumauer

auch davon abgeleitete Modelle zur Temperatur- oder Druckmessung), andererseits sollen chemische Glasfasersensoren entwickelt werden, die mit dem vorhandenen Messgerät zum Beispiel die Feuchtigkeit oder den pH-Wert (wichtig im Stahlbeton) zu messen imstande sind.

Schliesslich wird auch die Installationstechnik der Sensoren und die computerunterstützte Auswertung und Darstellung (Konzept der «Augmented Reality») der Messdaten weiterentwickelt, ganz im Hinblick auf eine bestmögliche Integration ins Konzept der «Smart Structures» im Bauwesen.

## Zusammenfassung

Die Glasfasertechnik stellt ohne Zweifel einen Technologiesprung in der Bauwerksüberwachung dar. Sie wird in Zukunft neue Massstäbe im Sensorbereich setzen, was Messgenauigkeit und -zuverlässigkeit anbelangt. Spezialisierte Computer Routinen werden eine beschleunigte Datenbereinigung und auf den Benutzer ausgerichtete, automatisierte Messauswertung anbieten. Im übrigen macht diese Technik von optischen Bauteilen Gebrauch, die in der Telekommunikation üblicherweise eingesetzt werden und somit vom dort herrschenden Preiserfall gleichermaßen betroffen sind. Interessant ist vor allem die Tatsache, dass das Herzstück der Sensoren, die optische Faser, ebenso die Rolle des eigentlichen Sensors wie die des Informationsträgers übernimmt.

Ein weiterer Pluspunkt auf der Sensorseite ist seine Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern sowie Korrosion, was ihn auch für kritische Anwendungen in schwierigem Umfeld interessant macht, wo traditionelle elektrische oder mechanische Sensoren kaum eingesetzt werden können (Untertagebau, Staumauern usw.).

Somit steht nun den um die Bauwerkssicherheit besorgten Instanzen – vom Ingenieur bis zum Bauherr – ein neues, effizientes und vor allem zuverlässiges Hilfsmittel zur Verfügung, ihre Verantwortung auch wahrzunehmen; ganz im Sinne des Smart-Structure-Konzepts «Messen – Auswerten – Eingreifen».

Adresse der Verfasser:

Pascal Kronenberg, dipl. Bauing. ETH, IMAC-DGC, EPFL, 1015 Lausanne, Nicoletta Casanova, dipl. Bauing. ETH/SIA, Smartec SA, via al Molino 6, 6916 Grancia

## Anmerkungen

<sup>1</sup>Institut de mesure et analyse des contraintes du département de génie civil de l'EPFL, Prof. L. Pflug

<sup>2</sup>Französisches Akronym für Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques

<sup>3</sup>Kommission für Technologie und Innovation

<sup>4</sup>Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, Prof. L. Vuillet

<sup>5</sup>Istituto Meccanica dei Materiali SA in Grancia

<sup>6</sup>Institut de Béton armé et précontraint de l'EPFL, Prof. R. Favre

<sup>7</sup>Eine Balkenzelle ist ein Messabschnitt eines Balkens. Dieser entspricht üblicherweise der Länge der dort eingesetzten Sensoren. Aus den Messungen der Sensoren einer Zelle kann der mittlere Krümmungswert bestimmt werden. Ein Balkenelement hingegen besteht aus mehreren Zellen. Es ist ein Teilstück des Balkens mit verteilter Belastung und Krafteinführung an den Abschlüssen. Der Grad seines Durchbiegungspolynoms hängt vom eingeführten Lastfall ab. Bei gleichmässiger Belastung beispielsweise ist das Krümmungspolynom vom Grad 2 und das Durchbiegungspolynom somit vom Grad 4.

<sup>8</sup>Dieser Beton besitzt eine etwa 10mal höhere Zug- und Druckfestigkeit im Vergleich zu einem herkömmlichen Standardbeton (B35/25).

<sup>9</sup>Institut de construction métallique de l'EPFL, Prof. M. Hirt

<sup>10</sup>Maintenance, construction et sécurité des ouvrages de l'EPFL, Prof. E. Brühwiler

## Dank

Die Autoren möchten sich bei allen Personen und Gruppen bedanken, die in irgendeiner Weise am Sofo-Projekt beteiligt sind oder waren; insbesondere dem IMM in Grancia/Lugano, der Firma Smartec SA in Grancia/Lugano, der Firma Diamond SA in Losone, Prof. L. Vuillet, M. Pedretti, R. Passera, D. Inaudi, S. Vurpillot, R. Delez, P. Colombo, A. Osa-Wyser, J.-M. Ducret, P. Mivelaz sowie den Forschungsteams am IMAC, LMS, IBAP<sup>6</sup>, ICOM und MCS der EPFL.

Dieses Projekt wurde durch die KTI und die EPFL finanziell unterstützt.

## Weitere Informationen über Sofo

<http://imacwww.epfl.ch> oder  
<http://www.smartec.ch>

## Literatur

[1]

Culshaw B.: Smart Structures and Materials. Ed. 1, Artech House 1996

[2]

Inaudi D., Casanova N., Kronenberg P., Vurpillot S.: Embedded and surface mounted sensors for civil structural monitoring. Smart Structures and Materials, SPIE Vol. 3044-23, San Diego March 1997

[3]

Pflug L., Pedretti M.: Construction of a 100-tonns holographic table. Practical holography VII: Imaging and materials, SPIE Volume 1914, 50-54, San Jose 1993

[4]

Vurpillot S., Inaudi D., Ducret J.-M.: Bridge monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results. Smart Structures and materials, SPIE Volume 2719-16, San Diego February 1996

[5]

Vurpillot S., Inaudi D., Scano A.: Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurements of a bridge. Smart Structures and materials, SPIE Volume 2719-05, San Diego February 1996

[6]

Vurpillot S., Casanova N., Inaudi D., Kronenberg P.: Bridge spatial displacement monitoring with 100 fiber optic sensors deformations: sensors network and preliminary results. Smart Structures and Materials, SPIE Vol. 3043-07, San Diego March 1997

[7]

Kronenberg P., Casanova N., Inaudi D., Vurpillot S.: Dam monitoring with fiber optic deformation sensors. Smart Structures and Materials, SPIE Vol. 3043-02, San Diego March 1997

[8]

Vuillet L., Casanova N., Inaudi D., Osa-Wyser A., Vurpillot S.: Development and laboratory tests of deformation fiber optic sensors for civil engineering applications. International Symposium on Lasers, Optics and Vision for Productivity in Manufacturing, Europto Series, Besançon, 10-14 June 1996

[9]

Inaudi D., Vurpillot S.: Sofo: Surveillance d'ouvrages par senseurs à fibres optiques. Ingénieurs et Architectes Suisses, 121<sup>e</sup> année, numéro 26, 6 décembre 1995, 522-529