

# Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung

Dirk Samiec, Polytec GmbH, Waldbronn

Durch Abtasten der Rayleigh-Streuung entlang einer Standardglasfaser lässt sich ein verteilt messendes Sensorsystem realisieren, bei dem jeder Faserpunkt als Sensor wirkt. Dieses neuartige Verfahren ermöglicht quasi-kontinuierliche Messungen von Temperatur- und Dehnungsprofilen über Strecken bis 70 m. Die räumliche Auflösung liegt dabei im Millimeterbereich, was tausenden konventioneller Punktsensoren entspricht.



## 1 Faseroptische Sensorik

Glasfaserbasierte Sensoren werden seit vielen Jahren bei Temperaturmessungen oder der Erfassung mechanischer Größen eingesetzt, insbesondere in Situationen, in denen elektrische Sensorsysteme an ihre Grenzen stoßen. Dies können Umgebungen mit großen elektromagnetischen Feldern oder schwierigen chemischen Bedingungen sein. Oder es handelt sich um Anwendungen, in denen große Entfernungen überbrückt werden müssen, der kompakte Durchmesser oder ein geringes Gewicht der Glasfaser vorteilhaft sind. Konzeptionell bestehen faserbasierte Systeme aus einer Ausleseeinheit und der daran angeschlossenen passiven Sensorfaser. Die Ausleseeinheit sendet Licht aus einem durchstimmbaren Laser oder aus einer Breitbandquelle in die Faser. In der Faser werden die Eigenschaften des Lichts abhängig von Temperatur und Dehnungszustand charakteristisch modifiziert. Diese Änderungen werden in der Ausleseeinheit im zurück gestreuten Licht detektiert, analysiert und in Dehnungen und Temperaturen umgerechnet.

### 1.1 Punktförmig messende Sensorsysteme

Auf der Sensorseite unterscheidet man punktförmige und verteilt arbeitende Ansätze. Punktförmige Sensoren werden entweder durch das Einschreiben von Faser-Bragg-Gittern realisiert, deren Reflexionswellenlänge vom Dehnungszustand und der Temperatur der Faser abhängt. Oder es wird in einer zweiten Variante das temperaturabhängige Absorptionsverhalten eines Halbleiterkristalls am Faserende ausgelesen, so dass ein optischer Endpunktsensor entsteht.

Da diese Sensoren nur an diskreten Messorten arbeiten, ist sowohl die Anzahl als auch die genaue Position der Sensoren ein kritischer Punkt bei der Auslegung des Gesamtsystems, insbesondere unter Berücksichtigung der Gesamtkosten. So ist grundsätzlich das Erfassen von Ereignissen schwierig, deren Ort vorher nicht bekannt ist, wie etwa das Auftreten eines Temperatur-„Hotspots“ oder die Bildung von Rissen in einer Betonstruktur. Falsch positionierte

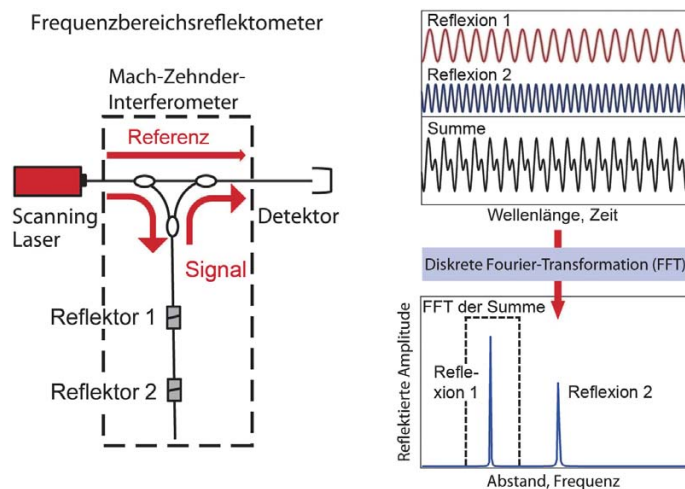
Einzel Sensoren können hier zu kompletten Fehlmessungen und -interpretationen führen. Ein ähnliches Problem ergibt sich, wenn Temperatur- und Dehnungsprofile große Gradienten aufweisen oder, wenn räumlich ausgedehnte Strukturen (2- oder 3-dimensional) präzise überwacht werden sollen. In beiden Fällen können lokale Ereignisse durch eine zu geringe Anzahl von Sensoren unentdeckt bleiben.

### 1.2 Verteilt messende Sensoren

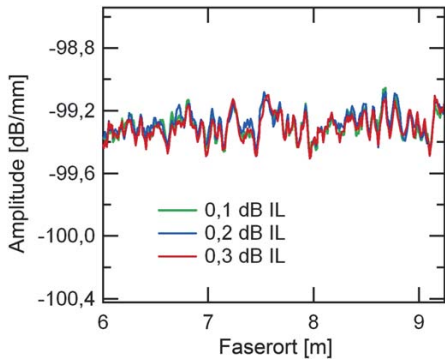
Hier leisten Systeme Abhilfe, die eine quasi-kontinuierlich verteilte Messung entlang der Sensorfaser erlauben. Sie nutzen das vom Fasermaterial selbst zurückgestreute Licht, das die gewünschte Information über Temperatur und Dehnungen enthält.

Für große Entfernungen haben sich zwei Messverfahren etabliert, die sich den Raman- oder Brillouin-Anteil im zurückgestreuten Licht zu Nutze machen. Diese Systeme ermöglichen eine verteilte Temperatur- und Dehnungsmessung entlang der Glasfaser über Strecken im Bereich von einigen 10 km. Allerdings ist die Auflösung verteilt messender Raman- und Brillouin-Sensoren auf etwa 1 m begrenzt. Limitierender Faktor ist eine äußerst geringe Intensität der hierbei genutzten Streuanteile, die eine Erhöhung der Auflösung extrem aufwendig macht.

Der Rayleigh-Anteil im Rückstreulicht ist absolut gesehen ebenfalls klein, aber dennoch deutlich höher als der Raman-



**Bild 1:** Bei der Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR) wird ein durchstimmbarer Laserstrahl in ein Mach-Zehnder-Interferometer eingekoppelt, bei dem die Sensorfaser Teil des Signalpfades ist. Die Frequenzanteile im Detektorsignal sind ein Maß für den jeweiligen Ort der Reflexion



**Bild 2: Verlauf der Rayleigh-Intensität entlang eines Glasfasersegments. Bei konstanten äußeren Bedingungen bleibt der Signalverlauf bei aufeinanderfolgenden Scans gleich. Dieser charakteristische Fingerabdruck dient als Referenzmuster für Messungen, die unter veränderten Bedingungen aufgenommen werden**

und Brillouin-Anteil. Dem US-Unternehmen Luna Technologies ist es in den letzten Jahren gelungen, unter Ausnutzung des Rayleigh-Streulichts ein verteilt messendes System mit Auflösungen im Millimeterbereich zu entwickeln.

## 2 Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR)

Wesentlicher Bestandteil eines verteilt messenden Sensorsystems ist ein ortsauflösendes Reflektometer. Raman- und Brillouin-Systeme arbeiten in vielen Fällen mit einem Zeitbereichsreflektometer (engl. Optical Time Domain Reflectometer, OTDR), bei dem die Ausleseinheit einen kurzen Lichtpuls aussendet und über die Laufzeit des zurückgestreuten Lichtanteils der jeweilige Ort der Reflexion berechnet wird.

Für die Rayleigh-Sensorik wird eine erheblich höhere als die mit einem OTDR erreichbare Auflösung benötigt. Erreicht wird dies mit einem kohärenten Frequenzbereichsreflektometer (engl. Coherent Optical Frequency Domain Reflectometer, c-OFDR (Bild 1)).

Im c-OFDR wird der Strahl eines durchstimmbaren cw-Lasers in ein faseroptisches Mach-Zehnder-Interferometer eingekoppelt. Der eine Arm stellt die Referenz mit fester Weglänge dar, der zweite wird durch die Sensorfaser gebildet. Das von der Faser zurückgestreute Licht interferiert am Ausgangskoppler mit dem Lichtanteil aus dem Referenzarm. Beim Durchstimmen der Laserwellenlänge entsteht so am Detektor ein periodisches Signal, dessen Frequenz vom Ort des jeweils zurückstreuenden Fasersegments abhängt. Je weiter das Segment vom Detektor entfernt ist,

desto größer wird die Frequenz des Interferenzsignals. Da der Detektor die Signale von allen zurückstreuenden Segmenten empfängt, muss das Summensignal durch Fourier-Transformation in seine Frequenzanteile zerlegt werden. Die Frequenzen entsprechen dann den Signalorten in der Faser. Die Amplitude jedes Frequenzanteils gibt die Stärke der jeweiligen Reflexion an.

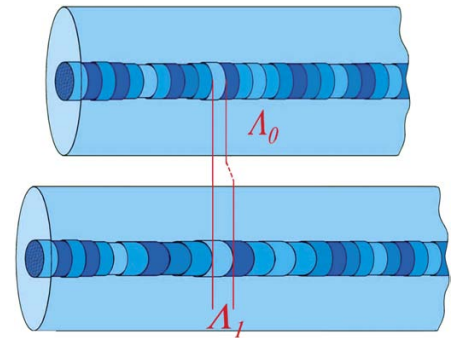
Die erreichbaren räumlichen Auflösungen hängen vom Wellenlängenbereich ab, über den der Laser pro Scan abgestimmt wird. Kommerzielle Systeme von Luna Technologies arbeiten bei 1550 nm und überstreichen maximal 90 nm. Dies entspricht einer räumlichen Auflösung von 10 µm. Bei Faserlängen bis maximal 70 m erhält man je Laserscan das Rayleigh-Rückstreusignal von 7 Millionen Segmenten.

## 3 Analyse des Rayleigh-Signals

Tastet man eine handelsübliche Glasfaser mittels OFDR ab, zeigt sich ein fluktuierender Intensitätsverlauf der Rayleigh-Streuung entlang der Glasfaser. Dieser Verlauf ist bei wiederholter Messung und konstanten äußeren Bedingungen absolut stabil, so dass er einen charakteristischen „Fingerabdruck“ für ein bestimmtes Glasfasersegment darstellt (Bild 2). Die Ursache liegt in der Natur der Rayleigh-Streuung. Sie entsteht durch elastische Streuprozesse an lokalen Defekten, Brechzahlvariationen oder Störungen der Wellenleitergeometrie, die zwar von Segment zu Segment leicht variieren, aber dennoch stabil sind.

Ändert man nun Temperatur oder Dehnungszustand der Glasfaser, so wird der Fingerabdruck räumlich gestreckt oder gestaucht (Bild 3). Dieses Phänomen ist die Basis für die Rayleigh-Sensorik, da die Änderungen des lokalen Rayleigh-Musters in lokale Temperatur- oder Dehnungsänderungen umgerechnet werden können.

Dazu wird das Messsignal entlang der Faser in kleine Auswertefenster  $\geq 1$  mm zerlegt und das darin enthaltene Signal in den Frequenzbereich transformiert (Bild 4). Das Ergebnis ist ein fluktuierendes Reflexionsmuster in Abhängigkeit von der Frequenz. Änderungen der



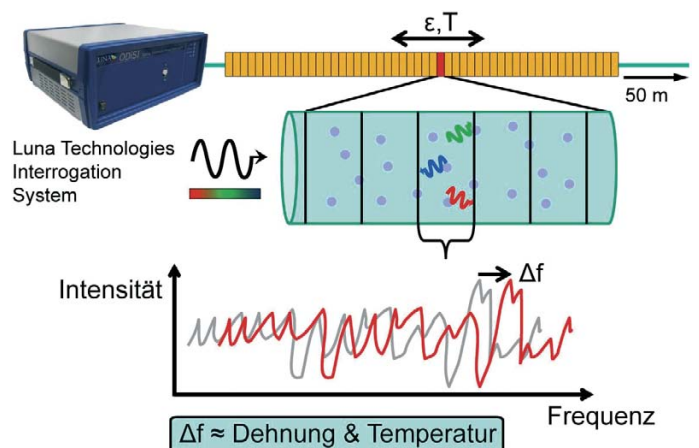
**Bild 3: Rayleigh-Streuung hat ihre Ursache in lokalen Brechzahlchwankungen längs der Glasfaser. Bei Temperatur- oder Dehnungsänderungen wird dieses charakteristische Profil auseinandergezogen oder gestaucht, was zur Messung dieser Größen genutzt werden kann**

Temperatur oder der Dehnung der Faser führen zu einer Frequenzverschiebung  $\Delta f$ , die proportional zu den von außen wirkenden Zustandsänderungen ist. Dieses Vorgehen entspricht im Grunde der Messung mittels Faser-Bragg-Gitter, bei der ebenfalls die Frequenzverschiebung des Reflexionspeaks bei Änderung der äußeren Bedingungen erfasst wird.

Um zu einer verteilten Messung zu gelangen, muss schließlich das Auswertefenster vom Algorithmus über die Faserstrecke geschoben werden, so dass ein vollständiges Profil entlang des Weges entsteht.

## 4 Eigenschaften der Rayleigh-Sensorik

Die Kombination aus OFDR und Rayleigh-Streuung stellt somit ein verteilt messendes



**Bild 4: Zur Auswertung der Rayleigh-Streuung wird das Messsignal in kleine Auswertefenster zerlegt, in denen die lokalen Änderungen in Form von Frequenzverschiebungen ermittelt und in Temperatur- und Dehnungsänderungen umgerechnet werden**



**Bild 5: Belastungstest an einem Stahlbetonbalken, in den ein faseroptisches Kabel zur Messung der Dehnung über Rayleigh-Streuung integriert ist** (Bild: [1])

System für Temperatur und Dehnung mit besonderen Eigenschaften dar:

**Hohe räumliche Auflösung:** Das variable Auswertefenster bestimmt die räumliche Auflösung. Bei aktuellen kommerziellen Systemen kann es minimal auf 1 mm gesetzt werden und die gesamte Faserstrecke kann bis zu 70 m lang sein. Dies stellt aber keine physikalische Grenze dar, sondern ist durch die Datenverarbeitung limitiert.



**Bild 6: Stahlbetonbalken mit Glasfaserkabel (blau) vor dem Ausgießen mit Beton. Das Kabel verläuft als Schleife im oberen und unteren Segment, um Zug und Druckspannungen zu erfassen** (Bild: [1])

**Flexible, virtuelle Sensorpositionen:** Mit nur einem Laserscan werden prinzipiell immer alle relevanten Informationen aufgenommen. Das Auswertefenster kann an beliebigen Positionen mit variabler Breite positioniert werden, sowohl kontinuierlich als auch an festen Messorten. Die komplizierte Frage der physikalischen Sensorpositionierung entfällt, da

dies in der Software vor oder auch nach der Messung festgelegt wird.

**Standardglasfaser als Sensor:** Da selbst besonders streuarmer Glasfasern noch genügend Rayleigh-Streuung produzieren, können viele kommerzielle Standardfasern, nach entsprechender Kalibrierung aber auch Sondertypen, eingesetzt werden. Allerdings muss die Ummantelung der Glasfaser für die jeweilige Anwendung angepasst sein. Bei Temperaturmessungen bis 350°C ist eine Polyimid- und bis 700°C eine Goldbeschichtung der Faser notwendig. Bei Dehnungsmessungen muss die Ummantelung die Dehnungsänderungen des Messobjekts möglichst optimal auf die Faser übertragen. Die praktisch erreichbare Maximaldehnung mit einer Standardglasfaser liegt bei ca. 30 000  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

**Hohe Messempfindlichkeit:** Temperaturänderungen können mit 0,1°C, Änderungen der Dehnung mit 1  $\mu\text{m}/\text{m}$  Auslösung erfasst werden.

**Paralleles Abfragen aller Sensoren:** Bei der beschriebenen Messmethode werden alle Punkte der Glasfaser gleichzeitig ausgelesen. Die maximale Rate beträgt bis zu 5 Hz. Somit kann die Gesamtdynamik eines Systems leicht beobachtet werden.

## 5 Anwendungen

Die Anwendungsbreite der verteilten Rayleigh-Sensorik ist groß. Diese Methode ist immer dann besonders sinnvoll, wenn eine größere Anzahl von Temperatur- oder Dehnungssensoren mit hoher Dichte abgefragt werden müssen. Anwendungsbeispiele gibt es aus praktisch allen Bereichen von Forschung und Technik.

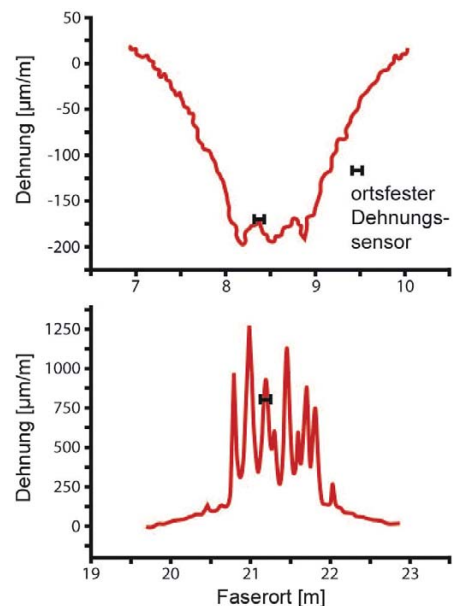
Im Folgenden werden zwei Beispiele beschrieben, die die Besonderheiten, aber auch die Robustheit des Verfahrens verdeutlichen.

### 5.1 Test und Überwachung von Betonstrukturen

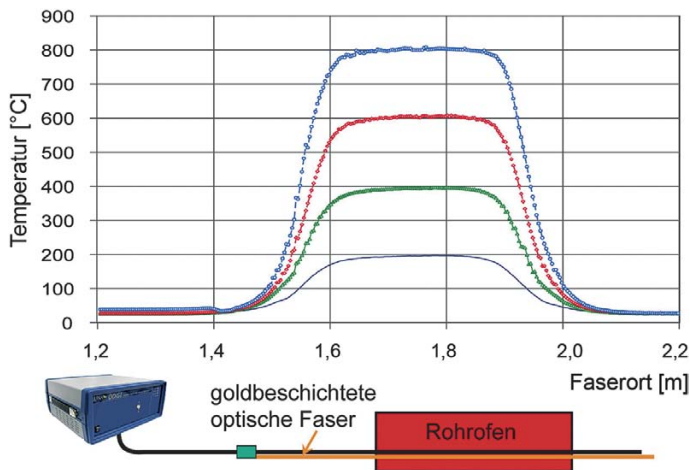
Zur Untersuchung der Belastbarkeit verschiedener Strukturelemente wurde in einem Forschungsprojekt der Electricité de France EDF ein Glasfaserkabel in einen Stahlbetonbalken integriert, zusammen mit einem konventionellen Dehnungssensor (Bild 5 und Bild 6). Der anschließende Belastungstest wurde bis in den nichtelastischen Bereich ausgedehnt, was zu einer lokalen Rissbildung in der Struktur führte.

**Bild 7** zeigt die dabei aufgenommenen Dehnungsänderungen über die Gesamtlänge des Balkens. Die obere Kurve zeigt das Segment unter Druckspannung, die untere Kurve unter Zugspannung. Die ausgeprägten Peaks lassen lokal deutlich erhöhte Dehnungswerte erkennen, die genau mit der in diesem Segment beobachteten Rissbildung korrelieren.

Der konventionelle Sensor erfasst zwar auch einen dieser Risse, aber eben nur rein zufällig. Die übrigen Risse, die an benachbarten Orten entstehen, werden gar nicht erkannt. Hier zeigt sich die Überlegenheit der verteilten Messtechnik, die alle Ereignisse registriert und die Interpretation erheblich vereinfacht.



**Bild 7: Verteilte Messung der Dehnung in einem mit 100 kN belasteten Stahlbetonbalken nach [1]. Oben: Segment unter Druckspannung mit negativen Dehnungsänderungen. Unten: Segment unter Zugspannung. Hier ist der elastische Bereich überschritten und es kommt zu lokalen Rissen, die an den lokalen Dehnungsspitzen eindeutig erkennbar sind. Zum Vergleich war ein konventioneller Sensor eingebaut, der lediglich an einem Messpunkt einen Dehnungswert liefert**



**Bild 8: Messung von Temperaturverteilungen in einem Ofen. Die mit Gold beschichtete Glasfaser arbeitet dauerhaft bei Temperaturen bis 700°C, kurzzeitig auch darüber**

## 5.2 Verteilte Messung hoher Temperaturen

Ideal geeignet ist die Rayleigh-Sensorik zur Aufnahme kompletter Temperaturprofile, insbesondere in Bereichen hoher Temperaturen, wie sie beispielsweise im Abgassystem von Automobilen, in Mikrowellenöfen oder großen Ofenanlagen der Stahlindustrie entstehen können.

**Bild 8** zeigt mehrere Temperaturprofile, die mit Hilfe einer goldbeschichteten Faser in einem Rohröfen aufgenommen wurden. Solche kommerziell erhältlichen Fasern

bestehend aus ausgereiften Komponenten der optischen Telekommunikation, hat sich die Methode in bisherigen Anwendungen als sehr robust und alltagstauglich erwiesen. Zur Erweiterung der Messmöglichkeiten liegt der Entwicklungsschwerpunkt zurzeit auf den Themen „Reichweite“ und „Auslesegeschwindigkeit“. So ist in naher Zukunft eine Gerätevariante geplant, die den Messbereich von 70 m auf 2 km erweitert, bei einer räumlichen Auflösung im Zentimeterbereich. Damit wird die Überwachung von ausgedehnten Objekten möglich. Ferner

können dauerhaft bis 700°C betrieben werden, kurzzeitig sogar deutlich darüber.

## 6 Ausblick

Die Rayleigh-Sensorik ist ein glasfaserbasiertes Verfahren zur verteilten Messung von Temperatur und Dehnung, das sich durch eine besonders hohe Ortsauflösung im Millimeterbereich auszeichnet. Aufgrund des internen Aufbaus, beste-

sind Messkonfigurationen realisierbar, bei denen sich der Messort nicht in unmittelbarer Nähe der Ausleseinheit befindet. Für dynamische Untersuchungen verlangt der Markt Ausleseraten im Bereich bis 1 KHz. Hier ist die Kombination von OFDR-Technologie und kontinuierlich geschriebenen Faser-Bragg-Gittern ein vielversprechender Ansatz.

## Literaturhinweise:

- [1] J.M. Henault et al., *Qualification of a truly distributed fiber optic technique for strain and temperature measurements in concrete structures*, EPJ Web Conferences 12, 03004 (2011)
- [2] M. Froggatt, B. Soller, D. Gifford, M. Wolfe, *Correlation and keying of Rayleigh scatter for loss and temperature sensing in parallel optical networks*, OFC Technical Digest, paper PDP 17 (2004)
- [3] Grafiken außer Bild 5–7 mit freundlicher Genehmigung Luna Technologies, Blacksburg, Virginia, USA

## Ansprechpartner:

Dr. Dirk Samiec  
Vertriebsingenieur  
Polytec GmbH  
Polytec-Platz 1-7  
D-76337 Waldbronn  
Tel. 07243/604-174  
Fax 07243/604-293  
eMail:  
d.samiec@polytec.de  
Internet: www.polytec.de



www.photonik.de ▶ Webcode 6005