

Hochfrequente spektrale Auswertung von Faser-Bragg-Gitter-Sensorsignalen zur dynamischen Strukturregelung

L. Hoffmann*, U. C. Müller**, T. Zeh*, M. S. Müller*, H. Baier**, A. W. Koch*

*Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München

**Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München

<mailto:l.hoffmann@tum.de>

Es existieren bereits Faser-Bragg-Gitter Messsysteme zur Dehnungsmessung mit sehr geringen Messunsicherheiten. Allerdings verhindern ihre geringe Messbandbreite, ihre asynchrone Abtastung oder auch ihr Totzeitverhalten den Einsatz in der dynamischen Strukturregelung oder für das Health Monitoring. Im Beitrag wird ein Messsystem beschrieben, das diese Nachteile nicht aufweist.

1 Faser-Bragg-Gitter Sensor

Faser-Bragg-Gitter (FBG) Sensoren eignen sich sowohl für die präzise statische Messung wie auch zur Messung hochdynamischer Dehnungen. Außerdem eignen sich die Sensoren besonders gut zur synchronen Zustandsmessung an mehreren Sensororten. Ein einfacher FBG-Sensor besteht aus einer periodischen Brechzahlmodulation im Kern einer einmodigen Glasfaser. Dadurch wird ein Stopband mit der Mittenwellenlänge λ_B erzeugt:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

n_{eff} ist der effektive Brechungsindex und Λ die Periode der Indexmodulation. Für den einachsigen Spannungszustand bewirkt eine Dehnungsänderung bei konstanter Temperatur eine Änderung der Mittenwellenlänge des Stoppbandes:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - p_{eff}) \cdot \varepsilon_{mech} \quad (2)$$

p_{eff} ist der photoelastische Koeffizient und ε_{mech} die Dehnung am Sensorort [1].

Jeder Sensor in einer einzelnen Glasfaser kann mit einer individuellen Bragg-Wellenlänge geschrieben werden, so dass die Dehnungen an den Messstellen unterscheidbar bleiben.

2 Aufbau des Messsystems

In den letzten Jahren haben sich drei wesentliche Herangehensweisen zur Abfrage von FBG-Sensoren etabliert [2]. Diese sind

1. das Verstimmen der Beleuchtungswellenlänge,
2. die interferometrische Detektion und
3. die spektrometrische Auswertung (mit CCD-Zeilenkameras).

Jedes der drei Konzepte hat Nachteile beim Einsatz der Messsysteme zur dynamischen Formkontrolle von Strukturen (siehe Tab. 1). Um diese Lücke zu schließen wurde ein neues Messsystem entwickelt, das die positiven Eigenschaften der verschiedenen Konzepte kombiniert.

	1.	2.	3.	Ziel
Bandbreite	< 1 kHz	< 1 kHz	< 1 kHz	> 20 kHz
synch. Abtastung	nein	nein	ja	ja
Totzeit < Abtastzeit	ja	ja	nein	ja

Tab. 1 Gegenüberstellung der verschiedenen Abfragesysteme für Faser-Bragg-Gitter bzgl. einiger für die Formkontrolle wesentlicher Eigenschaften

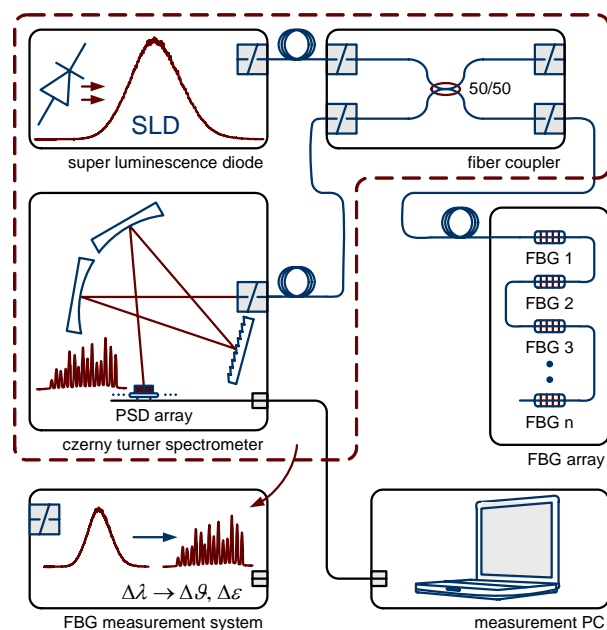


Abb. 1 Aufbau des FBG-Messsystems zur hochfrequenten Dehnungserfassung

Grundlage für den neuen Aufbau ist der spektrometerbasierte Ansatz, da es mit den anderen Verfahren nicht möglich ist, mehrere Sensoren synchron abzutasten. Die FBG-Sensoren werden mit einer breitbandigen Lichtquelle beleuchtet und die reflektierten Signale spektral ausgewertet (siehe Abb. 1). Das Spektrometer verfügt über ein Array aus acht positionsempfindlichen Detektoren (PSD). Jedem Sensor ist ein PSD zugeordnet. Die Wellenlänge jedes Sensors wird somit im Spektrometer zeitgleich gemessen. Eine Änderung der Wellenlänge bewirkt eine Änderung des Stromflusses am jeweiligen PSD. Die Messwellenlänge λ kann rein analog ausgewertet werden:

$$\lambda = E_{Spec} \frac{L_{PSD}}{2} \frac{i_2 - i_1}{i_2 + i_1} \quad (3)$$

L_{PSD} ist die Gesamtlänge des PSD-Chips, i_1 und i_2 sind die Messströme, die die x- und y-Positionsinformation des Messflecks tragen. E_{Spec} ist die Wellenlängenempfindlichkeit des Spektrometers bzgl. einer örtlichen Veränderung des Messflecks.

3 Hochpräzise statische Dehnungsmessung

Dieser Versuch wurde an einem einfach gelagerten Stahlbalken durchgeführt. Der Stahlbalken ist ein Demonstrator für einen Teil der Trägerstruktur eines großen Teleskopspiegels, wie er vom European Southern Observatory (ESO) geplant ist [3].

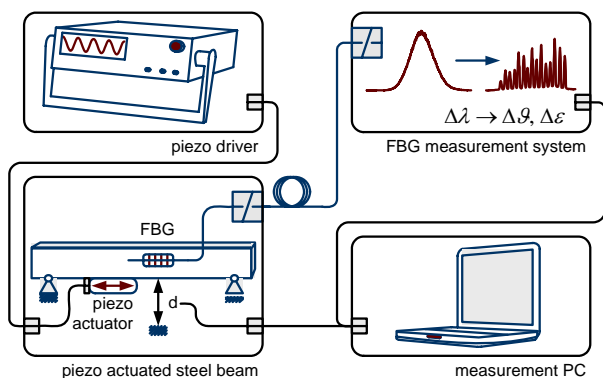


Abb. 2 Stahlbalken mit Piezokristall und Abstandsmessung zur Deformationserfassung

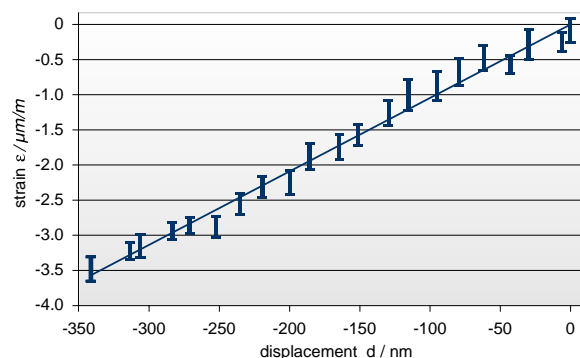


Abb. 3 Gemessene Dehnung mit Fehlerbalken aufgetragen über der Durchsenkung des Stahlbalkens

Mit einem Piezokristall lässt sich der Balken statisch deformieren. Die Deformation wird mittels mehrerer kapazitiver Sensoren gemessen und mit dem gemessenen Signal korreliert.

Die Unsicherheit (2σ) der Dehnungsmessung liegt unter $0,3 \mu\text{m/m}$ für die verschiedenen Durchbiegungen des Balkens bei einer Messfrequenz von 5 Hz. Die Unsicherheit der rechnerisch rekonstruierten Durchbiegung beträgt damit 12 nm [4] für eine Messung mit acht FBGs.

4 Hochfrequente Messungen

Sinusoidale Dehnungssignale mit Frequenzen von bis zu 12,5 kHz, angeregt durch einen Piezokristall, konnten gemessen werden. Die maximale Frequenz war durch den Piezotreiber begrenzt.

Eine einfache Möglichkeit, höherfrequente Dehnungssignale zu erzeugen, ist, die Struktur mit einem Hammerschlag anzuregen. Abb. 4 zeigt die mit einer Abtastfrequenz von 50 kHz gemessene Schockwelle.

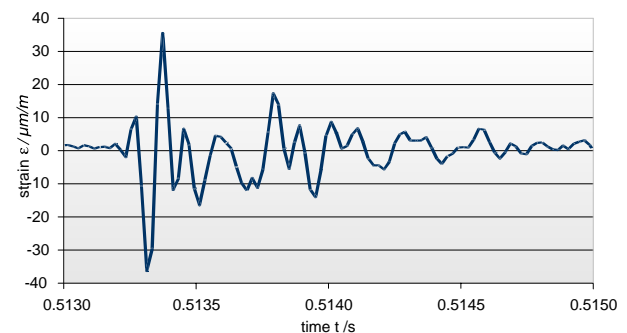


Abb. 4: Zeitsignal der Dehnung eines Faser-Bragg-Gitters nach einem Hammerschlag auf die Struktur

5 Ergebnis

Das entwickelte Messsystem kann gleichzeitig bis zu acht Faser-Bragg-Gitter mit einer Frequenz größer 25 kHz abtasten. Durch die einfache Sensorauswertung liegt die Totzeit mit $34,5 \mu\text{s}$ deutlich unterhalb der Abtastzeit [5].

Literatur

- [1] K. Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology", J. of Lightwave Tech. 15 (8): 1263-1276 (1997)
- [2] B. Lee, "Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors", Optical Fiber Technology 9 (2), 57-79 (2003)
- [3] E. Marchetti et al, "MAD status report", Proc. SPIE 5490, 236-247 (2004)
- [4] U. C. Mueller et al, "Fiber Optic Bragg Grating Sensors for Structural Deformation Control", Proc. SPIE 6167, 64-75 (2006)
- [5] T. Zeh, "Optical Fiber Bragg Sensors", Dissertation, Technische Universität München (2004)