



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

10. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

11. März 2019

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-3 65 68
Fax: +49 351 463-3 72 89

Titelbild:
Belastungsrahmen für die Prüfung von Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus
Görlitz (Foto: Oliver Mosig, s. Beitrag Mosig et al. in diesem Tagungsband)

Redaktion und Layout: Silke Scheerer
Korrekturen: Petra Kahle, Angela Heller
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel
Für die Inhalte der Beiträge sind die Autor*innen verantwortlich.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, März 2019

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau verfügbar (<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/das-institut/veranstaltungen/SEUB>).

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-583-4

Inhalt

Vorwort	7
Steffen Marx, Jürgen Grünberg, Gregor Schacht	
Sicherheitskonzept für Belastungsversuche	9
Mai Häßler	
Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen	23
Thilo Fröhlich, Veit Birtel, Dieter Lotze	
Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung	33
Oliver Mosig, Sabine Wellner, Jörg Rudolph	
Belastungsprüfung der Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz	45
Volker Wetzke, Claudia Pahlow	
Das Potenzial von Miniatur-Druckproben für die Werkstoffcharakterisierung von Stahlguss	59
Kerstin Speck, Fritz Vogdt, Manfred Curbach, Yuri Petryna	
Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton	71
Jens Heinrich, Reinhard Maurer	
Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken	83
Max Käding, Gregor Schacht, Guido Bolle, Steffen Marx	
Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrissskorrosion	97
Florian Schill, Milo Hirsch, Andreas Eichhorn	
Überwachung von Tragwerken mit Profilscannern	109
Jörg Scheithauer, Chris Hobusch, Falk Steinigk, Torsten Hillig, Matthias Schramm	
UAV und BIM – neue Herausforderungen an die Bauüberwachung bei Infrastrukturmaßnahmen an Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn	123
Nico Steffens, Kay Degenhardt, Karsten Geißler	
Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring	135
Marc Gutermann, Werner Malgut, Carsten Böhme	
Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover	147
Oliver Fischer, Sebastian Gehrlein	
Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke ...	161

Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton

Kerstin Speck¹, Fritz Vogdt², Manfred Curbach³, Yuri Petryna⁴

Kurzfassung. Die Ermittlung lastinduzierter, anisotroper Schädigungen unter verschiedenen mehraxialen Spannungszuständen bedingt die Dehnungsmessung im Inneren kleinformatiger Probekörper. Die Wahl fiel auf quasi-kontinuierlich messende faseroptische Sensoren ohne werksseitige Schutzummantelung. Dieser Beitrag erläutert das Messprinzip und zeigt, welche Messkonfigurationen bestehend aus Messsystem, Sensorfaser und Coatingmaterial für diese Aufgabe geeignet sind und mit welchen Hilfskonstruktionen die Positionierung der Messsensoren im Probekörper gelingt, um besonders auch im Bereich kleiner Dehnungen exakte Messwerte zu erhalten, die mindestens die gleiche Genauigkeit wie die etablierten Messsysteme Dehnmessstreifen und Photogrammetrie aufweisen. Dafür werden einaxiale Druck- und Zugversuche an Mörtelprismen ausgewertet und ein geeignetes Messkonzept für kommende mehraxiale Versuche entwickelt.

Vorab: Der vorliegende Beitrag ist ein Zweitabdruck von [1], mit freundlicher Genehmigung des Verlags Ernst & Sohn.

1 Motivation

Kann Beton nach seiner Herstellung noch als nahezu isotrop betrachtet werden, so führen ab einem bestimmten Lastniveau (Mikro-)Risse im Betongefüge zu einer Anisotropie, da sich die Rissufer entsprechend dem vorherrschenden Spannungszustand orientieren. Qualitativ ist diese Anisotropie allgemein bekannt, siehe z. B. [1]–[5], quantitative Aussagen über Steifigkeiten und Festigkeiten liegen jedoch kaum vor. Für eine realistische Modellierung des Betonverhaltens, wie sie an der TU Berlin mittels einer verzerrungs- und energie-basierten Formulierung des Werkstoffgesetzes angestrebt wird und bei der Evolutionsgleichungen und Versagensflächen überwiegend auf messtechnisch nachvollziehbaren Parametern basieren, ist die Kenntnis dieser richtungsabhängigen Eigenschaften erforderlich.

¹ Dr.-Ing., Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

² Dr.-Ing., Fachgebiet Statik und Dynamik, Technische Universität Berlin

³ Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

⁴ Prof. Dr.-Ing. habil., Fachgebiet Statik und Dynamik, Technische Universität Berlin

Zur Ermittlung der Parameter sind am Institut für Massivbau der TU Dresden Versuche geplant, die verschiedene Be- und Entlastungspfade im dreiaxialen Spannungsraum abbilden. Nach einer Vorschädigung werden bleibende Verformungen, die Steifigkeiten in allen Raumrichtungen und Festigkeiten unter ausgewählten Spannungsverhältnissen messtechnisch ermittelt. So werden u. a. bei einem einaxialen Druckversuch neben der Entlastungssteifigkeit und der plastischen Verformung in Belastungsrichtung anschließend auch die Steifigkeit und die Zugfestigkeit in Querrichtung bestimmt – um ein einfaches Beispiel zu nennen.

In dem gemeinsamen DFG-Forschungsvorhaben „*Experimentell gestützte Modellierung von Versagensmechanismen hochfester Betone unter multiaxialer Beanspruchung* (MaBet)“ sollen die Modellparameter experimentell beschrieben und die Modellansätze erweitert bzw. verbessert werden. Essentiell für den Erfolg des Vorhabens ist deshalb eine exakte Dehnungsmessung auch im Bereich sehr geringer Dehnungen. Die Seitenflächen der Probewürfel werden aber gleichzeitig oder nacheinander durch Lasteinleitungsmittel belastet und stehen somit nicht für die Applikation von Messtechnik zur Verfügung. Die Wahl fiel daher auf faseroptische Sensoren (FOS), die die Dehnung quasi kontinuierlich entlang ihrer Achse messen. Aus den verfügbaren Messsystemen, siehe auch [6]–[8], fiel die Wahl auf Messfasern, welche lediglich mit einem Coating bedampft werden und nicht durch zusätzliche Schutzschichten ummantelt sind und die mittels eines Trägergerüsts im Beton positioniert werden. Damit sollten den beengten Platzverhältnissen in den maximal 10 cm großen Probekörpern Rechnung getragen und die Beeinflussung der Materialeigenschaften des untersuchten Betons minimiert werden.

2 Faseroptisches Messverfahren

Das angewendete Messverfahren basiert auf der Analyse der Rayleigh-Rückstreuungen mithilfe der kohärenten Frequenzbereichsreflektometrie (engl. *Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry*, c-OFDR) [9].

Die Rayleigh-Rückstreuung wird durch einen elastischen Rückstreuprozess verursacht, bei dem es zu keinem Energieaustausch zwischen dem einfallenden Licht und dem FasermEDIUM kommt. Die Wellenlänge λ des einfallenden Lichts bleibt bei dieser Art der Rückstreuung unverändert [9]. Zwei weitere wichtige Rückstreukomponenten sind die Raman- und die Brillouin-Rückstreuung. Im Gegensatz zur Rayleigh-Rückstreuung werden sie durch inelastische Rückstreuprozesse verursacht, bei denen Energie zwischen dem einfallenden Licht und dem Fasermaterial ausgetauscht wird. In beiden Fällen kommt es zu Wellenlängenveränderungen zwischen einfallendem und zurückgestreutem Licht. Messprinzipien, die auf der Raman- oder der Brillouin-Rückstreuung basieren, werden im Rahmen dieses Beitrages nicht behandelt. Für Erläuterungen dieser Verfahren wird auf [8] verwiesen.

Die folgenden Ausführungen zu der c-OFDR sowie die verwendeten Formeln und Symbole gehen aus der Darstellung in Bild 1 hervor. In der c-OFDR wird an der Lichtquelle die Wellenlänge λ eines Laserstrahls linear mit der Zeit variiert:

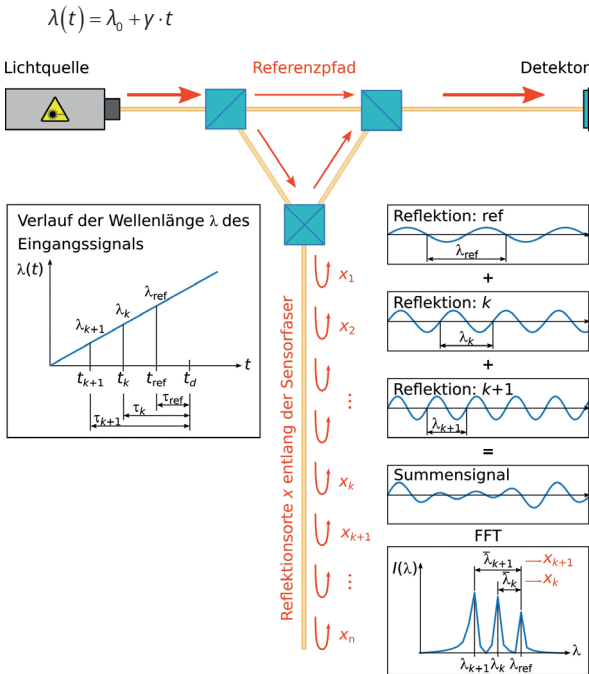


Bild 1 c-OFDR am Mach-Zehnder-Interferometer

Das entsendete Licht wird auf zwei Lichtwellenleiter aufgeteilt, deren Anordnung einem Mach-Zehnder-Interferometer entspricht (Bild 1). Ein Teil des Lichts wird durch den sogenannten Referenzpfad geleitet, der andere Teil in die Sensorfaser. Die regellose Struktur des amorphen Fasermaterials Silikatglas und Einschlüsse von Verunreinigungen führen dazu, dass an Fasersegmenten k entlang der gesamten Länge der Sensorfaser Licht unterschiedlich stark gebrochen und zurückgestreut wird, die oben genannte Rayleigh-Rückstreuung. Die örtliche Auflösung und die Anzahl der Fasersegmente k hängen von

dem Wellenlängenbereich und der Wellenlängenänderungsrate der Lichtquelle sowie der Datenerfassungsrate des Detektors ab.

Das Licht aus dem Referenzpfad wird mit dem zurückgestreuten Licht aus der gesamten Messfaser interferiert. Die zurückgelegten Strecken durch den Referenzpfad bzw. zu den einzelnen Fasersegmenten k und zurück unterscheiden sich. Entsprechend unterscheiden sich die Reisedauern τ_{ref} des Lichts durch den Referenzpfad von den Reisedauern τ_k des Lichts durch den Pfad über die Fasersegmente k (vgl. Bild 1). Daher werden am Detektor zum Zeitpunkt t_d Lichtsignale überlagert, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten

$$t_{ref} = t_d - \tau_{ref} \quad \text{bzw.} \quad t_k = t_d - \tau_k$$

an der Lichtquelle entsendet wurden. Durch die Variation der Wellenlängen λ an der Lichtquelle enthält das Summensignal unterschiedliche Wellenlängen

$$\lambda_{ref}(t_d) = \lambda(t_d - \tau_{ref}) \quad \text{bzw.} \quad \lambda_k(t_d) = \lambda(t_d - \tau_k).$$

Am Detektor wird ein periodisches Signal aufgezeichnet, das durch eine Fourier-Transformation in seine Wellenlängenanteile λ_{ref} aus dem Referenzpfad und λ_k aus der Sensorfaser zerlegt wird. Die Differenzen der Wellenlängen

$$\bar{\lambda}_k = \lambda_k - \lambda_{ref}$$

sind proportional zu den Reflexionsorten x_k der jeweils zurückstreuenden Fasersegmente. Die dazugehörigen Amplituden $I(\bar{\lambda}_k)$ geben die Intensität der jeweiligen Rückstreuungen an.

Der Intensitätsverlauf $I(\bar{\lambda}_k)$ des gewonnenen Spektrums der Rayleigh-Rückstreuungen ist für eine Sensorfaser bei gleichen äußeren Einwirkungen einzigartig und unveränderlich. Vor einer Messung wird für einen bekannten Verzerrungszustand des Probekörpers ein Referenzsignal $I_{ref}(\bar{\lambda}_k)$ erzeugt. Er wird in [10] 'charakteristischer Fingerabdruck' der Sensorfaser genannt.

Dehnungsänderungen durch Temperatur oder mechanische Einwirkung führen zu einem räumlich gestreckten Verlauf dieses Fingerabdrucks, dem Messsignal $I_{meas}(\bar{\lambda}_k)$. Nach [11] werden Referenz- und Messsignal in einzelne Auswertefenster j zerlegt. Praktisch können diese als Dehnmessstreifen einer vorgegebenen Länge aufgefasst werden, die eine Anzahl von Fasersegmenten k enthalten. Durch eine Kreuzkorrelation der Signale $I_{ref}(\bar{\lambda}_k)$ und $I_{meas}(\bar{\lambda}_k)$ in sich entsprechenden Auswertefenstern werden die lokalen Wellenlängenverschiebungen $\Delta\lambda_j$ zwischen Referenz- und Messzustand bestimmt. Sie sind nach [12] proportional zu den lokalen Änderungen der Temperatur bzw. des Verzerrungszustandes der Sensorfaser.

Mit zunehmender Länge der Auswertefenster verbessert sich das Signal-Rausch-Verhältnis der Kreuzkorrelation, die räumliche Auflösung der Verzerrungsmessungen entlang der Faser hingegen sinkt. In der vorhandenen Ausstattungsvariante des Gerätes ODISI-B der Firma LUNA Inc. [13] lassen sich zwei Konfigurationen wählen, die in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Tabelle 1 Wählbare Konfigurationen der quasi kontinuierlichen Verzerrungsmessung

Konfiguration	High resolution	Extended length
Messlänge	10 m	20 m
Abstand der Messstellen	0,64 mm	2,56 mm
Länge der Auswertefenster	1,28 mm	5,12 mm
Geschätzte Messempfindlichkeit	25 $\mu\text{m/m}$ bzw. 2,5 °C	1 $\mu\text{m/m}$ bzw. 0,1 °C

Für die Rayleigh-c-OFDR können ausschließlich übliche *Single-Mode*-Fasern, wie z. B. die *Corning SMF-28e*, eingesetzt werden. Laut [14] ergibt sich dadurch gegenüber Faser-Bragg-Gitter-Sensoren ein deutlicher Kostenvorteil. Nach [10] beträgt die maximal mögliche Dehnung einer solchen Standardfaser ca. 30.000 $\mu\text{m/m}$, d. h. 30 ‰. Damit werden alle möglichen Deformationszustände im Beton mit dieser Messfaser gut messbar. Inwieweit lokale Dehnungsspitzen in Makrorissen einen Faserbruch verursachen, muss jeweils neu untersucht werden.

3 Einsatz der faseroptischen Sensoren in kleinformatischen Probekörpern

Die Einsatzmöglichkeiten von FOS im Bauwesen reichen vom Monitoring von Brücken mit über 100 m Messlänge [6], [7] bis hin zur Verformungsmessung an Probekörpern im Labormaßstab [8]. Je nach Einsatzgebiet variieren die Messstellenabstände von wenigen Millimetern bis hin zu mehreren Zentimetern und die Auswahl der geeigneten Messfaser wird bestimmt durch die Robustheit bei frei bewitterten und einbetonierten Fasern oder durch die maximal mögliche Dehnung bei Messungen über Risse hinweg oder entlang von Bewehrungsstäben, die bis in den Fließbereich hinein belastet werden.

In dem geplanten Forschungsvorhaben liegt das Augenmerk auf einer hohen Messempfindlichkeit im Bereich kleiner Dehnungen, um z. B. die plastischen Dehnungen nach Entlastung eines Betonwürfels sicher bestimmen zu können. Rein aus den geometrischen Randbedingungen im Probekörper resultiert die Forderung nach möglichst kleinen Umlenkradien. Außerdem soll das Betongefüge möglichst wenig gestört werden, um dessen Verformungs- und Festigkeitsverhalten nicht zu beeinflussen, weshalb die Wahl auf Messfasern ohne zusätzliche Ummantelungen fiel. Gleichzeitig muss die Messfaser während des Betonierens in ihrer Lage fixiert und vor mechanischer Beschädigung geschützt werden. Deshalb werden die Fasern mit Hilfe von Messing-U-Profilen im Beton positioniert, wie sie in ähnlicher Weise bei Messungen mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren verwendet wurden [15]. Die Profile weisen Kantenlängen von 1 mm auf (Bild 2) und besitzen ähnliche Steifigkeiten wie der untersuchte hochfeste Beton.

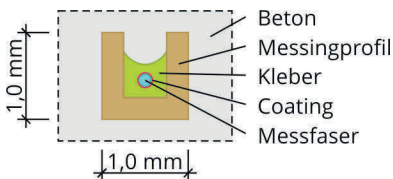


Bild 2 Einbettung der Messfaser in den Beton

Zur Findung einer geeigneten Messkonfiguration wurden Vorversuche an Mörtelprismen durchgeführt. Diese wurden im einaxialen Druck- und Zugversuch zunächst be- und entlastet und anschließend die Last bis zum Bruch gesteigert. Die Eignung der FOS wurde dabei im Vergleich zu etablierten Messverfahren bewertet.

Bild 3 zeigt die Lage der Messstellen im und auf dem Probekörper. Das verwendete faseroptische Messsystem erlaubt nur die Auswertung einer Messfaser. Deshalb wird diese in drei Schlaufen durch den Probekörper geführt. Die betrachteten Messstellen sind untereinander und von der Bauteiloberfläche 10 mm entfernt. Sie sind parallel zur Belastungsrichtung entlang der Längsachse des Mörtelprismas ausgerichtet und werden im Folgenden mit FOS 1 bis 3 bezeichnet. Im selben Abstand zur Bauteiloberseite, aber auf den Seitenflächen, werden zwei Dehnmessstreifen (DMS 1 und 2) appliziert. Die Auswertung der photogrammetrischen Messungen auf der Bauteiloberfläche erfolgt entlang der Messstellen PG 1 bis 3, welche sich genau über den faseroptischen Sensoren befinden.

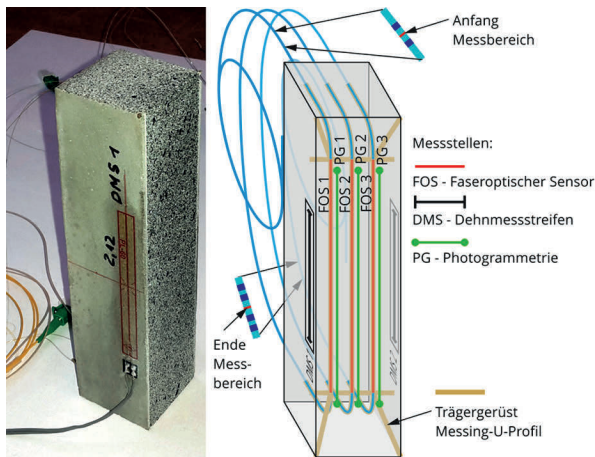


Bild 3 Dehnungsmessung am Mörtelprisma mittels faseroptischer Sensoren, Dehnmessstreifen und Photogrammetrie; links: Probekörper mit applizierter Messtechnik, rechts: schematische Lage der Messstellen

Ergebnis der faseroptischen Messung sind örtlich über die Messpunkte entlang der Faser und zeitlich in Abhängigkeit von der Abtastrate aufgelöste Dehnungswerte. Bild 4 links zeigt exemplarisch für einen Zugversuch mit Acrylat-Fasern zu einem bestimmten Zeitpunkt die Dehnungen entlang der Faserachse. Deutlich zu erkennen sind die drei Messstellen im Probekörper und dazwischen die unbelasteten Schlaufen außerhalb. Im Bild 4 rechts sind beispielhaft die Dehnungen einer Messstelle einer Polyimid-Faser für verschiedene Zeitpunkte und damit unterschiedliche Zugspannungen dargestellt. Für die Gegenüberstellung der Messsysteme werden die Dehnungen der faseroptischen Sensoren und aus der Photogrammetrie über die Länge der Messstelle gemittelt, wie es analog bei der DMS-Messung impliziert ist.

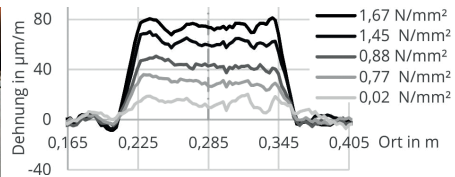


Bild 4 Quasi kontinuierliche Dehnungsmessung entlang der Messfaser mit drei Messstellen; links: Ausgabe während der Messung, rechts: ausgewählte Messstelle bei verschiedenen Laststufen

Variiert wurden bei der faseroptischen Messung das Coatingmaterial, der Klebstoff, der Umlenkradius und die Länge der internen Auswertefenster. Außerdem wurde untersucht,

ob im Bereich der Messstelle auf den Klebstoff oder komplett auf das Trägerprofil verzichtet werden kann.

4 Einfluss der untersuchten Messkonfigurationen

4.1 Einfluss des Coatingmaterials und des Umlenkradius

Zum Einsatz kamen zwei verschiedene Coatings, zum einen eine sehr preisgünstige Faser mit einem Coating aus Acrylat, wie sie bei der Datenübertragung mittels Glasfasern zum Einsatz kommt, und zum anderen eine spezielle Messfaser mit Polyimid-Coating. Neben dem preislichen Vorteil überzeugt die Acrylat-Faser auch bei der Verarbeitbarkeit, da sie einfacher zu verformen und leichter am Trägergerüst zu befestigen ist. Demgegenüber versteift das Polyimid die Messfaser, ermöglicht dabei aber auch die verlustfreie Weiterleitung des Lichts um engere Umlenkradien und die bessere Übertragung von Verformungen aus dem Beton in die Faser. Im Bild 5 rechts erkennt man bei der Variante mit im Messbereich freiliegenden Fasern im mittleren Bildausschnitt das „goldene“ Polyimid-Coating und im rechten Bildausschnitt das farblose und damit optisch nicht vom Glas unterscheidbare Acrylat-Coating.



Bild 5 Trägergerüst aus Messing-U-Profilen zur Positionierung der Messfasern; links: Trägergerüst entlang der Messstelle, Mitte und rechts: Messbereich ohne Trägerprofil – Mitte: Polyimid-Coating, rechts: Acrylat-Coating

Die gemessenen Dehnungen entlang einer Messstelle sind im Bild 6 für einen Druckversuch dargestellt. Während die Polyimid-Faser im linken Bild ein eindeutiges Plateau entlang der Messstelle zeigt, werden die Dehnungen durch das relativ schubweiche Acrylat nicht zuverlässig in die Glasfaser übertragen, siehe rechts in Bild 6. An die eigentliche Messstelle schließt sich die Krümmung des Trägerprofils an und danach verläuft die Faser für rund 2 cm in Richtung der Querdehnung. Auch diese kann bei der Polyimid-Faser eindeutig erkannt werden, wird aber bei der Acrylat-Faser verschmiert.

Den Vergleich der über den Messbereich gemittelten Dehnungen aller Messsysteme über die Dauer einer Belastungsrampe aufgetragen zeigt Bild 7. Bei der Mittelung der FOS-Dehnungen wurde bei der Festlegung der Länge der Messstelle nicht der maximale gerade Bereich zwischen den Umlenkstellen verwendet, sondern ein Abstand von 5 mm angesetzt,

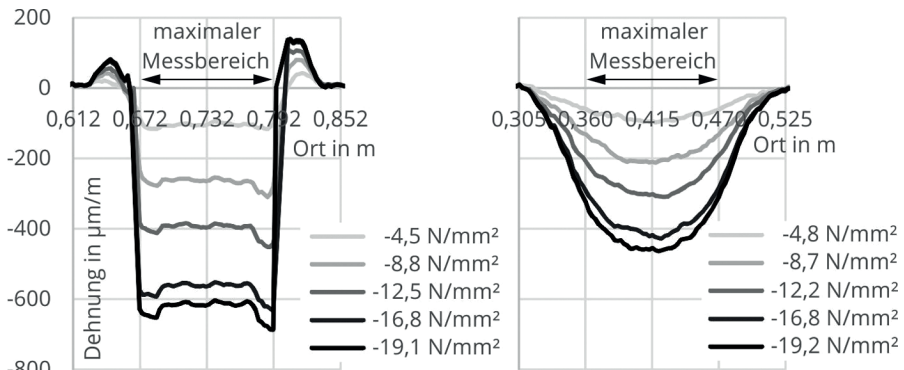


Bild 6 Dehnungsverteilung entlang einer Messstelle für ausgewählte Laststufen; links: Polyimid-Coating, rechts: Acrylat-Coating

da die Umlenkung bei einigen Konfigurationen die Ergebnisse zu beeinflussen scheint. Die Messwerte der Polyimid-Faser im linken Bild liegen im oberen Streubereich der Werte der Photogrammetrie (blaue Linien) und der DMS (grüne Linien). Klar erkennbar ist auch die leicht außermittige Belastung des Probekörpers. So erfährt die Probekörperseite mit den Messstellen DMS 1, FOS 1 und PG 1 eine etwas geringere Stauchung als die gegenüberliegende Seite mit den Messstellen DMS 2, FOS 3 und PG 3.

Die Dehnungen der Acrylat-Fasern im rechten Bild erreichen dagegen nicht das Niveau der andern Messstellen, selbst dann nicht, wenn man den nicht berücksichtigten „Störbereich“

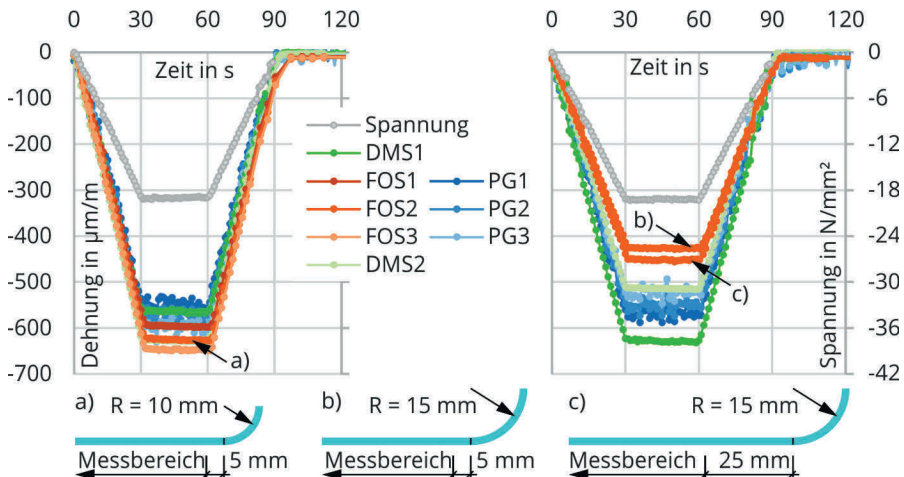


Bild 7 Vergleich der etablierten Messsysteme über die Dauer einer Belastungsrampe mit den faseroptischen Sensoren mit (links) Polyimid-Coating und Acrylat-Coating (rechts)

auf 25 mm ausdehnt. Außerdem würde, wenn man dieses Vorgehen auf den 10er Würfel für die geplanten mehraxialen Versuche überträgt, der verbleibende Messbereich gegen Null gehen. Die Auswertung der Acrylat-Faser beschränkt sich auf die Messstelle FOS 2, da es teilweise zu Faserbrüchen an den Stellen kam, an denen die Faser aus dem Messprofil geführt wurde. Für die Hauptversuche wird die Faser deshalb mit einer Schutzhülle versehen. Diese beginnt ca. 5 mm bevor die Faser das Trägerprofil verlässt.

Für die Polyimid-Faser empfiehlt der Hersteller einen minimalen Umlenkradius von 10 mm, für die Acrylat-Faser von 15 mm, was als Ausgangspunkt für die Untersuchungen angesetzt wurde. Vergrößert man für Vergleichszwecke den Umlenkradius bei der Polyimid-Faser auf 15 mm, zeigen sich keine Veränderungen in den Messwerten. Bei einer Verringerung des Radius auf 10 mm bei der Acrylat-Faser vergrößern sich die Abweichungen zu den anderen Messsystemen weiter. Die signifikant schlechteren Ergebnisse der Acrylat-Faser zeigten sich bei nahezu allen untersuchten Konfigurationen, weshalb die weiteren Betrachtungen an dieser Stelle nur für die Polyimid-Faser durchgeführt werden.

4.2 Einfluss von Klebstoff und Trägerprofil

Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene Klebstoffe verwendet: der Klebstoff CN, welcher für die Applikation von DMS auf Metall und Kunststoffe entwickelt wurde, sowie der Klebstoff X120, ein Spezialklebstoff für optische Fasern. Während der dünnflüssige und farblose CN (Bild 8 links) sich durch die Kapillarwirkung einfach und schnell blasenfrei in dem Trägerprofil verteilt und die Messfaser umschließt, weist der X120 eine sehr hohe Viskosität auf und ist für das Einkleben der Faser in die schmalen Profile ungeeignet (Bild 8, Mitte). Die Messergebnisse zeigen bei beiden Klebstoffen eine sehr gute Übereinstimmung mit den konventionellen Messverfahren. Deshalb konnte für die Polyimid-Faser auch keine weitere Verbesserung dadurch erzielt werden, dass ein direkterer Kontakt zum Beton hergestellt wurde, indem an der Messstelle auf den Klebstoff verzichtet oder die Faser direkt einbetoniert wurde (siehe auch Bild 5 rechts). Bei der Acrylat-Faser ist die direkte Lage im Beton allerdings die einzige Konfiguration, die befriedigende Ergebnisse lieferte. Es ist jedoch schwierig, die Faser während der Betonage in ihrer Position zu halten und sie nicht zu beschädigen.

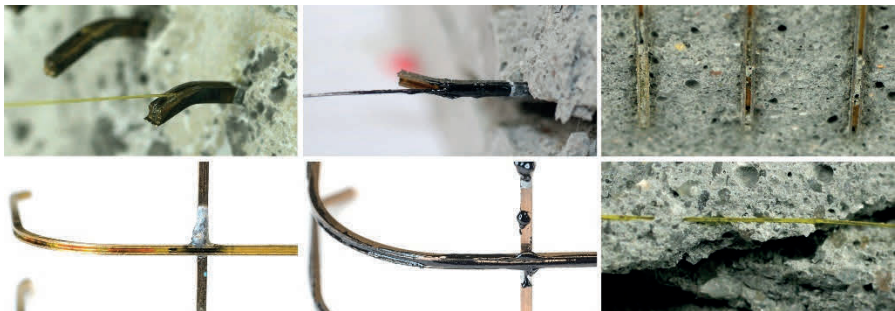


Bild 8 Applikationsvarianten der faseroptischen Sensoren; links: DMS-Klebstoff CN, Mitte: Faserklebstoff X120, rechts oben: ohne Klebstoff, rechts unten: ohne Trägergerüst

4.3 Einfluss von Messstellenabstand bzw. Länge der Auswertefenster

Wie in Tabelle 1 vorgestellt, stehen zwei verschiedene Konfigurationen bezüglich der Länge des Auswertefensters zur Verfügung, welche mit unterschiedlichen Messpunktabständen, also der örtlichen Auflösung der Messstellen entlang der Faser, einhergehen. Bild 4 zeigt den Dehnungsverlauf bei 5,12 mm Auswertefensterlänge. Dieselbe Messstelle wird im Bild 9 mit 1,28 mm Auswertefensterlänge ausgewertet. Deutlich erkennbar ist, dass gerade im Bereich kleiner Dehnungen das Signal-zu-Rausch-Verhältnis sehr ungünstig ist. Die mittlere Dehnung über die Messstelle ist bei beiden Konfigurationen vergleichbar. Im Hinblick auf die geplanten Untersuchungen, bei denen die Dehnungen bis auf die materialbedingten Inhomogenitäten über mehrere Zentimeter Messlänge konstant sind, bringt die feinere örtliche Auflösung keinen Erkenntniszuwachs, sondern vergrößert lediglich die zu verarbeitende Datenmenge.

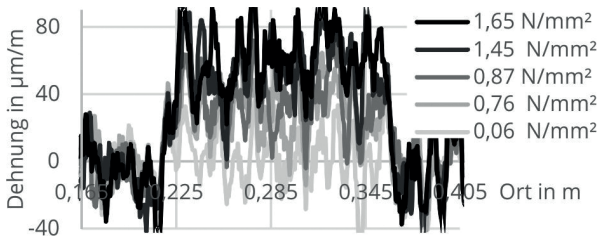


Bild 9 Ausgewählte Messstelle bei verschiedenen Laststufen und einer Auswertefensterlänge von 1,28 mm

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es kann festgestellt werden, dass sich faseroptische Sensoren für die Messung von Dehnungen in kleinformatigen Betonprobekörpern eignen. Die Ergebnisse sind nahezu identisch zu denen konventioneller Messverfahren, wie Bild 10 am Beispiel einer Spannungs-Dehnungs-Linie eines Druckversuchs zeigt.

Es sind gesicherte Messungen bis zum Versagen möglich, also bis in einen Bereich, in dem oberflächlich applizierte Messmittel durch Abplatzungen teilweise ausfallen können. Bei Messungen im Beton können die Fasern mit Polyimid-Coating und eine Auswertefenster-

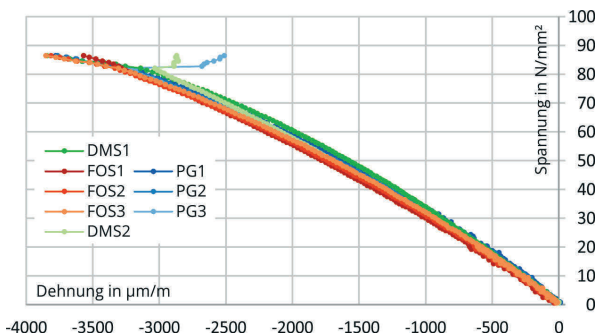


Bild 10 Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines Feinbetons unter Druck, aufgezeichnet mit verschiedenen Messmitteln

länge von 5,12 mm empfohlen werden. Hinsichtlich der Probekörperherstellung hat sich ein Trägergerüst aus Messing-U-Profilen und die Verwendung des Klebstoffs CN bewährt.



Bild 11 Trägergestell mit faseroptischen Sensoren für Dehnungsmessung in Betonwürfeln mit 10 cm Kantenlänge

Aus diesen Erkenntnissen heraus wurde eine Messkonfiguration entwickelt (siehe Bild 11), wie sie bei zukünftigen Versuchen an Betonwürfeln in der Triaxial-Prüfmaschine des Otto-Mohr-Laboratoriums zum Einsatz kommen wird. Ein- und zweiaxiale Vorversuche zur Vorbereitung des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass die mit Dehnmessstreifen ermittelten Verzerrungszustände zur Ableitung der Modellparameter geeignet sind. Mit dem hier dargelegten Nachweis, dass mit faseroptischen Sensoren gleichwertige Dehnungsmessungen möglich sind, kann der Untersuchungsbereich auf dreiaxiale oder andere beliebige Beanspruchungsszenarien erweitert werden.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), ohne deren finanzielle Zuwendung die Umsetzung dieses Forschungsvorhabens nicht möglich wäre.

Literatur

- [1] Speck, K.; Vogdt, F.; Curbach, M.; Petryna, Y.: Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 3 – DOI: 10.1002/best.201800105
- [2] Hampel, T.; Speck, K.; Scheerer, S.; Ritter, R.; Curbach, M.: High Performance Concrete under Biaxial and Triaxial Loads. ASCE Journal of Engineering Mechanics 135 (2009) 11, S. 1274–1280 – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:11(1274)
- [3] Curbach, M.; Speck, K.: Strength under multiaxial states of stress. In: fib (Hrsg.): Bulletin 70. Code-type models for structural behaviour of concrete: Background of the constitutive relations and material models in the fib Model Code for Concrete Structures 2010, State-of-art report, Lausanne: fib, 2013, S. 21–29
- [4] Speck, K.; Curbach, M.: Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von ultra-hochfestem Beton (UHPC) | Experimental Determination and Mathematical Description of the Multiaxial Strength of Ultra-High Performance Concrete. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Thiemicke, J. (Hrsg.):

- Nachhaltiges Bauen mit Ultrahochfestem Beton – Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1182, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), erschienen in: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 22, Kassel: kassel university press, 2014, S. 365–392 – urn:nbn:de:0002-34816
- [5] Speck, K.: Beton unter mehraxialer Beanspruchung · Ein Materialgesetz für Hochleistungsbetone unter Kurzzeitbelastung. Diss., TU Dresden, 2008 – URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1216628091575-43714>
 - [6] Schmidt-Thrö, G.; Scheufler, W.; Fischer, O.: Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 8, S. 496–504 – DOI: 10.1002/best.201600026
 - [7] Fischer, O.; Gehrlein, S.: Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke. Publiziert im hier vorliegenden Band
 - [8] Fischer, O.; Thoma, S.; Crepaz, S.: Quasi-kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung zur Rissdetektion in Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 3 – DOI: 10.1002/best.201800089
 - [9] Hartog, A. H.: Historical Development of DOFS. In: Hartog, A. H. (Hrsg.): An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors, Boca Raton: CRC Press, 2017, S. 9–16
 - [10] Samiec, D.: Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung. Photonik 6 (2011), S. 34–37
 - [11] Froggatt, M.; Moore, J.: High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter. Applied Optics 37 (1998) 10, S. 1735–1740 – DOI: 10.1364/AO.37.001735
 - [12] Kreger, S. T.; Gifford, D. K.; Froggatt, M. E.; Soller, B. J.; Wolfe, M. S.: High Resolution Distributed Strain or Temperature Measurements in Single- and Multi-Mode Fiber Using Swept-Wavelength Interferometry. In: Optical Society of America (Hrsg.): Proc. of Symp. Optical Fiber Sensors 2006, 23.–27.10.2006 in Cancun (Mexico), 2006, paper ThE42., 4 S.
 - [13] LUNA Inc.; LUNA Technologies (Hrsg.): ODiSI-B Optical Distributed Sensor Interrogator Users Guide. Rev. 4.0. Blacksburg, VA 24060: LUNA Technologies, 2013
 - [14] Künzel, A.: Parameteridentifikation auf Basis faseroptisch gemessener quasi-kontinuierlicher Dehnungssignale. Diss., TU Berlin, 2016
 - [15] Ritter, R.; Curbach, M.: Strain Measurement of Steel Fiber-Reinforced Concrete under Multiaxial Loads with Fiber Bragg Grating. ACI Materials Journal 110 (2013) 1, S. 57–66

Bildnachweise

Bild 1
 Bilder 2–4, 6, 7, 8 (oben Mitte und rechts), 9, 10
 Bilder 5, Bild 8 (unten Mitte und links)
 Bild 8 (links oben, rechts unten)
 Bild 11

Fritz Vogdt
 Kerstin Speck
 Sven Hofmann
 Elena Fleckenstein
 Stefan Gröschel

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 48

Das 10. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ fand am 11. März 2019 an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

Das Symposium wurde mit einem Vortrag über Analogiebetrachtungen und Sicherheitsaspekte bei experimentellen Bauwerksuntersuchungen eröffnet. Zum Thema Messtechnik wurden in diesem Jahr vor allem faseroptische Systeme und deren Anwendung sowie die Möglichkeiten digitaler bildgebender Verfahren diskutiert. Zwei Vortragende stellten Messmethoden vor, die auf Schwingungsanregungen beruhen, einmal zur Bestimmung von Stabkräften und einmal für die Prüfung von Befestigungen. Als Fortsetzung eines Beitrags zum 9. SEUB wurde das Potential von Miniaturproben zur Kennwertermittlung dargelegt.

Berichte über Projekte zur Thematik Bauwerksbeprobung und Monitoring rundeten das Vortragsprogramm ab. Neben einem Beispiel aus dem Hochbau nahmen beim 10. SEUB vor allem Projekte aus dem Brückenbau eine dominierende Rolle ein. Die Spanne reichte von der Anwendung faseroptischer Messmethoden bei 1:1-Versuchen über die realitätsnahe Bestimmung von Ziellastniveaus bis zu In-situ-Tests an Brückenbauwerken.