



Sensorbasierte Kohlefaser-textilarmierungen für Monitoring und Verstärkung

**Stefan Käseberg
Maria Barbara Schaller
Michael Kuhne**

Sensor based Carbon Fiber reinforced Polymers for Monitoring and Strengthening

Im Betonbau hat sich die Bauteilverstärkung mit CFK-Systemen (Kohlefaserverstärkten Kunststoffen) bewährt. Zu den Vorteilen zählen neben einem hohen E-Modul und großer Zugfestigkeit auch Korrosionsbeständigkeit sowie ein geringes Kriechen und Schwinden. Neben den genannten Vorteilen weisen CFK-Materialien aber auch Nachteile auf. Zu diesen zählen neben dem spröden Materialversagen das wenig duktile Verbundverhalten zwischen Betonoberfläche und CFK-Material sowie die nicht abschließend geklärte Langzeitstabilität. Moderne faseroptische Messsysteme können Dehnungen, Risse etc. zuverlässig überwachen. In diesem Beitrag sollen deshalb sensorbasierte Textilarmierungen vorgestellt werden, die sowohl zur Tragwerksertüchtigung als auch in der Bauwerksüberwachung Verwendung finden können. Im Rahmen des regionalen Wachstumskerns „highStick“ werden durch das Forschungsprojekt „Sensorbasierte Textilarmierung“ technische Textilien, wie Kohlefaser-Sheets (CF-Gelege), mit optischen Fasern bestickt. Der Verlauf der optischen Faser auf dem Textil kann frei gewählt werden, wodurch sich z. B. eine Temperaturkompensation in mechanisch entkoppelten Bereichen realisieren lässt. Die Fixierung am Bauteil geschieht mittels Epoxidharzklebern, die das technische Textil durchdringen und gleichzeitig den Klebeverbund zum Bauteil herstellen. Am Bauteil entsteht ein sensibler Faserverbundwerkstoff, der äußerst flexibel eingesetzt werden kann. Neben der Bauwerkertüchtigung sind z. B. auch reine Monitoringaufgaben möglich.

Schlüsselbegriffe: Kohlefaserverbundwerkstoffe, Bauwerksüberwachung, optische Faser, technisches Sticken

The reinforcement of bearing structures with secondary glued reinforcement has been practiced successfully for a long time. The load bearing behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) is significantly influenced by the properties of the matrix, the fiber and the interface between both. Thereby some important disadvantages of the brittle materials must be considered, for example the low ductility of the bond between CFRP and concrete and brittle failure of FRP. With embedded sensor systems it is possible to measure crack propagation and strains. In this paper a sensor based CFRP system will be presented, that can be used for strengthening and measuring.

Keywords: CFRP, smart composite, structural health monitoring, optical fiber, FBG, embroidery



ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.

Tag der Einreichung: 10. März 2010

1 Einleitung – Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

Die Nachverstärkung und Ertüchtigung von Stahlbetontragwerken spielt eine immer wichtigere Rolle im modernen Stahlbetonbau. Die Gründe liegen sowohl im zunehmenden Alter des Bauwerksbestandes als auch in der Notwendigkeit, Umnutzungen vornehmen zu müssen. Für die Sanierung von Stahlbetonkonstruktionen stehen im Wesentlichen Querschnittsergänzungen, Änderungen am Tragsystem, Injektionen und die Technik des Vorspannens als wirksame Werkzeuge zur Verfügung. Insbe-

sondere Querschnittsergänzungen sind interessant, da durch diese aufwändige Änderungen am statischen System vermieden werden können. Neben Spritzbeton oder Aufbeton haben sich hier vor allem geklebte Zusatzbewehrungselemente bewährt. Die Bewehrung stellen Laschen dar, die aus Stahl oder faserverstärkten Kunststoffen bestehen und mittels Reaktionsharzsystemen an das zu ertüchtigende Bauteil angeklebt werden. Die Verstärkung von Tragwerken durch aufgeklebte Zusatzbewehrungen wird seit Langem erfolgreich praktiziert. Stahlflaschen werden dabei seit rund 50 Jahren und faserverstärkte Kunststoffflaschen seit ungefähr 25 Jahren eingesetzt. Gegenüber Stahl bietet die Kohlefaser eine Reihe von Vorteilen. Dazu zählen der bis zu 50 % höhere E-Modul sowie die bis zu 12-fach höhere Zugfestigkeit. Die Anwendungsmöglichkeiten zur Nachverstärkung sind aufgrund der Flexibilität der CFK-Systeme mannigfaltig und reichen von der Biege- und Schubverstärkung bis hin zur Umschnürung von Beton-Druckgliedern zur Erhöhung der Betondruckfestigkeit [1]. Demgegenüber stehen aber auch Nachteile, wie das spröde Versagen der linearelastischen Baustoffe als auch der komplizierte Verbund zwischen Betonoberfläche und Klebermatrix [2]. In den meisten Fällen stellen sich deshalb Versagensformen zu meist ohne Vorankündigung ein und zeigen ein wenig duktilen Verhalten. Abb. 1 zeigt ein zerstörtes Betondruckglied nach Versagen der CFK-Verstärkung.



Abb. 1: Zerstörte CFK-Verstärkung an Betondruckglied

Die aufgezeigten Schwierigkeiten und Probleme führten dazu, über eine dauerhafte Überwachung der CFK-Strukturen nachzudenken. Die Lösung sind direkt in die Harzmatrix integrierte Sensoren, die zu sog. smarten CFK-Systemen führen. Als Sensoren bieten sich, basierend auf ihren im Weiteren dargestellten Charakteristika, Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG-Sensoren) in der Anwendung als faseroptisches Verfahren an.

2 Sensorbasierte Kohlefasertextilarmierungen

2.1 Faser-Bragg-Gitter

Ein Bragg-Gitter besteht aus einer periodischen Abfolge künstlich erzeugter äquidistanter Brechzahlssprünge im Kern einer optischen Faser [3], welche durch Beleuchten

mit einem Interferenzmuster im UV-Bereich (durch Einsatz leistungsstarker UV-Laser [4]) erzeugt wurden. Durch das eingebrannte Interferenzmuster erfolgt eine wellenlängenselektive Reflexion des in der Faser geführten Lichts λ . Es wird Licht mit der Bragg-Wellenlänge λ_B reflektiert [5]. Das bedeutet, dass das Licht eines einstrahlenden Lichtspektrums reflektiert wird, das die Gleichung 1 einhält [6].

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

Hierbei sind λ_B = Bragg-Wellenlänge, n_{eff} = effektive Brechzahl und Δ = Gitterebenenabstand.

Folglich fehlen diese Spektren im transmittierten Bereich des Gesamtspektrums. Gleichung 1 macht das Messprinzip des Bragg-Gitters deutlich. Ändert sich der Gitterebenenabstand, verschiebt sich die Bragg-Wellenlänge und andere Lichtspektren werden reflektiert. Diese Änderungen können durch Dehnung oder Temperatureinwirkung auftreten.

Durch Dehnungsänderungen verändert sich die Bragg-Wellenlänge nach der folgenden Formel.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (1 - p_e) \cdot \Delta\varepsilon \quad (2)$$

Hierbei sind $\Delta\lambda_B$ = Änderung Bragg Wellenlänge, p_e = photoelastische Komponente ≈ 0.22 und $\Delta\varepsilon$ = Änderung der Dehnung.

Neben dem Monitoring von Dehnungen in Bauteilen sind insbesondere auch Temperaturmessungen von Interesse. Auch auf diesem Gebiet lohnt sich der Einsatz der FBG-Sensoren, da die Temperatur über den folgenden Ansatz ermittelbar ist.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (3)$$

Hierbei sind α = Thermoelastischer Koeffizient, ξ = Thermo-optischer Koeffizient und ΔT = Temperaturänderung. Gleichzeitig legt Gleichung 3 den Umstand nahe, dass der messbare Effekt der Verschiebung der Bragg-Wellen auch durch Überlagerung von Dehnung und Temperatur verursacht werden kann. Beide Einflüsse können mit guter Näherung durch folgenden linearen Zusammenhang beschrieben werden [7].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \cdot \Delta\varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (4)$$

Aus Gleichung 4 ergibt sich durch Umstellen nach $\Delta\varepsilon$ Gleichung 5.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{1 - p_e} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \right) \quad (5)$$

Sollen explizit Dehnungsmessungen durchgeführt werden, ist eine Kompensation des Temperatureinflusses unbedingt erforderlich. Dies kann z.B. durch Anordnung eines zweiten Faser-Bragg-Gitters im mechanisch unbeanspruchten Bereich erfolgen.

Ein wesentlicher Grund für die stetige Verbreitung der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren ist in der Multiplexfähigkeit zu sehen [8]. Ein Bragg-Gitter kann Dehnungsveränderungen nur an einem Punkt messen. Es ist aber möglich, mehrere Gitter auf einer optischen Faser zu verteilen. An jedem Einzelgitter werden die Lichtspektren reflektiert, die die Gleichung 1 einhalten. Die Unterscheidung der

Gitter erfolgt durch Variation der Gitterperioden Δ_i , wodurch ein sog. verteilter und wellenlängenkodierter Sensor entsteht [9]. Weitere Vorteile sind unter anderem die geringen Abmessungen, ein niedriges Gewicht sowie eine hohe statische und dynamische Messwertauflösung, aber auch die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Strahlung und den meisten Chemikalien.

Um die FBG-Sensoren auslesen zu können, wird breitbandiges Licht in die optische Faser eingekoppelt. Das an den Bragg-Gittern reflektierte Licht wird in der Regel über ein Spektrometer erfasst. Jedes FBG erzeugt dabei einen spezifischen Peak mit der Bragg-Wellenlänge λ_B im Spektrum (Abb. 2). Die Wellenlänge des Peaks wird dann nach Gleichung 5 in Dehnungswerte umgerechnet. Die technischen Daten des im Projekt genutzten Spektrometers sind in Tabelle 1 aufgeführt.

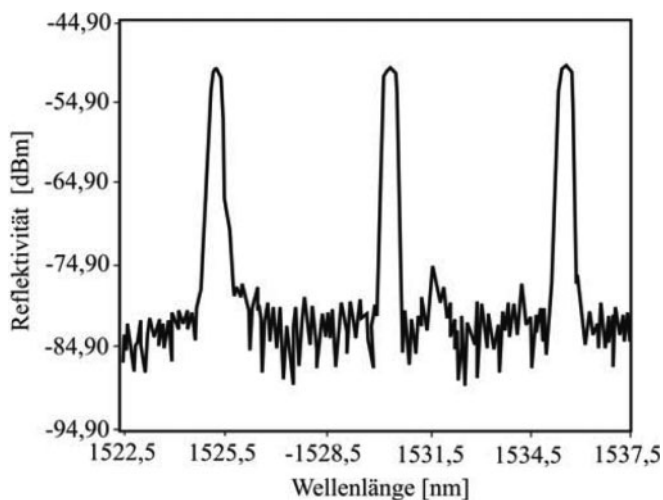


Abb. 2: Spektrum dreier FBG-Sensoren

2.2 Einsatz von FBG-Sensoren in CFK-Werkstoffen

Die unmittelbare Einbettung von optischen Fasern mit integrierten Bragg-Gittern in die Harzmatrix erlaubt direkte Dehnungsmessungen im CFK-Material. Die Harzmatrix stellt gleichzeitig einen wirkungsvollen Schutz für die Glasfaser dar.

Optische Sensoren zur Messung von CFK-Verstärkungssystemen sind aus der Literatur bekannt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die Verstärkungsfunktion des CFK-Systems optimal mit der Echtzeitmessung durch die optischen Sensoren verbinden lässt. An mit CF-Sheets (Kohlefaser-Gelegen) verstärkten Biegebalken wurden die Dehnungen im CFK-Material mit Faser-Bragg-Gittern gemessen und mit DMS-Messergebnissen und theoretisch errechneten Werten verglichen. Die dabei ermittelten Werte, insbesondere von DMS und FBG-Sensoren, zeigten sehr gute Übereinstimmung [10]. Weiterhin wurden auch Bewehrung und Betonmatrix mit FBG-Sensoren überwacht, was die komplette Abbildung der Dehnungsverteilung über den Querschnitt ermöglichte. Dadurch sind neue Erkenntnisse hinsichtlich des nichtlinearen Verhaltens verstärkter Stahlbetonbauteile möglich, die zu mehr Sicherheit, aber auch gesteigerter Wirtschaftlichkeit führen können.

Tabelle 1: Eigenschaften verwendetes Spektrometer

Hersteller	AOS GmbH Dresden	
Arbeitswellenlängenbereich	[nm]	1515 ... 1570
Auflösung Wellenlängenmessung	[pm]	< 1
Auflösung Dehnungswerte	[μm]	< 1
Auflösung Temperaturmessung	[K]	0,1
Genauigkeit Wellenlängenmessung mit Kalibrator	[pm]	+/- 5
Genauigkeit Dehnungswerte mit Kalibrator	[μm]	+/- 5
Genauigkeit Temperaturmessung mit Kalibrator	[K]	+/- 0,2
Messgeschwindigkeit	[Hz]	2
Steckertyp	[-]	FC / APC

Auch in in-situ-Versuchen wurden erste Ergebnisse mit optischer Messtechnik gesammelt [11]. Sensitive CFK-Nachverstärkungssysteme gestatteten, Fehlstellen im Verbund zwischen Beton und CFK-System, besonders an schwerzugänglichen Stellen, zu erkennen und zuverlässig zu überwachen. Mittels FBG-Sensoren können darüber hinaus auch Querspannungen und Risse in Querrichtung in CFK analysiert werden, was gerade unter dem Umstand der Querbelastungsempfindlichkeit von Kohlefasern interessant ist.

Durch die Anordnung von mechanisch entkoppelten FBG gelingt es, Dehnungsmessung und Temperaturkompensation auf einer Glasfaser im CFK-Material zu realisieren. Somit ist es möglich, intelligente smart CFK zu entwickeln, die neben der Realisierung der reinen Verstärkungsfunktion eine Vielzahl von mechanischen Zuständen langfristig aufzeichnen und überwachen können.

2.3 Applizieren und Integrieren der optischen Fasern durch Aufsticken

Bisher erfolgt das Aufbringen von FBG-Sensorglasfasern meist durch punktuelle Fixierung (z. B. mit Epoxidharz) der Glasfasern auf einem Träger. Dabei muss in der Regel das Coating der Faser im Bereich der Fixierung entfernt werden, um die Kraftübertragung auf den Glaskern zu gewährleisten. Das ist in der Praxis schwierig und fehleranfällig. Einzelne FBG-Sensoren in verschiedene Raumrichtungen anzuordnen, ist dabei nicht leicht zu realisieren.

Um erfolgreich sensorbasierte CFK-Verstärkungen herstellen zu können, ist eine ausreichende Fixierung der optischen Glasfasern mit integrierten FBS-Sensoren unabdingbar. Besonders das Verlegen der Fasern in einem bestimmten Muster ist aufwändig und muss mit sehr viel Vorsicht geschehen. Eine Möglichkeit, beliebige Muster der Sensorfasernanordnung zu realisieren, besteht darin, die optische Faser direkt auf ein CF-Trägergewebe zu sticken. (z. B. CF-Gelege siehe Abb. 3).

Wenn das Stickmuster so gepunscht (programmiert) wird, dass die einzelnen FBG-Sensoren jeweils in verschiedene Richtungen auf dem Gewebe ausgerichtet sind, können

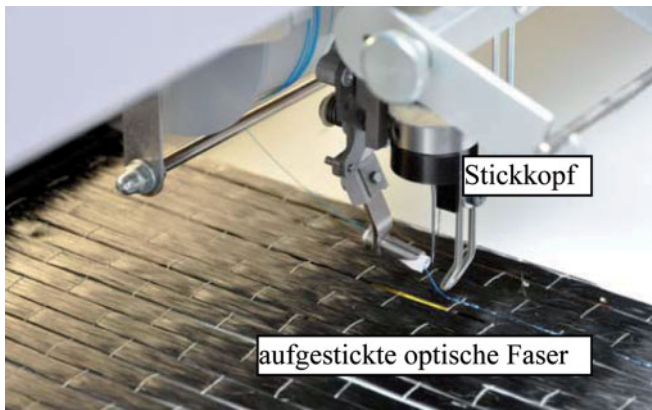


Abb. 3: Aufbringen der optischen Faser auf CF-Sheet

zweidimensionale Spannungszustände erfasst werden. Ist eine Belastungsrichtung spannungsfrei, kann ein in diese Richtung angeordneter FBG-Sensor zur Temperaturkompensation herangezogen werden. Dabei ist beim punschen des Stickmusters darauf zu achten, dass durch Krümmung der Glasfaser die Reflexion des Lichtes in der Glasfaser verringert wird. Die deshalb einzuhaltenden Mindestbiegeradien betragen 15 mm. Bei dem hier vorgestellten Verfahren erfolgt das Aufstickten der optischen Fasern mittels einer Spule, die die Faser zuführt, und eines Stickkopfes (siehe Abb. 3), der die Faser in einem Zick-Zack-Muster überstickt. Die ebenfalls integrierbaren Stecker sind mit Schutzhüllen versehen, die ein Abknicken der Glasfasern im Randbereich der sensitiven CF-Gelege verhindern.

Um während des Stickprozesses die Knickbelastung für die optischen Fasern so gering wie möglich zu halten, werden die Trägergelege mittels Fixiereinrichtung in X-Y-Richtung auf dem Sticktisch bewegt. Stickkopf und Spule sind drehbar und passen sich so dem jeweiligen Verlauf auf dem Gelege an.

In Abb. 4 ist der Verlauf einer optischen Faser auf CF-Textilien erkennbar. Bragg-Gitter können mit dem Verfahren an den Stellen positioniert werden, an denen Dehnungs- oder Temperaturmessungen stattfinden sollen. Durch die Bestickung gelingt darüber hinaus die direkte mechanische Verbindung der optischen Faser mit den Kohlefasern. Eine Schwächung der CF-Gelege durch den Prozess des Aufstickens konnte experimentell durch Zugversuche ausgeschlossen werden.

Das sensorbewehrte CF-Textil kann nun vorlaminieren oder direkt auf der Baustelle in Handlaminierung zum CFK-

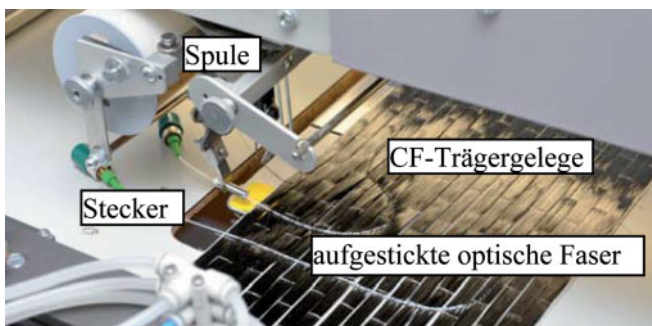


Abb. 4: Aufgestickte Faser mit Steckern

Werkstoff weiterverarbeitet werden (siehe Abb. 5). Hierzu wird das sensitive CF-Gelege in ein Reaktionsharzsystem eingearbeitet. Der Kleber realisiert gleichzeitig die Klebeverbindung des Geleges zum Untergrund. Da jeweils drei FBG-Sensoren in eine Faser eingebracht wurden, sind drei Peaks im reflektierten Spektrum zu sehen, so wie in Abschnitt 2.1 beschrieben und in Abb. 2 dargestellt.



Abb. 5: Laminieren des sensitiven CF-Geleges am Bauteil

3 Laborversuche

In Laborversuchen sollten die Eigenschaften der sensorintegrierten CF-Gelege bestimmt werden. Dazu wurden acht Stahlbetonbalken mit einer Länge von 70 cm und einem quadratischen Querschnitt von $15 \times 15 \text{ cm}^2$, jeweils mit zwei Betonstählen mit 6 mm Durchmesser als Biegebewehrung hergestellt. Die Balken wurden auf der Unterseite, der Betonzugzone, mit den sensorintegrierten CF-Gelegen die mit Epoxidharz fixiert wurden, versehen. Ein weiterhin auf der Unterseite angebrachter elektrisch arbeitender Dehnmessstreifen (DMS) diente zur Überprüfung der Messwerte der FBG-Sensoren.

Die für die Verstärkung verwendeten CF-Gelege wurden, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, mittels Sticktechnik mit einer optischen Sensorfaser versehen. In dieser waren drei FBG-Sensoren integriert. Das Stickmuster wurde so gepunscht (programmiert), dass zwei FBG-Sensoren in Längsrichtung, der Zugrichtung und ein FBG in Querrichtung (spannungsfrei zur Temperaturkompensation) angeordnet waren. In Abb. 6 ist der fertige Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

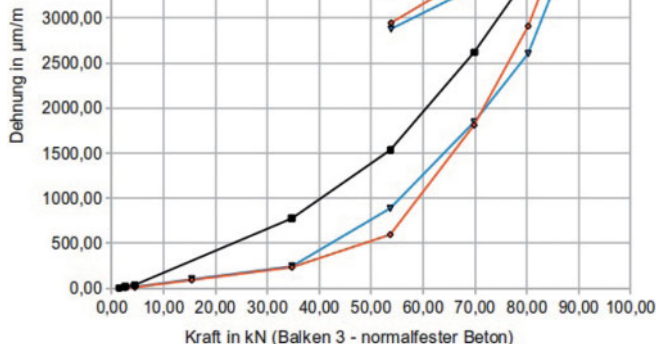
In Vier-Punkt-Biegezugversuchen wurden die Balken bis zum Bruch belastet. Für die Wegsteuerung wurden induktive Wegaufnehmer und Kraftmessdosen verwendet. Bei allen Versuchsbalken wurde das Versagen durch die Zerstörung des Verbundes zwischen aufgeklebter CFK-Verstärkung und Betonoberfläche verursacht.

Exemplarisch werden in Abb. 7 die Messwerte eines Versuchs dargestellt.

Die FBG-Sensoren, als auch der DMS zeigten bei allen Versuchen jeweils einen analogen Messwertverlauf, wobei alle Sensoren bis zum Versagen ausgelesen werden konnten. Die relativ großen Abweichungen zwischen den Messergebnissen der FBG-Sensoren als auch dem DMS erklären sich aus der räumlichen Trennung der Sen-



Temperaturkompensation; 5: DMS



Zugzonen der Balken bestätigen diese These.

4 Fazit und Ausblick

stanz vornehmen zu müssen. Dennoch gibt es auch bei dieser Sanierungsmethode Probleme. Zu diesen zählen

Stick- und Laminierprozess ließ sich nicht feststellen.

5 Dank

schung unter folgenden Förderzeichen gefördert.

- Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.
03WKBJ1D
- Materialforschungs- u. -prüfanstalt an der Bauhaus-
Universität Weimar 03WKBJ1E
- LEHMANN Maschinenbau GmbH 03WKBJ1F

und Torsten Müller von der HTWK Leipzig.

6 Literatur

- [3] KURTARAN, S.; KILIÇKAYA, M. S.: The modelling of Fiber Bragg Grating. In: Opt Quant Electron 39 (2007), Springer Verlag, 2007.
- [4] PEUPELMANN, J.: Experimentelle Untersuchungen zur Realisierung eines Inline-Faser-Polarimeters basierend auf UV-induzierten Strukturen. Dissertation, Aachen, 2004.
- [5] HERING, E.; MARTIN, R.: Photonik. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [6] KLINK, T.; SLOWIK, V.; MEIBNER J.: Dehnungsmessung an einer Spannbetonbrücke mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. In: Bautechnik 74 (1997), Heft 6, Ernst und Sohn Verlag, 1997.
- [7] HABEL, W. R.: Faseroptische Sensoren für hochaufgelöste Verformungsmessungen in der Zementsteinmatrix. Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2003.



- [8] FRANK, A.: Dehnungs- und Temperaturmessung in Verbundwerkstoffen mit eingebetteten faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren. Dissertation, Dübendorf, 2001.
- [9] KREUDER, A.: Dynamische Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gittern. Dissertation, Duisburg, 2001.
- [10] LU, S.; XIE, H.: Strengthen and real-time monitoring of RC beam using „intelligent“ CFRP with embedded FBG sensors. In: Construction and Building Materials 21 (2007), Elsevier, 2007.
- [11] BASTIANINI, F.; CORRADI, M.; BORRI, A.; TOMMASO, A.: Retrofit and monitoring of an historical building using „Smart“ CFRP with embedded fibre optic Brillouin sensors. In: Construction and Building Materials 19 (2005), Elsevier, 2005.

Anschrift der Autoren:

M. Sc. STEFAN KÄSEBERG, HTWK Leipzig, Institut für Betonbau, stefan.kaeseberg@fb.htwk-leipzig.de

Dipl.-Ing. MARIA BARBARA SCHALLER, GGB mbH, Espenhain, mbschaller@ggb.de

Dr. rer. nat. MICHAEL KUHNE, Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, michael.kuhne@mfpa.de