

# Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau

Das Verfahren der kontinuierlichen faseroptischen Messung bietet eine Reihe von neuen Möglichkeiten bei der messtechnischen Begleitung von Versuchen und erlaubt eine detailliertere Auswertung und Interpretation. Auf der anderen Seite stellt die Technik auch erhöhte Anforderungen an die Expertise und Erfahrung der Beteiligten. Das Messverfahren wird im vorliegenden Beitrag kurz vorgestellt und es werden das Potenzial sowie die Herausforderungen und Grenzen aus Sicht der Autoren anhand von zwei einfachen Versuchen aufgezeigt und erläutert.

## 1 Einleitung

Grundsätzlich besteht bei experimentellen Untersuchungen das Bestreben, innere und äußere Verformungen und Verzerrungen so genau als möglich zu erfassen und basierend auf den gewonnenen Messdaten mechanische Zusammenhänge und das Schädigungsverhalten zu analysieren sowie wirklichkeitsnahe Ingenieurmodelle abzuleiten. Die äußeren Verformungen werden bereits seit Jahrzehnten durch klassische Verformungsmesstechnik (z. B. induktive Wegaufnehmer) an ausgewählten Punkten aufgezeichnet. Im Inneren von Stahlbetonbauteilen sind besonders die Dehnungen der schlaffen oder vorgespannten Bewehrung von Interesse. Diese werden üblicherweise mit Dehnmessstreifen (DMS) [1] oder – vor allem bei lang dauernden Messungen – durch Schwingsaitensensoren [2] messtechnisch erfasst. Mit der Weiterentwicklung der analog/digitalen Verstärkertechnik, in Verbindung mit immer leistungsfähigeren Computern, wurden die klassischen Verfahren weiter verbessert und neue Verfahren kamen hinzu. Ein nennenswerter Fortschritt zur Messung von Verformungen an Bauteiloberflächen wurde durch die Nahfeldphotogrammetrie (engl: digital image correlation = DIC [3]) erzielt, die – basierend auf Speckle-Interferometrie oder Kantenerkennung – zur berührungslosen und flächigen Messung herangezogen werden kann. Dadurch eröffneten sich bereits völlig neue Möglichkeiten in der Versuchsbeobachtung [4].

Die Entwicklung der in diesem Artikel diskutierten faseroptischen Sensoren ist eng mit der Erforschung und Entwicklung von Glasfaserleitungen [5] verknüpft. Beispielsweise erlaubte die Möglichkeit zur lokalen Modulierung des Brechungsindex (Bragg Gitter [6]) später die Entwicklung von diskreten faseroptischen Sensoren (FBG-Sensor) zur Temperatur- und Dehnungsmessung [7]. Faseroptische Verfahren zeichnen sich gegenüber konventionellen DMS unter anderem durch ihre Robustheit ge-

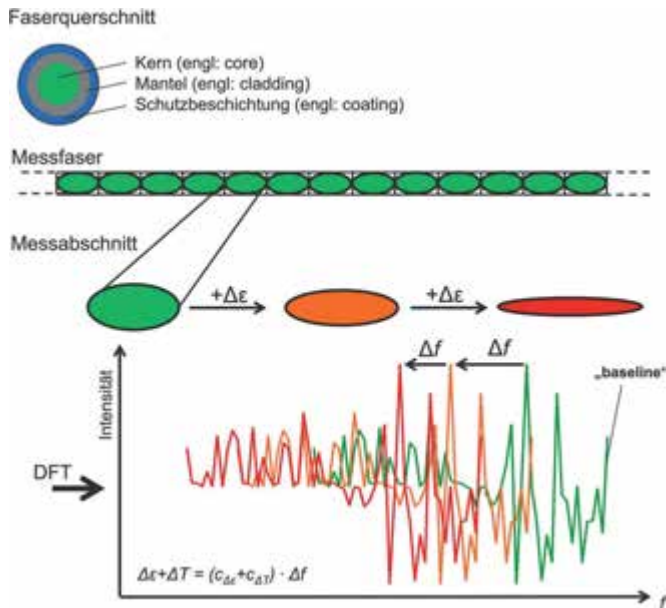
## Distributed fiber-optic strain measurement – application in reinforced concrete members

Distributed fiber optic measurement based on Rayleigh scattering is a technique with new possibilities in the field of analysis and interpretation of experiments. However, the application is challenging and requires a lot of experience and practice. The measurement technique will be briefly described and subsequently the authors will show and explain the potential as well as challenges and limits of application based on two small experiments.

genüber elektromagnetischen Interferenzen aus. Zudem werden durch die Messtechnik bedingte Bauteilstörungen reduziert, da die optische Messfaser einerseits die Zuleitung darstellt und andererseits auch sämtliche Sensoren miteinander verbindet, während bisher je Sensor (DMS) eine eigene Zuleitung (mit größerem Querschnitt als die optische Faser) erforderlich wird, die jeweils aus dem Bauteil zu führen ist. Das Multiplexverfahren bei FBG-Sensoren erlaubt prinzipiell bereits diskontinuierliche Messungen mit kleinen Messpunktabständen, vgl. [8].

Mit der flächendeckenden Verlegung von Glasfaserleitungen wurden auch diagnostische Überwachungsgeräte (Detektion von Beschädigungen, Stellen mit hohem Signalverlust und schlechte Faserverbindungen) notwendig, vgl. [5]. Entsprechende Systeme gelten als erste Anwendung der kontinuierlichen faseroptischen Messtechnik. Im Bauwesen sind bereits Systeme basierend auf Brillouin- und Raman-Streuung bekannt und zum Teil für die Strukturüberwachung im Einsatz, vgl. z. B. [9]. Diese zeichnen sich durch Faserlängen im Kilometer-Bereich und Messlängen im Bereich von mehreren Zentimetern aus. (Als „Messlänge“ wird dabei die Länge eines Messabschnitts (vgl. Bild 1) bezeichnet. Diese ist vergleichbar mit der Messgitterlänge eines DMS. Je einzelner Messlänge wird jeweils ein Messergebnis (Messpunkt) ausgegeben.) Derartige Verfahren werden beispielsweise im Bereich des Pipeline-Baus oder in der Geotechnik verwendet. Für den messtechnischen Einsatz, speziell im Stahl- und Spannbetonbau, ist die örtliche Auflösung jedoch in den meisten Fällen nicht ausreichend.

Mit der Entwicklung eines patentierten hochauflösenden und kontinuierlichen Messverfahrens, das die Rayleigh-Rückstreuung zur Messung von Dehnung und Temperatur nutzt, sind nun auch Messpunktabstände im Millimeter-Bereich möglich. Auf Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens wird im weiteren Verlauf näher eingegangen.



**Bild 1** Messprinzip basierend auf Rayleigh-Rückstreuung  
Fiber optic measuring principle based on Rayleigh scattering

Grundsätzlich stehen den wesentlichen Vorteilen der variablen, nahezu kontinuierlichen Messung mit vergleichsweise günstigen Fasern die relativ hohen Anschaffungskosten für die Gerätetechnik gegenüber. Derzeit sind drei unterschiedliche Geräte eines Herstellers erhältlich und wurden im Bereich des Massivbaus bereits vereinzelt für Messungen genutzt, vgl. z.B. [10, 11]. Dem Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München (TUM) stehen die zwei neuesten Geräte (entsprechend der Produktspezifikation des Herstellers: Typ „A“ und Typ „B“) zur Verfügung. Damit konnten bereits vielfältige Erfahrungen in der Anwendung bei experimentellen Forschungsvorhaben und bei Industrieaufträgen im Labor sowie bei Bauteilmessungen vor Ort gesammelt werden, vgl. z.B. [12–14]. Das Gerät Typ „A“ erzielt unter Laborbedingungen eine maximale Wiederholgenauigkeit von  $\pm 2 \mu\text{-strain}$  ( $\pm 0,002\%$ ) bei Messlängen von 1 mm und maximaler Dehnung von  $\pm 1,3\%$  bei Abtastraten von bis zu 5 Hz. Dagegen ermöglicht Gerät Typ „B“ gemäß Herstellerangaben eine Abtastrate von bis zu 250 Hz bei einer maximalen Wiederholgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{-strain}$ , Messlängen von 5,12 mm im Regelfall (minimal möglich sind Messlängen von 1,58 mm) und maximaler Dehnung von  $\pm 1,2\%$ . Wesentlicher Vorteil von Gerät „A“ ist der im Vergleich mit „B“ frei wählbare Messpunktstand (und Messlänge) sowie die höhere Auflösung und die Möglichkeit zur sequentiellen Messung von mehreren Fasern bei einem insgesamt stabileren Messverhalten. Typ „B“ eignet sich aufgrund der möglichen höheren Abtastraten vor allem auch für dynamische Messungen.

## 2 Verfahren der faseroptischen Dehnungsmessung basierend auf Rayleigh-Rückstreuung

Das Messprinzip wird an dieser Stelle nur sehr vereinfacht beschrieben. Eine eingehende detaillierte technische Beschreibung des Verfahrens findet sich z.B. in den

Veröffentlichungen [15–19]. Der Faserkern (Bild 1) besitzt aufgrund von Dichte- und Geometrieschwankungen sowie von Mikroeingüssen entlang der Faser einen schwankenden Brechungsindex. Wird Laserlicht durch den Kern geleitet, entsteht infolge der veränderlichen Brechung entlang der Messfaser eine Rückstreuung mit vielfach geringerer Intensität als das Ausgangslicht. Diese als „Rayleigh-Rückstreuung“ bezeichnete Strahlung wird längs der kompletten Messfaser erfasst, in Messabschnitte (Messlänge) entlang der Faser geteilt und mithilfe der diskreten Fourier-Transformation (DFT) in den Frequenzbereich übertragen. Eine Änderung der Dehnung  $\Delta\epsilon$  und/oder der Temperatur  $\Delta T$  ist im Frequenzbereich proportional (Proportionalitätskonstanten  $c_{\Delta\epsilon}$  und  $c_{\Delta T}$ ) zur aufgezeichneten Wellenlängenveränderung  $\Delta\lambda$ . Zur Bestimmung der quantitativen Größe der Dehnungs- bzw. der Temperaturänderung dient eine vorher durchgeführte Referenzmessung („baseline“) der Faser. Die Daten können über ein proprietäres Programm des Herstellers während der Messung erfasst und im Anschluss in ein bearbeitbares Datenformat umgewandelt werden. Die erzeugten Messdaten ( $\mu\text{-strain}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) sind dabei nach der Stationierung [m] auf der Faser gegliedert.

## 3 Laborversuche

### 3.1 Allgemein

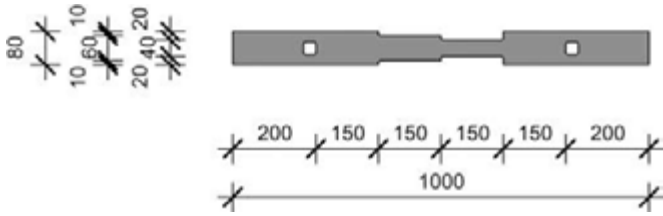
Im Folgenden wird anhand von zwei einfachen Versuchen der Einsatz von Faseroptik mit deren Stärken und Herausforderungen in Versuchen gezeigt. Die Laborversuche wurden mit dem Gerät „B“ in der Standardkonfiguration (Messpunktstand 2,56 mm, Messlänge 5,12 mm, bei maximaler Messfrequenz von 100 Hz) durchgeführt.

Die erhaltenen Rohdaten werden mit einem selbst entwickelten Softwarewerkzeug weiterverarbeitet. Die Software erlaubt die Zuordnung der Stationierung zu einer geometrischen Koordinate auf dem Versuchskörper und zusätzlich die numerische Integration von Teilabschnitten über die Zeit mithilfe des Trapezverfahrens. Aus Übersichtsgründen wird eine Linien- anstatt einer Einzelpunktdarstellung der Messdaten gewählt.

## 3.2 Versuche an einer gefrästen Stahlzugprobe

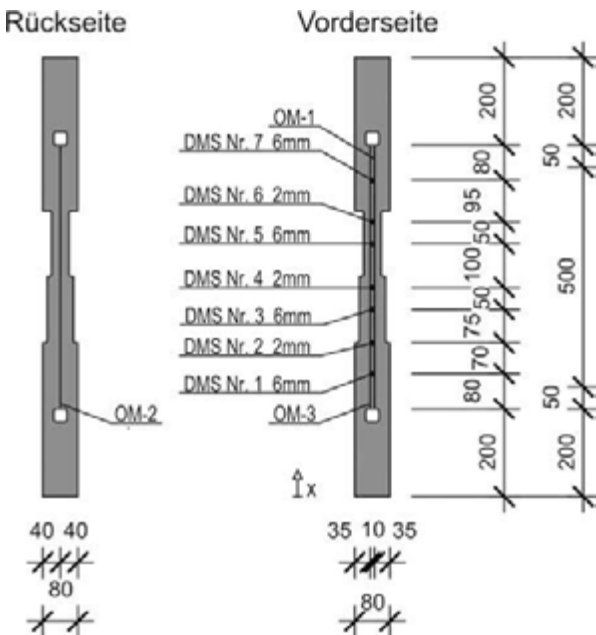
### 3.2.1 Versuchsbeschreibung, Messtechnik

Zur Untersuchung des Verbunds zwischen der Messfaser und der Probe sowie zur allgemeinen Überprüfung der Ergebnisse des optischen Verfahrens wurde am Lehrstuhl eine speziell gefräste Stahlzugprobe mit genau definiertem veränderlichem Querschnitt aus C45E+N (Material Nr.: 1.1191) hergestellt (Bild 2). Die gefräste und gestrahlte Stahlzugprobe mit konstanter Dicke von 14,4 mm hatte eine variable Breite von 80 mm bis 40 mm. Die maximale Toleranz der angegebenen Abmessungen betrug jeweils  $\pm 0,1$  mm. Die Sprünge in der Breite um jeweils 20 mm wurden bewusst zur Erzeugung einer veränderlichen Dehnung längs des Probekörpers vorgesehen.

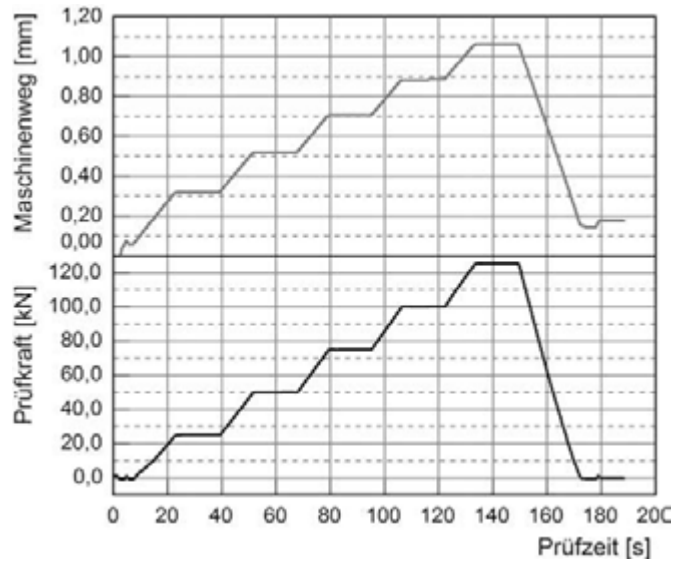


**Bild 2** Abmessungen der Stahlzugprobe  
Dimensions of tensile test sample

An der Stahlzugprobe wurde der mittlere Bereich über eine Länge von 500 mm mit Messmitteln (Bild 3) bestückt und im Versuch näher betrachtet. Dabei wurden auf der Vorderseite der Probe zwei Messfasern (OM-1 und OM-3) parallel zueinander mit einem Cyanacrylat-Klebstoff aufgeklebt, die Rückseite wurde mit einer Faser (OM-2) bestückt. Als Vergleich zur faseroptischen Messung wurden zudem in regelmäßigen Abständen DMS (Zwei-Leiter-Technik) mittig zwischen den beiden Messfasern OM-1 und OM-3 appliziert. Die Messgitterlänge der DMS wurde je nach Dehnungsgradient mit 2 mm bis 6 mm gewählt. Die Probe wurde in eine Universalprüfmaschine eingespannt und auf Zug beansprucht (Bild 4). Die Messsignale, die Prüfkraft und der Maschinenweg wurden synchron aufgezeichnet. Die faseroptische Messung wurde im Nachgang zur Versuchsdurchführung synchronisiert. Der Fokus im Tastversuch lag auf dem Nachweis eines unverschieblichen starren Verbunds zwischen der Stahlzugprobe und der verwendeten Klebstoff-Polyimid-Faser-Kombination. Dabei wurde neben der quantitativen Bestimmung der Dehnungsverteilung entlang des Stahlblechs auch punktuell ein qualitativer Vergleich mit der DMS-Messung und mit rechnerisch ermittelten Längenänderungen (FEM-Simulation; lineares, homogen-isotropes Materialverhalten) durchgeführt.



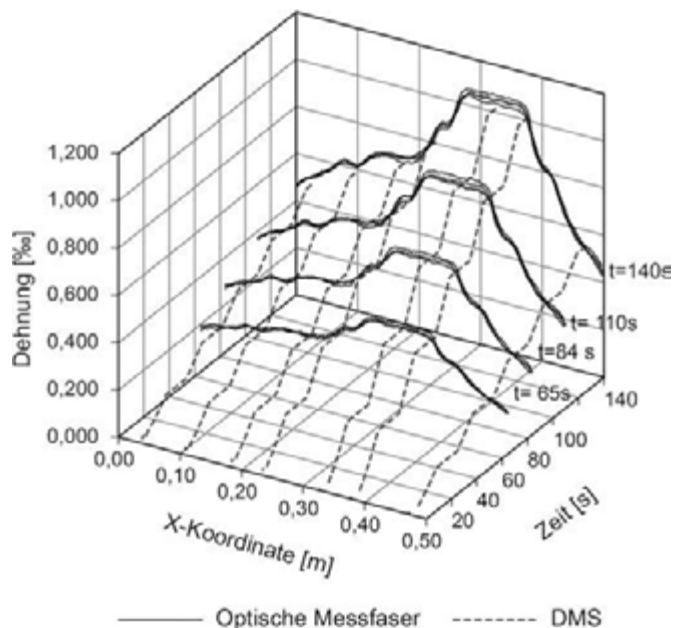
**Bild 3** Messmittel an Stahlzugprobe (DMS: Dehnmessstreifen, OM: Optische Messfaser)  
Measuring equipment (DMS: strain gage, OM: optical measurement fiber)



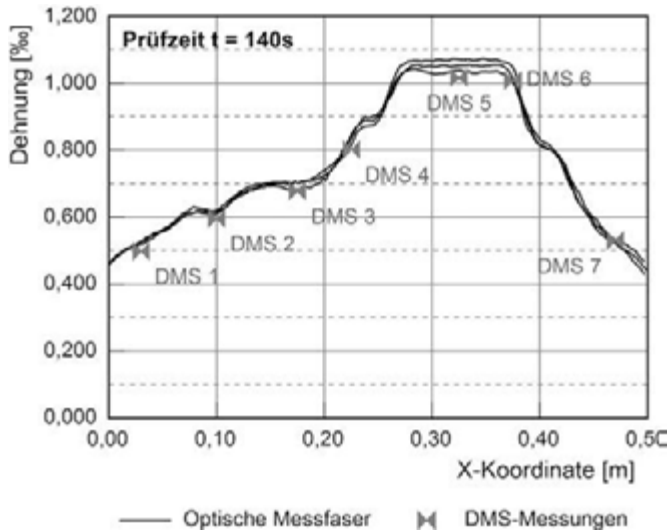
**Bild 4** Zeitlicher Verlauf der Prüfkraft (unten) und des Maschinenwegs (oben)  
Test force (bottom) and machine way (top) over time

### 3.2.2 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

In Bild 5 werden die mittels der Faseroptik gemessenen Dehnungen in den Lasthalteplateaus (Zeitpunkte  $t = 65$  s,  $84$  s,  $110$  s und  $140$  s) mit der DMS-Messung verglichen. Zur besseren visuellen Vergleichbarkeit werden in Bild 6 die Dehnungen zum Zeitpunkt  $t = 140$  s mit den insgesamt größten Dehnungsunterschieden zweidimensional dargestellt. Insgesamt zeigt sich eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der beiden Messverfahren. Die Spreizung der Messergebnisse der optischen Fasern ( $\epsilon_{OM1} < \epsilon_{OM2} < \epsilon_{OM3}$ ) lässt auf ein unplanmäßiges Biegemoment um die starke Achse der Zugprobe schließen, das auf geringe Exzentrizitäten in der Lasteinleitung zurückzuführen ist. Die maximale Ergebnisabweichung von DMS und OM liegt im Bereich von  $0,05\%$ .



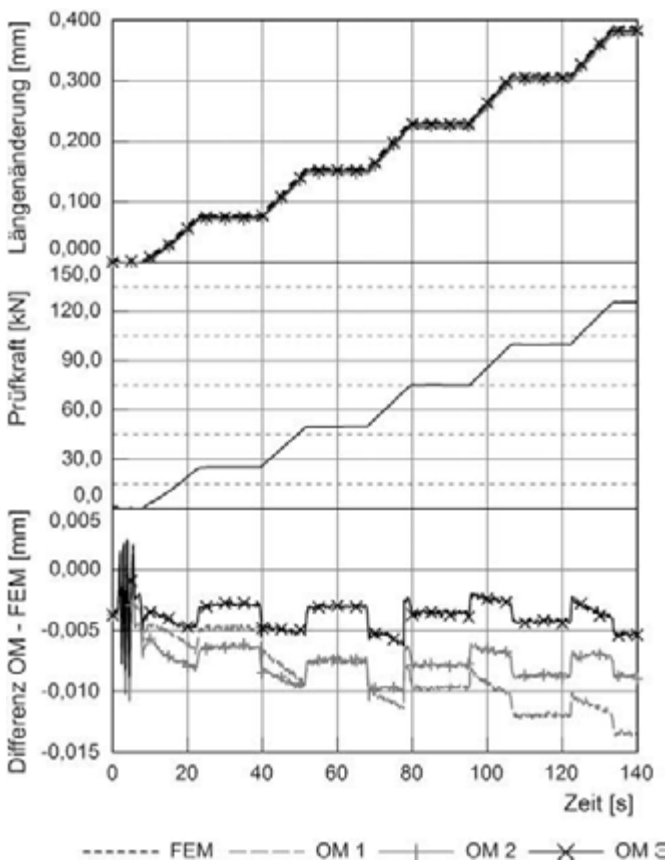
**Bild 5** Gemessene Dehnungen (DMS und optische Messfaser)  
Measured strains (strain gage and optical fiber)



**Bild 6** Dehnungsmessung (optische Messfaser und DMS), Zeitpunkt  $t = 140$  s  
Strain measurement (optical fiber and strain gage)  $t = 140$  s

Der Vergleich der integrierten Längenänderungen der Dehnungsmessung am Stahlzugblech mit der Nachrechnung mithilfe eines kommerziellen Finite-Elemente-Programms zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 7).

Bei einer maximalen Ergebnisdifferenz zwischen dem Versuch und der FEM-Rechnung von 0,0075 mm (zum



**Bild 7** Gerechnete und gemessene Längenänderungen über den mittleren Bereich (Integrationsbereich) von 500 mm  
Calculated and measured change in length over the middle region (area of integration) with 500 mm

Zeitpunkt  $t = 140$  s) ergibt sich bei der vorliegenden Integrationslänge von 500 mm ein mittlerer Dehnungsunterschied von nur  $15 \mu\text{-strain}$  ( $\Delta\epsilon = 0,015 \text{‰} \rightarrow \Delta\sigma = 3,15 \text{ MPa} \approx \Delta F = 2,75 \text{ kN}$ ).

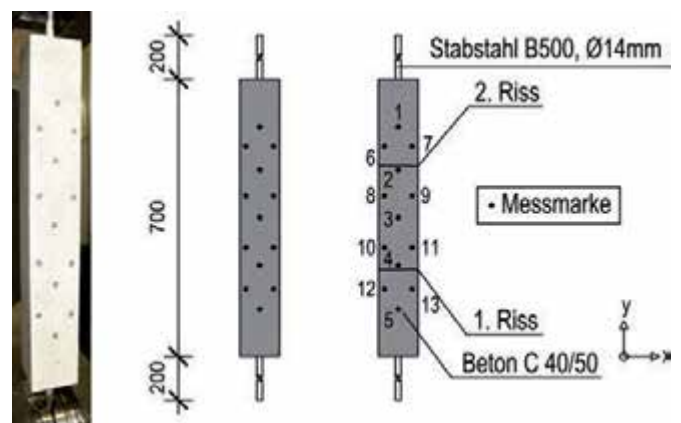
Die sich experimentell ergebenden Unterschiede in den Ergebnissen der optischen Messfasern und der DMS lassen sich mit unvermeidbaren Imperfektionen im Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung sowie daraus resultierenden unplanmäßigen Lastausmitten und damit verbundenen Biegeeffekten erklären. Weitere Ursachen für Abweichungen können auf Inhomogenitäten im Probenmaterial und auf Toleranzen in der Kraftmessung (Maschinenklasse 1, nach DIN EN ISO 7500.1) zurückgeführt werden.

### 3.3 Einbetonierter Betonstabstahl

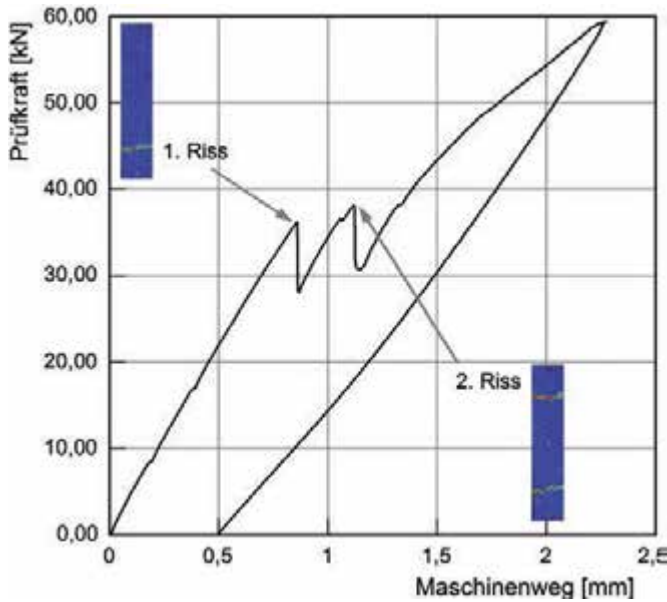
#### 3.3.1 Versuchsbeschreibung, Messtechnik

Im Rahmen eines weiteren Tastversuchs wurde ein Betonstabstahl B500 (Nenndurchmesser 14 mm, Länge 1,10 m, Stabgewicht 1303 g) in einem  $100 \times 100 \times 700 \text{ mm}^3$  großem Betonprisma einbetoniert und im Versuch gezogen (Bild 8). Der Versuch wurde weggesteuert mit Lasthalteplateaus bis zu einer Zugkraft von 60 kN (Bild 9) durchgeführt. Dabei wurden jeweils bei einer Kraft von etwa 36 kN (erster Riss) und 38,1 kN (zweiter Riss) Risse initiiert. Alle Messmittel wurden nach Aushärtung des Betons unmittelbar vor Beginn der Versuchsdurchführung (Zeitpunkt  $t = 0$ ) tariert. Die Betoneigenschaften wurden am Tag der Prüfung ermittelt und entsprechen zum Versuchszeitpunkt in guter Näherung den Werten eines C40/50. Der Beton hatte gemäß Normenreihe DIN EN 12390 eine mittlere Betonfestigkeit  $f_{cm}$  von 44,4 MPa, einen Elastizitätsmodul  $E_{cm}$  von 33500 MPa und eine gemessene Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,sp}$  von 3,56 MPa.

Im Fokus des Tastversuchs stehen der Vergleich der oberflächigen optischen Messung mit der Faseroptik im Hinblick auf die quantitative Bestimmung von Längenände-



**Bild 8** Einbetonierter Zugstab mit Faseroptik und Nahfeldphotogrammetrie (DIC)  
tension rod embedded in concrete with applied fiber-optic measurement and digital image correlation (DIC)



**Bild 9** Kraft-Weg-Diagramm  
Force-displacement diagram

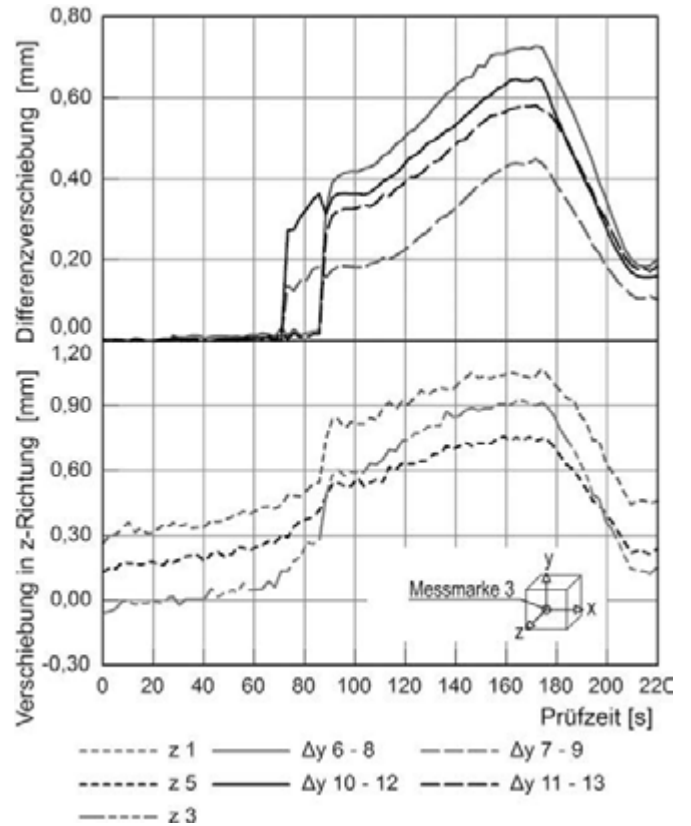


**Bild 10** Applizierte optische Messfaser am Betonstabstahl  
Applied optical measuring fiber on reinforcement bar

rungen sowie eine kontinuierliche Aufzeichnung der Dehnungsverteilung des einbetonierten Betonstahls aufgrund des Verbunds zwischen Stahl und Beton. Dabei werden die Dehnungen entlang des Stabes beidseitig mittels optischer Messfasern gemessen, Bild 10. Die Geradlinigkeit der Messfaser wurde durch Applikation entlang des Walzgrates sichergestellt. Die Verwendung von eingefrästen Nuten ist ebenfalls denkbar. Die beiden Faserabschnitte werden nachfolgend mit OM 0 (rechte Stabseite) und OM 1 (linke Seite) bezeichnet. Zusätzlich wird die Vorderseite des Versuchskörpers oberflächlich mit DIC (Bild 8, links) beobachtet. Neben einer flächigen Auswertung erlaubt das DIC auch die Auswertung von aufgeklebten Messmarken (Bild 8, rechts).

### 3.3.2 Auswertung der DIC-Ergebnisse

In Bild 11 (oben) sind die Differenzverschiebungen  $\Delta y$  der äußeren Messpunkte aufgetragen, die an gegenüberliegenden Rissufern jeweils oberhalb und unterhalb der Risse angebracht sind (Riss 1: Messmarken 10, 12 und 11, 13; Riss 2: Marken 6, 8 und 7, 9). In Bild 11 (unten) ist für die in der Stabachse liegenden Messmarken 1, 3 und 5 die Verschiebung in z-Richtung relativ zu den Ausgangskordinaten der Messmarke 3 dargestellt. Zur genauen Position der Messmarken wird auf die Darstellung in Bild 8 verwiesen.



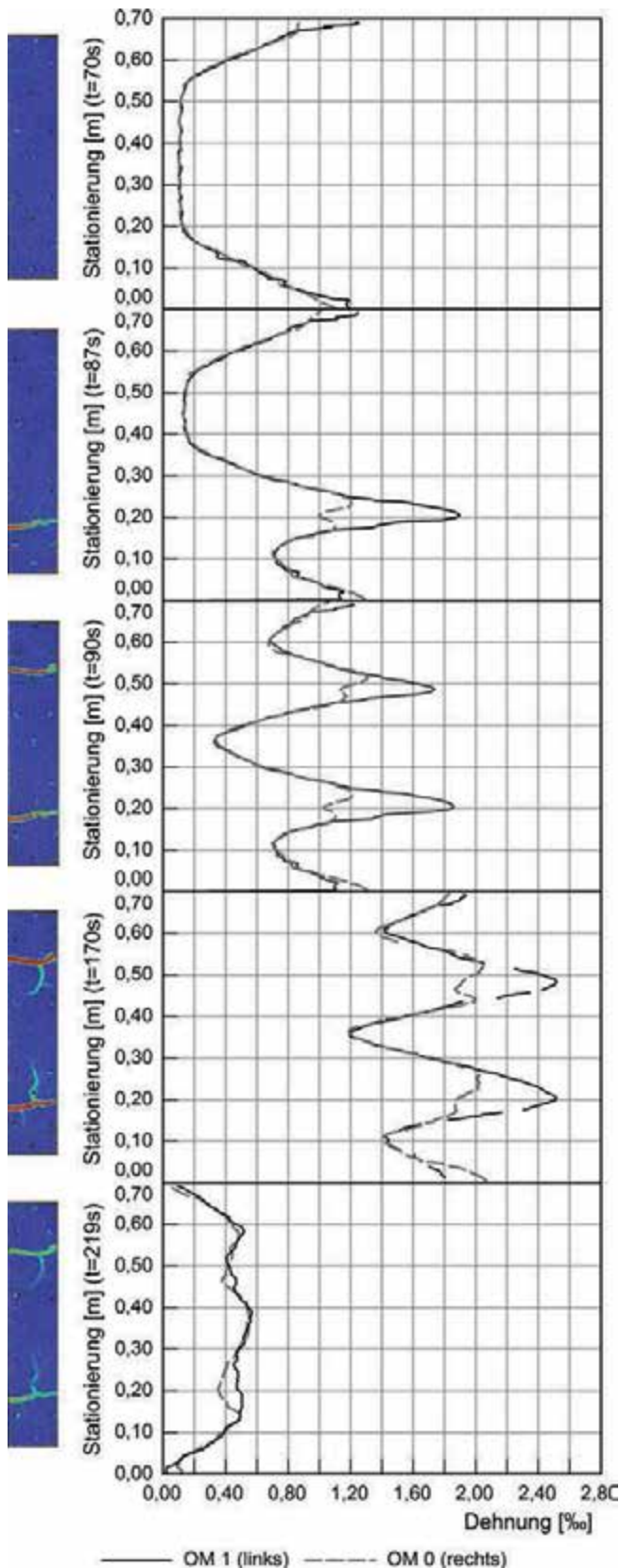
**Bild 11** Differenzverschiebung der äußeren Messmarken ober- und unterhalb der Risse (oben); Verschiebung der mittleren Messmarken in z-Richtung (unten)  
Relative movement of outer measurement marks above and below the cracks (top); displacement in z-direction of central measurement marks (bottom)

Aus den Differenzverschiebungen wird ersichtlich, dass die Risse in der Betrachtungsebene jeweils auf der linken Seite stärker öffnen als auf der rechten Seite, vgl. Bild 11, oben:  $\Delta y_{6-8} > \Delta y_{7-9}$  bzw.  $\Delta y_{10-12} > \Delta y_{11-13}$ . Zusätzlich lässt sich aus den Verschiebungen der Messmarken 1, 3 und 5 in z-Richtung (Bild 11, unten) ablesen, dass sich die Lage der durch den Riss getrennten Betonkörper ab dem Zeitpunkt des zweiten Risses relativ zueinander verändert.

### 3.3.3 Auswertung der Dehnungsmessungen

Bis zum Auftreten des ersten Risses bei  $t = 70,8$  s wird die Prüfkraft über Verbundspannungen von den Enden des Stabes in den Beton eingeleitet und der gesamte Betonstab verbleibt im Zustand I. Bei einer Dehnung von etwa 0,125‰ (Prüfkraft ca. 36 kN) tritt im Betonstab der erste Riss am Ende des Lasteinleitungsbereichs am unteren Ende des Stabes auf. Die Zugkraft fällt durch die schlagartig reduzierte Steifigkeit im Rissquerschnitt aufgrund der Wegsteuerung der Prüfmaschine entsprechend ab (Bild 9, unten). Bei einer Zugkraft von etwa 38,1 kN ( $t = 88$  s) wird während der kraftgesteuerten Lasthaltephase der zweite Riss im Betonstab initiiert. Bei weiterem Anstieg der Kraft (z. B.  $t = 170$  s) wird die Dehnung des Stahls kontinuierlich gesteigert und auch die Betondehnung zwischen den Rissen steigt weiter an. Die in den

Beton eingeleitete Zugkraft erreicht jedoch nicht mehr die Zugfestigkeit, sodass kein weiterer Riss initiiert wird (abgeschlossene Rissbildung). Am Ende des Versuchs im nahezu lastfreien Zustand (Prüfkraft  $F \approx 0$  kN) wird im



**Bild 12** Qualitative DIC-Hauptdehnungen der Betonoberfläche (links); Faser-messung: Dehnungsverlauf im Betonstahl entlang des Walzgrates (rechts)

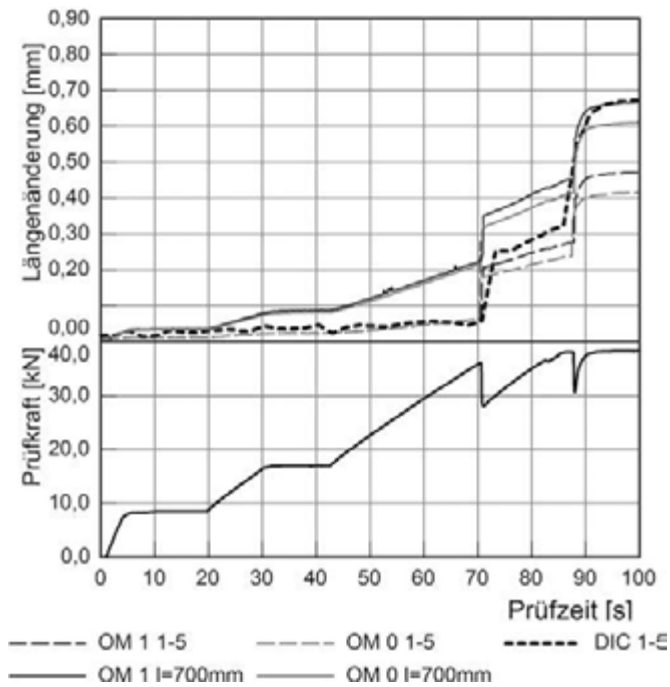
Qualitative principal strains (DIC) on concrete surface (left); fiber optical measurement: strain characteristic along rolling burr (right)

mittleren Bereich am Betonstahl eine verbleibende Zugdehnung von maximal bis zu 0,6‰ (Bild 12, rechts) gemessen. Diese Dehnung verringert sich in den Randbereichen am Stabende auf etwa 0‰. Aufgrund der unplanmäßigen Biegung im Betonstahlstab als Folge von Herstellungs- und Einspannungungenauigkeiten im Anschnitt sind die Dehnungen der Abschnitte OM 0 und OM 1 (Stationierung 0,00 m und 0,70 m) unterschiedlich. Aus den gemittelten Dehnungen an den Stabenden (Stationierung 0,00 m bzw. 0,70 m) kann mithilfe der einwirkenden Prüfkraft auf den Elastizitätsmodul des Betonstahls rückgerechnet werden. Es ergibt sich ein rechnerischer mittlerer Elastizitätsmodul von etwa 216000 MPa bei Rissbildung (ca. 37 kN) und 206000 MPa bei Höchstlast (ca. 60 kN). Die Verläufe der Dehnungen entlang des Stabes verhalten sich bis auf die Dehnungsspitzen im Bereich der beiden Risse nahezu synchron. Der Mittelwert der Stahldehnung im Riss ist um etwa 0,3‰ größer als die gemessene Dehnung im Bereich außerhalb des Betons (Rand).

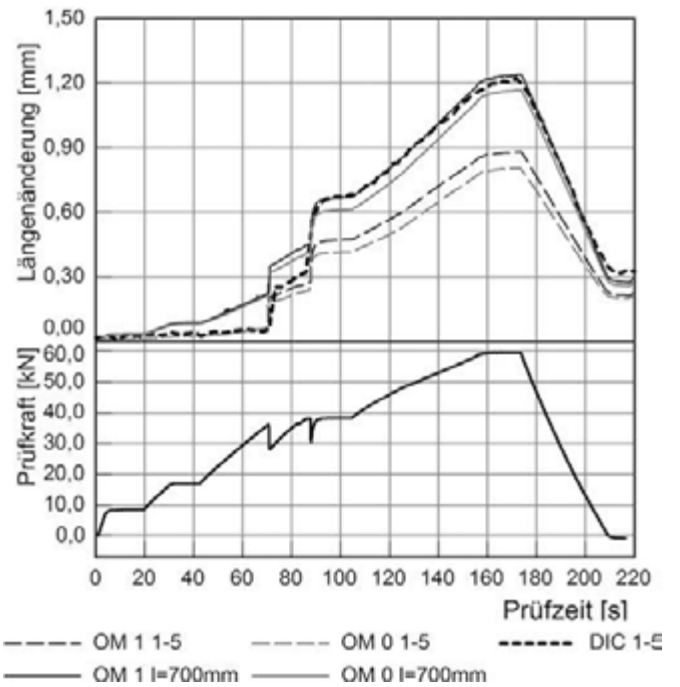
### 3.3.4 Interpretation der Versuchsergebnisse

Diese Werte erscheinen auf den ersten Blick als „Messfehler“, da sich das System im Gleichgewicht befindet. Im Rissquerschnitt wird die gesamte Zugkraft durch den Stahl aufgenommen, die (mittlere) Stahldehnung im Riss muss somit gleich der Stahldehnung außerhalb des Betons (= Lasteinleitungsbereich) sein. Interessanterweise wurden diese „zu großen Dehnungen“ an einbetonierten Bewehrungsstäben aber sowohl bei der faseroptischen Messung als auch bei vorangegangenen Versuchen und einer mit DMS durchgeführten Dehnungsmessung der Literatur beobachtet [21]. Das Phänomen lässt sich erklären, wenn man den genauen Zeitpunkt der Tarierung (hier: unmittelbar vor Versuchsbeginn) betrachtet. So wurde der mit den Messfasern bestückte Bewehrungsstab zunächst einbetoniert. Im Zuge der Erhärtung (u. a. Hydratationswärmeentwicklung) und der anschließenden Schwindverkürzung bis zum Versuchsbeginn ( $t = 0$  s) wurde der Bewehrungsstab gestaucht, während sich im umgebenden Beton entsprechende Zugdehnungen eingestellt haben. Die resultierende Betonzugkraft und die Druckresultierende der Bewehrung stehen miteinander im Gleichgewicht und ergeben keine äußeren Kräfte (vgl. Kapitel 3.2.1.2 in [20]). Es handelt sich um einen reinen inneren Zwangszustand.

Zur weiteren Verifikation werden im Folgenden die Längenänderungen an der Betonoberfläche (Bild 13, DIC 1-5) im Vergleich mit den Längenänderungen am Betonstahl (Bild 13, OM 0 1-5 und OM 1 1-5), die aus den Integralen der Dehnungen berechnet sind, betrachtet. (OM 0 1-5 steht als Abkürzung für die näherungsweise Integration des Abschnitts 0 der optischen Messfaser zwischen den optischen Messmarken 1 und 5 (Bild 8). Dies entspricht in etwa der Integration zwischen der Stationierung 0,10 m und 0,60 m. Gleiches gilt für OM 1.) Bis zur Bildung des ersten Risses (Bild 13,  $t = 70,8$  s) er-



**Bild 13** Zeitlicher Verlauf von Prüfkraft – Längenänderung von Beton und Betonstahl bis  $t = 100$  s  
Length change of concrete and reinforcement bar over time until  $t = 100$  s



**Bild 14** Zeitliche Verlauf von Prüfkraft und Längenänderung von Beton und Betonstahl  
Length change of concrete and reinforcement bar over time

gibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den an der Bauteiloberfläche gemessenen Längenänderungen und dem zugehörigen Dehnungsintegral (Integration von Station  $x = 0,10$  m bis  $x = 0,60$  m). Das innere Gleichgewicht ist bis zu diesem Zeitpunkt ungestört und die im Inneren des Prüfkörpers gespeicherte Energie bleibt im System vollständig erhalten.

Ab dem Zeitpunkt des Erstrisses werden die an der Oberfläche gemessenen Längenänderungen sukzessive größer als die sich aus der Integration der Betonstahldehnung ergebenden (Integration von Station  $x = 0,10$  m bis  $x = 0,60$  m) zugehörigen Längenänderungen. Die sich dabei einstellende Differenz wächst kontinuierlich bis zum Auftreten des zweiten Risses an (Bild 13,  $70,8$  s  $< t < 88$  s). Mit dem ersten Riss wird die über Eigenspannungen gespeicherte Energie partiell freigesetzt. Bei Bildung des zweiten Risses nimmt die an der Betonoberfläche gemessene Längenänderung schlagartig zu. Diese schlagartige Verlängerung des Systems bei Bildung des zweiten Risses ist auf das Freiwerden der aus dem Erhärtungsvorgang gespeicherten inneren Energie zurückzuführen. Ab diesem Zeitpunkt ist der innere Zwang nahezu vollständig abgebaut und es wirken nur noch die Kräfte aus der äußeren Beanspruchung. Diese „Verlängerung“ des Betonstahls infolge eines Abbaus von Zwangsspannungen (bzw. Dehnungen) gegenüber der Anfangslänge bei Versuchsbeginn zeigt sich auch an der oberflächlich über DIC gemessenen Längenänderung am Ende des Versuchs ( $t > 210$  s). Dabei verbleibt eine Verlängerung von etwa  $0,3$  mm (Abstand der Messmarken 1-5, DIC) am Prüfkörper. Die Messwerte der Betonstahldehnung nach der Entlastung (Zeitpunkt  $t = 219$  s, Bild 12, rechts unten) zeigen deutlich die im System aus

dem Erhärtungsvorgang eingeprägten Vordehnungen. Aufgrund des bereits erwähnten Zeitpunkts der Tarierung ( $t = 0$  s; unmittelbar vor Versuchsbeginn) ergeben sich aus der faseroptischen Messung positive verbleibende Dehnungen am unbelasteten Bewehrungsstab. Der Mittelwert von etwa  $0,5\text{‰}$  (zwischen den Stationen  $x = 0,15$  m und  $x = 0,55$  m) erscheint allerdings betragsmäßig etwas zu groß. Über Vergleichsbetrachtungen wurde eine mittlere Betonstahlstauchung von etwas mehr als  $0,3\text{‰}$  abgeschätzt. Zur genaueren Verifikation der Messwerte sind daher weitere experimentelle Untersuchungen vorgesehen.

Die Verlängerung des Prüfkörpers spiegelt sich daneben auch in den aufgezeichneten Messwerten zum Maschinenweg wider (Bild 10; der Maschinenweg ist aufgrund von zusätzlichen Schlupfanteilen an den Einspannstellen um ca.  $0,2$  mm erhöht). Neben dem Freisetzen der inneren Energie ist ein zweiter Effekt für den sprunghaften Anstieg zum Zeitpunkt  $t = 88$  s (zweiter Riss) der mittels DIC gemessenen Verformungen verantwortlich. Der Anfangs- und Endbereich des nun dreiteiligen Betonprismas verankert sich jeweils entsprechend den Modellen des verschieblichen Verbunds in den rand- bzw. lasteinleitungsnahen Rippen des Bewehrungsstabes. Diesem Verhalten wurde in der Datenauswertung dadurch Rechnung getragen, dass in Bild 14 der Vergleich von der an der Bauteiloberfläche gemessenen Längenänderung mit dem Integral der Dehnungen am Bewehrungsstab über die gesamte einbetonierte Länge gegenübergestellt wird. Es zeigt sich, dass ab dem Zeitpunkt  $t > 88$  s die von Station  $x = 0,0$  m bis  $x = 0,70$  m integrierten Dehnungen des Betonstahls (Bild 14,  $t > 88$  s) hervorragend mit der Werten der optischen Deformationsmessung übereinstimmen.

#### 4 Herausforderungen der faseroptischen Messung

Zusammen mit der aufwendigen Aufbereitung des sehr umfangreichen Datenmaterials der faseroptischen Messung stellt die Wahl der richtigen Kombination des Klebstoffs und einer zur Messaufgabe am besten geeigneten Messfaser sowie deren Applikation auf dem Versuchskörper die größte Herausforderung dar. Durch den Gerätehersteller wird derzeit eine mit Polyimid bedampfte, hochsensitive Messfaser mit einem Außendurchmesser von etwa 100 µm angeboten. Hervorzuheben sind bei dieser Faser der erzielbare, nahezu unverschiebliche Verbund zwischen der inneren (Mess-)Faser und der Polyimid-Umhüllung („Coating“) und die hohe Empfindlichkeit, die es erlaubt, kleinste Dehnungen zu erfassen. Leider zeigen sich bei dieser Faser in der praktischen Anwendung gewisse Defizite in der Robustheit. So traten vor allem bei einbetonierten Messfasern auf Bewehrungsstäben (infolge der unvermeidlichen Beanspruchungen bei der Betonage) wiederholt Ausfälle auf. Neben der Polyimid-Faser können mit den Messgeräten aber auch eine Reihe von Fasern eingesetzt werden, die derzeit beispielsweise in der Telekommunikation Verwendung finden. Vereinzelt gibt es daneben auch verschiedene Hersteller, die spezielle Messfasern (meist hinsichtlich der Brillouin-Streuung optimiert) anbieten. Als Umhüllung werden entweder Nylon, PEEK oder auch mehrlagige (zum Teil bewehrte) Coatings verwendet. In jedem Fall ist das Verbundverhalten zwischen dem Faserkern und der jeweiligen (ggf. mehrlagigen) Außenhülle zu betrachten. Je nach Messaufgabe muss geprüft werden, ob der Verbund ausreichend ist, um die erforderliche lokale Auflösung der Dehnungsmessung zu gewährleisten. Insbesondere herkömmliche Telekommunikationsfasern besitzen häufig einen verschieblichen Verbund zwischen dem Kern und der Außenhülle. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Dehnungsmessung von Stahl ein (weitestgehend) unverschieblicher bzw. starrer Verbund innerhalb der Faser ein Optimum für die Messung darstellt, während bei der Applikation auf spröden Werkstoffen (z. B. Beton) aufgrund der diskreten Rissbildung eine maßvolle Verschieblichkeit zum Teil von Vorteil sein kann. In den sich einstellenden Risszonen ergeben sich bei Fasern mit einem (nahezu) starren Verbund sehr hohe lokale Dehnungen, die bereits bei kleinen Rissbreiten zur Überschreitung der maximal messbaren bzw. der zulässigen Faserdehnung führen kann. Daneben entstehen im Bereich großer Dehnungsgradienten häufig stark streuende Messwerte (Messartefakte), die die Messung dann reichsweise unbrauchbar werden lassen.

Bei der Auswahl des Klebstoffs spielt neben der Temperatur- auch die Langzeitbeständigkeit für aussagekräftige Messungen eine entscheidende Rolle. Daneben ist die Vernetzungsfähigkeit des Klebstoffs aufgrund der verhältnismäßig kleinen Kontaktflächen zwischen dem Klebstoff

und der Faser mit der zu messenden Oberfläche wesentlich. Die Wechselwirkung von chemischen Prozessen (z. B. Korrosion), der Verbund mit der Oberfläche des Prüfkörpers sowie die Kopplung der Außenhülle der Messfasern („Coating“) mit dem Klebstoff ebenso wie das Kriechverhalten sind daher für den jeweiligen Anwendungsfall detailliert zu betrachten. Ein unbemerktes Ablösen der Faser aus den vorgenannten Punkten führt nicht nur zum Verlust von Messpunkten, sondern kann ggf. auch zu Fehlinterpretationen im Zuge der Auswertung führen.

#### 5 Zusammenfassung

Der Einsatz der faseroptischen Messtechnik im Massivbau erlaubt erstmals, Stahl- und/oder Betondehnungen kontinuierlich und nahezu lückenlos mit hoher Auflösung zu messen. Dabei können durch das Applizieren der Fasern auf einbetonierten Bewehrungsstäben wesentlich genauere Erkenntnisse auch über die inneren Trag- und Schädigungsmechanismen in Bauteilen gewonnen werden. Zudem eignet sich die Technologie sowohl für den Laboreinsatz als auch zur Untersuchung und zum Monitoring von Bauteilen und Bauwerken in situ. Die Kombination der mittlerweile auf dem Markt erhältlichen faseroptischen Hochleistungsmesstechnik mit bewährten Verfahren der Messtechnik bietet neue Möglichkeiten für eine deutlich detailliertere messtechnische Erfassung von Versuchen und den zugrunde liegenden werkstoffspezifischen Vorgängen. Auch bei scheinbar abgeschlossenen Forschungsfeldern (z. B. Verbundverhalten, Rissbreite) ist es in Anbetracht der neuen Möglichkeiten interessant, bisherige Ingenieurmodelle zu überprüfen und ggf. weiterzuentwickeln. Ein weiterer Aspekt ist die Verfeinerung der derzeitigen numerischen Materialbeschreibungen/ Materialmodelle und der damit verbundenen Erhöhung der Prognosesicherheit. Derzeit werden am Lehrstuhl für Massivbau der TUM weiterführende Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen sowie zur optimierten Konfiguration und Anwendung des Verfahrens (insbesondere im Hinblick auf die Auswahl von Fasern und Klebstoffen) durchgeführt und die Messtechnik kommt in einer Reihe von aktuellen Forschungsvorhaben zum Einsatz.

Die beiden dargestellten „einfachen“ Beispiele zeigen aber auch, dass die Anforderungen an die Beteiligten bei der Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen beim Einsatz hochleistungsfähiger Messtechnik entsprechend ansteigen. Die hohe örtliche Auflösung in Verbindung mit der kontinuierlichen Messung offenbart bisher unbekannte Randeinflüsse aus der Versuchstechnik, erfordert aber gleichzeitig zusätzliche Expertise bei der Handhabung und ein nicht unerhebliches Maß an Erfahrung, damit aus der Fülle von Messdaten wertvolle neue Erkenntnisse gewonnen werden können.



## Literatur

- [1] US Patent Nr. 2.393.714 A (1946-01-29). SIMMONS, E.E. JR.: strain gauge.
- [2] VOLKMANN, CHR. U.: *Hilfssensoren zur Messwertkorrektur bei Wägezellen*. In: *Technisches Messen* 53 (1986), Nr. 7/8, pp. 293–298.
- [3] LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendung*. VDE Verlag, 2010.
- [4] SCHEUFLER, W.; ZILCH, K.: *Einsatz von optischen Messsystemen bei der Bauteilprüfung*. In: 50. DAfStb-Forschungskolloquium, 2009, pp. 191–198.
- [5] ROGERS, A.: Review Article: *Distributed optical-fibre sensing*. In: *Measurement Science Technology* 10 (1999), Nr. 8, pp. R75–R99.
- [6] HILL, K.O.; MELTZ, G.: *Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview*. In: *Journal of Lightwave Technology* 15 (1997), Nr. 8, pp. 1263–1276.
- [7] LEE, B.: *Review of the present status of optic fiber sensors*. In: *Optical fiber technology* 9 (2003), pp. 57–79.
- [8] KENEL, A.; MARTI, P.: *Faseroptische Dehnungsmessungen an einbetonierten Bewehrungsstäben*. vdf, Hochschulverlag ETH Zürich (2002), IBK-Bericht Nr. 271.
- [9] LEUNG, C.K.; WAN, K.T.; INAUDI, D.; X., BAO; HABEL, Z.W. ZHOU; OU, J.; GHANDEHARI, M.; WU, H.C.; IMAI, M.: *Review: optical fiber sensors for civil engineering applications*. In: *Materials and Structures* 48 (2015), pp. 871–906.
- [10] HENAULT, K. J.M.; SALIN J.; MOREAU G.; DELEPINE-LESOILLE S.; BERTAND J.; TAILLADE F.; QUIERTANT M.; BENZARTI: *Qualification of a truly distributed fiber optic technique for strain and temperature measurements in concrete structures*. In: EPJ Web of Conferences, 2011.
- [11] REGIER, R.; HOULT, N.A.: *Distributed Strain Behavior of a Reinforced Concrete Bridge: Case Study*. In: *Journal of Bridge Engineering* 19 (2014).
- [12] SCHMIDT-THRÖ, G.; FISCHER, O.: *Experimentelle Untersuchungen an Rohrstoßfuge und Tübbingfertigteilen*. In: *BFT International* 82 (2016), Nr. 2, pp. 203–205.
- [13] WILD, M.; SCHMIDT-THRÖ, G.; FISCHER, O.: *Faseroptische Dehnungsmessung im Versuch und an Bauwerken – Anwendungsmöglichkeiten im Betonbau*. In: Tagungsband „18. Münchener Massivbau Seminar“, O. Fischer (Hrsg.), Technische Universität München, 11/2014, S. 56-65.
- [14] VOLZ, C.; FISCHER, O.: *Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbalken unter Torsionsbeanspruchung*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Heft 7, S. 431–444.
- [15] SAMIEC, D.: *Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung*. In: *Photonik* (2011), Nr. 6, pp. 34–37.
- [16] FROGGATT, M.; MOORE, J.: *High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter*. In: *Applied Optics* 10 (1998), pp. 1735–1740.
- [17] FROGGATT, M.; SOLLER, B.; GIFFORD, D.; WOLFE, M.: *Correlation and Keying of Rayleigh Scatter for Loss and Temperature Sensing in Parallel Optical Networks*. In: *OSA trends in optics and photonics series 95B* (2004), pp. 691–693.
- [18] SOLLER, B.; GIFFORD, D.; WOLFE, M.; FROGGATT, M.: *High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies*. In: *Optics Express* 13 (2005), Nr. 2, pp. 666–674.
- [19] SANG, A.; FROGGATT, M.; GIFFORD, D.; KREGER, S.; DICKERSON, B.: *One Centimeter Spatial Resolution Temperature Measurements in a Nuclear Reactor Using Rayleigh Scatter in Optical Fiber*. In: *IEEE sensors journal* 8 (2008), Nr. 7, pp. 1375–1380.
- [20] SCOTT, R.H.; GILL, P.A.T.: *Short-term distributions of strain and bond stress along tension reinforcement*. In: *The Structural Engineer* 65B (1987), Nr. 2, pp. 39–48.
- [21] GÜNTHER, G.: *Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton unter monotonsteigender, schwellender und lang andauernder Belastung*. Gesamthochschule Kassel, 1989.

### Autoren



Dipl.-Ing. Gerald Schmidt-Thrö  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Massivbau  
Theresienstraße 90  
80333 München  
gerald.schmidt-throe@tum.de



Dipl.-Ing. Wolfgang Scheufler  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Massivbau  
Theresienstraße 90  
80333 München  
wolfgang.scheufler@tum.de



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Massivbau  
Theresienstraße 90  
80333 München  
oliver.fischer@tum.de