TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

11. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

08. März 2021

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

11. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

08. März 2021

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
D - 01062 Dresden

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

© 2021 Technische Universität Dresden
Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.
Für die Inhalte sind die Autor*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel
Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche
Anzeigen: Sabine Wellner
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-665-7

Inhalt

Grußwort 5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer

Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken 8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner

Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken 20
Marc Gutermann und Werner Malgut

Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite 32
Florian Schill und Gregor Schacht

Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen 46
Sebastian Schulze

Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbetonbrücke zur Analyse von Schädigungsprozessen 54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag

Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung 66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler

Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen 78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke

Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren 88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher

Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring 96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx

Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien 106
Ulrich Schneck

Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke 118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach

Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020 130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer

Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen

DI Dr. Alois Vorwagner[1], DI Maciej Kwapisz[1], Univ.-Prof. DI Dr. Werner Lienhart[2], DI Madeleine Winkler[2], DI Urs H. Grunicke[3]
[1] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien
[2] TU Graz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS)
[3] UHG Consult ZT, Infrastructure Asset Management, Salzburg

KURZFASSUNG

Risse und deren Veränderung in Betonbauten sind wesentliche Indikatoren für Bauwerkszustände. In diesem Beitrag wird ein Messsystem zur Rissmessung basierend auf nachträglich verklebten, faseroptischen Messsystemen vorgestellt. Mit neuen Auswertealgorithmen basierend auf Messungen der Rayleigh-Rückstreuung können anhand kostengünstig angebrachter Glasfaserkabel Risse identifiziert, sehr genau verortet sowie die Rissweitenänderung gemessen werden. Ergebnisse von Labor- und Kalibrierungsversuchen werden vorgestellt. Mit verteilten optischen Fasermessungen können Rissweiten bis zu einer Messlänge von 70 m mit Genauigkeiten von 0,02 mm (Labor) bzw. 0,15 mm (reale Einsatzumgebung) bestimmt werden. Auch Einzelrisse bei im Stahlbetonbau üblichen Rissabständen von 15 cm werden damit messbar.

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Risse in Betonbauten sind wesentliche Indikatoren. Risse ab einer gewissen Größe sowie die Änderung des Rissbildes werden deshalb heute im Zuge der Bauwerksüberwachung erfasst und dokumentiert. Sie dienen dem fachkundigen, prüfenden Ingenieur als Grundlage für eine objektspezifische Beurteilung der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Dies gilt besonders für Infrastrukturbauten wie Tunnel oder Brücken, wo im Zuge von Objektprüfungen die Risse in regelmäßigen Abständen erfasst und kartiert sowie die Rissweiten vorrangig visuell gemessen werden. Der beurteilende Ingenieur versucht dabei, aus dem angetroffenen Bauwerkszustand Veränderungen festzustellen, um so auf frühere oder aktuelle Beanspruchungen zu schließen. Abgesehen von den Grenzwerten der Erfassungsgrenze und einem allfälligen Vergleich mit den Bemessungskriterien der ursprünglichen Planung bestehen dazu allerdings derzeit im Regelfall keine allgemeinen, systematisierten Beurteilungskriterien. Auch sind die Erfassungsmethoden meist noch visueller Natur, kontinuierliche Messungen der Rissweiten bzw. der Rissbewegungen über die Zeit mittels Sensoren sind nur in Ausnahmefällen vorhanden. Die hier dargestellten Ergebnisse sind Bestandteil eines soeben abgeschlossenen Forschungsprojekts mit dem Ziel, die Rissweiten an Tunnelschalen hinter Verkleidungsplatten zu bestimmen [1].

1.2 Möglichkeiten der Rissweitenbestimmung

Rissweiten werden derzeit bei Inspektionen visuell mittels Rissweitenlineal oder Risslupe erfasst. Neue bildgebende Verfahren werden laufend entwickelt, sie werden jedoch noch nicht vollflächig eingesetzt. Die Lokalisierung von einzelnen Rissen und die Bestimmung von Rissbildern sind nur mit lückenlosen Messverfahren möglich. Dazu gehören bildgebende Messverfahren, Laserscanning und verteilte faseroptische Messsysteme (engl.: *Distributed Fibre Optic Sensing* oder DFOS).

Bildgebende Messverfahren verwenden Ansätze aus der Photogrammmetrie, der Bildverarbeitung und des maschinellen Sehens. Beleuchtungsqualität und Luftqualität im Freien sind entscheidend für die Auswertung. Eine geringe Lichtstärke und staubige Luft liefern Bilder mit hohem Rauschen, wodurch eine genaue Auswertung schwierig oder im Inneren von Bauwerken (z. B. Hohlkasten) unmöglich wird. Weiters kann sich Schmutz an den Rissen ablagern, sodass diese in den Bilddaten größer, als sie tatsächlich sind, erscheinen. Dennoch besitzen bildgebende Verfahren grundsätzlich ein großes Potenzial. Auch im Hinblick auf die maschinelle Bearbeitung dieser Messdaten eröffnen sich neue Anwendungsfelder, wie es beispielsweise in Pilotprojekten an Brücken demonstriert wurde, z. B. [2].

Mit Laserscanning werden vorranging der Ist-Zustand und Verformungen erfasst. Die Methode eignet sich bspw. bei Tunnelanwendungen sehr gut, um bei statischen Messungen großräumige Aussagen zu geometrischen Veränderungen zu treffen. Neue Anwendungen am fahrenden Fahrzeug wurden an korrosionsgeschädigten Stützwänden mit mobilen, hochfrequenten Laserscannern entwickelt, womit Neigungsänderungen sehr genau detektiert werden können [3]. Für die Detektion von feinen Rissen kann die Divergenz der ausgesandten Laserstrahlen jedoch zu groß werden. Ist das Abtastraster des Lasers an der Bauteiloberfläche wesentlich größer als die Rissbreite, wird die Rissdetektion und erst recht die Messung der Rissweiten schwierig.

All die genannten Monitoringsysteme sind mit einem manuellen Aufwand verbunden und erfordern einen freien Zugang zum Messobjekt. Ist eine Verkleidung (z. B. für Lärmschutz oder Brandschutz) vorhanden, ist zudem eine visuelle Detektion neuer Risse ausschließlich durch eine Demontage der Verkleidung möglich. Rissweitenmessungen sind automatisiert bislang zumeist nur mit punktuell applizierten Sensoren möglich. Diese können damit nur bereits bekannte Risse überwachen. Neue Risse zu identifizieren ist mit konventionellen Wegsensoren nicht bzw. nur extrem eingeschränkt möglich.

1.3 Faseroptisches Messverfahren

Das Grundprinzip faseroptischer Verfahren besteht darin, dass Licht in den Kern einer Glasfaser eingekoppelt und dort gestreut wird, wobei ein geringer Teil des gestreuten Lichtes zur Messeinheit zurückkommt und von dieser erfasst werden kann. Beeinflussen mechanische Einflüsse die Glasfaser von außen, so ändert sich die Charakteristik des rückgestrahlten Lichtes. Aus der Änderung des rückgestreuten Signals kann nach einer Kalibrierung des Messsystems schließlich auf die Dehnungsänderungen rückgeschlossen werden. Aufgrund der Laufzeit kann die Position entlang der Faser berechnet werden. Die Faser ist somit gleichzeitig sowohl Sensor als auch Leitung. Als Messeinheit selbst wird ein Interrogator verwendet, der die gemessenen Lichtimpulse erstellt, in die Faser einleitet und Messsignale wieder ausgibt. Dieser ist handlich und auch für Messungen an Bauwerken grundsätzlich gut geeignet.

Bei faseroptischen Messverfahren unterscheidet man im Wesentlichen punktweise, quasiverteilte und verteilte Messverfahren. Letztgenannte nutzen die natürliche Streuung des Lichtes an Partikeln in der Glasfaser. Sie besitzen daher die Eigenschaft, dass jede Position der Faser auf äußere Einflüsse sensitiv ist. Vereinfacht ausgedrückt, erhält man durch verteilte faseroptische Messungen eine lückenlose Reihe von Punktmessungen entlang der Faser mit einer entsprechenden räumlichen Auflösung. Die Faser kann demzufolge über ihre gesamte Länge als sensitives Element angesehen werden und durch eine einzige Messfaser können bis zu mehrere 10.000 Messstellen realisiert werden (Bild 1), wie auch bereits schon in [4], [5] dargestellt.

Bild 1: Prinzipskizze eines verteilten faseroptischen Dehnungsmesssystems

Eine grundlegende Unterscheidung ist das verwendete Messprinzip der Fasermessung, womit

Bild 2: Systemrelevante Komponenten des Messsystems (links), die auch für ein detailliertes numerisches Modell (rechts) betrachtet werden müssen

der Auflösungsgrad der Messung definiert wird. Mit einem sogenannten Brillouin-System, wie es bereits schon in ersten Tests bei Tunnelmessungen angewandt wurde, gelingen örtliche Auflösungen von max. 50 cm. Das führt aber dazu, dass zwar Dehnungen gemessen werden, die Risse jedoch nicht wirklich zufriedenstellend lokalisiert bzw. in weiterer Folge Rissbewegungen nicht aufgezeichnet werden können. Erst durch den Einsatz am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz speziell für die Rissmessung an Tunneltübbingen getesteter, neuer hochauflösender Rayleigh-Interrogatoren bzw. in Kombination mit entsprechenden Auswertealgorithmen können Risse mittels DFOS zuverlässig erkannt und deren Bewegungen überwacht werden. Mittels einbetonierter Fasern wurden Risse als Dehnungsspitzen eindeutig identifiziert [4]. In [5] werden ebenfalls erste Anwendungen zur Rissidentifikation und Ansätze für die Rissweitenerfassung mittels verteilter optischer Fasermessung demonstriert; die Wahl der Messfaser und deren Befestigung war auch hier vor allem für die nachträgliche Applikation entscheidend.

Wesentlich ist die Wahl der Faser, welche in der Regel mehrschichtig aufgebaut sind (siehe ein Beispiel in Bild 2, links). Theoretisch bedeutet ein Riss, dass sich eine Länge L = 0 plötzlich auf eine Länge ΔL = Rissbreite vergrößert (Bild 3, links und Mitte). Da die Dehnung ε als ΔL/L definiert ist, bedeutet dies eine unendliche hohe Dehnung an der Position des Risses. In der Realität besitzt aber jedes Messkabel einen mehrschichtigen Aufbau, wodurch sich der Riss über eine aktivierte Faserlänge L_R verteilt (Bild 3, rechts). Die genannten Punkte stehen im Gegensatz zueinander.

Ein robusteres Messkabel verschmiert das Signal stärker, sodass die Rissdetektion verschlechtert als auch die minimal detektierba-

Bild 3: Dehnungsverlauf bei Rissbildung: ungerissener Balken (links), gerissener Balken und theoretisches Dehnungsprofil (Mitte), gerissener Balken und Dehnungsprofile erfasst mit Rayleigh-Instrumenten (rechts)

re Rissbreite vergrößert wird. Ein sensitiveres Kabel kann zwar Risse exakter erkennen, birgt aber die Gefahr, dass es leichter reißt. Messkabel und Aufbau sind in Bild 2, links, dargestellt; letzterer wurde zur späteren detaillieren Betrachtung der Messdaten auch in ein numerisches Modell implementiert.

Des Weiteren hat jedes faseroptische Messsystem eine bestimmte örtliche Auflösung. Dies bedeutet, dass der Messwert an einer bestimmten Stelle immer dem Mittelwert der Dehnung über die Länge der örtlichen Auflösung entspricht. Eine zuverlässige Bestimmung der Rissbreite und -bewegungen aus den verteilten Dehnungsmessungen ist jedoch noch ausständig. Deshalb wurden zur Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Dehnungsmesswert und Rissbreite Versuche mit einer faseroptischen Kalibrieranlage sowie Belastungstests an Versuchsbalken durchgeführt. Ziel war es, das richtige Setup von Faser, Mantel und nachträglicher Verklebung zu finden.

2 Belastungsversuche

2.1 Versuchs-Setup

Die Versuche dienten in erster Linie dazu, eine geeignete Montagemöglichkeit des faseroptischen Sensors zu finden, mit der eine optimale Übertragung der Dehnung des Bauteiles auf den Kern der Glasfaser erreicht wird. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Erkennung des Erstrisses an der Kreuzung des Risses, der Simulation einer bauwerksbedingten (temperaturabhängigen) Atmung bereits bestehender Risse sowie einer Alterungssimulation einer mehrjährigen Rissatmung.

Dazu wurden an drei Betonbalken 3-Punkt-Biegezugversuche durchgeführt (Bild 4), welche mit

Bild 4: Versuchsanordnung als Schema (oben) und Umsetzung am Spannfeld (unten)

den vorab im Kalibrierlabor ausgewählten Sensorfasertypen sowie unterschiedlichen Klebertypen in unterschiedlichen Varianten bestückt wurden. Ziel war es, Risse ganz gezielt in einem Betonkörper zu induzieren, deren Öffnung exakt zu steuern und mehrmaliges Öffnen und Schließen bis hin zur Simulation von mehreren 10.000 Lastwechseln zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde eine Bewehrungsführung gewählt, bei der bei einer Plattenhöhe von 25 cm die Stäbe zentrisch angeordnet und zusätzlich ohne Verbund vorgespannt wurden. Dadurch entstehen entsprechend größere Rissweiten bzw. ist die in diesem Fall ungewollte rissverteilende Wirkung der Bewehrung damit ebenfalls untergeordnet. Aufgrund der zentrischen Vorspannung in innenliegenden Hüllrohren war ein mehrmaliges Be- und Entlasten über die hydraulischen Pressen gut steuerbar.

Die Balken wurden im Fertigteilwerk gefertigt und hatten eine Betondruckfestigkeit von ca. 53 MPa am Tag der Versuchsdurchführung. Sie wurden weitgehend zwängungsfrei auf Gipsstreifen und Zentrierleisten in der Versuchsanlage gelagert (siehe Bild 4, unten). Mittels nachträglich applizierter Weggeber wurden nach der Erstrissbildung in Balkenmitte die Rissweiten zusätzlich gemessen.

Die vorausgewählten Glasfasern wurden mit sechs unterschiedlichen Kleberarten (Versuch #1) und vier Faserarten (Versuch #2) versehen und mittels unterschiedlicher Applikationsarten (Versuche #3) angebracht. Details dazu sind beispielsweise in [1] zu finden. In Bild 5 ist beispielhaft die Verklebung vor dem Belastungsversuch #1 dargestellt.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Probekörper wurden in unterschiedlichen Phasen belastet und verschiedene Risszustände simuliert (siehe Bild 6). In Phase 1 wurde der Versuchsbalken in 10-kN-Schritten bis zur Entstehung des Erstrisses belastet. Zur Simulation der Rissatmung wurde in Phase 2 eine zyklische Be- und Entlastung aufgebracht. Insgesamt wurden fünf Zyklen durchgeführt, wobei beginnend bei einer Rissweite w_R = 0,2 mm in 0,2-mm-Schritten bis zu einer Rissweite von w_R = 0,8 mm belastet wurde. Phase 3 stellt eine Alterungssimulation dar, um die Ermüdung der Faser und des Klebers selbst sowie die Ermüdung der Klebeverbindung zu untersuchen. Dazu wurde eine sinusförmige Last mit einer wechselnden Amplitude zwischen w_R = 0,4 mm und 0,8 mm Rissweite bei einer Frequenz von ca. 0,3 Hz über einen Zeitraum von 10 Stunden

Bild 5: Schema der applizierten Fasern (links) und Applikation mit sechs unterschiedlichen Klebertypen (rechts)

Bild 6: Darstellung der drei wesentlichen Phasen: 1 Erstbelastung, 2 Be- und Entlastung, 3 Ermüdungslast mit 10.000 Rissöffnungen

auf den Versuchsbalken aufgebracht. Nach jeweils drei Stunden wurde die Aufbringung der Sinuslast für 15 Minuten unterbrochen und statisch bei einer Rissweite von w_R = 0,8 mm gehalten, um ungestört die Messungen mit dem Interrogator durchführen zu können. Nach Phase 3 wurde der Versuchsbalken nochmals drei Belastungszyklen analog zur Phase 2 unterzogen und anschließend bis zum Bruch der Glasfasern bzw. zur maximal erfassbaren Rissweite $w_{R,max}$ der linearen Wegaufnehmer belastet. Während der konstant gehaltenen Laststufen wurden kontinuierlich faseroptische Messungen durchgeführt. Zusätzlich wurden die auftretenden Rissbilder und Rissbreiten mittels linearer Wegaufnehmer unabhängig erfasst sowie mit einer Risslupe validiert.

2.3 Bestimmung der Rissweite

Mit dem verteilten faseroptischen Messsystem werden singuläre Risse als Dehnungen über den verteilten Bereich L_R (= aktivierte Faserlänge) aufgezeichnet (siehe Bild 7). Dies ist essentiell, damit nicht nur eine binäre Risserkennung – vorhanden ja/nein – erfolgt, sondern auch die tatsächliche Rissweite bestimmt werden kann. Wird das Setup von Faser/Mantel und Kleber optimal getroffen, so ist es möglich, die Rissweiten durch eine Integration der gemessenen Dehnungen über die aktivierte Faserlänge L_R zu bestimmen. Dies wurde auf Basis der Messdaten durchgeführt.

Die Vorgehensweise ist prinzipiell in Bild 7, rechts, für den schraffierten Bereich bei einer Rissweite w_R = 0,4 mm detailliert dargestellt. Im Diagramm sind die gemessenen Dehnungsverläufe der Wiederbelastungskurven nach Erreichen der Rissweite von w_R = 0,4 mm, 0,6 mm und 0,8 mm der verschiedenen Lasthaltepunkte der Versuche erkennbar. Aus der Integration der Fläche des Dehnungsverlaufes – hier schraffiert für w_R = 0,4 mm dargestellt – kann sehr genau die Rissweite ermittelt werden. Zusammenhänge mehrerer Belastungs- und Entlastungsvorgänge bis zu einer Öffnung von w_R = 0,8 mm wurden untersucht. Es liegt keine Hysterese in den Messdaten vor.

2.4 Numerische Simulation

Im Zuge einer numerischen Simulation wurde das Dehnungsverhalten der Glasfaser der unterschiedlichen drei Phasen im Detail untersucht, um damit die mechanischen Vorgänge und Ursachen besser nachvollziehen zu können. Es wurde ein Modell für die Faser aufbau-

Bild 7: Risse im Körper und Verklebung nach durchgeführtem Versuch (links), gemessene bzw. berechnete Dehnungsverläufe in der Faser (rechts)

end auf Faser, Mantel und Kleber wie in Bild 2 ersichtlich definiert, welches das Verhalten der applizierten Messfaser auf dem Beton bestmöglich widergibt. Die Faser wurde explizit als ein eigenes Element modelliert und mit dem Beton mittels eines nichtlinearen Federsystems gekoppelt.

Diese Vorgehensweise wurde grundsätzlich analog zur üblichen Verbundmodellierung zwischen Beton und Bewehrung ausgeführt. Die Bestimmung der rechnerischen Verbundeigenschaften basiert auf einem Modellupdating aus den Versuchsdaten bei Erstbelastung (Phase 1). Damit können alle anderen Rissweitenzustände sowohl für Be- als auch Entlastungsvorgänge (Phasen 2 und 3) nachvollzogen und berechnet werden. Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung ist in Bild 8 beispielsweise für den Entlastungsvorgang ersichtlich. Die Übereinstimmung ist sehr gut und es können nun mit dem Modell auch diverse Zustände, welche nicht im Versuch gemessen wurden, untersucht werden.

Das Modell diente auch dazu, verschiedene Einflüsse auf die Rissweitenmessung numerisch detailliert zu untersuchen. Der Einfluss der Rissweitenöffnungen auf das Messsignal ist wesentlich für die Zuverlässigkeit der Erfassung. Folgend wird speziell der darüberhinausgehende Bereich betrachtet. Gemessene Dehnungsverläufe für Öffnungen ab w_R = 0,8 mm sind in Bild 9 dargestellt. Daraus wurde eine Weite von 2,48 mm berechnet, die aber noch nicht zum Bruch der Faser führte.

Die punktuelle, singuläre Rissöffnung äußert sich als eine verteile Faserdehnung entlang der aktivierten Faserlänge L_R. Diese hängt vorrangig mit der Faser und den Verbundeigenschaften des Klebers und der Rissöffnung zusammen. Sie wächst mit steigender Rissweite an und bestimmt die Möglichkeit, ob die Rissweiten eng nebeneinanderliegender Risse einzeln gemessen werden oder nur als ein zusammengewachsenes Dehnungssignal erkennbar sind. Im zweiten Fall ist zwar die Summe der Rissweiten über das Dehnungssignal berechenbar; diese exakt auseinanderzuhalten ist jedoch nicht möglich.

Bild 8: Dehnungsverlauf während des Entlastungsvorgangs (Rissschließung); Vergleich zwischen Messung (durchgezogene Linie) und FE-Nachrechnung (strichlierte Linie)

Bild 9: Versuch #V3 – Zusammenhang zwischen aktivierter Faserlänge und Dehnung bzw. berechneter Rissweite bei verschiedenen Lasthaltepunkten bei Maximalbelastung

Bild 10: Modellhafter Zusammenhang von möglichem Rissabstand, Längenzuwachs und Rissweite w_R

Aufbauend auf den Versuchsergebnissen wurde die Abhängigkeit der aktivierten Faserlänge in Bezug zur Rissweite w_R ausgewertet und in Bild 10 dargestellt. Die dargestellte Länge bezieht sich ausgehend von der Risswurzel immer auf die jeweilige symmetrische Rissflanke ($L_R/2$). Somit ist ein direkter Vergleich mit den Rissabständen, bei der Einzelrissweiten noch als solche identifiziert werden, möglich.

Anfänglich tritt bis w_R = 0,3 mm ein starker Zuwachs von z. B. 10 cm/mm Rissweite auf. Danach nimmt der Zuwachs kontinuierlich ab und beträgt ab einer Weite von w_R = 0,8 mm ca. 5,5 cm/mm Rissweite. Die im Versuch maximal erreichte Weite war 2,5 mm. Der modellhafte Verlauf wurde theoretisch bis zu w_R = 3,8 mm berechnet und ist in Bild 10 strichliert dargestellt. Diese Berechnung basiert auf der Annahme, dass Faser und Kleberverbindung bei so großen Rissweiten intakt bleiben, was versuchstechnisch im Rahmen des Projekts so nicht untersucht wurde. Erkennbar ist, dass mit dem gefundenen Setup Rissabstände bis zu 15 cm problemlos als Einzelrisse gemessen werden können. Bei im Stahlbetonbau schon eher unüblichen Weiten von w_R = 2,0 mm wären dafür sogar noch Abstände von 20 cm möglich.

2.5 Vergleich mit Referenzmessung

Eine sehr gute Übereinstimmung konnte mit den Referenzmessungen im Labor erzielt werden. Eine statistische Gegenüberstellung der Messergebnisse mit dem Referenzwert der Vergleichsmessung der final gefundenen Kombination von Faser, Mantel und Kleber ist in Bild 11 und Tabelle 1 dargestellt. Die Übereinstimmung war sehr gut, die maximale Abweichung betrug 0,017 mm. Dies gilt für die Laborkennwerte, in realer Umgebung ist mit nicht ganz so hohen Genauigkeiten zu rechnen.

Das System zeigte bei allen drei Messphasen (Erst-, Wieder- und Dauerbelastung) auch nach über 10.000 Lastzyklen keine Hysterese. Langzeitmessungen über 14 Monate wurden im Zuge des Forschungsprojekts in einem Tunnel in Österreich mit mehreren Folgemessungen getestet. Hier konnten Genauigkeiten von 0,15 mm bei bis zu 70 m Faserlänge identifiziert werden [1], [7].

Bild 11: Schema der statistischen Bewertung und Gegenüberstellung mit Referenzwert

Vergleich	Standardabweichung	Abweichung im Mittel	Abweichung maximal
DOS-REF	0,006 mm	0,006 mm	0,017 mm

Tabelle 1: Gegenüberstellung der verteilten optischen Messung mit Messwerten der Referenzsensoren

3 Schlussfolgerung

Im Zuge der vorgestellten Untersuchungen konnte ein verteiltes faseroptisches Messsystem erfolgreich für eine nachträgliche Applikation zur Rissmessung an Betonbauwerken entwickelt und im Zuge von Laborversuchen getestet sowie mit ergänzenden numerischen Untersuchungen validiert werden.

Die richtige Kombination von Faser, Mantel und Kleber konnte im Zuge der Laborversuche bestätigt werden. Es wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzmesssensoren festgestellt. Bei Messfaserlängen von bis zu 70 m sind Risse identifizierbar und deren Weite im Labor mit Genauigkeiten ca. 0,02 mm bestimmbar. In realer Einsatzumgebung sind ca. 0,15 mm zu erwarten. Das System zeigt auch nach mehrmaliger Belastung bei hohen Lastwechselzahlen von getesteten 10.000 Lastwechseln keine Hysterese. Auch der Materialpreis von Sensoren und Verklebung ist überschaubar und liegt deutlich unter 10 €/m.

Auch im Stahlbetonbau übliche Rissabstände von 15–20 cm könnten mit dem präferierten System noch als Einzelrisse identifiziert und deren Rissweite gemessen werden.

Reale Testanwendungen wurden bisher an zwei Bauwerken in Form von nachträglich an den Tunneloberflächen applizierten Messfasern durchgeführt. Weitere Untersuchungen an unterschiedlichen realen Bauwerken würden weitere Erkenntnisse zu Applikation, Umsetzung und Langzeiteffekten des Messsystems bringen. Ebenso müssten noch der Einfluss unterschiedlicher Betonarten sowie bewetterter Oberflächen versuchstechnisch genauer untersucht werden.

Die gegenständliche Forschung ist im Rahmen des Förderprogramms Mobilität der Zukunft – VIF 2017 (Fördernummer 866968) finanziert worden. Die Autoren danken dem Österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft ASFiNAG, der ÖBB Infrastruktur AG sowie der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung.

Literatur

[1] FORSCHUNGSKONSORTIUM AIT, TU-GRAZ, UHG: ABSCHLUSSBERICHT FORSCHUNGSPROJEKT RIBET – Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen. FFG-Projekt #866968, Wien (noch nicht veröffentlicht)

[2] Furtner, P.; Forstner, E.; Karlusch, A.: Automated Infrastructure Inspection based on Digital Twins and Machine Learning. In: EMPA/DGZfP (Hrsg.): Proc. of 5th Conf. on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures – SMAR, 27.–29.08.2019 in Potsdam, 2019, 8 S.

[3] FORSCHUNGSKONSORTIUM SIBS: ABSCHLUSSBERICHT FORSCHUNGSPROJEKT SIBS – Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke. FFG-Projekt #861163, VÖBU, Wien: 2019

[4] Monsberger, C.; Lienhart, W.; Moritz, B.: Beurteilung des In-situ-Dehnungsverhaltens der Tunnelschale mittels verteilter faseroptischer Messsysteme. Geomechanik und Tunnelbau 11 (2018) 6, S. 701–709 – DOI: 10.1002/geot.201800050

[5] Fischer, O.; Thoma, S.; Crepaz, S.: Quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung zur Rissdetektion in Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), S. 150–159 – DOI: 10.1002/best.201800089

[6] Winkler, M.; Monsberger, C. M.; Lienhart, W.; Vorwagner, A.; Kwapisz, M.: Assessment of crack patterns along plain concrete tunnel linings using distributed fiber optic sensing. In: WMPA/DGZfP (Hrsg.): Proc. of 5th Conf. on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures – SMAR, 27.–29.08.2019 in Potsdam, 2019, 8 S.

[7] Grunicke, U. H.; Lienhart, W.; Vorwagner, A.: Long-term monitoring of visually not inspectable tunnel linings using fibre optic sensing | Langzeitmonitoring von nicht visuell inspizierbaren Tunnelinnenschalen mittels Faseroptik. Geomechanics and Tunnelling | Geomechanik und Tunnelbau 14 (2021) 1, S. 19–32 – DOI: 10.1002/geot.202000051

Bildquellen

Bild 1: Lienhart, IGMS, TU Graz
Bilder 2 [7], 6: IGMS, TU Graz
Bilder 3, 8–11: AIT
Bilder 4, 5, 7: AIT und IGMS, TU Graz

Hegewald & Peschke
Meß- und Prüftechnik GmbH

Kompetenz schafft Resultate

Unsere Produkte:

* Universalprüfmaschinen
* Stationäre und transportable Härteprüfgeräte
* Bauteilprüfanlagen und Möbelprüfstände
* Längenmessvorrichtungen
* Sonderprüfmaschinen und Automatisierungslösungen
* Modernisierung von Werkstoffprüfmaschinen
* Service und Wartung von Prüfmaschinen
* Lohnprüfung

Ihr Kontakt zu uns:

Hegewald & Peschke
Meß- und Prüftechnik GmbH
Am Gründchen 1
01683 Nossen
Tel.: 035242- 445 0
E-Mail: info@hegewald-peschke.de

www.hegewald-peschke.de

Unsere Prüflösungen für Baustoffe (Auswahl):
Druckprüfungen - Biegeprüfungen - Zugprüfungen

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-665-7