

# Neues Potential im Structural Health Monitoring: Verteilte faseroptische Sensoren für Bestandsbauwerke

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák<sup>1</sup>, Franziska Stein, M.Sc.<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Jochen Reinhard<sup>2</sup>,  
Ing. Andrian Dudonu<sup>1</sup>, Tanja Zeller, M.Sc.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

<sup>2</sup> Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Kleinostheim

<sup>3</sup> Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Stuttgart

## KURZFASSUNG

*Aufgrund der Altersstruktur der Brücken in Deutschland und des überproportional steigenden Schwerlastverkehrs werden umfangreiche Erhaltungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung des Infrastrukturnetzes erforderlich. Zur Dynamisierung der Erhaltungsstrategie werden vermehrt kontinuierliche Bauwerksmessungen zur Überwachung und Beurteilung des Bauwerkszustands eingesetzt. Weiterentwicklungen in der Leistungsfähigkeit hochauflösender faseroptischer Sensoren bieten neue messtechnische Möglichkeiten für die großflächige (permanente) Bauwerksüberwachung. Der Beitrag beleuchtet die Potentiale hochauflösender faseroptischer Sensoren zur Zustandsüberwachung von Bestandsbrücken. In einem Pilotprojekt an einer spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannbetonbrücke wurden bzw. werden derzeit faseroptische Sensoren für eine permanente Überwachung installiert und sukzessive in Betrieb genommen. Die Einsatzmöglichkeiten als Dauermonitoringsystem werden anhand der bisherigen Erfahrungen und Ergebnisse demonstriert.*

### 1 Motivation

Die Altersstruktur der Brücken in Deutschland in Verbindung mit dem überproportionalen Zuwachs des Schwerlastverkehrs erfordert umfangreiche Erhaltungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur. Die Dringlichkeit der Erhaltungsfähigkeit an einem Bauwerk wird anhand der Zustandsnote und des Traglastindex bewertet [1]. Erhaltungsmaßnahmen zur Zustandsverbesserung von Bestandsbrücken wie Erneuerung, Verstärkung und Instandsetzung erfordern zum Teil langjährige Planungsvorläufe sowie finanzielle und personelle Kapazitäten. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, heute Bundesministerium für Digitales und Verkehr, schlägt in [1] eine Dynamisierung der Erhaltungsstrategie mit reaktiven und präventiven Erhaltungsansätzen vor, mit der ein möglichst geringer Eingriff in den Verkehr erzielt werden soll. Der reaktive Ansatz basiert auf dem Einsatz eines kontinuierlichen Monitorings zur permanenten Zustandserfassung mit definierten Schwellenwerten und eignet sich für Bauwerke mit geringem Verkehrsaufkommen. Der späteste Zeitpunkt zum Eingreifen wird bei Überschreiten der messtechnischen Schwellenwerte erreicht. Bei hoch beanspruchten Strecken ist eine präventive Erhaltungsstrategie zu verfolgen. Hierbei werden zeitlich fixierte Erhaltungsmaßnahmen auf dem Kenntnisstand des Ist-Zustands des Bauwerks angestrebt. Die prognostizierten Annahmen des Zustands sind durch unterjährliche oder kontinuierliche Überwachungen zu überprüfen [1].

sätzen vor, mit der ein möglichst geringer Eingriff in den Verkehr erzielt werden soll. Der reaktive Ansatz basiert auf dem Einsatz eines kontinuierlichen Monitorings zur permanenten Zustandserfassung mit definierten Schwellenwerten und eignet sich für Bauwerke mit geringem Verkehrsaufkommen. Der späteste Zeitpunkt zum Eingreifen wird bei Überschreiten der messtechnischen Schwellenwerte erreicht. Bei hoch beanspruchten Strecken ist eine präventive Erhaltungsstrategie zu verfolgen. Hierbei werden zeitlich fixierte Erhaltungsmaßnahmen auf dem Kenntnisstand des Ist-Zustands des Bauwerks angestrebt. Die prognostizierten Annahmen des Zustands sind durch unterjährliche oder kontinuierliche Überwachungen zu überprüfen [1].

Beide Erhaltungsansätze basieren in einem gewissen Umfang auf einer (kontinuierlichen)

messbasierten Überwachung des Tragwerkszustands. Nach jetzigem Stand der Technik werden überwiegend lokale Sensoren für das permanente *Structural Health Monitoring* (SHM) von Bestandsbrücken verwendet. Lokale Messungen erfordern eine sichere Prognose der zu erwartenden Tragwerksreaktion bei Zustandsveränderungen und Wissen über die maßgebenden Messstellen zur messtechnischen Erfassung.

Die Leistungsfähigkeit und Platzierung der lokalen Messung entscheidet über die Möglichkeit einer frühzeitigen und eindeutigen Detektion von Veränderungen und darüber, in welchem Umfang und Zeitrahmen Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der möglichst uneingeschränkten betrieblichen Nutzung getroffen werden können. Neue messtechnische Entwicklungen in der Leistungsfähigkeit verteilter faseroptischer Sensoren zeigen das Potential, die Messtechnik als kontinuierliches Überwachungssystem zur großflächigen Erfassung von globalen und lokalen Zustandsveränderungen einzusetzen. Die Messtechnik kann z. B. als unterstützendes Mittel der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 [2] zur permanenten Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Rissentwicklungen für den präventiven Ansatz herangezogen werden.

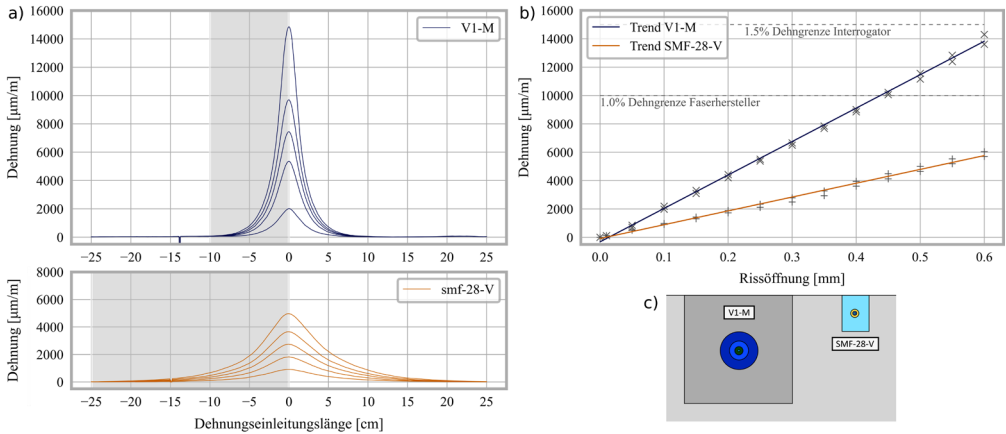
## 2 Stand der Wissenschaft: Monitoring mit verteilten faseroptischen Sensoren

Faseroptische Sensoren setzen sich aus einem Laser, einer optischen Ausleseeinheit und einer *Singlemode*-Glasfaser zusammen. Für die Detektion lokaler Schädigungen an Bestandsbauwerken, z. B. Rissentwicklungen an Massivbauten, eignen sich örtlich hochauflösende Messsysteme auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung. Nach dem aktuellen Stand der Technik können Dehnungsverteilungen in einer räumlichen Auflösung von wenigen Millimetern über eine Sensorlänge von derzeit bis zu 100 m kontinuierlich gemessen werden [3].

Die Möglichkeit der Rissdetektion und Rissquantifizierung mit faseroptischen Sensoren wurde

in mehreren Laboruntersuchungen bestätigt (z. B. [4]–[6]). Die Einsatz- und Installationsmöglichkeit außerhalb des Laborumfelds und die Qualität und Robustheit der Messung hängen im Wesentlichen von der gewählten Faserummantelung, dem verwendeten Klebemittel und der Installationsweise ab. In Vorversuchen wurden an der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Kleinostheim unterschiedliche Applikationsmöglichkeiten für faseroptische Sensoren an der Oberfläche bestehender Massivbauten untersucht [7]. Bild 1 zeigt die Kalibrierungsergebnisse für die in einer Nut an der Betonoberfläche applizierten Messfasern. Es wurde die Applikation einer mehrschichtig ummantelten Messfaser mit steifem Klebemittel (Bild 1c, V1-M) und die Applikation einer dünn-schichtig ummantelten Messfaser mit dauerelastischem Klebemittel (Bild 1c, SMF-28-V) untersucht. Beide Applikationsvarianten weisen eine charakteristische Dehnungskurve bei Rissbildung und Rissentwicklung auf (Bild 1a). Die Faserdehnung verhält sich linear zur wachsenden Rissweite (Bild 1b). In Feldversuchen an einer Spannbetongroßbrücke und in einem Kurzzeitmonitoring an einer Bogenbrücke konnte die Einsatzmöglichkeit der Messtechnik zur Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Rissentwicklungen für die Bauwerksanwendung im Außeneinsatz bestätigt werden [7], [8].

Im Bereich der Zustandsüberwachung und Bewertung von Brückenbauwerken werden hochauflösende faseroptische Sensoren derzeit überwiegend für (periodische) Kontrollmessungen als unterstützendes Mittel der visuellen Bauwerksprüfung [9], [10] und als Kurzzeitmonitoring im Zuge von Belastungstests [8], [9], [11] zur Bauwerksbeurteilung eingesetzt. Die wesentlichen Messziele der Kurzzeitmessungen sind die Lokalisierung von Bestandsrissen im Bereich der Messfaser und die Messung der Dehnungen resultierend aus Bauwerksverformungen z. B. infolge definierter Lastüberfahrten. Kontinuierliche faseroptische Messungen ermöglichen neben der permanenten Überwachung von Zustandsveränderungen – insbesondere der Entstehung neuer Risse – auch eine Quantifizierung



**Bild 1:** a) Exemplarische Dehnungskurve und Dehnungseinleitungslänge bei zunehmender Dehnung, b) Gegenüberstellung des Trends der Dehnungsmessungen und der gemessenen Risspitzenöffnung der Wegaufnehmer, c) Applikationsvarianten in einer Nut [7]

der Rissentwicklungen über die Zeit. Aufgrund der hohen Anzahl der Messstellen je Sensor werden an das faseroptische Langzeit- bzw. Dauermonitoring erhöhte Anforderungen an das Datenmanagement und die Auswertung gestellt. Außerdem sind erhöhte Ansprüche an die Dauerhaftigkeit der Messfaserinstallation sowie den Schutz der Gesamtanlage vor Umwelteinflüssen und Vandalismus zu beachten.

Im Zuge der Erhaltungsplanung einer Spannbetonbrücke wurden bzw. werden seit dem Jahr 2022 faseroptische Sensoren als Dauermonitoringsystem installiert. Im Folgenden werden die Erfahrungen und erste Ergebnisse des Pilotprojekts beschrieben.

### 3 Referenzobjekt des Pilotprojekts: Vorlandbrücke Hochheim

#### 3.1 Bauwerks- und Zustandsbeschreibung

Die Mainbrücke Hochheim wurde im Jahr 1966 gebaut und überführt die A 671 mit 24 Feldern über den Main mit angrenzendem Überflutungsgebiet, eine Landstraße, Schienenwege und mehrere Fuß- und Wirtschaftswege. Das Bauwerk besteht aus vier Teilbauwerken: (A) einer stählernen Strombrücke, (B) einem 12-feldrigen Spannbetonbau, (C) einem Spann-

betoneinfeldträger sowie (D) einem 10-feldrigen Spannbetonbau. Die Teilbauwerke B bis D bilden hierbei die Vorlandbrücke. Die Vorlandbrücke wurde als 4-stegiger vorgespannter Plattenbalken mit einer Gesamtbreite inkl. Kappen von 25,0 m mit zwei Fahrrichtungen auf einem Überbau ausgeführt. Als Spannstahl wurde der nach heutigem Sachstand hinsichtlich Spannungsrissskorrosion (SpRK) gefährdete Neptunstahl verwendet [12], [13]. Die Teilbauwerke B und D wurden in den Jahren 2005 und 2006 zur Verbesserung des Ankündigungsverhaltens und zur Reduktion der Spannungsschwingbreite in den Koppelfugen mit einer externen Vorspannung verstärkt. Die für den Ankündigungsfall ursprünglich geplante Vorspannkraft der externen Vorspannung konnte aufgrund eines überschätzten Kräfteinleitungsvermögens der Horizontalkräfte in den Schubfugen der nachträglich angebrachten (End-)Verankerungsblöcke nicht vollumfänglich aufgebracht werden. Das Bauwerk soll ab dem Jahr 2026 durch einen Ersatzneubau ersetzt und bis dahin über die rechnerische Restnutzungsdauer hinaus unter Betrieb gehalten werden [14].

Vor dem Hintergrund des Ersatzneubaus und der überschrittenen Restnutzungsdauer wurde in den Jahren 2019 und 2020 eine Notunterstützung aus Stahlstützen an den Teilbauwerken B

und D errichtet. Im Bauzustand wird der Überbau planmäßig auf die Notunterstützung aufgelegt. Für den Fall einer Schadensankündigung vor Beginn des Bauzustands können die Lagerpunkte der Notunterstützung zum Abstützen des Überbaus aktiviert werden. Aufgrund der schlechten Bodenbedingungen im Überflutungsgebiet des Mains werden im Lagerfall Setzungsdifferenzen erwartet, die zur Vermeidung unkontrollierten Zwangs im Überbau mit Pressen auszugleichen sind.

Abgesehen vom statischen System (Einfeldträger) ist das Teilbauwerk C baulich vergleichbar mit den Teilbauwerken B und D und überführt die Strecke der DB AG. Für das Teilbauwerk C wurde bisher vor dem Hintergrund der erschwerten Zugänglichkeit auf Grund der überführten elektrifizierten Schienenwege keine Verstärkungsmaßnahme oder Notunterstützung für den Fall einer nicht auszuschließenden Verschlechterung der Bauwerksstruktur umgesetzt. Die visuelle Bauwerksprüfung ist in den Trassenbereichen nur unter hohem Aufwand mit langen organisatorischen Vorlaufzeiten in Sperrpausen möglich.

### 3.2 Ergebnisse der Nachrechnung

Im Zuge der Erhaltungsplanung wurde die Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH mit der Nachrechnung des Teilbauwerks C beauftragt [15]. Die Nachrechnung erfolgte gemäß der Nachrechnungsrichtlinie [16] und der Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion [17] unter Ansatz der Verkehrslasten der Brückensklasse 60/30 nach DIN 1072 [18]. Die Nachrechnung führte zu dem Ergebnis, dass insbesondere die ermittelte Querkrafttragfähigkeit der Träger in Längsrichtung als kritisch eingestuft werden muss. Die Anforderungen bezüglich eines ausreichenden Ankündigungsverhaltens konnten entsprechend [17] nachgewiesen werden. Unter der Voraussetzung, dass durch das bereits installierte faseroptische Monitoring am Teilbauwerk C keine entsprechende Verschlechterung des Bauwerkszustands beobachtet wird, sind aktuell keine sonstigen (sofortigen) Maßnahmen erforderlich [15].

### 3.3 Notwendigkeit Monitoring

Für die Erhaltungsplanung des Bauwerks liegt auf regionaler Ebene eine erhöhte Dringlichkeit im vorliegenden Verkehrskorridor vor. Im selben Korridor ereignete sich im Jahr 2021 an einem Bestandsbauwerk ein Havariefall [19], der das regionale Infrastrukturnetz einschränkt und die umgebenden Ausweichkorridore belastet. Vor dem Hintergrund der SpRK-Problematik der gesamten Vorlandbrücke, der Setzungsempfindlichkeit der Notunterstützung und der Verankerungsproblematik der externen Vorspannung wurde eine kontinuierliche Überwachung des Bauwerkszustands für den weiteren Betrieb und die Einhaltung der rechnerischen Restnutzungsdauer unter Ansatz wissenschaftlicher Methoden empfohlen [14]. Im Jahr 2019 wurde ein lokales Koppelfugenmonitoring zur Überwachung ermüdungsrelevanter Rissentwicklungen an den maßgebenden Koppelfugen an den Teilbauwerken B und D in Betrieb genommen [20]. Durch das bestehende Monitoringsystem kann eine lokale Zustandsaussage getroffen werden, weshalb eine Erweiterung des Bauwerksmonitorings am Teilbauwerk B zur Überwachung globaler Veränderungen angestrebt wurde. Für das Teilbauwerk C ist aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit im Trassenbereich nur eine eingeschränkte Einsicht der Bauwerksprüfung zur visuellen Rissdetektion möglich, weshalb ein kontinuierliches Monitoring zur Kontrolle auf Rissbildung für den Ansatz eines rechnerisch ausreichenden Ankündigungsverhaltens nach [17] anzuordnen ist.

## 4 Konzept des faseroptischen Dauermonitorings

Hochauflösende faseroptische Sensoren ermöglichen eine großflächige und ganzheitliche Überwachung von Bauteilbereichen. Durch die hohe Anzahl an Messstellen von bis zu ca. 38.400 Messungen pro Sensor bei einem örtlichen Messabstand von wenigen Millimetern muss die Stelle der Zustandsveränderung, z. B. angekündigt durch Rissbildung, vor der Sensorinstallation nicht bekannt sein. Zustandsveränderungen im Messbereich der Sensorfaser

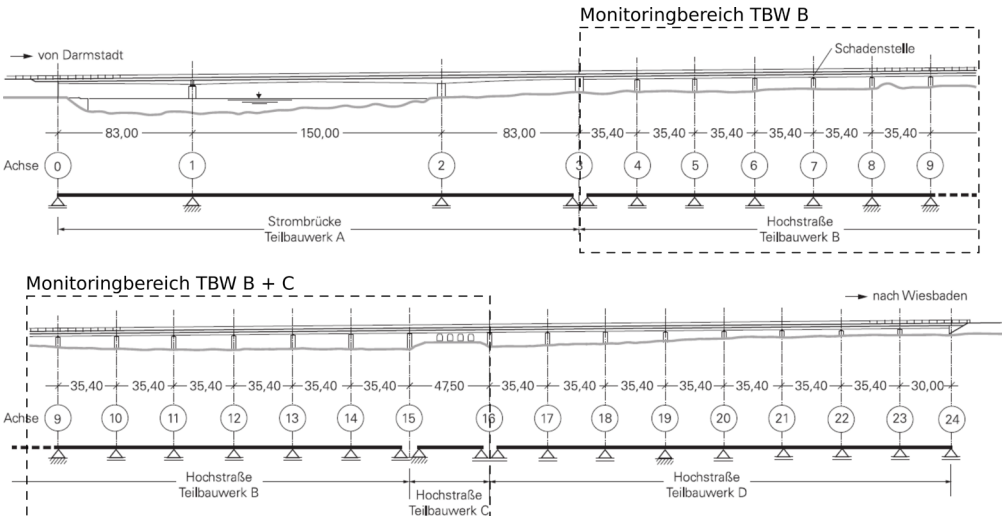


Bild 2: Ansicht der Mainbrücke Hochheim [20] und faseroptischer Monitoringbereich

können dadurch zu einem deutlich früheren Zeitpunkt mit einer höheren örtlichen Genauigkeit festgestellt und lokalisiert werden, als dies mit konventionellen lokalen Messmethoden möglich ist. Dies bietet die Möglichkeit, frühzeitig auf Veränderungen reagieren und entsprechend Maßnahmen ergreifen zu können. Die Leistungsfähigkeit des Bauwerks lässt sich hierdurch präventiv kontrollieren. Im Zusammenspiel mit einem belastbaren Alarmierungsplan und Maßnahmenkatalog lässt sich damit das Risiko möglicher verkehrlicher Einschränkungen erheblich reduzieren.

Das Messkonzept an den Teilbauwerken verfolgt den Ansatz, dass sich Änderungen des Bauwerkszustands infolge SpRK durch Rissbildung, Rissentwicklungen und ggf. Verformungszunahmen ankündigen. Mit der örtlich hochauflösenden faseroptischen Messung können zustandsbedingte Rissentwicklungen im Messbereich des Sensorkabels kontinuierlich lokalisiert und quantifiziert werden. Insgesamt wurden bzw. werden zwölf Sensoren mit jeweils ca. 100 m Sensorlänge in den Feldbereichen des Teilbauwerks B und vier Sensoren mit bis zu ca. 90 m Messlänge in den Feld- und Querkraftbereichen der Träger des Teilbauwerks C installiert (siehe Bild 2). Die Sensorfaser wird zum Schutz

vor äußeren Einflüssen und zur Herstellung guter Verbundbedingungen in einer Nut verlegt und mit Injektionsmörtel verklebt (Bilder 3a und b). In den Feldbereichen wird die Faser zur Detektion von Biegerissen im Abstand von ca. 3 cm zur Trägerunterkante an den Trägerseiten geführt. Am Teilbauwerk C werden die Sensoren aufgrund der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit im kritischen Bereich zur Detektion möglicher Risse in um 45° geneigten, parallel verlaufenden Schleifen mit einem Abstand von 1,5 m verlegt (Bild 3c) und anschließend geradlinig in den Feldbereich überführt. Für je acht Sensoren stehen an zwei Stellen am Bauwerk zwei klimatisierte Messzentralen mit faseroptischer Ausleseeinheit, Server und Mobilfunkanschluss bereit. Die faseroptischen Sensoren sind mit bis zu 200 m langen optischen Zuleitungskabeln an die Messzentrale angeschlossen.

Die Sensoren werden sukzessive seit dem Frühjahr 2022 in Betrieb genommen und erfassen den langfristigen Bauwerkszustand über Dehnungsmessungen mit einer Abtastrate von 0,65 Hz und einer örtlichen Messauflösung von 2,6 mm. Die Messergebnisse werden kontinuierlich in einem Intervall von < 5 min ausgewertet und zu Extrem- und Mittelwerten aggregiert. Die Intervallauswertungen sind mit einer



**Bild 3:** a) Oberflächennahe Verlegung der Sensorfaser in einer Nut, b) Installation der Messfaser nach der Verklebung, c) Ansicht der schleifenförmigen Sensorverlegung während der Installation

Alarmfunktion gekoppelt, die bei Überschreitung eines definierten Grenzwertes eine Benachrichtigung an die Monitoringverantwortlichen sendet. Die Kontrolle und Auswertung der Messergebnisse erfolgt täglich, sofern keine Alarmmeldung vorliegt. Das Datenmanagement- und Auswertesystem befindet sich derzeit in einer Lern- und Kalibrierphase, in der die Intervalle der Datenaggregation, Grenzwerteinstellung und automatisierte Datenauswertung über die erste Betriebsperiode von einem Jahr erprobt und eingestellt werden. Zur Temperaturkompensation der faseroptischen Dehnungsergebnisse werden lokale Bauteil- und Lufttemperaturmessungen herangezogen.

## 5 Bisherige Monitoringergebnisse

Die in diesem Beitrag vorgestellten Messergebnisse beschränken sich auf das im September im Jahr 2022 in Betrieb genommene faseroptische Monitoring am Teilbauwerk C über die Bahntrasse.

In Bild 4 sind exemplarisch die Tagesmittelwerte der geradlinigen Messbereiche der Sensoren im Feld des Außen- und Mittelträgers einer Fahrtrichtung dargestellt. Das Messrauschen aus Verkehrseinwirkungen und Dehnungsstörungen aus installationsbedingtem Querdruck/-zug auf das Kabel bewegen sich in einem Bereich

von durchschnittlich  $\sim 150 \mu\text{m}/\text{m}$ . Die thermische Dehnung führt zu einem Verschiebung des Dehnungsgrundniveaus der gemittelten Tageswerte auf ca.  $-300 \mu\text{m}/\text{m}$  bezogen auf die Nullmessung. Die Dehnungen aus Rissentwicklungen setzen sich deutlich vom Messrauschen durch die Ausbildung der in [7] beschriebenen charakteristischen Dehnungskurven ab. Im bisherigen Messzeitraum über die Wintermonate konnte eine Risssschließung in einer Größenordnung von  $\sim 0,02 \text{ mm}$  in den Feldbereichen des Mittelträgers und  $0,015 \text{ mm}$  am Außenträger gemäß der Sensorkalibrierung in [7] erfasst werden.

Detektierte und plausibilisierte Risse werden in eine Rissdokumentation und Risskartierung aufgenommen. So kann neben der Risslokalisierung am Gesamtsensor eine Überwachung langfristiger Zustandsveränderungen in den einzelnen Rissen erfolgen und zwischen bestehenden Rissen zum Zeitpunkt der Installation und Rissneubildung während des Monitorings unterschieden werden.

Im Kontext der Bauwerksprüfung kann die Rissdokumentation mit faseroptischen Sensoren als Hilfsmittel für die Vorgehensweise bei gerissenen Querschnitten nach [17] herangezogen werden. Bei dem Bauwerksalter von über 50 Jahren ist davon auszugehen, dass die Rissbildung weitgehend abgeschlossen ist und neue



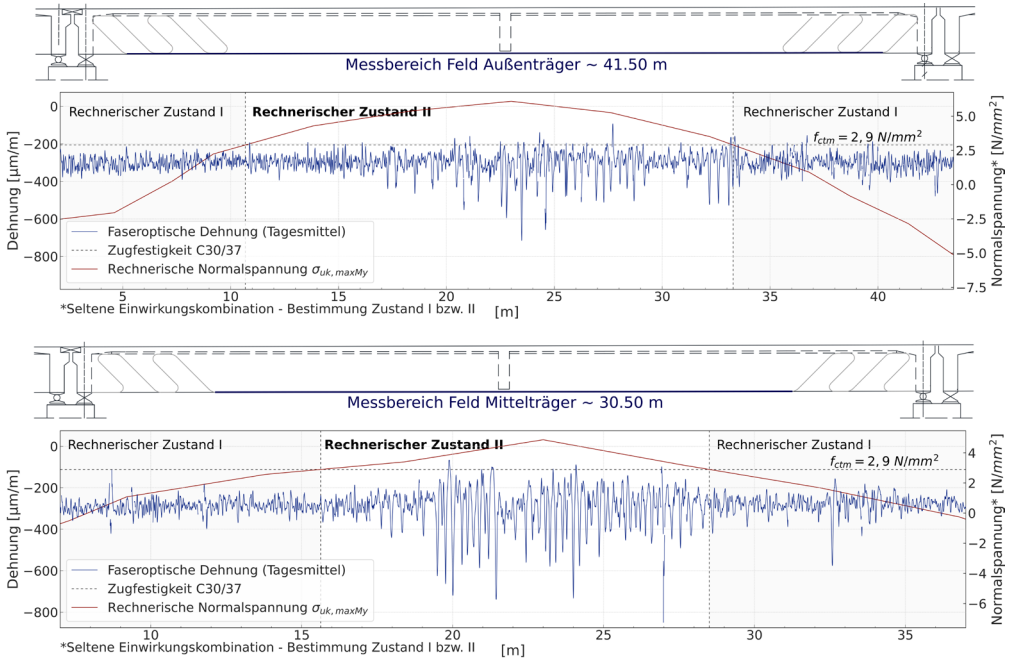


Bild 4: Faseroptische Dehnungsmessungen in den Feldbereichen des Außenträgers (oben) und des Mittelträgers (unten) im Vergleich zum rechnerischen Zustand II

Risse auf einen beginnenden bzw. fortschreitenden Schädigungsprozess hindeuten könnten. Sollten während des Monitorings neue Risse auftreten, können diese im Idealfall durch die faseroptischen Sensoren bereits bei Rissentwicklungen im Mikrometerbereich detektiert werden. Im Feldeinsatz wird nach den aktuellen Erfahrungen unter Berücksichtigung des Messrauschens (Verkehr, installationsbedingter Querdruck/-zug etc.) von einer Detektionsmöglichkeit ab einer Rissentwicklung von 0,01 mm ausgegangen. Durch die frühzeitige Detektion mithilfe des kontinuierlichen Monitorings kann ein größerer Handlungszeitraum zur Maßnahmenergreifung für die Aufrechterhaltung der verkehrlichen Nutzung geschaffen werden.

In Bild 4 werden die faseroptischen Dehnungsmessungen (Tagesmittelwerte) im Feldbereich des Außen- und Mittelträgers den rechnerischen Normalspannungen der seltenen Einwirkungskombination an der Unterkante des Trägers exemplarisch gegenübergestellt. Das

bisher dokumentierte Rissbild zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Erwartungswerten der analytischen Untersuchung. Als Rissursache werden auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes die in der Vergangenheit aufgetretenen Belastungszustände des Bauwerks angenommen.

Wird die hochauflösende faseroptische Sensorik in einem kontinuierlichen Monitoring eingesetzt, können neben der Risslokalisierung am Gesamtsensor lokale Dehnungsauswertungen über die Zeit zur Beobachtung der einzelnen Rissentwicklungen angestellt werden. Änderungen des Tragwerkzustands können im Zeitverlauf über plötzlich, irreversible Dehnungssprünge oder langfristige Dehnungsänderungen ohne Korrelation zur Temperatur ermittelt werden. Bild 5 stellt den Dehnungsverlauf für einen exemplarischen Riss im Feldbereich am Außen- und Mittelträger im Tagesverlauf dar. An der Differenz der Extremwerte im Tagesverlauf ist zu erkennen, dass die faserop-

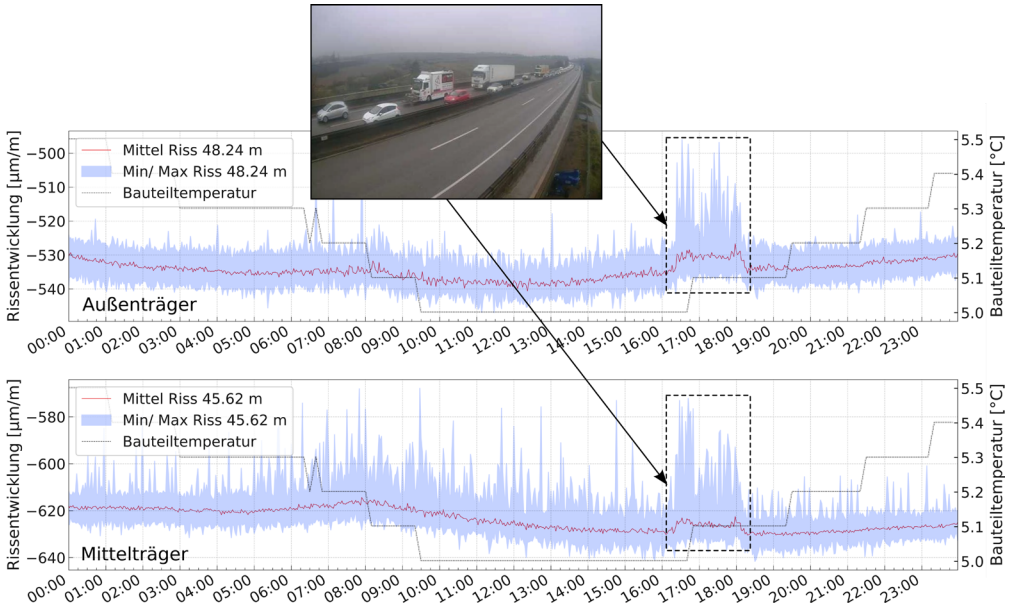


Bild 5: Exemplarische Tagesauswertung der Rissentwicklung eines Risses am Außen- und am Mittelträger und einseitigem Stau

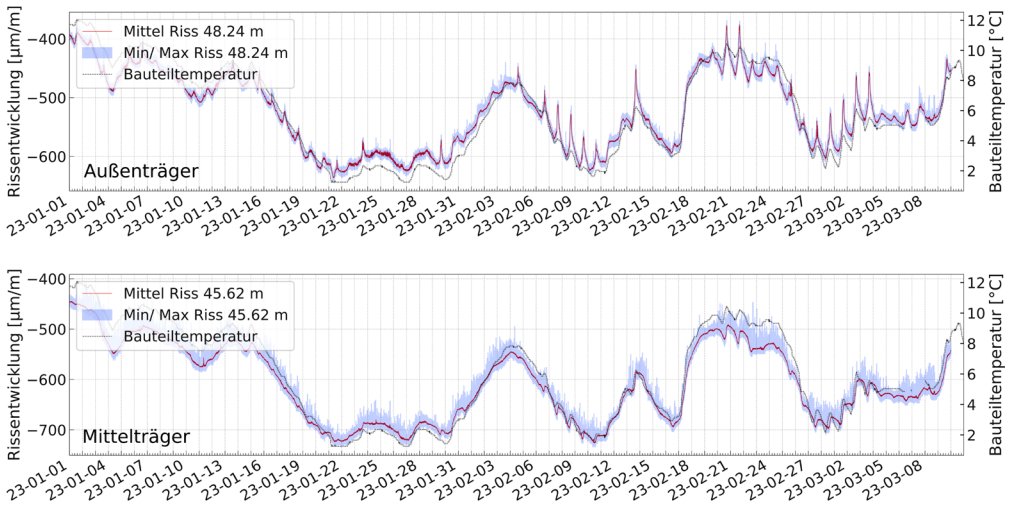


Bild 6: Exemplarische Auswertung der Rissentwicklung jeweils eines Risses am Außen- und am Mittelträger über einen Messzeitraum von mehr als zwei Monaten

tische Messung nur vereinzelt (zufällig) verkehrsinduzierte Dehnungsereignisse aufgrund der vergleichsweise geringen Messfrequenz erfasst. Stausituationen zeichnen sich allerdings deutlich aufgrund der ausreichend langsamen Überfahrten in den Messergebnissen ab.

Die exemplarische Rissentwicklung über einen Messzeitraum von mehr als zwei Monaten (Bild 6) veranschaulicht den thermischen Einfluss in den faseroptischen Dehnungsergebnissen über einen nahezu parallelen Verlauf der Dehnungsmessung zur Bauteiltemperatur.



Der Sensor am Außensteg befindet sich an der Südseite des Bauwerks und erfährt im Vergleich zum verschatteten Mittelträger teils sprunghafte Temperaturschwankungen durch direkte Sonneneinstrahlung. Daraus resultieren reversible Dehnungssprünge im Tagesverlauf, die aufgrund der aktuellen Position der lokalen Bauteiltemperatursensoren noch nicht aufgezeichnet werden. Die Temperatur wird derzeit in Bauwerksmitte gestaffelt über die Steghöhe am Außenträger (verschattete Innenseite) erfasst und zeitnah durch weitere lokale Bauteiltemperaturmessungen auf Höhe der Sensorfaser an mehreren Außen- und Mittelstegen ergänzt. In der bisherigen Messperiode konnten keine auffälligen Rissentwicklungen beobachtet werden, die auf eine Zustandsverschlechterung der überwachten Teilbauwerke hindeuten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In einem Pilotprojekt werden erstmals hochauflösende faseroptische Sensoren als Dauermonitoringsystem an einer SpRK-gefährdeten Spannbetongroßbrücke angebracht. Das Messziel des Monitoringsystems ist die Überwachung der Rissentwicklung bestehender Risse und die Detektion von neuer Rissbildung als Hinweis auf eine Verschlechterung des Bauwerkszustands z. B. infolge Spannungsrissskorrosion. In den bisherigen Messungen konnten in den Feldbereichen ausgewählter Träger Rissentwicklungen erfasst werden. Die gerissenen Bereiche stehen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des rechnerischen Zustands II der Nachrechnung. Die Risse werden gemäß der Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion in eine Risskartierung aufgenommen. Neben der Risslokalisierung am Gesamtsensor kann durch die kontinuierliche Messung eine Einzelbetrachtung der jeweiligen Rissentwicklung über die Zeit erfolgen. Dadurch können neben der kontinuierlichen Kontrolle des Riss-vor-Bruch-Kriteriums Zustandsveränderungen anhand auffälliger Rissentwicklungen (nahezu in Echtzeit) zur Bewertung des Tragwerkszustands herangezogen werden.

Das faseroptische Monitoring zeigt das Potential, für einen präventiven und reaktiven Ansatz der dynamischen Erhaltungsstrategie eingesetzt zu werden. Die annähernd flächige und örtlich hochauflösende Überwachung maßgebender Bauteilbereiche ermöglicht die Kontrolle der prognostizierten Annahmen ohne Kenntnis über die kritischen Bauwerksstellen. Im Zuge des präventiven Ansatzes können faseroptische Sensoren als unterstützendes Mittel der Bauwerksprüfung zur Detektion und Lokalisierung von Rissen in periodischen oder kontinuierlichen Messungen eingesetzt werden. Für den reaktiven Ansatz ist das faseroptische Monitoring als kontinuierliches Überwachungssystem mit vorab definierten Schwellenwerten vorzusehen. Der reaktive Ansatz erfordert neben der kontinuierlichen Überwachung eine vorab geplante und kommunizierte Reaktionsstrategie, um im Fall einer eintretenden kritischen Zustandsveränderung kurzfristig eingreifen zu können.

Bei einem hinsichtlich der Tragfähigkeit als kritisch bewerteten Brückenbauwerk kann durch den Einsatz eines faseroptischen Dauermonitorings im Idealfall die verkehrliche Nutzungsphase über den erforderlichen Zeitraum verlängert werden. Dies setzt voraus, dass keine Verschlechterung des Bauwerkszustands beobachtet werden kann. Übergeordnet steht mit dem faseroptischen Dauermonitoring ein weiterer Baustein für die Aufrechterhaltung eines leistungsstarken Infrastrukturnetzes zur Verfügung.

## Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt allen Projektbeteiligten der Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, insbesondere Sven Marx und Vincenzo Barbaro, und der Universität Stuttgart für die konstruktive Zusammenarbeit und die Unterstützung während der Maßnahmenplanung und Installation des faseroptischen Dauermonitorings. Ein weiterer Dank geht an die Autobahn GmbH des Bundes für die Möglichkeit, die innovative Messtechnik in einem Pilotprojekt als Dauermonitoring einsetzen zu können, und das große Engagement, neue Monitoringpotentiale im Zuge der Erhaltungsplanung zu fördern.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Stand der Modernisierung von Brücken der Bundesfernstraßen. Bericht an den Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages. Online: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-modernisierung-bruecken-0212.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-modernisierung-bruecken-0212.pdf?__blob=publicationFile).
- [2] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.
- [3] Luna Innovations Incorporated: Luna ODISI 6000 Data Sheet, ODISI6 REV.5.7, 03.20.2022, <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/data-sheet/Luna%20ODISI%206000%20Data%20Sheet.pdf> (geprüft am 13.03.2023).
- [4] Howiacki, T.: Analysis of cracks in concrete structures with the use of distributed optical fibre measurements. Diss., Cracow University of Technology, 2022.
- [5] Fischer, O.; Thoma, S.; Crepez, S.: Quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung zur Rissdetektion in Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 3, S. 150–159.
- [6] Bassil, A.: Distributed Fiber Optics Sensing for Crack Monitoring of Concrete Structures. Diss., Université de Nantes, Université Bretagne Loire, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux IFSTTAR, Loire, 2019.
- [7] Novák, B.; Stein, F.; Reinhard, J.; Dudonu, A.: Einsatz kontinuierlicher faseroptischer Sensoren zum Monitoring von Bestandsbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 10, S. 718–726.
- [8] Novák, B.; Stein, F.; Reinhard, J.; Dudonu, A.: Progress in the application of distributed fibre optic sensors for monitoring existing bridges. (Hrsg.): Proc. of 6<sup>th</sup> fib Int. Congress, 12.–16.06.2022 in Oslo (Norwegen), Oslo: Norwegian Concrete Association, 2022, S. 2229–2238.
- [9] Fischer, O.; Schramm, N.; Burger, H.; Tephö, T.: Wirklichkeitsnahe Beurteilung des Brückenbestands mit innovativer Sensorik – SpRK-Monitoring der Kreuzhofbrücken, München. In: Berger, J. (Hrsg.): Tagungsband der Innsbrucker Bautage 2022 – Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix, 24./25.05.2022 in Innsbruck, Innsbruck: Studia Universitätsverlag Innsbruck, 2022, S. 120–144.
- [10] Zdanowicz, K.; Bednarski, Ł.; Howiacki, T.; Sieńko, R.: Verteilte Dehnungsmessungen von Spannbetonbauteilen mit faseroptischen Sensoren. Beton- und Stahlbetonbau 117 (2022) 7, S. 539–547.
- [11] Sieńko, R.; Bednarski, Ł.; Howiacki, T.: Distributed fibre optic sensing for safety monitoring of concrete, steel and composite bridges. In: Casas, J. R.; Frangopol, D. M.; Turmo, J. (Hrsg.): Bridge safety, maintenance, management, life-cycle, resilience and sustainability – Proc. of the 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2022), 11.–15.07.2022 in Barcelona (Spanien), Leiden: CRC Press/Balkema, 2022, S. 1612–1620.
- [12] Züblin: V 6225 Züblin A.G./I. Spannverfahren „Züblin“ Typ 56 t, „Bauaufsichtliche Zulassungsnummer V6225 Züblin A.G./I“, Geltungsdauer 15.08.1959–30.09.1961, Ministerium Baden-Wuerttemberg, Zulassungsbescheid vom 15.08.1959.
- [13] Züblin: V 6225 Züblin A.G./II. Spannverfahren „Züblin“ Typ 126 t, „Bauaufsichtliche Zulassungsnummer V6225 Züblin A.G./II“, Geltungsdauer 29.04.1963–31.03.1968, Ministerium Baden-Wuerttemberg, Zulassungsbescheid vom 29.04.1963.
- [14] Novák, B.; Reinhard, J.: Überprüfung der Berechnungen zur Restnutzungsdauer der Vorlandbrücke der Mainbrücke Hochheim. Schlussbericht, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2015.
- [15] Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH: Nachrechnung Teilbauwerk C der Vorlandbrücke der Mainbrücke Hochheim. Dokumentation der statischen Berechnungen, Kleinostheim, 2022.
- [16] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Abteilung Straßenbau (Hrsg.): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Ausgabe 05/2011.
- [17] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Abteilung Straßenbau (Hrsg.): Handlungsanweisung Spannungsrisskorrosion. Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Ausgabe 06/2011.
- [18] DIN 1072:1985-12: Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen.
- [19] Rapps, C.; Kina, J.; Fehling, E.; Gündel, M.: Sprengabbruch der Salzachtalbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), S1, S. 50–58.
- [20] Novák, B.; Reinhard, J.: Analyse der rechnerischen Restnutzungsdauer und Erarbeitung eines Monitoring-Konzeptes mit anschließender wissenschaftlicher Begleitung des Monitorings für die Vorlandbrücke der Mainbrücke Hochheim. Schlussbericht, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2017.

## Bildquellen

Bild 1: aus [7]

Bilder 2, 3, 6: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart

Bild 4: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart; Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH

Bild 5: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart; LGA Bautechnik GmbH