

Ortsaufgelöste Zustandsüberwachung von Brückenbauwerken mittels faseroptischer Sensoren

Aleksander WOSNIOK¹, Rob JANSEN², Lun CHENG², Sebastian CHRUSCICKI¹
¹ BAM, Berlin
² TNO, Delft, Niederlande

Kontakt E-Mail: aleksander.wosniok@bam.de

Kurzfassung. Das stetig steigende Verkehrsaufkommen mit schweren Lkws beschleunigt die fortschreitende Verschlechterung der Bausubstanz von Brücken. Die schädlichen Auswirkungen der von schweren Lkws ausgehenden Schwingungen und Lastbeanspruchungen werden zusätzlich durch die Alterung der Infrastruktur, die oft vor Jahrzehnten errichtet wurde und manchmal sogar ihre Lebensdauer erreicht hat, noch verstärkt. Der durch Lkw-Verkehr bedingte überproportionale Anstieg von Infrastrukturschäden hat oft aufwendige und deshalb teure Erneuerungsmaßnahmen zur Folge. Dies wiederum führt zu erheblichen Kosten für Bund, Länder und Kommunen. Angesichts der begrenzten finanziellen Mittel suchen die zuständigen Behörden ständig nach neuen kostengünstigen Wartungslösungen, die auf eine erhebliche Verlängerung der Lebensdauer der verfügbaren Infrastruktur abzielen. Die in dieser Arbeit vorgestellten ortsverteilten faseroptischen Messmethoden sind eine interessante Alternative zur Beurteilung der strukturellen Integrität und Sicherheitsbewertung bestehender Betonbrücken.

In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss der statischen Verkehrsbelastung auf die geringen Durchbiegungseffekte in der Betonkonstruktion einer bestehenden Brücke mittels ortsauflösender faseroptischer Sensoren untersucht. Dabei tragen die Ergebnisse der an der Amsterdamer Brücke 705 durchgeführten Belastungstests wesentlich zum Verständnis des Strukturverhaltens bei. Das Konzept der statischen Belastung basierte auf dem Einsatz von zwei 36-Tonnen-Lastwagen, die an mehreren vorbestimmten Stellen auf der Brücke anhielten. Die auf diese Weise aufgebrachte Last führte zu ortsabhängigen kleinen Durchbiegungseffekten, die als lokale Längsdehnung der an der Unterseite der Brücke integrierten Sensorfaser aufgezeichnet wurden. Die reflektometrischen Messungen beruhen auf dem Prinzip genannt TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry). Die Messgenauigkeit lag im Bereich von 0,5 $\mu\text{m/m}$.

Einführung

Bedingt durch die steigenden Anforderungen an die Tragwerksanalyse stehen die existierenden Brückenbauwerke heutzutage unter besonderer Beobachtung. Im Hinblick auf Ihre Ermüdungssicherheit und Gebrauchstauglichkeit führt die rasante Verkehrsentwicklung, speziell beim signifikanten Anstieg des Gütertransports mit schweren Lkws, zu einer neuen Dimension der Lastbeanspruchungen, die bei der Planung und Errichtung bei weitem nicht vorgesehen wurden. Die negativen Auswirkungen auf die Bausubstanz von Brücken werden



zusätzlich noch durch altersbedingte Verschleißerscheinungen verstärkt. Die Beseitigung von Brückenschäden ist öfters aufwendig und deshalb kostspielig. Angesichts der begrenzten finanziellen Mittel und hoher politisch-wirtschaftlicher Hürden beim Rechtfertigen teurer Sanierungsmaßnahmen setzt man verstärkt auf Mess- und Monitoringkonzepte zur zuverlässigen Zustandsbeurteilung zwecks frühzeitiger Schadenserkenkung. Die heutigen Überwachungskonzepte gehen weit hinaus über regelmäßige Inspektionen und Hot-Spot-Messung mittels herkömmlicher Dehnungsmessstreifen (DMS). Die neue Ära von Big Data and der intelligenten Datenanalyse mit Algorithmen des maschinellen Lernens eröffnet schöpferisches Potenzial für eine enorme Effizienzsteigerung in der Erstellung von zuverlässigen und aussagekräftigen Monitoringkonzepten auf der Basis von lückenlosen Langzeitmessdaten.

Die in dieser Arbeit vorgestellten ortsverteilten faseroptischen Messverfahren bieten vorteilhafte Lösungen zur Gewinnung lückenloser Messdaten über große Entfernungen als Grundlage zur präzisen Beurteilung der strukturellen Integrität und Sicherheitsbewertung bestehender räumlich ausgedehnter Infrastruktur. Die Anwendung der faseroptischen Sensoren schreitet in gewissen technischen Bereichen aufgrund ihrer vorteilhaften Materialeigenschaften, wie geringe Abmessungen, Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und Einsetzbarkeit in einer explosiven Umgebung sowie unter hohem Druck, weltweit fort. Dazu zählen Erdöl- und Erdgasindustrie sowie Fahrzeugbau sowie Luft- und Raumfahrt [1]. Im Bausektor dagegen kommt die faseroptische Sensorik bis jetzt bedingt durch konservative Einstellung und begleitende monetäre Aspekte nur an ausgewählten Bauvorhaben zum Einsatz. Die allgegenwärtige digitale Wende kann jedoch in den nächsten Jahren zur relevanten Leistungssteigerung der Monitoringkonzepte auf der Basis von lückenlosen und kontinuierlichen Messdaten führen, was über eine neue Kosten-Nutzen-Analyse entscheidend zur Etablierung der ortsauflösend messenden faseroptischen Systeme im Bausektor beitragen kann.

In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss der statischen Verkehrsbelastung auf die geringen Durchbiegungseffekte in der Betonkonstruktion einer bestehenden Amsterdamer Brücke mittels ortsauflösender faseroptischer Sensoren untersucht. Das Konzept der statischen Belastung der Brücke 705 basierte auf dem Einsatz von zwei 36-Tonnen-Lastwagen, die an mehreren vorbestimmten Stellen zwecks Durchführung ortsabhängigen Dehnungsmessungen anhielten. Die Brücke 705 ist ein Viadukt für den Straßenbahn- und Autoverkehr, der 1962 in Betrieb genommen wurde. Die Untersuchung der Konstruktionssubstanz dieser Brücke ist nicht nur wegen der Alterungseffekte interessant. Vielmehr wurden infolge der Umgestaltung und der Verkehrsausweitung um eine zusätzliche ursprünglich nicht eingeplante Straßenbahnlinie bereits in einer frühen Phase der Inbetriebnahme der Brücke wichtige bauliche Veränderungen vorgenommen. Aus diesem Grund mussten Öffnungen in die neu gebaute Brücke gebohrt werden, um die Treppe zu den beabsichtigten Straßenbahnhaltestellen zu errichten [2]. Daher sind es gerade die Auswirkungen der strukturellen Veränderungen aus der frühen Betriebsphase, die die Brücke 705 für messtechnische Untersuchungen so attraktiv machen.

1. Faseroptische Sensorik

Zur frühzeitigen Erkennung von sicherheitsrelevanten Versagensmechanismen in Brückenbauwerken kann eine Reihe von faseroptischen Sensoren eingesetzt werden. Dank der Nutzung von Lichtreflexion und -streuung bei der Übertragung über Glas- (GOF) bzw. Polymerfasern (POF) können dabei physikalische und chemische Messgrößen punktuell sowie orts aufgelöst erfasst werden. Ferner erfolgt das Erkennen von mechanischen Verformungen, Rissbildungen und Stauchungen über die Messung der Längs- und

Querdehnung sowie Erfassung von Schwingungen. Die Korrosionsgefährdung von Stahlbetonbauwerken lässt sich zusätzlich über die Überwachung des PH-Wertes und Messung der Feuchte beurteilen. Sind darüber hinaus die genauen messsignifikanten Positionen am Messobjekt im Vorfeld nicht bekannt, kann eine punktuelle bzw. quasiverteile Hot-Spot-Messung zu Fehlinterpretationen führen. Dies kann nur durch Einsatz von vollständig orts aufgelöst messenden Sensorsystemen vermieden werden. Solche in diesem Beitrag thematisierte ortsverteilte faseroptische Sensorsysteme verwenden optische Fasern (GOF bzw. POF) als Sensoren (Messaufnehmer) zur kontinuierlichen Messgrößenerfassung auf der Basis der im Fasermaterial auftretenden Streueffekte entlang der kompletten Faserstrecke. Die Auswertung der Messsignale erfolgt über an einem bzw. an beiden Faserenden angeschlossene Messgeräte.

1.1 Sensorfasern

Materialtechnisch lassen sich alle Sensorfasern in zwei Gruppen unterteilen. Bei den meisten Messverfahren kommen standardmäßig die quarzglasbasierten verlustarmen GOF zum Einsatz. Dagegen ist die Nutzung von POF, bei denen der Faserkern aus Polymeren wie z.B. Polymethylmethacrylat (PMMA) besteht, nach wie vor hauptsächlich ein Gegenstand der Entwicklung und Erprobung. Bedingt durch komplementäre physikalische Eigenschaften beider Faserarten finden die faseroptischen Messsysteme ein breites Anwendungsfeld. So lassen sich mit multimodigen POF extreme Dehnungszustände mit Werten um $400000 \mu\epsilon$ („Microstrain“: $1 \mu\epsilon = \mu\text{m}/\text{m}$) [3] entlang etwa hundert Meter langen Faserstrecken erfassen, während sich die dämpfungsarmen GOF bestens für Überwachung von räumlich ausgedehnten Objekten mit Messreichweiten von mehreren Kilometern eignen. Dank der möglichen monomodigen Faserausführung von GOF können dabei sogar Messgenauigkeiten in der Größenordnung von $0,5 \mu\epsilon$ im Dehnungsbereich bis zu etwa $20000 \mu\epsilon$ erreicht werden.

Die faseroptische quantitative Erfassung von geringfügigen Stauchungs- und Dehnungseffekten sowie Rissbildungen erfordert eine zuverlässige möglichst verlustfreie Kraftübertragung vom Messobjekt auf die einzusetzende Sensorfaser. Bei Betonbauwerken kann der faseroptische Sensor oberflächlich appliziert werden, eingebettet im Klebstoff wie Urethanacrylat und Epoxidharze [4]. Neben der wichtigsten Aufgabe der Übertragung von Verformungen auf den Sensor übernimmt die Klebung gleichzeitig die Schutzfunktion gegen unerwünschte mechanische und chemische Einflüsse. Abb.1 zeigt einen Abschnitt der Unterseite der Brücke 705 mit der durch die vollständige Einbettung in einer Epoxidharzmatrix implementierten Sensorfaser.



Abb. 1. Sensorapplikation an der Unterseite der Betonbrücke 705.

Im Fall der Sensorapplikation an der Amsterdamer Betonbrücke 705 wurde eine Standard-Corning-Glasfaser SMF-28 Ultra in einer etwa 250 m langen Schleife quer und entlang der Brücke oberflächlich appliziert. Der sensorisch relevante Faserabschnitt, dessen Verlauf in Abb. 3 schematisch markiert ist, wurde dabei in eine eingefräste Nut mittels Epoxidharzklebers bei der per Hand angebrachten Dehnvorspannung einlaminiert. Die Länge dieser Sensorstrecke beträgt 93,9 m. Der Rest der Faserschleife wird durch angrenzende spannungsfreie Faserabschnitte (SMF-28 Ultra) sowie faseroptische Kabelzuleitungen

(Patchkabel und Pigtails) zwecks Anschlusses an die sich im Messcontainer befindenden Messgeräte gebildet.

1.2 Ortsaufgelöst messende faseroptische Sensorsysteme

Die etablierten Messsysteme können je nach Art des genutzten Lichtstreuungseffektes unterschieden werden. Durch Abtasten der Rayleigh-Streuung entlang einer standardmäßig eingesetzten GOF-Sensorfaser kann eine relative Quantifizierung der dehnungs- und temperaturbedingten lokalen Änderungen vorgenommen werden. Bei der Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR) mit der Einkopplung von durchstimmbaren Dauerstrichlasersignalen in ein Mach-Zehnder-Interferometer, bestehend aus einer eingebauten Referenzfaser und einer zu vermessenden Sensorfaser, lassen sich sehr hohe Ortsauflösungen von bis zu 1 mm entlang einer einige Dutzend Meter langen Sensorfaser erfassen [5]. Das bei den Belastungstests an der Brücke 705 eingesetzte alternative Messsystem auf der Basis des kohärenten Verfahrens der Zeitbereichsreflektometrie TW-COTDR (engl.: tunable wavelength coherent optical time domain reflectometry) [6] ermöglicht Messungen entlang über 20 km langen Sensorfaserstrecken. Da die Rayleigh-Streuung den stärksten Lichtstreuungseffekt darstellt, können bei Rayleigh-basierten Messverfahren die höchsten Messgenauigkeiten unter $1 \mu\epsilon$ für eine Dehnungs- bzw. unter $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ für eine Temperaturmessung erreicht werden. Dagegen bietet die DSTS-Technik (engl.: DSTS – distributed strain and temperature sensing) [7] unter Nutzung der Brillouin-Streuung eine absolute Bestimmung der beiden Messgrößen, während die Raman-Streuungsbasierten Systeme [8] für reine Temperaturmessung geeignet sind.

Tabelle 1 fasst die wichtigsten Eigenschaften der kommerziell erhältlichen Messsysteme der beiden in Amsterdam genutzten Messverfahren zusammen.

Tabelle 1. Messtechnische Standardeigenschaften marktüblicher faseroptischer Messsysteme DSTS und TW-COTDR zu kombinierten statischen Dehnungs- und Temperaturmessungen für die Zustandsüberwachung

Messverfahren	Streuungsart	Messlängen	Genauigkeit	Ortsauflösung	Art der Messung
DSTS	Brillouin	20 km – 50 km	$5 \mu\epsilon - 10 \mu\epsilon /$ $0,25 \text{ }^\circ\text{C} - 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	50 cm – 100 cm	Absolutmessung
TW-COTDR	Rayleigh	20 km - 25 km	$0,5 \mu\epsilon /$ $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$	20 cm – 100 cm	Relative Quantifizierung in Bezug zur Referenzmessung

1.2.1 Ortsverteilte Brillouin-Sensorik

Die Brillouin-Sensorik basiert auf der Vermessung der Frequenzverschiebung ϑ_B zwischen den Frequenzen der in die Sensorfaser eingekoppelten Laserlichtsignale und der im unelastischen Rückstreuungprozess verstärkten niederfrequenten Brillouin-Signale. Demzufolge lässt sich die Temperatur- bzw. Dehnungsverteilung entlang der Sensorfaser mittels folgender Gleichung bestimmen:

$$\vartheta_B = \vartheta_{B0} + C_T \cdot (T - T_0) + C_\epsilon \cdot \epsilon \quad (1)$$

wobei C_T und C_ϵ die Fasermaterial- und wellenlängenspezifischen Temperatur- bzw. Dehnungskoeffizienten darstellen. ϑ_{B0} in Gl. (1) ist als eine materialabhängige charakteristische Brillouin-Frequenzverschiebung einer ungedehnten Faser bei einer Referenztemperatur T_0 zu verstehen.

Bei den marktüblichen Messgeräten wird die Bestimmung von ϑ_B entweder im Zeit- oder im Frequenzbereich realisiert. Die ansatzspezifischen Eigenschaften der beiden Messprinzipien sind in [9] und [10] detailliert vorgestellt.

Da sich die Brillouin-Messtechnik gem. (1) bei einem bekannten Temperaturzustand zur absoluten Quantifizierung der Dehnungsverteilung eignet, wurde eine Brillouin-Messung zwecks Überprüfung der bei der Sensorintegration angebrachten Vordehnung vor den Belastungstests an der Brücke 705 vorgenommen. Wie im Abschnitt 2.2 dargestellt, lieferte diese auf der Basis der Brillouin-Reflektometrie durchgeführte Überprüfung wichtige Aussagen zur vordehnungsbedingten Belastbarkeit der applizierten Sensorfaser.

1.2.2 Rayleigh-basierte Sensortechnik TW-COTDR

Bei dem TW-COTDR-Verfahren werden durchstimmbare Laserdioden verwendet, um Leistungsspektren des Rayleigh-Rückstreulichts als Funktion des durchgeführten Frequenzscans zu erzeugen. Da die Leistungsverläufe der Rayleigh-Streusignale entlang der Sensorfaser abhängig von den im Fasermaterial stochastisch verteilten lokalen Defekten und Störungen fluktuieren, so entsteht für jedes bestimmtes Sensorfasersegment ein charakteristischer spektraler Fingerabdruck, der bei konstanten Temperatur- und Dehnungsbedingungen stabil bleibt. Wird eine der beiden Messgrößen lokal verändert, so wird der spektrale Fingerabdruck in dem beeinflussten Fasersegment gestreckt bzw. gestaucht, sodass zwischen den beiden Zuständen eine Frequenzverschiebung $\Delta\vartheta_R$ zu beobachten ist. Die Frequenzverschiebung $\Delta\vartheta_R$ ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Sein Wert lässt sich mittels Kreuzkorrelation beim Vergleich beider spektralen Rückstreuprofile bestimmen. Die Umrechnung in einen Temperatur- ΔT bzw. Dehnungsgradienten $\Delta\varepsilon$ erfolgt gemäß:

$$\Delta\vartheta_R = C_R^T \cdot \Delta T + C_R^\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \quad (2)$$

wobei die Konstanten C_R^T und C_R^ε den Temperatur- bzw. Dehnungseinfluss auf die lokalen Änderungen der Rayleigh-Streuprofile beschreiben.

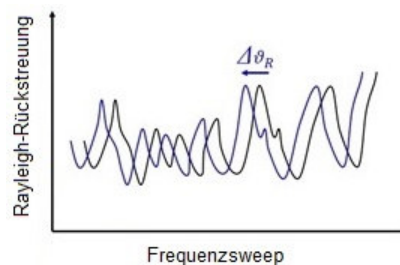


Abb. 2. Spektrale Leistungsdichte der Rayleigh-Rückstreuung in einem bestimmten Fasersegment entlang der Sensorstrecke – Dehnungs- bzw. temperaturbedingte Frequenzverschiebung gegenüber der Referenzmesskurve (schwarz).

2. Statische Belastungstests an der Amsterdamer Betonbrücke 705

Die orts aufgelösten faseroptischen Messungen zur Detektion der kleinsten Durchbiegungseffekte, verursacht durch statische punktuelle Belastung der Amsterdamer Brücke 705 mit zwei 36-Tonnen-Lastwagen, wurden in vier Messserien mit jeweils 13 Einzelmessungen durchgeführt. Dabei konnten biegebedingte Verformungen als lokale Änderungen der Längsdehnung der an der Unterseite applizierten Sensorfaser im Größenbereich von einigen $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen werden. Die Positionen der beiden Lkws

während der Einzelmessungen sowie der Verlauf der applizierten 93,9 m langen Sensorfaser sind in Abb. 3 schematisch dargestellt. Zur Verbesserung der räumlichen Auflösung der erwarteten lokalen Dehnungseffekte wurde die Sensorfaser in den Bereichen A und B abschnittsweise dreifach verlegt.

2.1 Belastungskonzept zur Detektion von Durchbiegungseffekten

Bei der ersten Messserie wurde die Brücke nur mit dem Lkw 1 betastet. Jede der weiteren drei Messserien wurde für die in Abb.3 markierten Positionen des Lkw 2 a bis c durchgeführt. Für jede einzelne Messung der jeweiligen Messserie durchlief der Lkw 1 stets die gekennzeichneten Positionen 01 bis 13.

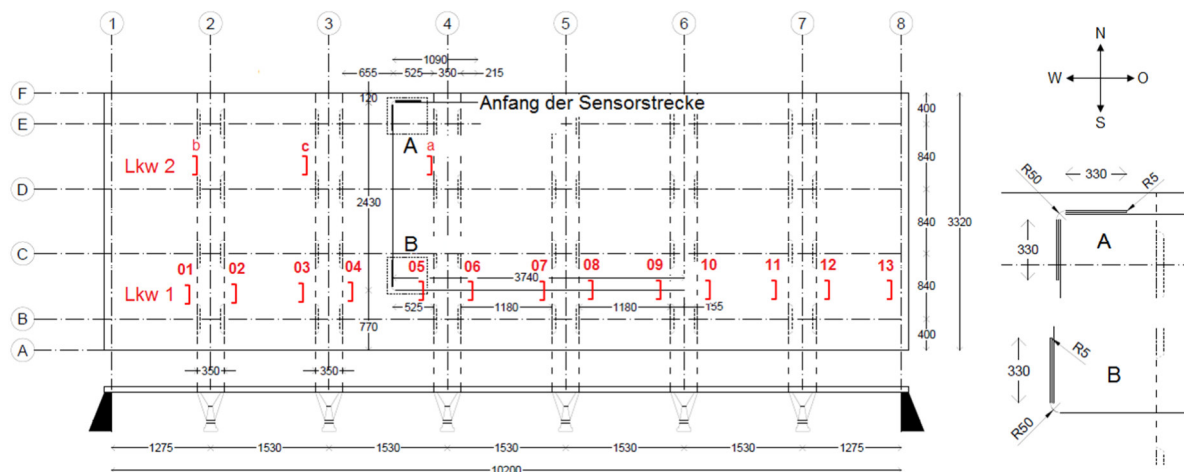


Abb. 3. Konzept zur ortsverteilten faseroptischen Detektion von Durchbiegungseffekten bei der punktuellen statischen Belastung mittels zweier Lkws – Längenmaße in cm.
Die rot markierten Positionen entsprechen der Lage der Vorderräder des jeweiligen Lkw.

2.2 Qualitätsüberprüfung der applizierten Sensorfaser

Da während der Sensorinstallation einzelne Arbeitsschritte messtechnisch nicht überwacht werden konnten, musste bei der Überprüfung der eventuell auftretenden kritischen Vorbelastungen auf Messverfahren zur Absolutmessung der Dehnungsverteilung zurückgegriffen werden.

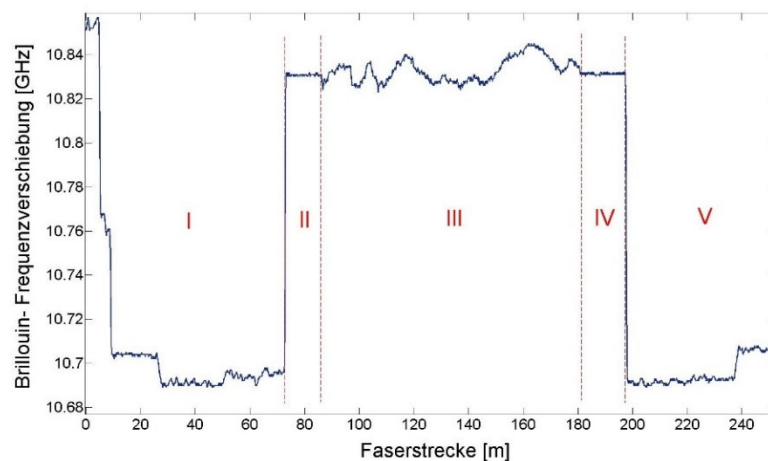


Abb. 4. Brillouin-basierte DSTS-Messung entlang der kompletten Faserschleife bestehend aus der Sensorfaser sowie Vor- und Nachlaufleitung (Patchkabel und Pigtails).

Abb. 4 zeigt die vor den Belastungstests mittels Brillouin-Reflektometrie aufgenommene Dehnungsverteilung der kompletten Faserschleife. Die sensorisch relevante in eine eingefräste Nut geklebte Sensorfaser befindet sich hierin im Abschnitt III. Die angrenzenden Bereiche II und IV entsprechen den beiden spannungsfrei an der Unterseite der Brücke befestigten Sensorfaserenden (SMF-28 Ultra). Die Segmente I und V zeigen die charakteristische Brillouin-Frequenzverschiebung der Anschlusskabel. Dabei ist die signifikante Differenz zur der Grundfrequenz der Sensorfaser (Abschnitte II bis IV) durch Unterschiede in der Faserdotierung zu erklären. Vergleicht man ferner den Frequenzverlauf im Abschnitt III mit den mechanisch entkoppelten Bereichen II bzw. IV, so ergeben sich Frequenzdifferenzen bis 15 MHz. Dies wiederum weist auf unkritische Werte der Vordehnung der applizierten Faser bis $300 \mu\text{m/m}$ hin.

2.3 Analyse der Testergebnisse

Die hier präsentierten Ergebnisse unterstreichen die Eignung des Verfahrens TW-COTDR zur präzisen Detektion von lastbedingten Durchbiegungseffekten.

Wie in 1.2.2 erläutert, bei diesem Verfahren handelt es sich um eine relative Quantifizierung der lokalen Änderungen der Dehnungszustände. Die erforderliche Referenzmessung wurde hier direkt vor den statischen Tests aufgenommen.

Abb. 5 belegt die hohe Reproduzierbarkeit der erfassten Messkurven, die am Beispiel von zwei repräsentativen Messserien die Auswirkung der statischen Belastung beider Lkws (grüne Markierung für Lkw 1 und die blaue für Lkw 2) zeigen.

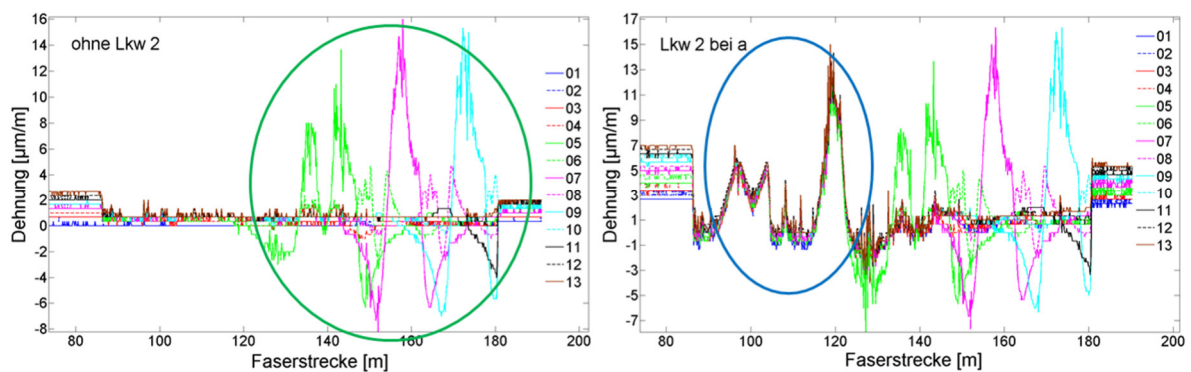


Abb. 5. Komplette Messreihe ohne Einsatz von Lkw 2 (links) und mit Lkw 2 bei der Position a (rechts). Der Lkw 1 durchläuft jeweils die Positionen 01 bis 13. Die umkreisten Bereiche belegen quantitativ die Lastbeanspruchung von Lkw 1 (grün) bzw. Lkw 2 (blau).

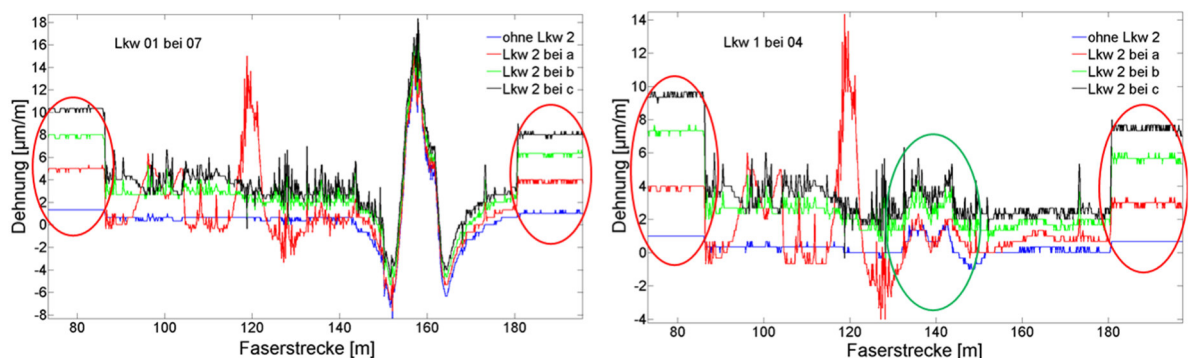


Abb. 6. Dehnungsprofile während aller vier Messreihen für Lkw 1 bei der Position 07 (links) und 04 (rechts). Der grün umkreiste Bereich zeigt die kleinste lastinduzierte gemessene longitudinale Dehnung. Die rot markierten Signaloffsets der stressfreien Faserabschnitte belegen eine Temperaturänderung im Größenbereich von etwa $1 \text{ }^\circ\text{C}$ während der kompletten Testdurchführung.

In den rot markierten Bereichen in Abb. 6 sind gem. (2) die Temperaturänderungen während der Dauer der statistischen Tests abzulesen. Da es sich ferner hier um die mechanisch entkoppelten Abschnitte handelt, soll die Änderung von $\Delta\vartheta_R$ nicht als Dehnungsgradient von maximal 10 $\mu\text{m}/\text{m}$, sondern als Temperaturanstieg von maximal 1 $^\circ\text{C}$ interpretiert werden. Die Bereiche II und IV dienen somit als Temperaturindikatoren.

Der rechts in Abb. 6 grün markierte Abschnitt zeigt in der Form von Dehnungsgradienten im Größenbereich von 2 $\mu\text{m}/\text{m}$ die kleinsten auflösbaren Durchbiegeeffekte.

3. Schlussfolgerungen

Die erzielten Messergebnisse bestätigen die Eignung der ortsauflösend messenden faseroptischen Systeme zur präzisen Detektion von statischen Belastungen mit einer Ortsauflösung von 20 cm.

Die Messungen belegen beim Vergleich der Positionen des Lkw 1 die Entlastungsfunktion der Brückenpfeiler.

Das mit der Testdauer zunehmende Signalrauschen weist auf die aufgrund der Belastung in der Sensorfaser bleibende geringe lokale Restdehnung hin.

Referenzen

- [1] A. Kindler, S. Großwig, *Distributed Strain Sensing in der Geotechnik*, Bautechnik 95(5), 385-393 (2018)
- [2] P.H. Kiers, JH. Stork, *De geschiedenis van de Amsterdamse elektrische tramlijnen*, Rotterdam, Wyt (1974)
- [3] S Liehr, M Wendt, K Krebber, J. C. München, L. Stempniewski, H. Metschies, *Distributed polymer optical fiber sensors integrated in technical textiles for monitoring of masonry structures*, Proc. of SHMII-4, Zurich, 1-7 (2009)
- [4] M Schallert, D Hofmann, W Habel, *Strukturanalyse von Betonpfählen durch eingebettete faseroptische Sensoren*, Technisches Messen 75(9), 1-16 (2008)
- [5] D. Samiec, *Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung*, Photonic 6(4), 34-37 (2011)
- [6] K. Kishida, CH. Li, K. Nishiguchi, Y. Yamauchi, A. Guzik, and T. Tsuda, *Hybrid Brillouin-Rayleigh distributed sensing system*, Proc. of SPIE 8421, 84212G-1 - 84212G-4 (2012)
- [7] L. Thévenaz, K. T. Chang, M. Niklès, *Monitoring of large structures for safety issues using Brillouin distributed sensing*, Proc. of OFS-16, 506-509 (2003)
- [8] E. Hurtig, J. Schrötter, S. Großwig, K. Kühn, B. Harjes, W. Wieferig, R.P. Orrell, *Borehole Temperature Measurements Using Distributed Fibre Optic Sensing*, Scientific Drilling 3(6), 283-286 (1993)
- [9] M. A. Soto, *Distributed Brillouin Sensing: Time-Domain Techniques*, Handbook of Optical Fibers, 1-91 (2017)
- [10] A. Wosniok, *Distributed Brillouin Sensing: Frequency-Domain Techniques*, Handbook of Optical Fibers, 1-25 (2017)