

Monitoring der CFK-Kabel der Brücke über die Kleine Emme

Autor(en): **Brönnimann, Rolf / Anderegg, Peter / Nellen, Philipp M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **117 (1999)**

Heft 17

PDF erstellt am: **10.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79723>

Nutzungsbedingungen

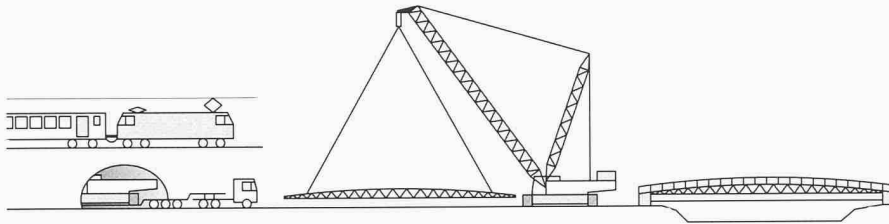
Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



6

Anlieferung durch Bahnunterführung und Montage der fertigen Brückenkonstruktion

(Kasten mit technischen Daten). Zerlegt in 35 Transporteinheiten war seine Installation bei den für grosse Pneuکرane zu engen Zufahrtsverhältnissen vorteilhaft und ermöglichte die präzise und praktisch erschütterungsfreie Montage der Brückenkonstruktion.

Anschließend wurden die Fahrbahnkonstruktion im Bereich der Widerlager noch ergänzt und die bituminöse Brückenabdichtung und der Gussasphaltbelag eingebracht.

Kontrollen

Nebst den üblichen vermessungs- und materialtechnischen Überprüfungen wurde das Hauptaugenmerk auf die Überwachung der CFK-Kabel gelegt. Erstmals werden Dehnungen und Temperatur über Glasfaserkabel gemessen, die in den CFK-Drähten zentrisch eingebettet sind. Im weiteren werden auch noch elektrische Messungen vorgenommen. Das Monitoring wird weiter unten in einem separaten Beitrag behandelt.

Am Bau Beteiligte

Bauherrschaft:
Verkehrs- und Tiefbauamt Kanton Luzern
Projekt und Bauleitung:
Plüss + Meyer Bauingenieure AG, Luzern
Gestalterische Mitwirkung:
Galliker und Geissbühler, Architekten, Luzern
Hauptunternehmer:
Gebr. Wüest, AG, Luzern
Stahlbau-Subunternehmer:
Senn AG, Oftringen
CFK-Vorspannung:
Arbeitsgemeinschaft BBR-Empa, Dübendorf
Draht-Lieferant:
Stesalit AG, Zullwil
Monitoring:
Empa, Dübendorf
Brückenmontage:
Fanger AG, Sachseln

Adressen der Verfasser:

Hansjakob Burkhardt, dipl. Bauing. ETH, Baudepartement des Kantons Luzern, VTA, Arsenalstrasse 43, 6010 Kriens, *Arnold Keller*, dipl. Bauing. ETH/SIA, *Gregor Schwegler*, dipl. Bauing. ETH/SIA, Dr. sc. techn., Plüss + Meyer Bauingenieure AG, Landenbergstr. 34, 6005 Luzern (A. Keller seit April 1999: Schmiedgasse 24, 6370 Stans)

Rolf Brönnimann, Peter Anderegge und Philipp M. Nellen, Dübendorf

Monitoring der CFK-Kabel der Brücke über die Kleine Emme

Für die neue Rad- und Gehwegbrücke über die Kleine Emme wurden zwei CFK-Spannkabel verwendet. Um diese Kabel, die unter hohen Lasten stehen, zu überwachen, wurden neben konventionellen hauptsächlich faseroptische Bragg-Gitter-Sensoren eingebaut. Die Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung faseroptischer Überwachungssysteme sowie Messresultate werden diskutiert.

1996 wurden als Weltpremiere bei der Storchenbrücke in Winterthur, einer Schrägseilbrücke [1], zwei Lastkabel aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) eingesetzt. Last, Kabeleinzug, Temperatur und Feuchte dieser Kabel werden seither permanent überwacht. Auch bei diesen Kabeln kamen schon faseroptische Sensoren zum Einsatz. Deren Daten werden in unregelmässigen Abständen ausgelesen. Sie funktionieren seit bald drei Jahren pro-

blemlos, und die Resultate stimmen hervorragend mit den Messungen der elektrischen Dehnungsmessstreifen überein.

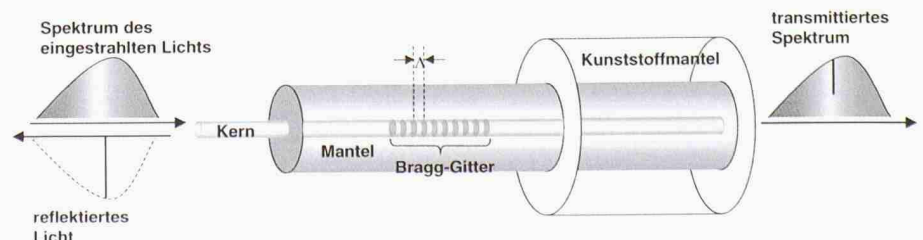
Bei der neuen Brücke über die Kleine Emme kommen zwei CFK-Kabel als Vorspannkabel zum Einsatz. Die Kabeldehnung ist jedoch mehr als fünfmal höher als bei der Storchenbrücke. Dies stellt eine grosse Anforderung an die Befestigungstechnik und Dauerhaftigkeit der Sensoren dar. Im Labor wurden deshalb umfangrei-

che Tests durchgeführt, um die Brauchbarkeit der Fasern als Messmittel für Überwachungsaufgaben im Brückenbau nachzuweisen.

Optische Faser-Bragg-Gitter als Sensoren

Bild 1 zeigt den typischen Aufbau einer optischen Faser. Sie besteht aus Quarz und hat einen Querschnitt mit einem Durchmesser um die 0,1 mm. Die Faser besteht aus zwei Zonen, dem Kern und dem Mantel. Zum mechanischen Schutz wird die Faser mit einem Kunststoffmantel umhüllt. Durch Dotierung des Kerns mit Germa-

1 Dargestellt ist eine optische Faser mit eingeschriebenem Bragg-Gitter. Das Gitter reflektiert von der eingestrahlichten breitbandigen Lichtquelle nur die Bragg-Wellenlänge



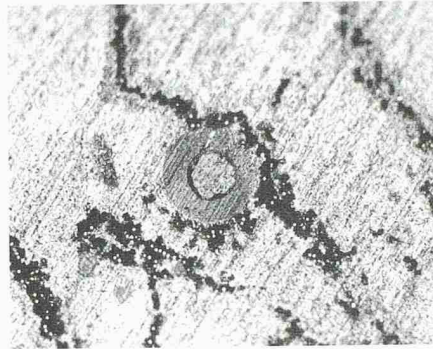
nium erhöht sich der optische Brechungsindex gegenüber dem Mantel. Wegen der Totalreflexion zwischen Mantel und Kern wird das Licht entlang der Faser geleitet. Es existiert nun eine Vielzahl von Messsystemen auf der Basis von optischen Fasern [2]. Wir setzen jedoch vor allem Bragg-Gitter ein:

Schon seit längerem ist bekannt, dass der Kern einer Faser bei Bestrahlung mit UV seinen Brechungsindex verändert. Dieser Effekt wird nun ausgenutzt, um eine periodische Brechungsindexstruktur, ein sogenanntes Bragg-Gitter (Bild 1), in eine Faser einzuschreiben. Das Gitter reflektiert das eingekoppelte Licht, falls dessen halbe Wellenlänge der Gitterperiode entspricht. Die Reflexion dieser Bragg-Wellenlänge kommt durch konstruktive Interferenz zustande. Wird die Faser gedehnt oder erwärmt, verändert sich die Gitterperiode und damit die Bragg-Wellenlänge. Diese Gitter wirken nun wie eingebaute Dehnungsmessstreifen. Relative Wellenlängenveränderungen lassen sich nun sehr genau, nämlich auf weniger als ein Millionstel bestimmen. Das bedeutet eine Auflösung von $1 \mu\text{m}/\text{m}$ für Dehnungen oder $0,1^\circ\text{C}$ für die Temperatur. In eine Faser können mehrere Bragg-Gitter mit unterschiedlichen Perioden eingeschrieben werden, so dass sie mehrere sensitive Stellen aufweist.

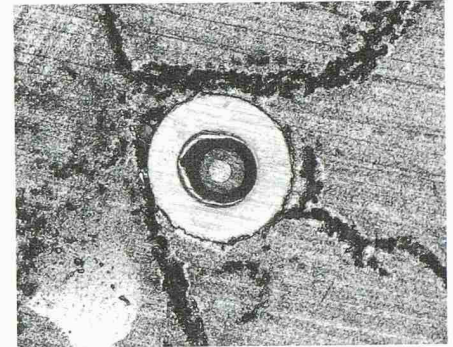
Die verwendeten, direkt am Faserziehturm hergestellten Bragg-Gitter [3] wurden uns freundlicherweise vom Naval Research Laboratory, Washington DC, USA, zur Verfügung gestellt.

Zur Attraktivität des faseroptischen Messsystems gehört unter anderem:

- Eine Faser kann eine Vielzahl von aktiven Stellen enthalten



a



b

2

Die Bilder zeigen in CFK-Drähte eingebettete optische Fasern. a) zeigt die Messfaser und b) eine in einen Teflonschlauch eingebettete Standardfaser

- Die Fasern sind gegenüber elektrischen und magnetischen Störungen immun
- Die Form und die kleinen Abmessungen der Sensoren und der Zuleitung können je nach Anwendung vorteilhaft sein
- Lange Zuleitungen haben keinen Einfluss auf das Messresultat
- Vor Ort ist keine Hilfsenergie nötig

Einbetten der Sensoren in CFK-Kabel

Die beiden Vorspannkabel für die Brücke über die Kleine Emme wurden aus 91 CFK-Drähten hergestellt. Die Vorspannkraft der Kabel entspricht einer Dehnung von 0,8%. Diese für CFK-Drähte unkritische Dehnung ist wesentlich über dem Einsatzbereich von Stahl. Um die Leistungsfähigkeit dieses neuen Baumaterials im Betrieb zu studieren, werden sie messtechnisch

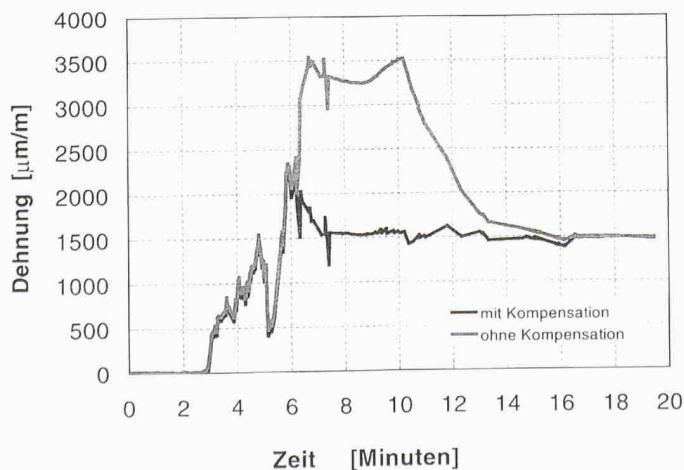
überwacht. Neben konventionellen Messmitteln, wie elektrischen Dehnungsmessstreifen (DMS), induktiven Wegaufnehmern und Widerstandsthermometern, wurden vor allem auch faseroptische Sensoren eingebaut.

Faseroptische Sensoren auf der Basis von Bragg-Gittern werden in vielen Anwendungen eingesetzt. Dabei werden sie auf die zu überwachende Struktur ähnlich wie Dehnungsmessstreifen aufgeklebt. Ein solches System ist seit bald drei Jahren bei der Storchenbrücke in Winterthur [1] im Einsatz. Für Kunststoffe mit unidirektionaler Faserverstärkung ist jedoch die Einbettung der faseroptischen Sensorfasern direkt bei der Produktion anzustreben. Die Vorteile sind offensichtlich:

- gute mechanische Verbindung mit dem Material
- mechanischer Schutz
- keine an der Oberfläche vorstehenden Teile
- keine Oberflächenveränderung

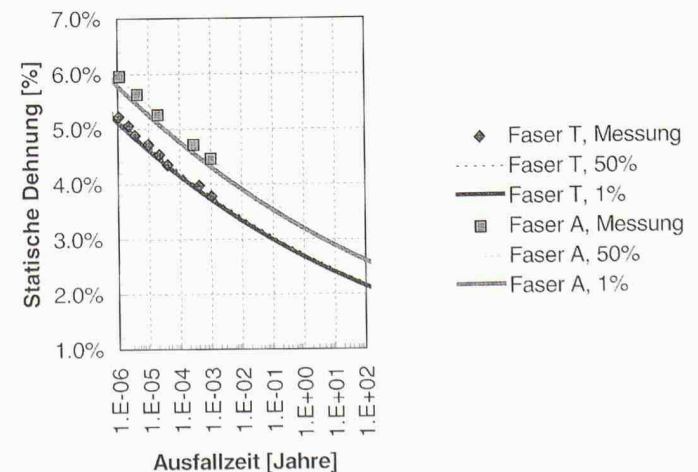
3

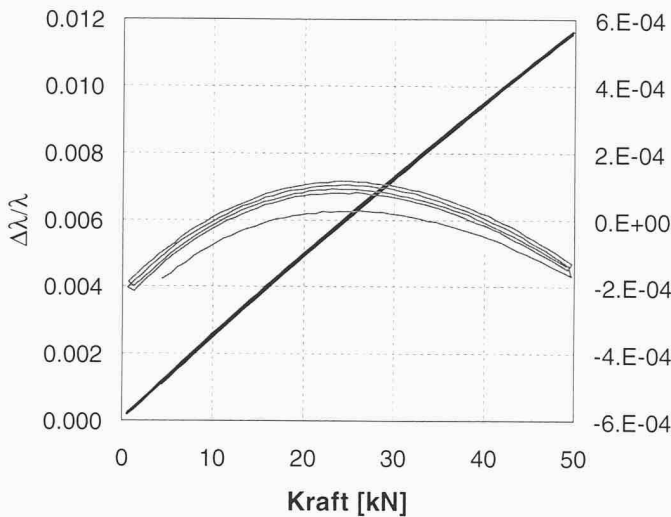
Im Bild sind die scheinbare und die temperaturkompensierte Dehnung eines Bragg-Gitters während des Einbettvorgangs dargestellt



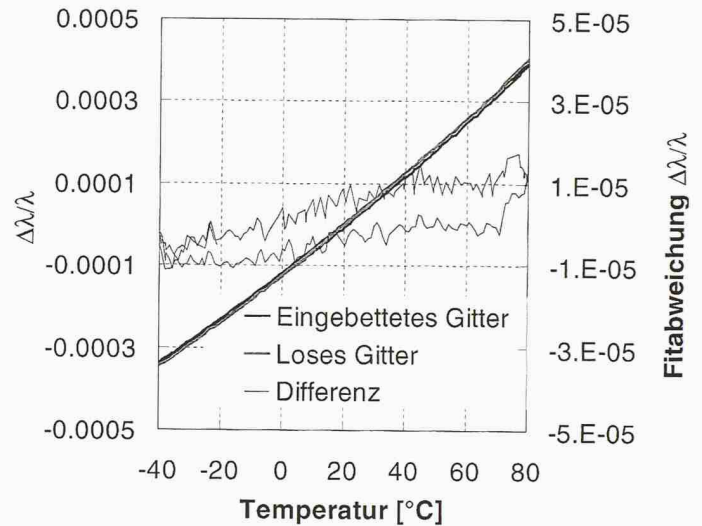
4

Schätzung der Lebensdauer in Abhängigkeit der statischen Dehnung von Fasern. Bei 2% Dehnung beträgt die Lebenserwartung für beide Fasern über 100 Jahre





5 Relative Wellenlängenverschiebung der Bragg-Gitter in Abhängigkeit der an einen 5 mm-CFK-Draht eingeleiteten Kraft



6 Relative Wellenlängenverschiebung als Funktion der Temperatur für lose und in CFK-Drähte eingebettete Bragg-Gitter

CFK-Drähte werden im Strangziehverfahren (Pulltrusion), das eine kontinuierliche Produktion erlaubt, hergestellt. Ausgangsmaterial für die 5 mm dicken Drähte sind 30 Stränge, die aus rund 12 000 Kohlenstofffasern mit ungefähr 7 µm Durchmesser bestehen. Diese Stränge werden durch ein Imprägnierbad gezogen, in einer beheizten Form zu Drähten geformt und in einem anschliessenden Ofen gehärtet [1]. Diese Drähte haben einen E-Modul von 160 GPa, eine Bruchkraft von 66 kN und eine entsprechende Bruchdehnung von

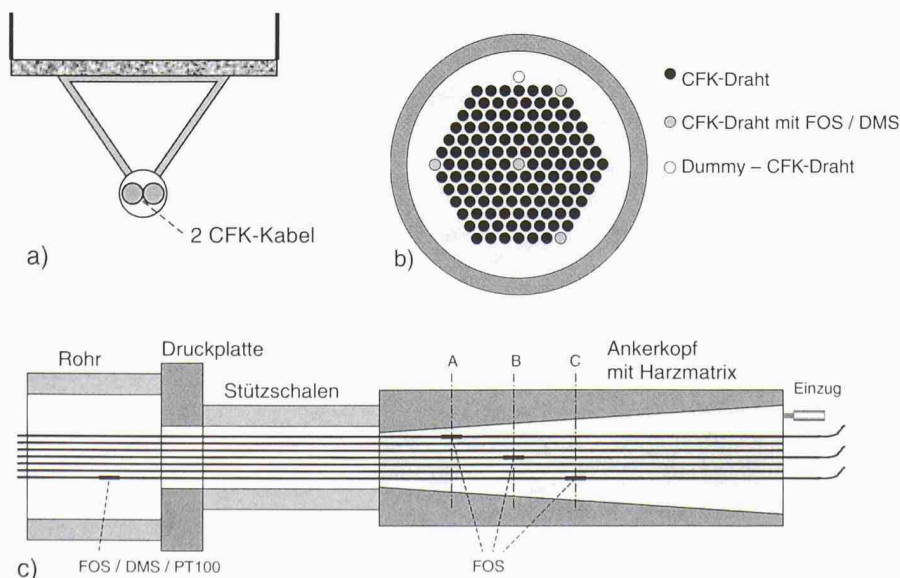
2,1%. Die optische Faser mit den Bragg-Gittern wird zentriert mitten in die imprägnierten Kohlenfasern eingeführt. Die optische Faser wird dabei leicht gestreckt, um eine gute Ausrichtung zu erreichen. Bild 2a zeigt das Resultat des Einbettens. Zu sehen ist die mit Hartacryl umhüllte Messfaser mit einem Durchmesser von 83 µm. Bild 2b zeigt eine in einem Teflonschlauch eingebettete Faser. Da die Faser sich frei bewegen kann, ist sie spannungsfrei und kann deshalb einerseits als Temperatursensor und andererseits zur Tem-

peraturkompensation der Messgitter verwendet werden. Die dunklen Flächen ausserhalb der Messfaser sind Gebiete mit geringem Kohlenfaseranteil. Dies hat zur Folge, dass die optischen Fasern nicht immer homogen eingebettet sind.

Monitoring der Produktion

Es ist von Interesse, den Verlauf der beim Einbetten auftretenden Temperaturen und Spannungen zu erfassen. Zwei Sensorfasern wurden während des Einbettens zur On-Line-Überwachung des Prozesses mit dem Spektrometer verbunden. Das erste in einen Teflonschlauch eingelegte Bragg-Gitter mass den Temperaturverlauf in der Form und im anschliessenden Ofen. Die Messungen stimmen gut mit den eingestellten Temperaturen überein. Mit den übrigen Gittern konnte der Spannungsverlauf gemessen werden. In Bild 3 ist der gemessene Dehnungsverlauf dargestellt. Die graue Linie zeigt die unkompenzierte, stark von der Temperatur verfälschte Messung. Da das Temperaturprofil mit dem ersten Gitter gemessen wurde, kann die Dehnungsmessung kompensiert werden; die schwarze Linie zeigt das Resultat. Sechs Minuten nach Messbeginn erreichte das Bragg-Gitter den Ofen. Vorher wurde die Faser vorgespannt. Im Ofen fiel die Dehnung (für dieses Gitter) von zuerst 2300 auf 1500 µm/m ab und blieb dann stabil. Zu diesem Zeitpunkt scheint der Kunststoff soweit ausgehärtet zu sein, dass eine kraftschlüssige Verbindung zwischen CFK-Draht und optischer Faser besteht. Die für dieses Gitter gemessene Restdehnung von

7 Brückenquerschnitt (a), Kabelquerschnitt (b) und Kabellängsschnitt (c). Die Positionen der Sensoren sind schematisch dargestellt



1500 $\mu\text{m}/\text{m}$ ist ein hoher Wert. Für die meisten Gitter beträgt die Restdehnung weniger als 500 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Lebensdauerschätzung

Bei Dehnungen von über 8000 $\mu\text{m}/\text{m}$ im Betrieb ist es wichtig, Abschätzungen über die Lebensdauer der Faser zu machen. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen der Spannungsrissskorrosion der Fasern durchgeführt: die bei der Faserherstellung unvermeidlichen mikroskopischen Risse vergrößern sich unter dem Einfluss einer Spannung. Dieses Risswachstum, das zum Versagen von gespannten Fasern führt, wird durch ein Potenzgesetz beschrieben [4], mit dem die Lebensdauer geschätzt werden kann. Um die Modellparameter zu bestimmen, wurde die Dauer bis zum Bruch einer gespannten Faser für verschiedene Vorspannungen gemessen. Bild 4 zeigt die Messungen und die daraus berechneten Lebenserwartungen für die Sensorfaser sowie für eine Standardfaser. Die gestrichelten Linien entsprechen 50% Ausfallwahrscheinlichkeit, die ausgezogenen Linien 1% Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Messungen zeigen, dass z.B. bei 2% Dehnung die Lebenserwartung für die Standardfaser mehr als 100 Jahre beträgt und für die Sensorfaser noch höher liegt. Diese Prognosen gelten unter der Annahme, dass die alterungsrelevanten Einflüsse ähnlich wie im Labor sind und dass die Faser beim Einbetten nicht beschädigt wurde. Im weiteren wird aus Messzeiten von 30 Sekunden bis 8 Stunden auf Lebensdauern von 100 Jahren hochgerechnet. Da die Kabel in der Brücke jedoch weniger als 1% gespannt sind, ist eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit wegen Spannungsrissskorrosion zu erwarten.

Zusätzlich wurden die Haftung der Faser in der Matrix sowie der Temperaturzerfall der Bragg-Gitter beim Einbetten detaillierter untersucht [5]. Die grosse Streubreite der Haftwerte, ermittelt durch «Push-Out»-Versuche an der Empa in Thun zeigten, dass der Herstellungsprozess noch optimiert werden kann. Der Temperaturverlauf beim Einbetten verschiebt die Wellenlänge der Bragg-Gitter nur unwesentlich, stabilisiert dabei jedoch das Langzeitverhalten.

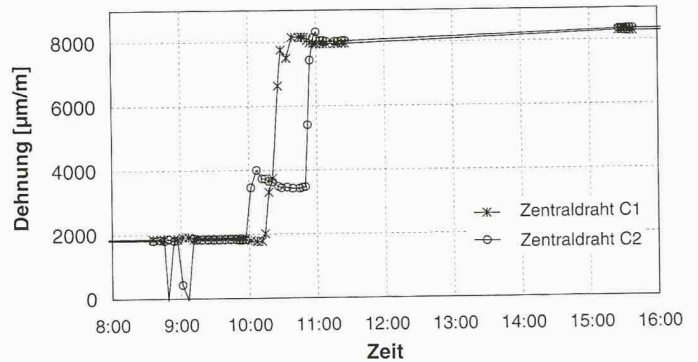
Dehnungsempfindlichkeit

Um aus der Dehnung auf die anliegende Kraft zu schliessen, wurde in einer Prüfmaschine das Kraft-Dehnungsverhalten eines mit Bragg-Gittern ausgerüsteten CFK-Drahts gemessen. Das Resultat ist in Bild 5 dargestellt. Bei genauer Betrachtung kann die Abweichung vom linearen Ver-

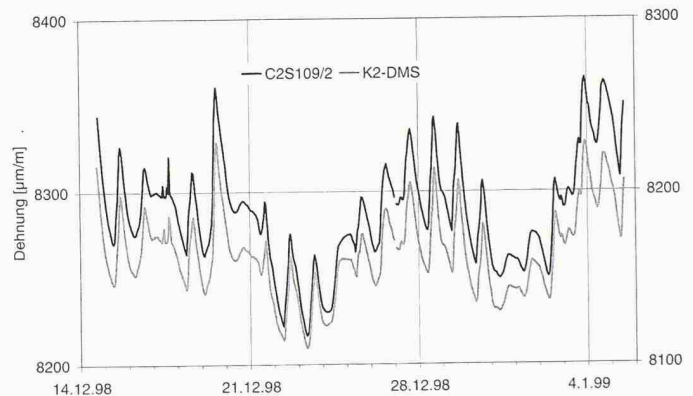
8
Zeitlicher Spannvor-
gang

Zeit	Ereignis
8:00	Die Kabel C1 und C2 sind schon mit ~25% Betriebslast vorgespannt
8:45,9:10	Nacheinander werden die Kabel kurz entlastet und wieder auf 25% Betriebslast vorgespannt
9:55	Spannen von C2 auf ~50% Betriebslast
10:10	Spannen von C1 auf 100% Betriebslast
10:45	Spannen von C2 auf 100% Betriebslast
11:10	Vorspannen abgeschlossen, Beginn des Transports zu den Widerlagern
15:30	Brücke in Widerlager eingesetzt

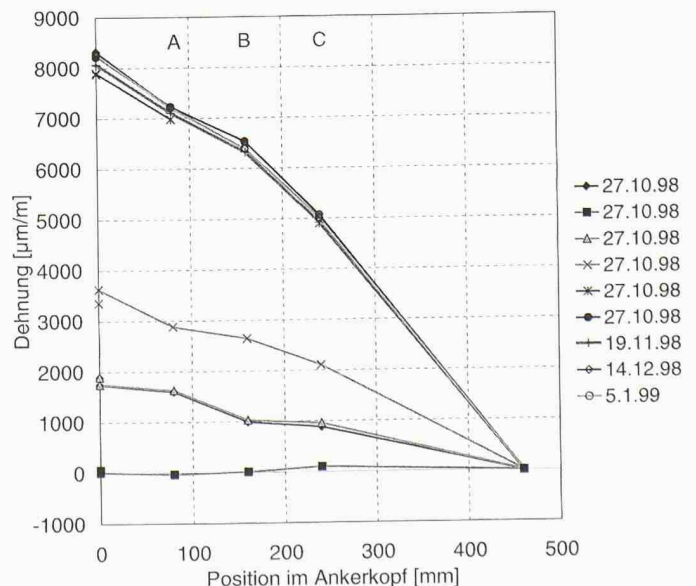
9
Lastverlauf während
des Spannens der bei-
den Kabel. In Bild 8
sind die einzelnen Ere-
ignisse beschrieben



10
Vergleich der mit Deh-
nungsmessstreifen
und faseroptischem
Sensor gemessenen
Dehnungen eines Vor-
spannkabels während
einer Periode von drei
Wochen



11
Mit faseroptischen
Sensoren gemessene
Dehnungsverteilung
im Ankerkopf
während des Spannens
und im Betrieb. A, B und C
entsprechen den in Bild 7c
eingezeichneten Posi-
tionen der Bragg-Git-
ter



halten, die durch die Erhöhung des E-Moduls von CFK bedingt ist, festgestellt werden. Diese Abweichung ist in Bild 5 für einige Belastungszyklen vergrössert dargestellt. Zu sehen ist auch die grössere Abweichung beim ersten Lastzyklus.

Temperaturgang und -kompensation

Die bisherigen Konzepte von Dehnungssensoren mit Bragg-Gittern zeigen immer auch eine Temperaturabhängigkeit. Für genaue Messungen muss der Einfluss der Temperatur auf die Messung kompensiert werden. Zu diesem Zweck wurden zwei unterschiedliche Konzepte angewandt. Einerseits wurde die etablierte Methode mit Dummy-Sensoren verwendet: in die Kabel wurde ein kurzer, unbelasteter CFK-Draht mit Bragg-Gittern eingebaut. Andererseits wurde das oben beschriebene Bragg-Gitter im Teflonschlauch verwendet. Diese Methode hatte eine geringere Reproduzierbarkeit. Der Grund: das Acrylcoating reagiert auf Feuchte und erhöht die Reibung. Wird die Faser ohne Acrylcoating eingebettet, kann die Temperatur genau bestimmt werden.

Bild 6 zeigt die relative Wellenlängenveränderung eines in CFK eingebetteten Bragg-Gitters und eines Bragg-Gitters ohne Acrylcoating bei Temperaturen von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$. Die ebenfalls dargestellte Differenz (rechte Skala) zeigt, dass der Temperaturgang beider Gitter beinahe gleich ist. Dies ist zu erwarten, da sowohl die Quarzfaser wie auch CFK-Drähte in Faserrichtung eine verschwindend kleine thermische Ausdehnung haben. Der Temperaturgang wird somit hauptsächlich von der Veränderung der optischen Eigenschaften der Quarzfaser bestimmt. Der geringfügig kleinere Temperaturgang im CFK-Draht korrespondiert mit dem noch näher bei Null liegenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten von CFK.

Die ausführlichen Vorabklärungen zeigten, dass faseroptische Sensoren für die geplanten Überwachungsaufgaben geeignet sind.

Monitoring-System für Spannkabel

In Bild 7a ist der Brückenquerschnitt mit den beiden CFK-Kabeln dargestellt, und Bild 7b zeigt den Querschnitt durch den Ankerkopf eines Kabels. Von den 91 CFK-Drähten sind der Zentrumsdraht und drei Eckdrähte mit faseroptischen Sensoren ausgerüstet. Ein ungespannter, sogenannter Dummy-CFK-Draht für die faseroptische Temperaturmessung und -kompensation ist seitlich im Ankerkopf angebracht. Bild 7c zeigt einen schematischen Längsschnitt durch ein Kabel mit den Positio-

nen aller Sensoren. Innerhalb des Ankerkopfs sind Gitter in den Schnitten A, B und C positioniert, die 8 cm, 16 cm bzw. 24 cm vom Kopfende entfernt sind. Ausserhalb des Ankerkopfs sind neben Bragg-Gittern auch Dehnungsmessstreifen, Widerstandsthermometer und ein Wegaufnehmer für die Einzugsmessung eingezeichnet. Die elektrischen Messwerte beider Kabel werden von einem Datenlogger kontinuierlich erfasst.

Spannen der Kabel

Am 26. Oktober 1998 wurde die Brücke in die Widerlager eingesetzt. Freihängend wurden die CFK-Kabel der Brücke auf die Betriebslast gespannt. Erst dann setzte der Baukran die Brücke in die Widerlager. In Bild 8 sind die Ereignisse aufgelistet, und in Bild 9 sind die zugehörigen faseroptischen Dehnungsmessungen der Zentraldrähte dargestellt.

Überwachungsergebnisse

Von Mitte Dezember 1998 bis Anfang Januar 1999 wurde die Brücke auch faseroptisch kontinuierlich überwacht. Die Daten wurden periodisch per Natel abgefragt. Die Resultate sind in Bild 10 dargestellt. Die schwarze Linie entspricht der faseroptischen Messung (linke Skala), die graue Linie der DMS-Messung (rechte Skala). Die beiden Messungen weichen um weniger als 2% voneinander ab. Die täglichen Belastungsschwankungen, hervorgerufen durch die thermische Ausdehnung der Brücke, werden von beiden Messsystem übereinstimmend wiedergegeben.

Spannungsverlauf im Ankerkopf

Von speziellem Interesse ist die Überwachung des Kräfteabbaus im Ankerkopf. Mit den im Ankerkopf eingebetteten Bragg-Gittern ist es nun zum ersten Mal möglich, diesen Spannungsabbau zu messen. Bild 11 zeigt die Resultate während des Spanns und im anschliessenden Betrieb. Für den Wert bei 0 mm wurde die Dehnung der freien Drähte verwendet, der Wert bei 460 mm (Kopfende) wurde auf $0\ \mu\text{m}/\text{m}$ gesetzt. Aus der Entwicklung der Dehnungsverteilung während des Betriebs kann auf die Stabilität des Ankerkopfs geschlossen werden. Seit dem Spannen wurden keine Kriechvorgänge festgestellt.

Ausblick

Faseroptische Sensoren sind ideale Überwachungselemente für CFK-Drähte. Dank des Einbettens während der Produktion sind sie optimal in die Kabel integriert. Mit

Dank

Für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung unserer Arbeit möchten wir dem Verkehrs- und Tiefbauamt des Kantons Luzern, allen beteiligten Firmen sowie den Kollegen der Empa danken.

diesen Sensoren sind Messungen möglich geworden, die mit konventionellen Methoden nur schwierig durchzuführen sind. Die bisherigen Erfahrungen und Abschätzungen zeigen, dass sie eine gute Langzeitstabilität aufweisen. Neben Anwendungen für Spannkabel setzten wir faseroptische Sensoren schon in einem Staudamm [6] sowie in Felsankern für einen Tunnel [7] ein. Weltweit untersuchen viele Forschungsgruppen Einsatzmöglichkeiten faseroptischer Sensoren. Zahlreiche Firmen, so auch schweizerische, entwickeln nicht nur faseroptische Sensorsysteme, sondern bieten solche für den Hoch- und Tiefbau bereits an. Es ist deshalb zu erwarten, dass faseroptische Sensoren bald eine weite Verbreitung finden werden, sobald Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erwiesen sind.

Adresse der Verfasser

Rolf Brönnimann, Dr. sc. nat., Peter Anderegg, dipl. Masch.-Ing. HTL, Philipp M. Nellen, Dr. sc. nat., Empa Dübendorf, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Literatur

- [1] Meier H., Meier U. und Brönnimann R.: Zwei CFK-Kabel für die Storchenbrücke. Schweizer Ingenieur und Architekt SI+A, (44), 8-13, 1996
- [2] Brönnimann R. und Nellen Ph. M.: Faseroptische Sensoren - Messmittel der Zukunft? Schweizerische Technische Zeitschrift, Nr. 1/99, S. 30-32, 1999
- [3] Askins C. G., Putnam M. A., Williams G. M. and Friebele E. J.: Stepped-wavelength optical-fiber arrays fabricated in line on a draw tower. Opt. Lett. 19(2), 147-149, 1994
- [4] Kapron F.P. and Yuce H. H.: Theory and measurement for predicting stressed fiber lifetime. Opt. Eng. 30(6), pp. 700-708, 1991
- [5] Nellen Ph. M., Anderegg P., Brönnimann R., Meier U. and Sennhauser U.: Fiber Optical Bragg Grating embedded in CFRP wires. SPIE Proceedings, Vol. 3670, 1999
- [6] Brönnimann R., Nellen Ph. M., Anderegg P. and Sennhauser U.: Application of Optical Fiber Sensors on the Power Dam in Luzzone. SPIE Proceedings, Vol. 3407, 386-391, 1998
- [7] Frank A., Brönnimann R., Nellen Ph. M. and Sennhauser U.: Fiber Optical Bragg Grating Sensors Embedded in GFRP Rockbolts. SPIE Proceedings, Vol. 3670, 1999