

Verteilte faseroptische Sensorik zur Detektion, Lokalisation, Identifikation und Quantifikation von Deformationsereignissen

Distributed Fibre Optic Sensing to Detect, Localize, Identify and Quantify Deformation Events

Werner Lienhart, Christoph M. Monsberger, Fabian Buchmayer

Verteilte faseroptische Messungen ermöglichen die lückenlose Erfassung von Temperaturen, Dehnungen und akustischen Signalen über große Distanzen von mehreren 10 Kilometern. Die Sensorkabel können direkt in die Überwachungsobjekte eingebettet werden, wodurch Deformationsmessungen an Orten möglich sind, welche mit geodätischen Messverfahren nicht zugänglich sind. In vielen Fällen können bereits vorhandene Kommunikationsleitungen verwendet werden und der Aufwand der Sensorinstallation entfällt. In diesem Beitrag werden Beispiele aus dem Tunnelbau, der Hang- und Leitungsüberwachung gezeigt, in welchen faseroptische Sensoren zur Riss- und Leckagedetektion und zur Detektion von Bautätigkeiten eingesetzt werden.

Keywords: Verteilte faseroptische Messungen, Rissdetektion, DSS, DTS, DAS

Distributed fiber optic sensing (DFOS) enables the continuous monitoring of strain, temperature and acoustic signals over distances of several tens of kilometers. The sensing cables can be embedded within the structures and therefore deformation information can be obtained at places which are not accessible by geodetic methods. Furthermore, existing fiber optic communication cables can be used for sensing. Thus, no installation of sensors is required. This article demonstrates that DFOS can be used to detect and localize cracks, leakages and construction activities in tunneling, landslide and pipeline monitoring.

Keywords: Distributed fiber optic sensing, crack detection, DSS, DTS, DAS

1 EINLEITUNG

Verteilte faseroptische Messsysteme nutzen Rückstreuungseffekte, welche auftreten, wenn sich optische Signale in Lichtwellenleitern (LWL) ausbreiten (Döring et al. 2016, Hartog 2017). Ein Laserpuls, welcher vom Interrogator in den LWL eingekoppelt wird, wird an jeder Stelle z der Faser zu einem kleinen Teil zurückreflektiert (Abb. 1). Der dabei abgedeckte Distanzbereich Δz ist von der Dauer des Laserpulses abhängig. Eine Pulsdauer von 10 ns führt, aufgrund der Lichtgeschwindigkeit und unter der Berücksichtigung

des Brechungsindex von Glas ($n_{\text{Glas}} \approx 1,47$), auf eine räumliche Auflösung von 1 m.

Das rückgestrahlte Signal wird von einem Detektor erfasst und je nach Messverfahren werden die temperatur- und dehnungsabhängige Rayleigh-Rückstreuung, Brillouin-Rückstreuung (ebenfalls temperatur- und dehnungsabhängig) oder die rein temperaturabhängige Raman-Rückstreuung aufgezeichnet. Der Ort der Rückstreuung kann, wie bei anderen Laserdistanzmessungen, durch die Laufzeit

Distanzen gewählt, so sind üblicherweise bessere räumliche Auflösungen und höhere Messraten erreichbar.

Im Gegensatz zu geodätischen Messverfahren können faseroptische Sensoren direkt in die Überwachungsobjekte eingebettet werden. Dadurch ist es möglich, Deformationen auch an Orten zu erfassen, welche durch geodätische Oberflächenmessungen nicht zugänglich sind. Im Folgenden wird gezeigt, wie DFOS-Messungen geodätische Monitoringaufgaben optimal ergänzen können.

2 DEFORMATIONSMESSUNGEN IM TUNNELBAU

2.1 Konventioneller Vortrieb

Im konventionellen Tunnelvortrieb nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) erfolgt der Ausbruch in mehreren Abschnitten. Zuerst wird die Kalotte aufgeföhren, später die Strosse und schlussendlich die Sohle. Je nach Stabilität des Gebirges können bei gutem Gebirge die Strosse und Sohle in einem Schritt entstehen (*Abb. 3 links*) oder es ist im Falle von schlechtem Gebirge eine Unterteilung in weitere Teilflächen erforderlich. Direkt nach dem Ausbruch erfolgt eine Sicherung mit Spritzbeton. Der Spritzbeton hat zu Beginn noch nicht seine volle Steifigkeit, weshalb Deformationen möglich und sogar gewünscht sind, sodass der Berg sein Gleichgewicht finden kann. Jedoch müssen Deformationen mit der Zeit abklingen und dürfen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten, da es sonst zu Rissen in der Spritzbetonschale kommen kann. Um

den Ausbruch zu steuern, d.h. um die Abschlagslängen, Anzahl von zusätzlichen Ankern etc. festzulegen, sind regelmäßige Deformationsmessungen erforderlich. Konventionell werden für die Messungen Bireflex-Targets in Messprofilen angeordnet (*/ÖGG 2014*) und deren 3D-Position mit Totalstationen manuell eingemessen. Typischerweise werden fünf Ziele für die Kalotte und zwei für die Strosse über den Querschnitt verteilt, sie *Abb. 3 rechts*.

Bei diesem Vorgang ergeben sich zwei Probleme. Einerseits stellt in vielen Fällen das Stativ mit der Totalstation ein Hindernis für die Bautätigkeiten dar und andererseits können Bereiche wie die Sohle gar nicht oder nur sehr aufwendig überwacht werden. Eine Alternative sind verteilte faseroptische Dehnungsmessungen. Dazu werden Sensorkabel an den Bewehrungsmatten befestigt und eingespritzt (*Abb. 4*). Die Kabel besitzen üblicherweise eine strukturierte Oberfläche, durch welche ein durchgehender Verbund des Kabels mit dem Beton sichergestellt wird. Um die Robustheit zu erhöhen, können die Kabel eine Stahlarmerung enthalten. Im Gegensatz zu geodätischen Messungen, welche eine direkte Sichtverbindung vom Instrument zum Ziel benötigen, kann sich das faseroptische Messgerät weit entfernt vom eigentlich Messort, z.B. in einem Querschlag oder außerhalb des Tunnels befinden. Ebenso können mehrere Messquerschnitte miteinander verbunden werden, sodass sämtliche Deformationsmessungen von einem zentralen Punkt aus durchgeführt werden können (*Abb. 5 links*). Für diese Anwendung wurde ein BOFDA-Instrument von fibrisTerre eingesetzt. Die Messungen wurden in der Schleifenkonfiguration durchgeführt und die Brillouin-Messungen entlang des Dehnungsmesskabels wurden mit den Messungen eines parallel verlaufenden Temperaturmess-

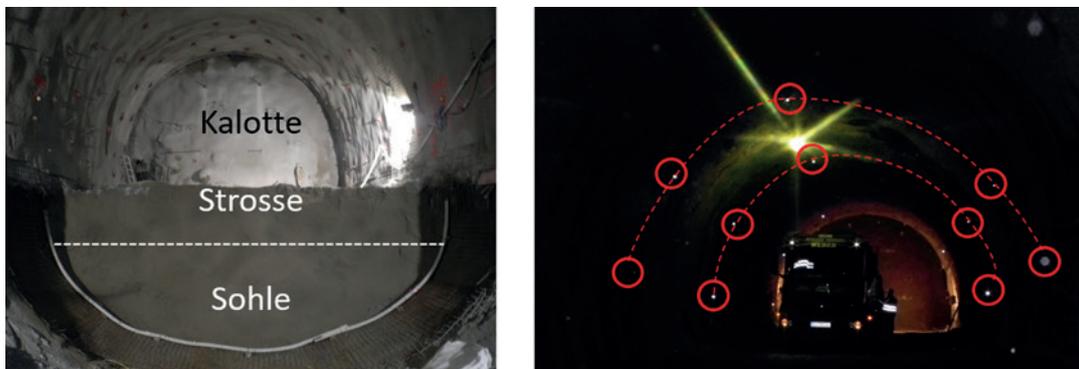


Abb. 3 | Zweistufiger Ausbruch (links), Messprofile mit Bireflex-Targets in der Kalotte (rechts)



Abb. 4 | Konzept von verteilter faseroptischer Dehnungsmessung im Tunnelbau (links), Montage von Sensorkabel (Mitte), Spritzvorgang (rechts)

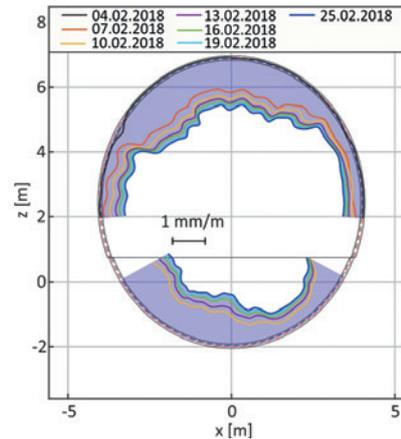
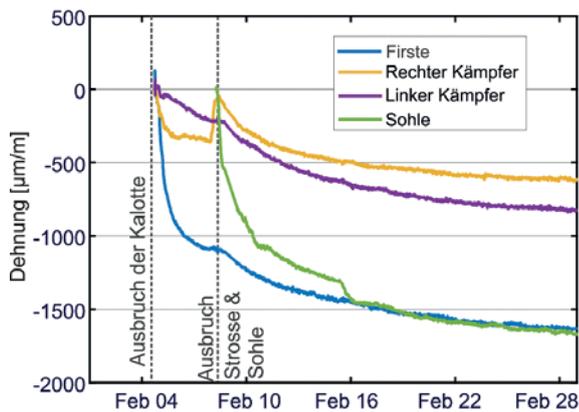


Abb. 5 | Zeitlicher Verlauf der Dehnungen von vier ausgewählten Bereichen (links), Dehnungsverteilung zu unterschiedlichen Zeitpunkten (rechts)

kabels numerisch temperaturkompensiert. Die temperaturkompensierten Brillouin-Verschiebungen wurden mit Kalibrierfunktionen, welche vorab im Messlabor auf der faseroptischen Kalibrieranlage (/Wochitz 2012/) bestimmt worden sind, in Dehnungen umgerechnet.

Beispielhaft zeigt *Abb. 5* links den aufgezeichneten Dehnungsverlauf, beginnend mit dem Ausbruch, über einen Zeitraum von 24 Tagen. Erkennbar ist, dass zu Beginn negative Dehnungen auftreten, welche sich stabilisieren. Sobald die Strosse und Sohle ausgebrochen werden, kommt es im Firste erneut zu einer Zunahme der negativen Dehnungen. Am rechten Kämpfer tritt zunächst eine Entspannung auf, d. h. eine positive Dehnungsänderung, gefolgt von erneuter Verkürzung. Während der folgenden 10 Tage verlangsamten sich die Dehnungsänderungen mit Ausnahmen der Sohle, in welcher es erneut zu erhöhten Dehnungsänderungen kommt, sobald die Strosse/Sohle weiter aufgeföhren wird. Aufgrund der nahezu lückenlosen Messung kann auch die Dehnungsverteilung entlang des Querschnitts beurteilt werden, siehe *Abb. 5* rechts. Neben den verteilten Dehnungsmessungen können überdies auch viele Informationen zum Bauablauf aus den Temperaturdaten abgeleitet werden, siehe /Buchmayer et al. 2021/.

In der vorliegenden Installation wurden faseroptische Sensor-kabel in die äußere und innere Spritzbetonlage der Außenschale eingebettet. Aus den differentiellen Dehnungen können die Krümmungsänderungen für jede Position im Querschnitt bestimmt und in weiterer Folge durch Doppelintegration die Formänderung abgeleitet werden. Dieser Ansatz wird in /Monsberger & Lienhart 2021a/ im Detail erläutert und analysiert.

2.2 Maschinelles Vortrieb

Faseroptische Sensoren können ebenso im maschinellen Tunnelvortrieb eingesetzt werden. In diesem Fall erfolgt der Einbau der Sensorkabel bereits im Tübbingwerk, wo die Kabel unter kontrollierten Bedingungen am Armierungskorb befestigt werden können. Eine mögliche mäanderförmige Linienführung, welche einen großen Bereich des Tübbings abdeckt, zeigt *Abb. 6* rechts. Der restliche Herstellungsprozess ist identisch zu Tübbing ohne Sensorkabel. Im Gegensatz zu konventionell eingesetzten Sensoren, z. B. Schwingsaitensensoren, können mit hochauflösenden

faseroptischen Dehnungsmessungen mehrere tausend Messstellen mit einem einzelnen Kabel realisiert werden. Dadurch wird der Informationsgehalt massiv erhöht und lokale Defekte können identifiziert und lokalisiert werden. Zum Nachweis der Tauglichkeit des Messansatzes wurden zahlreiche Versuche am Tübbingprüfstand der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Auf diesem Prüfstand können ein-axiale Lastsituationen in horizontaler und vertikaler Richtung sowie auch bi-axiale Belastungen umgesetzt werden. Zur Verifikation steht eine Vielzahl von Messverfahren, wie Seilzugsensoren, Wegaufnehmer, Kamera-basierte Verfahren oder auch Laserscanning-Aufnahmen, zur Verfügung (/Gehwolf et al. 2016/).

In *Abb. 7* ist der Dehnungsverlauf eines vertikalen Belastungstests gezeigt. Diese Messdaten wurden mit dem hochauflösenden DSS-System LUNA OBR 4600 aufgenommen. Die Messungen zeigen, wie zu erwarten, positive Dehnungen entlang der inneren Bewehrungslage (unten) und negative Dehnungen entlang der äußeren Bewehrungslage (oben). Erkennbar ist, dass im zentralen Bereich des Tübbings Dehnungsspitzen auftreten. Diese Dehnungsspitzen zeigen die Lage von Rissen. Durch die lückenlose hochauflösende Messung mit einer räumlichen Auflösung von besser als 1 cm kann der Ort und der Zeitpunkt des Auftretens von Rissen eindeutig identifiziert werden.

Die vorgestellte Messmethode wurde nicht nur am Tübbingprüfstand umgesetzt, sondern auch im realen Tunnelvortrieb /Moritz et al. 2021/. In diesem Fall kann das Instrument bereits, bevor die Tunnelvortriebsmaschine (TVM) den Messquerschnitt erreicht, hinter dem Nachläufer der TVM installiert werden und ein Zuleitungskabel bis in den Schildbereich der TVM verlegt werden. Dadurch müssen nach dem Setzen der Tübbinge lediglich die einzelnen Tübbinge miteinander verbunden und das Zuleitungskabel angeschlossen werden, um das verteilte Monitoring starten zu können. Wie im konventionellen Vortrieb liegt der Vorteil der faseroptischen Messungen darin, dass das Deformationsverhalten entlang des gesamten Rings erfasst werden kann. Als Beispiel ist die Dehnungsverteilung eines kompletten Tübbingrings nach 35 Tagen in *Abb. 8* gezeigt. Wie zu erwarten, treten vor allem negative Dehnungen auf. Ausnahme ist der untere Teil des Rings, in welchem auch positive Dehnungen sichtbar sind.

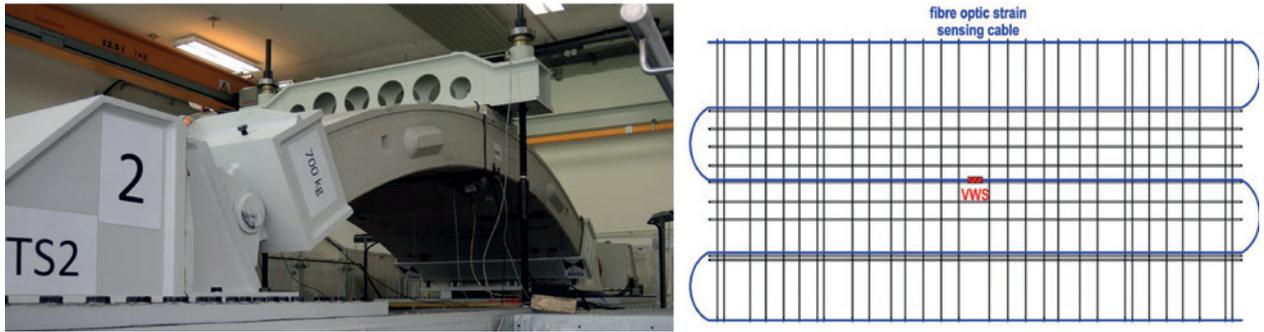


Abb. 6 | Tübbingprüfstand an der Montanuniversität Leoben (links), möglicher Kabelverlauf (blau) in einem Tübbing mit Schwingsaitensensor (rot) zur Verifikation (rechts)

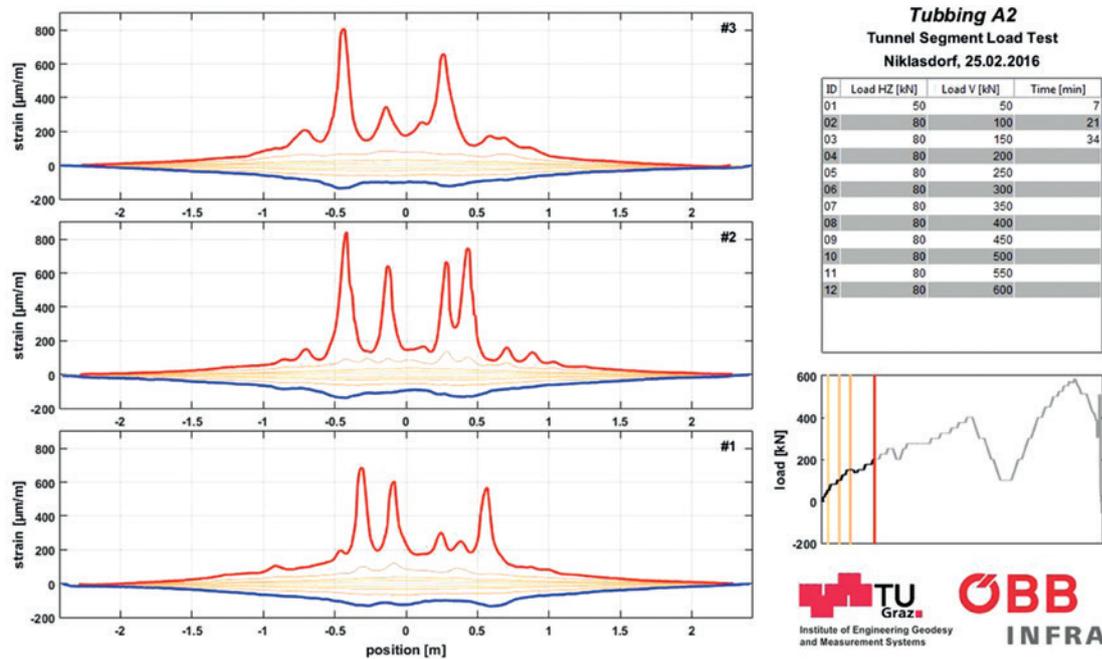


Abb. 7 | Dehnungsprofile entlang der inneren (rot) und der äußeren Bewehrungslage (blau) für drei Messlinien bei einem vertikalen Belastungstest

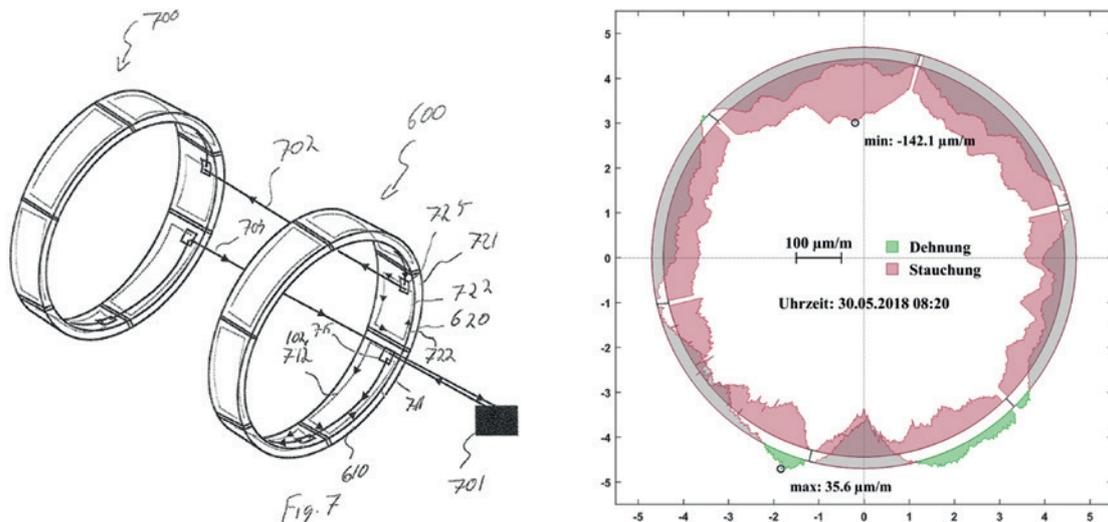
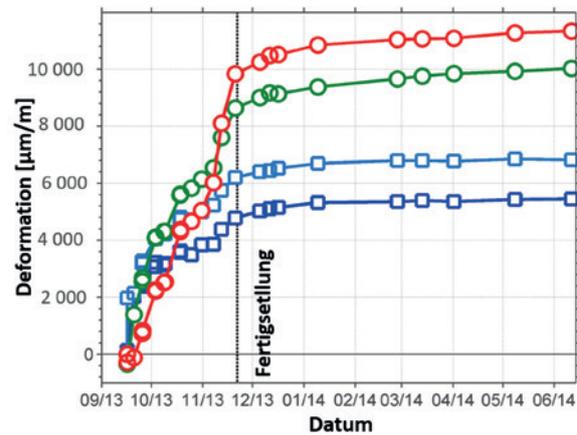


Abb. 8 | Konzept der faseroptischen Messung von Tübbingringen nach /Lienhart & Galler 2014/ (links), gemessene Dehnungen in der äußeren und inneren Bewehrungslage 35 Tage nach dem Setzen des Rings (rechts)



Abb. 9 | Kombinierte geodätische und faseroptische Überwachung einer BEK (links), Dehnungsverlauf in den ersten Monaten von vier Bereichen in Ebene 2 von Profil 2 (rechts)



3 ERDDAMM-MONITORING

Verteilte faseroptische Messungen werden ebenso zur Überwachung von Erdstrukturen eingesetzt. Hier ist auf eine kraftschlüssige Verbindung von Faser und Bauwerk zu achten. Im Falle von Bewehrte-Erde-Konstruktionen (BEK) können faseroptische Sensorkabel entweder direkt in die eingesetzten Dehnungsgitter integriert oder punktuell mit diesen verbunden werden. Die faseroptischen Messungen ermöglichen es, einen Blick in das Innere der Struktur zu werfen, wobei jedoch zu beachten ist, dass mit diesen internen Messungen nur Verformungen, aber keine Starrkörperbewegungen erfasst werden können. Um ein vollständiges Deformationsbild zu erhalten, ist eine Kombination von geodätischen und faseroptischen Messverfahren am besten geeignet. Dieser Ansatz wurde beim Monitoringkonzept der Dammkonstruktion in der Deponie Longsgraben beim Semmering-Basistunnel umgesetzt. Aus geodätischen Messungen zu Prismen an der Dammoberfläche wurden Verschiebungen und Neigungsänderungen abgeleitet, während der Auslastungsgrad der Geogitter mit den internen faseroptischen Dehnungsmessungen bestimmt wurde /Moser et al. 2016/. Abb. 9 zeigt das Konzept und den internen Dehnungsverlauf von der zweiten Ebene von Profil 2 während der ersten acht Monate. Erkennbar ist, dass es während der Bauphase durch das Aufschütten des Damms zu einer Dehnungszunahme gekommen ist, welche nach der Dammfertigstellung langsam abgeklungen ist.

4 LECKAGEORTUNG

Die bisher diskutierten Anwendungen konzentrierten sich auf die verteilte faseroptische Dehnungsmessung zur Detektion von Dehnungsereignissen. Wie bereits ausgeführt, können verteilte faseroptische Messungen auch zur Temperaturüberwachung eingesetzt werden. Eine mögliche Anwendung ist hier die Branddetektion und -Lokalisation von Brandherden in Tunnelbauten. Ein anderes Einsatzgebiet ist die Leckagedetektion von unter Druck stehenden Transportleitungen für Gas, Fernwärme oder Öl. Der Vorteil bei dieser Anwendung ist, dass in

vielen Fällen für die innerbetriebliche Kommunikation bereits LWL parallel zu den Pipelines verlegt sind. Abb. 10 zeigt ein Beispiel eines kontrollierten Leckageversuchs. In diesem Fall wurde ein Kommunikationskabel, welches parallel zu einer Fernwärmeleitung verläuft, lokal heißem Wasser ausgesetzt. In diesem Kommunikationskabel wurden mehrere Dark Fibers für Messungen genutzt. Einerseits wurde ein Raman-Messinstrument von AP Sensing eingesetzt, welches nur auf Temperaturänderungen sensitiv ist. Simultan wurden zwei weitere Dark Fibers zu einer Schleife verbunden und mit einem BOFDA-Instrument von fibrisTerre Brillouinfrequenzen aufgezeichnet. Wie bereits in Abb. 1 gezeigt, ist die Brillouinrückstreuung sowohl temperatur- als auch dehnungssensitiv. Da man in diesen Fall davon ausgehen kann, dass sämtliche Änderungen auf Temperaturänderungen zurückzuführen sind, können die Brillouinmessungen auch zur Leckageortung eingesetzt werden. Die Ergebnisse der Raman- und Brillouinmessungen lieferten ähnliche Temperaturverläufe und als Beispiel ist in Abb. 10 der Temperaturverlauf an vier Positionen des LWL-Kabels über einen Zeitraum von mehr als 12 Stunden gezeigt. An den drei Positionen 100 m, 500 m und 2000 m ist keine signifikante Temperaturänderung ersichtlich. Das Messrauschen ist unter 0,5 K. An Position 800 m hingegen ist um 06:00 ein signifikanter Temperaturanstieg erkennbar, welcher langsam über die Zeit wieder abklingt. Dieser Zeitpunkt repräsentiert das Einbringen des heißen Wassers und kann eindeutig im Temperatursignal identifiziert werden.

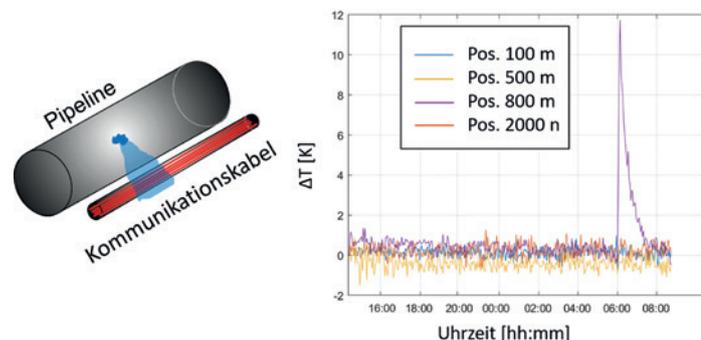


Abb. 10 | Kommunikationskabel parallel zu Pipeline mit Leckage (links), gemessene Temperaturänderung an verschiedenen Faserpositionen (rechts)

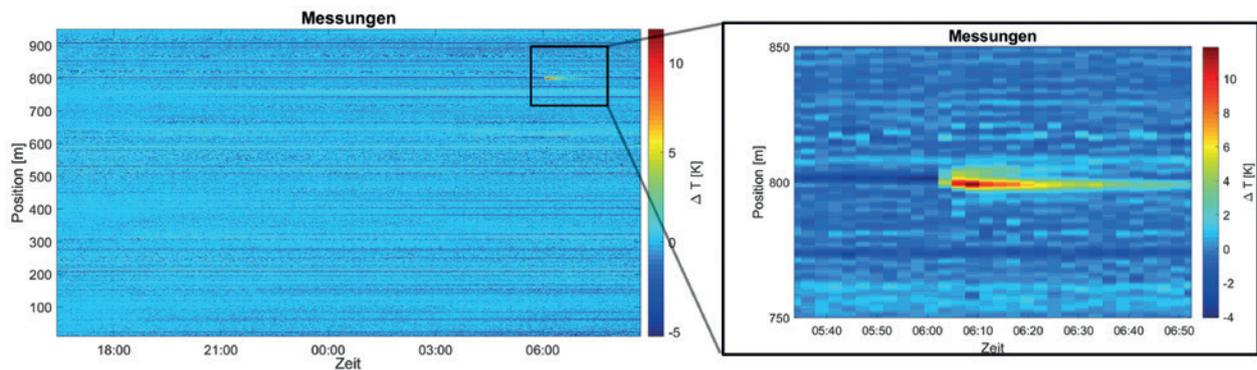


Abb. 11 | Wasserfallplot der Temperaturvariation über den Ort und die Zeit

Der wesentliche Vorteil der verteilten faseroptischen Temperaturmessung ist, dass die (hier simulierte) Leckage nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich lokalisiert werden kann. Zur Visualisierung bieten sich sogenannte Wasserfalldiagramme an. In *Abb. 11* sind sämtliche Messungen relativ zur Nullmessung dargestellt. Der örtliche Bereich beschränkt sich in diesem Fall auf eine Länge von bis zu 970 m. Die Leckagesimulation ist deutlich um 06:00 und bei 800 m festzustellen. Sonstige geringe Temperaturänderungen lassen auf Kabelziehschächte und sonstige Stellen schließen, an denen das LWL-Kabel frei verläuft und somit nicht im Erdbereich liegt.

5 EREIGNISORTUNG

Wasserfallplots sind auch eine übliche Art der Darstellung bei verteilten akustischen Messungen (DAS). DAS-Messungen erfassen sämtliche Ereignisse, welche Luftschall oder Vibrationen verursachen. Eine gängige Anwendung von DAS ist dabei die Zuglaufverfolgung, bei welcher Kommunikationsleitungen in Kabeltrögen neben Eisenbahnstrecken benutzt werden, um Zugposition, Zuggeschwindigkeit und Zugvollständigkeit zu bestimmen. Es konnte auch bereits gezeigt werden, dass eine Zustandsbeurteilung von Zügen mittels DAS möglich ist und mittels der aufgenommenen Vibrationssignale z. B. Flachstellen von Rädern identifiziert werden können (Lienhart et al. 2016). Zu beachten ist, dass DAS-Messungen dynamischen Impact benötigen, um Signale zu erfassen.

Konkret auf den Anwendungsfall bezogen bedeutet dies, dass sich bewegende Züge in einem Wasserfallplot sichtbar sind, während stehende Züge aufgrund des fehlenden dynamischen Eintrags nicht detektiert werden können.

Herausfordernd ist bei DAS-Messungen die große Datenmenge, da mehrere zehntausend Messpunkte mit Messfrequenzen im kHz-Bereich erfasst werden. Da ein dauerhaftes Aufzeichnen von so großen Datenmengen (teilweise mehrere Gigabyte pro Minute) nicht möglich ist, ist eine Echtzeitauswertung unumgänglich. Ein Beispiel der Ereignisse, welche entlang eines bodenverlegten LWL innerhalb von 30 Minuten auftreten können, ist in *Abb. 12* gezeigt. Für die Betrachtung wurde ein 600 m langer Abschnitt einer mehr als 12 km langen Messstrecke herangezogen. Bereits innerhalb dieses kurzen Ausschnitts sind zahlreiche Aktivitäten erkennbar. Manche Ereignisse verändern ihren Ort über die Zeit (durchgezogene Linien), während manche stationär bleiben (horizontale strichlierte Linien). Aus der Steilheit der Linien kann auf die Geschwindigkeit rückgeschlossen werden. Je steiler die Linie, desto schneller die Bewegung. Der vorbeifahrende Güterzug ist z. B. wesentlich schneller als der sich nähernde Radbagger. Im Fall des Kettenbaggers sind auch die Vibrationen verursacht durch den Leerlauf erkennbar. Neben den Fahrbewegungen zeichnen sich weitere Aktivitäten wie Baggern als klare Muster im Wasserfalldiagramm ab. Zur automatisierten Klassifikation und Identifikation der Aktivitäten können unter anderem Verfahren des maschinellen Lernens eingesetzt werden.

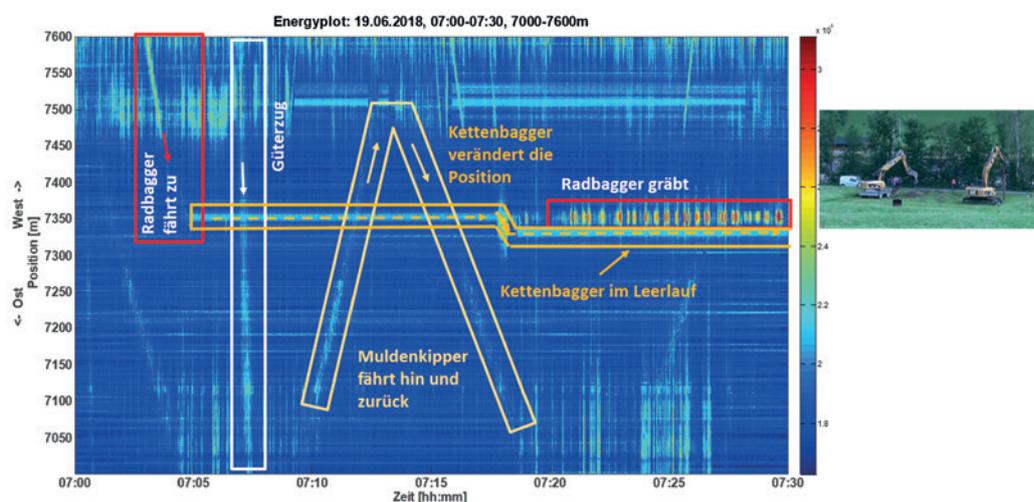


Abb. 12 | Wasserfallplot der Signalintensität von DAS mit verschiedenen Ereignissen

ZUSAMMENFASSUNG

Die gezeigten Anwendungen demonstrieren, dass verteilte faseroptische Messungen einen hohen Reifegrad erreicht haben und zur automatisierten Detektion, Lokalisation, Identifikation und Quantifikation von Deformationsereignissen eingesetzt werden können. Die Detektion ist aufgrund der lückenlosen Natur von DFOS-Messungen einfach zu realisieren. Für die richtige geographische Lokalisation ist zu beachten, dass DFOS-Messungen Daten in Abhängigkeit der Faserlänge liefern. Die Faserlänge ist aufgrund von Überlängen auf Spulen in Patch-Schächten meist nicht identisch mit der Länge der gewünschten Messstrecke. Eine genaue Georeferenzierung ist daher Voraussetzung für jede DFOS-Anwendung. Für die Identifikation von Ereignissen, z. B. Dehnungsspitzen als Anzeichen für Risse, können parametrische Beschreibungen oder maschinelles Lernen eingesetzt werden. Wenn die Ereignisse auch quantifiziert werden sollen, muss berücksichtigt werden, dass DFOS-Messungen auf die Erfassung von Rückstrahleffekten von eingekoppeltem Licht beruhen. Somit ist das rohe Messsignal Intensität, Wellenlänge, Frequenz oder Phase. Aus diesen Rohwerten müssen die gesuchten Größen, wie Temperatur und Dehnung, erst abgeleitet werden, wozu entsprechende Sensorkennlinien benötigt werden. In vielen Fällen sind diese durch entsprechende Kalibriermessungen unter kontrollierten Bedingungen gesondert zu bestimmen. Ebenso ein großer Vorteil ist, dass ungenutzte Fasern in vorhandenen LWL benutzt werden können und somit der Installationsaufwand des Sensors entfällt.

Zusammenfassend können DFOS-Messungen als sinnvolle Erweiterung des geodätischen Messportfolios gesehen werden. DFOS ermöglicht das Erfassen von Bereichen, welche mit geodätischen Messverfahren nicht erreicht werden können.

LITERATUR

- AP Sensing (2015): Linear Pro Series N4426A High Performance Singlemode. Data Sheet 2014.06.05. Ed. 05.2015.04.22.
- Buchmayer, F.; Monsberger, C. M.; Lienhart, W. (2021): Advantages of tunnel monitoring using distributed fibre optic sensing. In: *Journal of Appl. Geodesy* 15(2021)1, 1–12.
- Döring, H.; Habel, W.; Lienhart, W.; Schwarz, W. (2016): Faseroptische Messverfahren. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie, Band Ingenieur-geodäsie*. Springer, Berlin, 235–282.
- Febus (2019): Febus A1-R. Datasheet.
- fibrisTerre (2019): fTB 5020 Fiber-optic sensing system for distributed strain and temperature monitoring. Data Sheet.
- Gehwolf, P.; Monsberger, C.; Barwart, S.; Wenighofer, R.; Galler, R.; Lienhart, W.; Haberler-Weber, M.; Moritz, B.; Barwart, C.; Lange, A. (2016): Deformationsmessungen an Tübbingungen mit einem neu entwickelten Prüfstand. In: *Geomechanik und Tunnelbau* 9(2016)3, 180–187.
- Hartog, A. (2017): *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*; CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA.
- Lienhart, W.; Galler, R. (2014): Tübbingelement mit Dehnungsmessung. Patent AT516158 (B1).

Lienhart, W.; Wiesmeyr, C.; Wagner, R.; Klug, F.; Litzenberger, M.; Maicz, D. (2016): Condition monitoring of railway tracks and vehicles using fibre optic sensing techniques. *Proc. International Conference on Smart Infrastructure and Construction (ICSIC)*, Cambridge, ICE Publishing, 45–50.

Luna Technologies (2019): OBR 4600 Optical Backscatter Reflectometer. Datasheet. REV.2 02.15.19.

Monsberger, C. M.; Lienhart, W. (2021a): Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: Methodology, field applications, and monitoring results. In: *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 11(2021)2, 337–350. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00455-8>.

Monsberger, C. M.; Lienhart, W. (2021b): Distributed Fiber Optic Shape Sensing of Concrete Structures. In: *Sensors* 21(2021)18, 6098. <https://doi.org/10.3390/s21186098>.

Monsberger, C. M.; Lienhart, W.; Hayden, M. (2020): Distributed fiber optic sensing along driven ductile piles: Design, sensor installation and monitoring benefits. In: *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 10(2020)4, 627–637.

Moritz, B.; Heissenberger, R.; Schachinger, T.; Lienhart, W. (2021): Langzeitüberwachung von Eisenbahntunneln. In *Geomechanik und Tunnelbau* 14(2021)1, 35–46.

Moser, F.; Lienhart, W.; Woschitz, H.; Schuller, H. (2016): Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing. In *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 6(2016)3, 321–327.

Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (2014): *Geotechnical Monitoring in Conventional Tunneling*. ÖGG.

Woschitz, H (2012): Faseroptische Erweiterung des geodätischen Messlabors der TU Graz. In: *Vermessung & Geoinformation* 100(2012)3, 353–364.

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Werner Lienhart

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ – PROFESSUR
FÜR INGENIEURGEODÄSIE UND MESSSYSTEME

Steyrergasse 30 | 8010 Graz
werner.lienhart@tugraz.at



Dipl.-Ing. Christoph M. Monsberger

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ
& ACI MONITORING GMBH

christoph.monsberger@tugraz.at
christoph.monsberger@aci-monitoring.at



Dipl.-Ing. Fabian Buchmayer

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ
& ACI MONITORING GMBH

fabian.buchmayer@tugraz.at
fabian.buchmayer@aci-monitoring.at



Manuskript eingereicht: 31.07.2021 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet