

Schweben- und Schachtüberwachungen mit verteilten-faseroptischen Sensoren in Bergwerken

Eike BARNEFSKE¹ (0000-0003-3180-3626), Rainer WEIßMANN¹, Patrick LEHN¹, Mike LIESKE¹ & Volker BUSSE¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, eike.barnfske@bge.de (corresponding Author)

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-002](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-002), CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

1 Einleitung

Faseroptische Sensoren (FOS) erweitern seit ca. 25 Jahren das Spektrum der geodätischen und geotechnischen Sensoren. In den ersten Anwendungen wurden meist Sensoren eingesetzt, die eine Dehnungs- oder Temperaturänderung an einem „Punkt“ (Bereich von ca. 1 cm) messen (SAMIEC 2011). Die zentralen Vorteile von FOS gegenüber elektronischen Sensoren sind, dass die Sensoren in Reihe geschaltet werden können und dass sie immun gegen elektromagnetische Einflüsse sind (MONSBERGER ET. AL. 2022). Heute werden meist verteilte FOS (VFOS) bei der Bauwerksüberwachung eingesetzt. Hierbei kann die ganze Glasfaser als sensitives Element verwendet werden. VFOS sind bei geotechnischen Anwendungen in Bergwerken von Interesse, da die dünnen und langlebigen Faserkabel zusätzlich zu anderer Sensorik in Bohrungen an der Kontur des Gebirges mit geringem Mehraufwand installiert werden können. Mit VFOS-Kabeln können Dehnungen bzw. Stauchungen und zusätzlich Temperaturänderungen mit einer örtlichen Auflösung von 1 cm bis 50 cm entlang des Kabels gemessen werden, was zu einem signifikant gestiegenen Informationsgewinn über das meist heterogene Gestein führt (CHENG ET. AL. 2015). Die faseroptischen Sensoren erweitern somit das Feld der geotechnischen Messungen insbesondere für Verschiebungs- bzw. Dehnungsmessungen, die klassisch hauptsächlich über Konvergenzmessungen (im Hohlraum) oder mit Extensometer- bzw. Inklinometermessungen (im Gebirge) umgesetzt werden.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) erprobt seit ca. drei Jahren den Einsatz von verschiedenen VFOS-Verfahren und Kabeln für die Schachtüberwachung, die Überwachung von relevanten untertägigen Bereichen und Bauwerken, wie z. B. Schweben, Verschlussbauwerken und Ausbausicherungen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das zu überwachende Objekt bereits im Bestand ist und nur minimale Eingriffe, wie Bohrungen und Slitze, möglich sind.

Prinzipiell werden geotechnische und geodätische Messungen in den Endlagerbergwerken während der Errichtungs- und Betriebsphase zur Überwachung der Standsicherheit und der Arbeitssicherheit eingesetzt. Darüber hinaus dienen sie zur Überwachung des mechanischen Verhaltens des Gebirges, um einen Abgleich zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Gebirgsverhalten ableiten zu können. Beim Einsatz numerischer Modelle können die Messergebnisse zur Parameterkalibrierung sowie zur Verifikation des Modells verwendet werden.

In diesem Beitrag wird über die Planung, die Installation, die Durchführung und die Bewertungsansätze einer Schwebenüberwachung berichtet. Ferner wird über die Konzepte und die ersten Versuche zur Schachtüberwachung mit VFOS berichtet.

2 Verteilte-faseroptische Sensoren

Das Prinzip der verteilten-faseroptischen Messung basiert auf dem Effekt, dass Licht, das in einen Faserkern interrogiert wird, mit dem umgebenden Mantel und Störungen im Glas interagiert und (Rück-)Reflektionen entstehen. Diese unvermeidbare Reflektion verändert sich, wenn die Faser mechanisch gestaucht bzw. gedehnt wird oder eine Temperaturänderung erfährt. Drei unterschiedliche Streulichtphänomene, die jeweils nach ihren Entdeckern Rayleigh, Raman und Brillouin benannt sind, können für verteilte-faseroptische Temperatur-, Dehnungs- und Schwingungsmessung verwendet werden (LIENHART ET. AL. 2021, SAMIEC 2011). Für geodätische und geotechnische Anwendungen werden die Temperatur- und Dehnungsmessung angewendet. Bei jeder VFOS-Messung wird ein Aufbau aus Interrogator, Faserkabel und Befestigung des Faserkabels mit dem zu überwachenden Objekt benötigt. Optional können im Messaufbau Zuleitungen und optische Weichen installiert werden (Abb. 1).

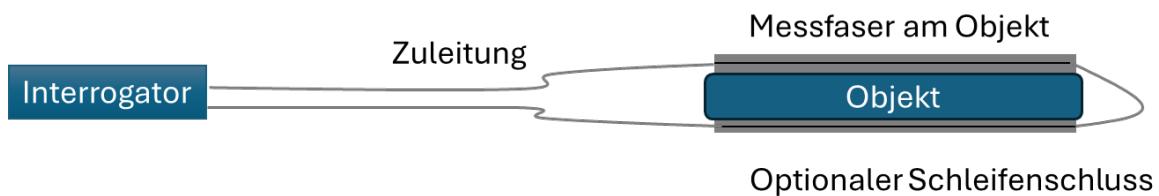


Abb. 1: Komponenten für einen VFOS. Bestehend aus Interrogator (Send-, Empfang- und Auswerteeinheit), Zuleitungen zum Messobjekt und kraftschlüssig installierte Messfaser.

Genaue Temperaturmessungen werden mit speziellen Raman-Interrogatoren durchgeführt, die nur Effekte messen, die aufgrund von Temperaturänderungen auftreten. Mit Rayleigh- und Brillouin-Interrogatoren werden mechanische und temperaturbedingte Änderungen gemeinsam gemessen, sodass eine Trennung der Einflüsse im Nachhinein erfolgen muss. Typische Methoden für diese Trennung sind das Messen mit einer am Objekt gekoppelten und einer entkoppelten Faser oder einer mathematischen Korrektur der Dehnungswerte mit einer externen Temperaturmessung. Rayleigh- und Brillouin-Interrogatoren unterscheiden sich im praktischen Einsatz in vier Punkten (DÖRING ET. AL. 2016, HARTOG 2017, NÖTHER 2010):

- Der Notwendigkeit einer Schleife für präzise Messungen
- Der maximalen Reichweite
- Der minimalen Auflösung
- Der Dauer einer Messung

Am Markt verfügbare Rayleigh-Interrogatoren können ohne eine Kabelschleife hochgenaue Messwerte mit einer typischen Auflösung von kleiner 1 cm und eine Reichweite von ca. 70 m liefern. Brillouin-Interrogatoren ermöglichen eine längere Reichweite von mehr als 100 km, die Messungen dauern jedoch länger und werden i.d.R. nur mit einer örtlichen Auflösung von

50 cm durchgeführt (LIENHART ET. AL. 2021). Für genaueres Messen muss das Prinzip der stimulierten Brillouinstreuung angewendet werden, sodass eine Schleifenanordnung des Faserkabels obligatorisch ist (FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH 2020).

3 Schwebenüberwachungsmessungen

3.1 Planung, Installation und Messungen

Aufgrund von anstehenden bergbaulichen Arbeiten wird eine bestehende Strecke im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben künftig verstärkt genutzt. In einer Schweben unterhalb dieser Strecke wurde durch Radarmessungen ein linienförmiger Reflektor festgestellt. Dieser Reflektor wurde durch eine senkrechte Bohrung mit anschließender Videoendoskopie als ungefähr horizontal verlaufender Riss bestätigt. Zur Bewertung der Arbeitssicherheit wurde die Bohrung anschließend messtechnisch mit einem Mehrfach-Extensometer, sowie zwei VFOS-Kabel ausgestattet und kraftschlüssig verfüllt.

Aufgrund der geringen Streckenhöhe, welche nur ca. der Hälfte der Bohrlochlänge entspricht, konnte kein übliches Stangenextensometer genutzt werden. Die Sensorik musste über einen ausreichend großen zulässigen Biegeradius verfügen. Daher wurde ein flexibler magnetostriktiver Sensor mit 12 Ankerpunkten sowie zwei flexible VFOS-Kabel verbaut.

Mithilfe des Extensometers wird die exakte Position und somit die Verschiebung über die Zeit der 12 Messpunkte kontinuierlich beobachtet. Die Messpunkte haben dabei jeweils einen Abstand von ca. 30 cm. Zusätzlich wird mithilfe der Faseroptik die Dehnungsänderung über die gesamte Faserlänge entlang des Extensometers beobachtet (siehe Abb. 2)



Abb. 2: Flexibles magnetostriktives Extensometer mit zwei Dehnungsfasern und Verfüllschlauch.

3.2 Auswertung und Bewertung

Änderungen in der Schweben können mit den VFOS nur relativ zu einer Nullepoche bestimmt werden. Im optimalen Fall ist die Schweben zum Zeitpunkt der Nullepoche intakt und Risse sind nicht vorhanden. Im vorliegenden Fall ist die Schweben schon vor dem Einbau des Faserkabels beschädigt und eine potenzielle weitere Schädigung soll durch die Überwachungsmessung

beobachtet werden. Durch die Auswertung sollen neue Risse bzw. Auflockerungszonen identifiziert sowie das Wachstum von bekannten Rissen quantifiziert werden. Das Auswertungskonzept für diese Fragestellungen sieht vor, dass Dehnungsänderungen zum Einbauzustand des Kabels bestimmt werden. Die Länge des Faserkabels ist bei allen Folgemessungen identisch, sodass die jeweiligen Epochendehnungen anhand der Faserpositionen den Nullepochendehnungen zugeordnet werden können. Eine Temperaturkorrektur ist aufgrund der nahezu konstanten Temperatur in der Schwebe nicht erforderlich. Die Dehnungsänderung ist in Abb. 3 (links) für ein Faserkabel dargestellt. Die Auswertung beginnt im festen Bereich der Schwebe bei etwa -1 m, da durch die Streckenauffahrung das Gebirge im oberen Bereich aufgelockert ist und hier Deformationen auftreten, die nicht bewertet werden sollen.

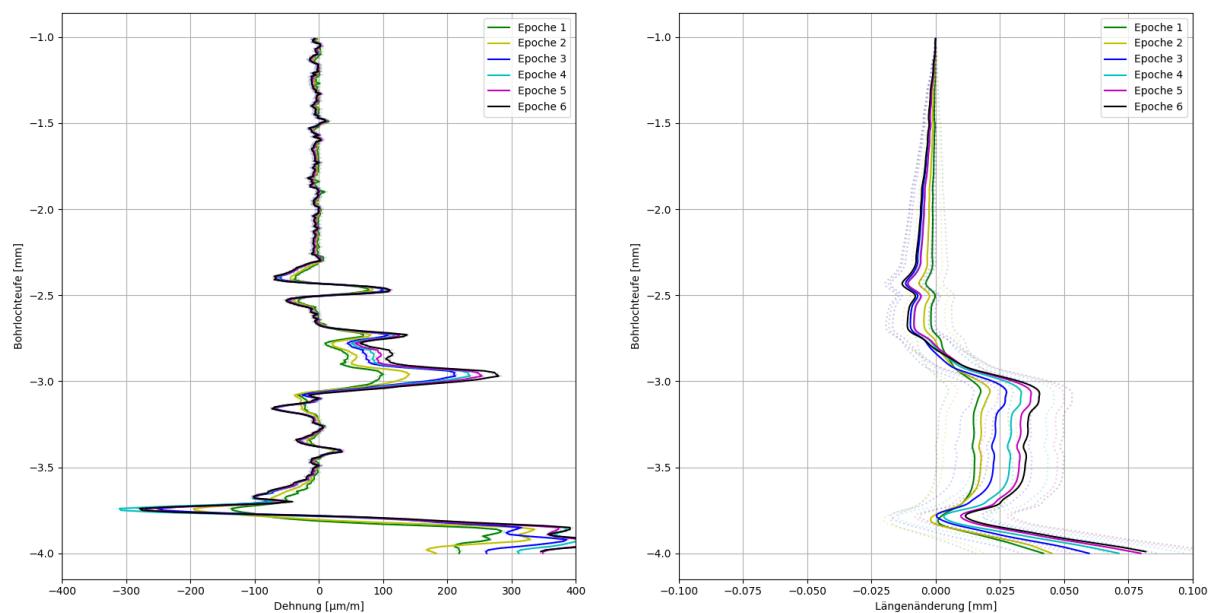


Abb. 3: VFOS in einer Schwebe zur Überwachung von möglichen Deformationen und Rissen. Dehnungen und Stauchungen entlang der Messstrecke (links). Längenänderungen entlang der Messstrecke (rechts). Gestrichelte Linie stellen die Unsicherheit der berechneten und gemessenen Werte dar.

In sechs Folgeepochen konnte festgestellt werden, dass der mittlere Schwebenbereich (-1 m bis ca. -2,5 m) keine signifikanten Dehnungen oder Stauchungen aufweist. Im unteren Bereich der Schwebe (-2,5 m bis -4 m) sind größere Stauchungen bzw. Dehnungen -300 μm bis 400 μm zu beobachten. Das typische Muster für Risse ist erkennbar, sodass mehrere Risse bzw. Auflockerungen in diesem Bereich zu erwarten sind. Diese Annahme deckt sich mit den Beobachtungen der Videoendoskopie. Um die Längenänderung der Schwebe zu bestimmen, kann über die Faserlängen integriert werden. Die Längung der Schwebe ist in Abb. 3 (rechts) dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die Schwebe im betrachteten Bereich um 0,075 mm länger geworden ist. Wird die Integration nur über eine Risszone durchgeführt, kann die Risslängenänderung bestimmt werden. Für den bestätigten Riss (bei ca. -3 m) kann eine Aufweitung von 0,02 mm/Jahr gemessen werden, was für die Schwebe als unkritisch zu bewerten ist.

4 Schachtüberwachungsmessungen

4.1 Konzepte und Zielgrößen

Die Schächte der BGE-Bergwerke sind mehrere Jahrzehnte in Betrieb und werden regelmäßig mit den jeweils aktuellen Methoden für die Schachtüberwachung vermessen, beobachtet und hinsichtlich der Standsicherheit bewertet. Die Methoden der Schachtüberwachung werden immer effizienter, genauer und zuverlässiger. Die bisherigen Methoden der Schachtüberwachungsmessungen sehen eine Lotung in Kombination mit Konvergenzmessungen und Nivellements vor. Für diese Vermessungsarbeiten sind die Schächte mehrere Wochen gesperrt und eine Drosselung der Bewetterung ist notwendig. Dieses wird zukünftig nicht mehr möglich sein, sodass eine Methode entwickelt werden muss, mit der Schachtneigungen, Längenänderungen und Verformungen von einzelnen Horizonten bestimmt werden können, ohne dass ein Messtrupp im Schacht arbeitet und Lote eingesetzt werden.

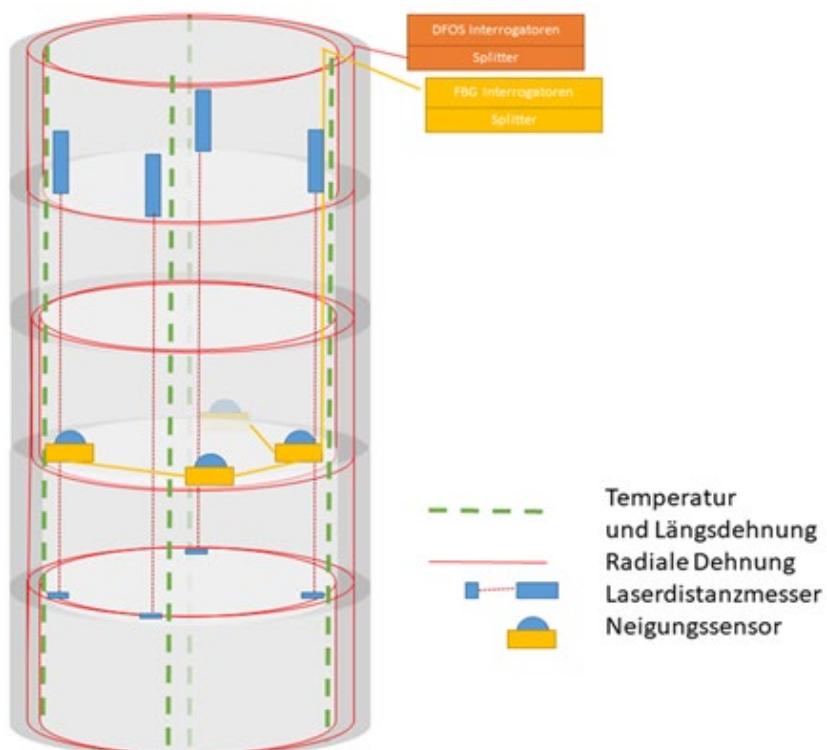


Abb. 4: Faserkabel (rot) für faseroptische Überwachungsmessung werden an der Schachtwand vertikal und in bestimmten Horizonten installiert. Die Faserkabel für Temperaturkorrektur (grün) verlaufen parallel zu den vertikalen Dehnungsmesskabeln. Mit Laserdistanzsensoren werden kurze vertikale Schachtabschnitte überwacht. Neigungen des Schachtes werden mit faseroptischen Inklinometern gemessen.

Das neue Messkonzept nutzt primär VFOS und wird durch Laserdistanzmessungen und Neigungsmessungen ergänzt. Grundlage für die Anwendung ist eine einmalige hochgenaue tachymetrische Vermessung des Schachtes inkl. der Einmessung des Faserkabels. Die Anordnung der Sensoren für das Messkonzept ist in Abb. 4 dargestellt.

Die horizontale Verformung von diskreten Schachthorizonten wird mit zwei parallelen Faserkabeln, die in einem Schlitz installiert sind, bestimmt. Die Teufenänderungen werden mittels der vier um 90° versetzten und vertikal im Schacht verlaufenden Faserkabel gemessen, nachdem die Messwerte höhenmäßig orientiert sind und eine Korrektur der temperaturabhängigen Dehnung erfolgte. Die vertikalen Faserkabel werden zudem für die Berechnung einer potenziellen Änderung der Schiefstellung verwendet. Zur Prüfung der Messgrößen und zur Verbesserung der Deformationsmodelle werden die Distanzmessungen, Neigungsmessungen und die Einmessung berücksichtigt.

4.2 Installation und Temperaturversuch

In einem Vorversuch sollte die Machbarkeit und Auswertung für parallel verlegte Faserkabel im Schachtquerschnitt nachgewiesen werden. Zur Installation der faseroptischen Messtechnik wurde die Schachtwand beraubt und die Faserkabel einbaugerecht konfektioniert. Zusätzlich wurden vor dem Einbau im Bereich der Messhorizonte Zielzeichen für eine Laserscanning-Vermessung (Ist-Formbestimmung der Schachtwand) unterhalb und oberhalb der geplanten Messhorizonte installiert. Die zwei Messhorizonte wurden mithilfe einer Mauernutfräse mit den Abmaßen von ca. 55 mm (Tiefe) und ca. 14 mm (Höhe) in die Schachtwand geschlitzt (Abb. 5).



Abb. 5: Geschlitztes Schachtmauerwerk (oben Messhorizont 1, unten Messhorizont 2).

Die Faserkabel wurden für den Einbau bereits im Labor vorbereitet. Die Vorbereitung umfasste das Zuschneiden der Faserkabel auf die Länge des Schachtumfangs mit zusätzlichen zwei Metern für die Zuleitung. Die Enden der Fasern wurden mit Steckern oder Terminalen versehen. Die Fasern wurden meterweise mit einer Markierung versehen (Stecker = 0 m). Eine Funktionsprüfung der Fasern wurde vor der Instrumentierung in der Schachtwand durchgeführt. Die installierten Faserkabel bestehen aus:

- Zwei Multi-Sensor-Kabel mit fester Geometrie (bestehend aus vier Fasern)
- Vier faseroptische Dehnungsmesskabel (bestehend aus einer Faser)
- Ein faseroptisches Temperaturmesskabel (bestehend aus mehreren entkoppelten Fasern)

Zur Sicherstellung eines parallelen Einbaus der einzelnen Faserkabel wurden Abstandshalter entwickelt, in welchen die Kabel befestigt wurden (Abb. 6). Die Abstandshalter wurden mittels

eines FDM-Druckers hergestellt. Bei der Installation in den Messhorizonten wurde der Verbundwerkstoff (Sika AnchorFix 3030) in den Schlitz eingebracht, die Abstandshalter samt Faserkabel hineingedrückt und der Schlitz vollständig mit dem Verbundwerkstoff verfüllt (siehe Abb. 7).

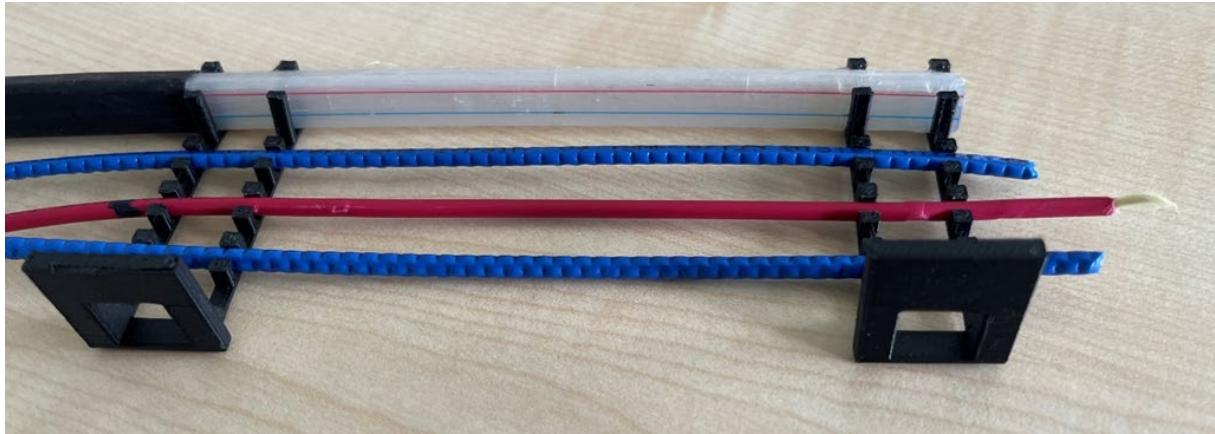


Abb. 6: Abstandhalter mit Faserkabel (v.o.n.u.: Multi-Sensor-Kabel, Dehnmesskabel, Temperaturmesskabel und Dehnmesskabel).

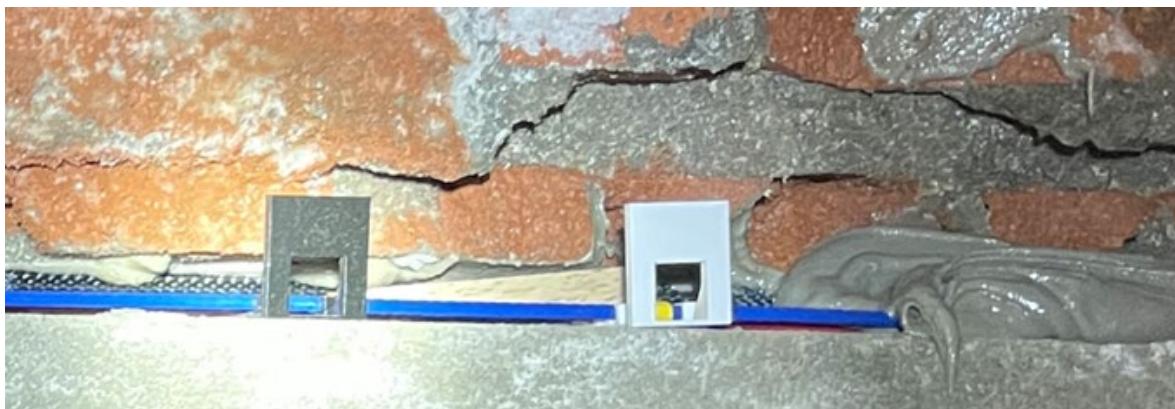


Abb.7: Messhorizont mit Abstandhalter, Faserkabel und Verbundwerkstoff.

Die erwarteten Deformationen im Schacht waren sehr gering. Aus diesem Grund wurde ein Erwärmungsversuch durchgeführt, um elastische Deformationen des Mauerwerks hervorzurufen und diese mit dem faseroptischen Messsystem zu erfassen. Dazu wurden drei elektrische Heizlüfter im Schachtbereich der Messhorizonte aufgestellt, um eine Erhöhung der Lufttemperatur von maximal 5°C zu ermöglichen. Die Lufttemperatur wurde im Versuchszeitraum gemessen. Vor Beginn des Temperaturversuchs wurde eine Bezugsmessung mit dem Optical Backscatter Reflectometer (OBR) an den Dehnungsfasern und mit einem Raman-Interrogator an der Temperaturfaser durchgeführt. Die Folgemessung am Ende der Erwärmungsphase wird in gleicher Weise, wie die Nullmessung bzw. Bezugsmessung mit der gleichen Hard- und Software durchgeführt. Somit stellt die Folgemessung die Veränderungen zur Nullmessung und Bezugsmessung dar, sodass eine elastische Deformation aufgrund der Temperaturänderung sichtbar wird.

4.3 Auswertungen und Zwischenergebnisse

Die Schachtüberwachungsmessungen werden in ähnlicher Art und Weise wie die Schwebenüberwachung ausgewertet. Auch hier wird eine Veränderung zu einer Nullmessung bestimmt, die lange Zeit nach der Auffahrung des Schachtes bzw. Grubenraumes liegt. Es werden somit nur geringe Dehnungen erwartet. Die Nullepoche ist der Zustand des Schachtmauerwerks nach der Installation der Faserkabel in beiden Messhorizonten. Anhand der Differenz zwischen der Nullmessung und den Folgemessungen FM1 bis FM6 können Dehnungsänderungen für jeden 1 cm-Abschnitt entlang der Messfaser bestimmt werden. Für die Messungen wird nur der sensitive Teil der Fasern ausgewertet, der eine Länge von etwa 12,5 m hat. In Abb. 8 ist die Dehnungsänderungen für die Epochen exemplarisch anhand eines monolithischen Faserkabels dargestellt. Die Dehnung wird mittels einer linearen Funktion und einem bekannten Faktor aus Frequenzänderungen berechnet. Die Dehnung wird als originäre Messgröße betrachtet und hat eine theoretische Messgenauigkeit von 5 $\mu\text{m}/\text{mm}$.

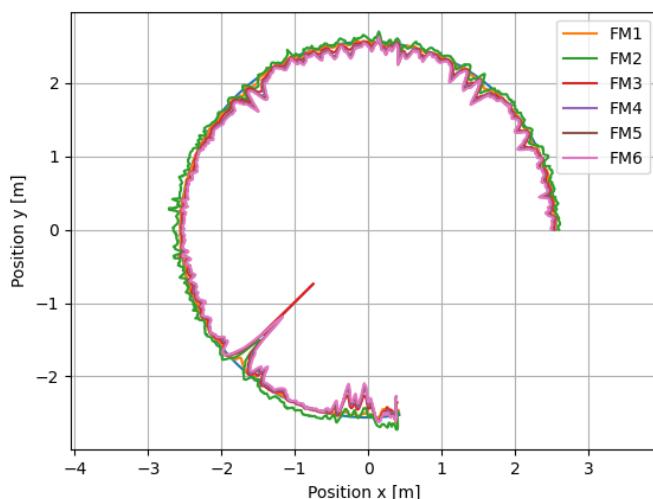


Abb. 8: Dehnungen und Stauchungen (überhöht) entlang des Schachtumfangs gemessen mit einem monolithischen Faserkabel. Ein vollständiger Ringschluss ist nicht möglich.

Aus der Dehnung kann durch eine einfache Integration über die gesamte Länge die Längenänderung bestimmt werden. Durch das Integrieren müssen für die Genauigkeitsberechnung der Längenänderungen die Genauigkeit der Segmentlängen und die der Dehnungsmessung berücksichtigt werden. Dies kann z. B. mittels einer Varianz-Fortpflanzung erfolgen. Analog zur Schwebenüberwachung können theoretisch Risse im Schachtbau überwacht werden. Im Mauerwerk des Schachtes wurden seit Beginn der Messung keine neuen oder wachsenden Risse mit dieser Methode erkannt. Eine visuelle Bewertung des Schachtmauerwerks ergab ebenfalls keine neuen Risse.

In der Theorie kann aus den VFOS die Verformung von einzelnen Schachthorizonten in Form einer Biegelinie dargestellt werden. Diese Zielgröße wurde bei der bisherigen Schachtüberwachungsmessung bestimmt und für die Bewertung der Schächte verwendet. Unterschiedliche Methoden und Ideen zur Bestimmung der Schachtverformung wurden in (BARNEFSKE ET. AL. 2025) diskutiert. Eine effektive Methode ist in der Arbeit von

(MONSBERGER & LIENHART 2021) beschrieben und wurde für die Versuchsdaten angewendet. Diese setzt voraus, dass Dehnungsmessungen mit zwei parallelen Fasern durchgeführt werden und daraus die Berechnung der Krümmung erfolgt. Das zweifache Integrieren der Krümmung führt zum Biegsungsverlauf, der gleich der Schachtverformung ist. Die Bestimmung des Biegeverlaufs kann nur durch eine doppelte Integration der Krümmung und mit Annahmen über den Verlauf bestimmt werden. Für fünf Epochen ist der bestimmte Biegeverlauf in Abb. 9 dargestellt. Dieser Verlauf ist abhängig von den Bedingungen am Start- und Endpunkt, die aktuell nur geschätzt werden.

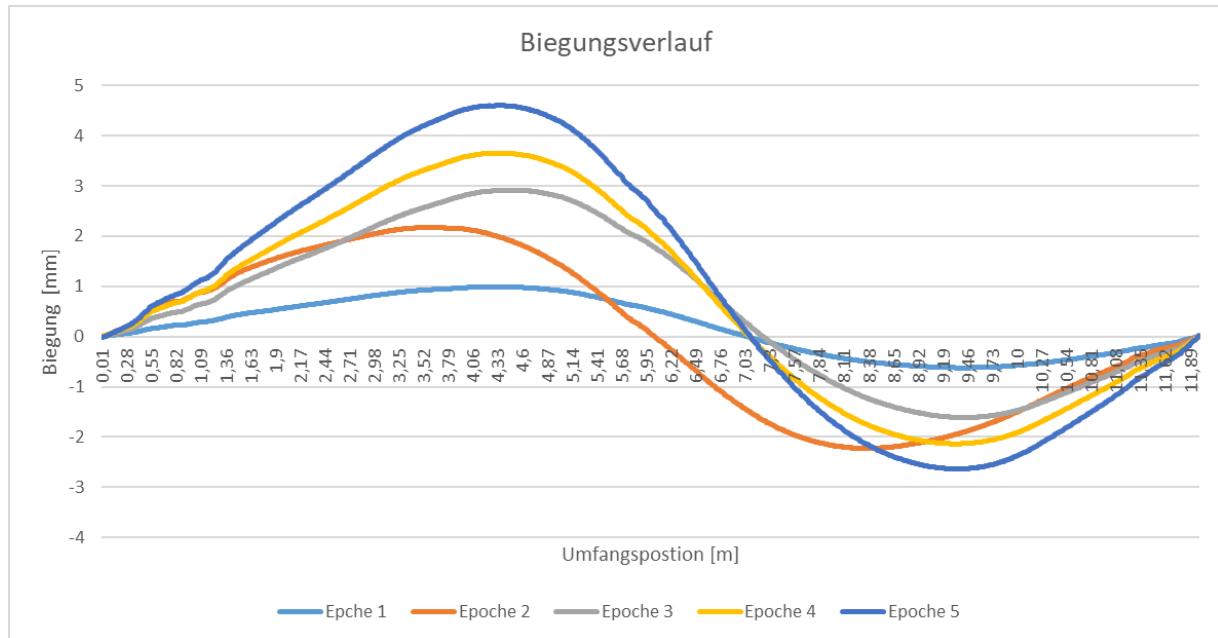


Abb. 9: Aus den VFOS-Messungen abgeleitete Biegung für jeden Ort entlang der Faser. Als zusätzliche Annahme gilt: Start- und Endpunkt sind unbeweglich.

Da die doppelte Integration ein hohes Maß an Unsicherheit mit sich bringt und die Annahmen über die Rahmenbedingungen in unserem praktischen Versuch nicht sicher bestimmt werden können, kann für die geringen Änderungen im Schacht mit den aktuellen Methoden kein verlässlicher Biegeverlauf berechnet werden. Um die VFOS als neues Werkzeug für die Schachtüberwachungsmessung anwenden zu können, werden der Messaufbau und die Auswertemethode in einem anstehenden Experiment weiter optimiert, sodass die Rahmenbedingungen bestimmt sind.

5 Fazit und Ausblick

Bisher werden VFOS zur Überwachung bestehender untertägiger Bauwerke bei der BGE eingesetzt. Bei der Installation von VFOS-Kabeln in einem Bohrloch gemeinsam mit einem Extensometer zur Überwachung einer Schwebekette können aufgrund der hohen Messauflösung entlang des Faserkabels sich öffnende Risse sicher erkannt und die zeitliche Rissentwicklung zwischen den einzelnen Messepochen überwacht werden. Die abgeleitete Rissöffnungsrate

beträgt hierbei ca. 0,02mm/Jahr. Da in diesem Grubenbereich ein sehr gleichförmiges Temperaturfeld besteht, sind hier temperaturinduzierte Einflüsse ausgeschlossen.

Die vergleichsweise große Flexibilität der Faserkabel und der geringe erforderliche Platzbedarf in Kombination mit der hohen Messauflösung für Dehnungen in Richtung des Faserkabels erweitern die Einsatzmöglichkeiten für Verformungsmessungen in der Geotechnik.

Der Vorversuch für Schachtüberwachungsmessungen hat gezeigt, dass es möglich ist, aus zwei parallel verlegten Faserkabeln mittels Rückrechnung die Krümmung abzuleiten und hieraus den Biegungsverlauf zu bestimmen. Im hier beschriebenen Versuch konnte kein vollständiger Ringschluss mit den Faserkabeln hergestellt werden, so dass für die mathematische Rückrechnung jeweils Annahmen zu treffen waren, die sich in der Genauigkeit des Ergebnisses zeigen. Aktuell laufen hierzu weitere Untersuchungen mit Instrumentierungen im vollständigen Ringschluss.

6 Literatur

- BARNEFSKE, E., SEMMELROTH, C., SCHEIDER, A., & STERNBERG, H. (2025): Determination of the coordinates of a circle using distributed fibre-optic length changes. in 6th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). <https://doi.org/10.5445/IR/1000180374>
- CHENG, G., SHI, B., ZHU, H.-H., ZHANG, C.-C., & WU, J.-H. (2015): A field study on distributed fiber optic deformation monitoring of overlying strata during coal mining. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(5):553–562
- DÖRING, H., HABEL, W., LIENHART, W. & SCHWARZ, W. (2016): Faseroptische Messverfahren, W. In Freeden, R. Rummel (Hrsg.), *Handbuch der Geodäsie, Springer Reference Naturwissenschaften*, https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_22-1
- FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH (2020): Distributed fiber-optic brillouin sensing: The ftb 5020 series: Technical documentation.
- HARTOG, A. (2017): An Introduction to distributed optical fibre sensors, CRC Press, Tylor & Francis Group, Boca Raton
- LIENHART, W., MONSBERGER, CH. & BUCHMAYER, F. (2021): Verteilte faseroptische Sensorik zur Detektion, Lokalisation, Identifikation und Quantifikation von Deformationsereignissen. In AVN, 128, 5, S. 248– 255.
- MONSBERGER, CH. & LIENHART, W. (2021): Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: Methodology, field applications, and monitoring results. In *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11:337–350, <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00455-8>
- MONSBERGER, CH, BAUER, P., BUCHMAYER, F., & LIENHART, W. (2022): Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(6): S. 1317–1327
- NÖTHER, N. (2010): Distributed fiber sensors in river embankments: Advancing and implementing the Brillouin optical frequency domain analysis: Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2010, Volume 64 of BAM-Dissertationsreihe. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
- SAMIEC, D. (2011): Verteile faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessungen mit sehr hoher Ortsauflösung. In Photonik 6/2011.