

Empirische Untersuchung der Separationsmöglichkeiten von mechanisch und thermisch induzierten Dehnungsänderungen in einer Dehnungsmessfaser für das Kaimauermonitoring mit Brillouin DFOS

Clemens SEMMELROTH¹ (0009-0000-4718-911X), Ellen HEFFNER² (0000-0002-0823-0893) & Harald STERNBERG³ (0000-0002-1905-2287)

¹ HafenCity Universität Hamburg, clemens.semmelroth@hcu-hamburg.de

² HafenCity Universität Hamburg

³ HafenCity Universität Hamburg

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-015](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-015), 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.

Kurzfassung

Verteilte faseroptische Sensorik eignet sich aufgrund der engmaschigen, weitläufigen Dehnungsmessungen für das Monitoring von alternden Kaimauern in Häfen. Zentrale Einflussgrößen auf die Objektdeformation wie auch das Monitoring selbst sind in Tidehäfen wie dem Hamburger Hafen einerseits zyklisch schwankende hydrostatische Drücke sowie wechselnde Temperaturbedingungen der beiden umgebenden Medien Wasser und Luft.

Nicht nur bezogen auf wechselnde Umweltbedingungen in Tidehäfen, sondern auch im Allgemeinen stellt bei der verteilten faseroptischen Dehnungsmessung die Überlagerung von mechanisch (durch Deformation) und thermisch (durch Temperatur) bedingten Dehnungsänderungen eine grundlegende Herausforderung dar. Selbst bei Brillouin-Streuung basierten faseroptischen Messsystemen, deren Signale sowohl hinsichtlich der thermischen als auch der mechanischen Einwirkung analysiert werden können, ist die Verwendung von zwei unterschiedlichen Fasern zur Separation beider Einflussfaktoren üblich. Die Separation beider Größen innerhalb einer einzelnen Messfaser hingegen ist aufgrund der notwendigen Laborkalibrierung der Messfaser hinsichtlich Temperatur und Dehnung aufwendig.

Der vorliegende Beitrag reiht sich in bisherige Untersuchungen ein, die die Trennung von Temperatur- und Deformationseinwirkungen auf verteilte faseroptische Messungen in einem einzelnen Dehnungsmesskabel behandeln. Mithilfe eines Brillouin DFOS wird in einem praxisnahen Versuchsaufbau die Möglichkeit der In-situ Simultankalibrierung eines Dehnungsmesskabels auf Temperatureinflüsse empirisch untersucht. Die Ergebnisse der Arbeit behandeln die Separationsmöglichkeiten von Temperatur und Dehnung am Versuchsaufbau und zeigen eine Messkonfiguration, die die Isolierung von Temperatur durch Eliminierung von Dehnung ermöglicht.

1 Zielsetzung und Motivation

Durch kollabierende Brücken in Europa (MKP GMBH 2025, RAINews 2019) sind marode Infrastrukturbauwerke in den öffentlichen und politischen Fokus gerückt. Steigende Infrastrukturausgaben sind in Deutschland das Resultat, um Herausforderungen des Sanierungsdruckes zu bewältigen (BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN 2025). Unter Berücksichtigung endlicher Baukapazitäten ist einerseits die beschleunigte Sanierung bzw. Erneuerung von Brücken, Schienen, Tunneln, Leitungen u.v.m. notwendig, andererseits ist die Optimierung und Überwachung der Standzeit des Bestandes durch geodätisches Monitoring unvermeidbar.

Durch die Verfügbarkeit nicht klassisch geodätischer Sensoren steht eine Vielzahl technischer Möglichkeiten für individuelle Umsetzungen von Monitorings zur Verfügung. Das Repertoire an Monitoring-Techniken ist im zurückliegenden Jahrzehnt durch das geodätische Monitoring mittels Glasfasern ergänzt worden. Technologien wie verteilte faseroptische Sensorik (*DFOS*, engl.: distributed fiber-optic sensing) erlauben es dabei, in Glasfasern, die unmittelbar an Bau- oder Geostrukturen angebracht sind, lineare Dehnungsänderungen in nahezu jedem Punkt der Faser zu messen – hinweg über Strecken von mehreren Kilometern. Die Glasfaser, die selbst wie eine Vielzahl virtueller, aneinandergereihter Dehnungsmessstreifen wirkt, eignet sich dabei vor allem für weitläufige und örtlich kleinteilige Dehnungsmessungen an großflächigen Bauwerken.

Eine Besonderheit stellt die Verwendung von *DFOS* an alternden Kaimauern dar. Dieser Anwendungsfall wird bisher wenig beachtet. Senkrecht an einer Kaimauer appliziert, bilden die Sensoren jedoch eine Biegelinie, die wiederum als Indikator für die Standsicherheit dient (FEINDT & JESSEN 2024). Ein angestrebtes *DFOS*-Monitoring an Kaimauern ist im Gegensatz zur Applikation von *DFOS* in Tunneln oder an Brücken durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen indes herausfordernd. Da Temperaturschwankungen zwischen den unterschiedlichen Medien Wasser und Luft auf die Dehnungsmessung mit *DFOS* wirken, soll in diesem Beitrag die Temperaturkalibrierung von Dehnungsmesskabeln untersucht werden. Ein Ziel der Untersuchung ist der Nachweis einer praxistauglichen, funktionalen Temperaturkompensation von verteilter Dehnungsmessung (*DSS*, engl.: Distributed Strain Sensing) durch die Bestimmung der Temperaturkoeffizienten anhand bekannter Wasser- und Lufttemperaturen für einen speziellen Messaufbau. Außerdem sollen durch die Konzeption des Versuchsaufbaus Herausforderungen bei zukünftigen Kaimauermonitorings identifiziert werden.

Im folgenden Abschnitt 2 wird der vorliegende Beitrag zunächst im praktischen und wissenschaftlichen Kontext eingeordnet, anschließend werden technische Hintergründe für das Verständnis von Sensorik und Versuchsaufbau erläutert. In Abschnitt 3 wird die Methodik der Untersuchung dargelegt und insbesondere der Versuchsaufbau detailliert beschrieben. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4 präsentiert und evaluiert, bevor sie in Abschnitt 5 diskutiert werden. Das Fazit in Abschnitt 6 schließt die Arbeit mit der Zusammenfassung von Inhalt und Erkenntnissen ab.

2 Temperatur- und Dehnungsmessung im DFOS-Monitoring

Verteilte faseroptische Sensorik wird bei geodätischen Überwachungsmessungen und allgemein im Structural Health Monitoring (SHM) allgemein eingesetzt, um bspw. Stahl- und Betonkonstruktionen von Brücken (GLIŠIĆ et al. 2007, LI et al. 2019), Tunnel und Stollen (BARNEFSKE et al. 2025, MONSBERGER et al. 2018, LIENHART et al. 2019) oder Stützmauern (LIENHART et al. 2018) langfristig und räumlich verteilt auf Standfestigkeit bzw. strukturelle Integrität zu überwachen. Im Weiteren wird die Forschung zunächst kurz im wissenschaftlichen Kontext verortet. Anschließend werden grob einige als wichtig erachtete technische Hintergründe zum B-DFOS dargelegt. In wissenschaftlicher Fachliteratur wird die Messung von mechanisch induzierten Deformationen als die Messung von „Dehnung“ bezeichnet, die Messung thermisch induzierter Deformationen wird oft schlicht mit der Messung von Temperatur vereinheitlicht, auch wenn beide Einflüsse sich in Dehnung widerspiegeln.

2.1 Thematische Einordnung

Erste größere und generelle Analysen von B-DFOS Signal-Charakteristika hinsichtlich der Temperatur und Dehnung haben beispielsweise PARKER et al. (1997), SMITH et al. (1999) und BAO et al. (2002) vorgestellt. Einen Beitrag zur Trennung von mechanisch und thermisch induzierten Dehnungen innerhalb einer Messfaser haben dann HOTATE et al. (2013) geliefert. In ihrer Studie zeigen HOTATE et al. (2013) mithilfe eines B-DFOS eine Möglichkeit zur Trennung von Temperatur und Dehnungsmessung und bestimmen Dehnungs- und Temperaturkoeffizienten für einen bestimmten Labor-Versuchsaufbau. Unterschiede zur vorliegenden Untersuchung liegen zunächst beim Einsatz von BOCDA (engl.: Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis) und damit einhergehend einer höheren örtlichen und geometrischen Auflösung bei gleichzeitig kürzeren Messdistanzen in der Faser. Entscheidende Unterschiede liegen jedoch im Versuchsaufbau. HOTATE et al. (2013) verwenden eine Spezialfaser mit mehreren Brillouin-Peaks im Brillouin-Gain-Spektrum und messen lediglich im klassischen Fall eines Umgebungsmediums. Einblicke in die Kalibrierung von Glasfasern gibt NÖTHER (2010) in seiner Forschungsarbeit. In einer Temperatorkammer wird der Temperaturkoeffizient eines klassischen Messkabels für einen Bereich von -70°C bis 150°C bestimmt. In Abgrenzung zu diesem Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit versucht, eine pragmatische Herangehensweise zur Kalibrierung durch einen kleineren Temperaturbereich zu prüfen.

Auch wenn LANCIANO & SALVINI (2020) zeigen, dass die Temperaturkompensation bei Projekten im SHM berücksichtigt wird, bleiben Temperaturkompensationen von Messfasern oft unberücksichtigt. Aufgrund der beiden unterschiedlichen Umgebungsmedien Wasser und Luft gilt es gerade beim Monitoring an Kaimauern praxistaugliche Konzepte zur Simultankalibrierung von Temperatureinflüssen zu finden.

2.2 Technische Hintergründe zum Versuchsaufbau: Brillouin DFOS

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher DFOS-Techniken. Ihnen ist die Messung von Streuungseigenschaften in einem Glasfaserkern mithilfe eines eingekoppelten Lichtsignals gemein. Abb. 1a) zeigt den Aufbau eines Messkabels für die verteilte faseroptische

Dehnungsmessung. Während sich das eingekoppelte Lasersignal im meist $9\text{ }\mu\text{m}$ dicken Faserkern in nur einer Richtung und einem Modus ausbreitet, bildet das Cladding (hier $125\text{ }\mu\text{m}$) eine Glashülle mit verändertem Brechungsindex (HARTOG 2017). Für DSS werden meist jene Singlemode Kabel verwendet, für verteilte Temperaturmessung (DTS, engl.: Distributed Temperature Sensing) hingegen werden Kabel nach dem Aufbau in Abb. 1b) implementiert (FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH 2020).

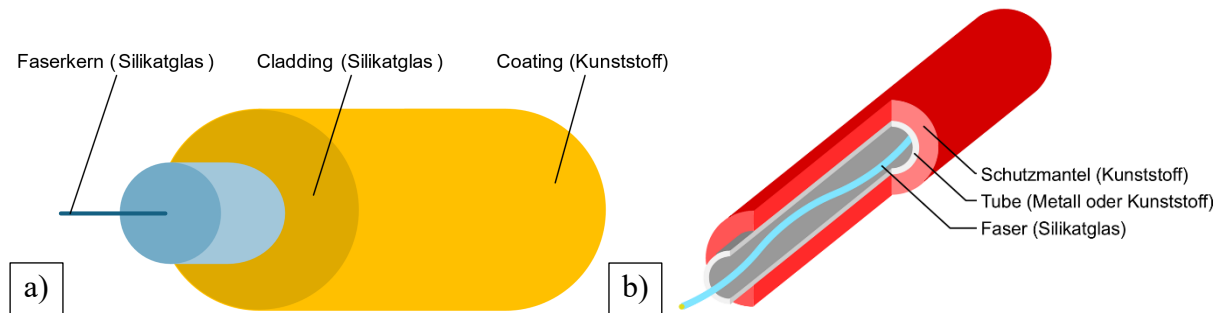


Abb. 1: a) Schematischer Aufbau einer Singlemode-Messfaser mit eng verbundenem Kunststoffmantel (*Tight-buffer Coating*). b) Schematischer Aufbau eines *Loose-tube* Kabels für die verteilte faseroptische Temperaturmessung (nach FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH 2020).

Durch die örtliche Zuordnung mittel der Streuungseigenschaften über die gesamte Distanz der Faser, können Tausende virtuelle Messstellen erzeugt werden (s. Abb. 2). Systemeigenschaften wie Anzahl der Messstellen, Gesamtmessstrecke des Sensorkabels, Messfrequenz oder Präzision der Dehnungsmessung variieren jedoch nach Messprinzip. B-DFOS zeichnen sich dabei durch lange Messdistanzen und die Möglichkeit zur Messung verteilter Dehnungs- und Temperaturmessung aus. Die Schleifenkonfiguration in Abb. 2 ist bei BOFDA nötig und wird in dieser Arbeit aufgrund der im Vergleich zur Konfiguration mit offenem Faserende höheren Wiederholgenauigkeit verwendet.

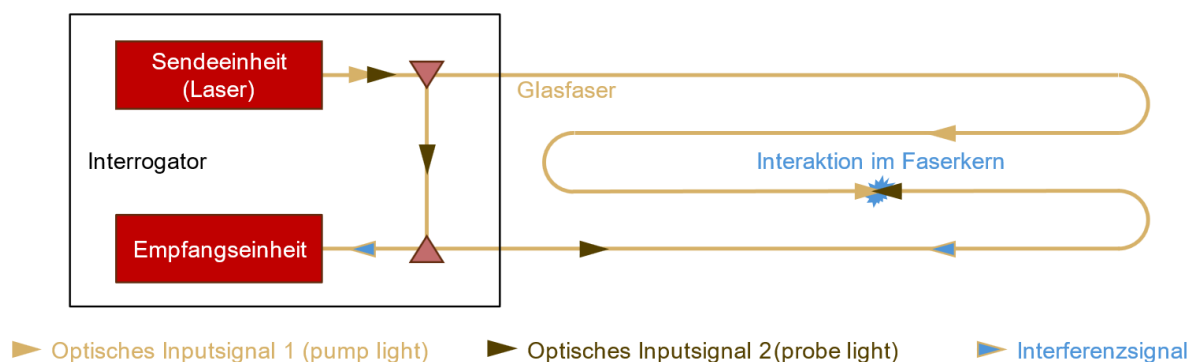


Abb. 2: Schema der Messung mit BOFDA. In beide Enden einer Glasfaser werden Lichtsignale eingekoppelt. Die Überlagerung beider erzeugt an jeder Position in der Faser stimulierte Brillouin-Streuung, deren Frequenz als Materialeigenschaft proportional zum Dehnungszustand interpretiert wird.

Der Interrogator sendet, empfängt und prozessiert Lasersignale, die in den Kern der Glasfaser eingekoppelt werden. Beide Input-Lasersignale interferieren kontinuierlich an jedem Punkt der

Faser, während das pump light innerhalb eines vorgegebenen Frequenzfensters variiert wird. Gesucht ist das Maximum des optisch-akustischen Interferenzsignals, bei dem die Faser akustisch zu schwingen beginnt (HOTATE et al. 2013). Die Frequenz des Interferenzsignals wird Brillouin-Frequenz genannt und ist an jedem Punkt der Faser individuell. Änderungen über die Zeit stellen sich als Brillouin Frequenzverschiebung f_B (BFS, engl.: Brillouin frequency shift) dar und sind proportional zur Dehnung aufgrund von thermischen und mechanischen Einflüssen. Die Einflüsse überlagern sich, lassen sich jedoch durch einfache lineare Zusammenhänge darstellen. Die Temperaturänderung ΔT und die mechanische Dehnungsänderung ε gehen nach HOTATE et al. (2013) und NÖTHER (2010) in die Brillouin Frequenzverschiebung mit

$$f_B = \varepsilon \cdot c_\varepsilon + \Delta T \cdot c_T \quad (1)$$

ein. Die Koeffizienten der Dehnung c_ε und der Temperatur c_T müssen für eine Trennung der Einflüsse bestimmt und kalibriert werden.

3 Datenerfassung

Kernziel der Untersuchung ist es, thermische Dehnungsänderungen von mechanischen Dehnungsänderungen in einem Dehnungsmesskabel zu trennen. Im Folgenden werden Dehnungen im Messkabel durch gezielte mechanische und thermische Einwirkung erzeugt. Da die Dehnung als abgeleitete Materialgröße proportional aus der BFS abgeleitet wird, wird im weiteren Verlauf die originäre Messgröße BFS betrachtet (FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH 2020).

3.1 Sensorik und Messmaterial

Der eingesetzte B-DFOS Interrogator fibrisTerre fTB5020 erreicht in der verwendeten Brillouin Optical Frequency-Domain Analysis (BOFDA) Einstellung die höchste Wiederholgenauigkeit von ca. 100 kHz, was bei kalibrierten Fasern $\leq 0,2 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ für das DSS entspricht. Die Positionsauflösung beträgt ca. 20 cm (FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH 2020). Messwerte werden jedoch auf ca. 5 cm Abstände interpoliert. Bei der Messfaser handelt es sich um eine Singlemode Messfaser (9/125 μm) mit 250 μm Coating, die gesamte Faserlänge beträgt ca. 21 m. Verklebt wurde die Faser mit einem 2-Komponenten Acrylklebstoff. Der Wassertank ist in orthogonaler Richtung mit einem zentral positionierten linearen Array von 16 Low-Cost Temperatursensoren ausgestattet. Dadurch kann die Temperaturvarianz im Wassertank evaluiert werden. Um eine Stratifizierung des Salzwassers zu vermeiden, sorgen zwei Ventilatoren für eine gleichmäßige Wassertemperatur. Betrachtet werden ausschließlich relative Temperaturunterschiede. Die Linearität der Temperaturmessung wird durch den Temperatursensor einer Conductivity-Temperature-Depth Sonde validiert.

3.2 Versuchsaufbau

Um thermisch bedingte Dehnungsänderungen von mechanischen Dehnungsänderungen zu trennen, wurde eine Vorrichtung angefertigt, die es zulässt, beide Größen in demselben Aufbau aufzuzeichnen. Mit der in Abb. 3a) dargestellten Versuchsvorrichtung sind zwei verschiedene *Deformationsstellungen* an der *Deformationsplatte* (in Abb. 3a) links) möglich. Die Richtung

der punktförmigen Deformation \vec{r}_{defo} führt in der Deformationsstellung zu einer Wölbung mit einer Auslenkung von 9,3 mm in orthogonaler Richtung im Vergleich zur *Neutralstellung* ohne Deformation. Die Deformationsstellung ist mit einer Standardabweichung von $s \approx 0,1$ mm reproduzierbar. Die *Kontrollplatte* (in Abb. 3a) rechts) dient zur Validierung der Messergebnisse und erfährt bei Deformationsstellung der Deformationsplatte in \vec{r}_{defo} eine maximale mittlere Auslenkung von 0,3 mm – der daraus resultierende Dehnungseinfluss wird aufgrund der orthogonalen Wirkrichtung vernachlässigt.

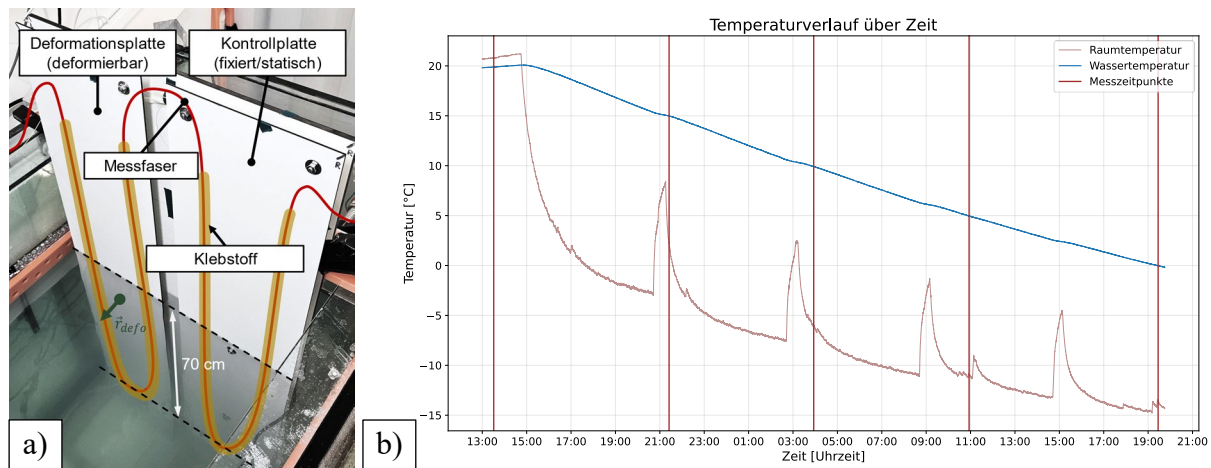


Abb. 3: a) Versuchsaufbau im Wassertank einer kühlbaren Kältekammer. b) Temperaturverläufe von Lufttemperatur in der Kältekammer und Wassertemperatur im Wassertank über den Kühlprozess hinweg. Die Messungen wurden manuell an den Zeitpunkten ausgelöst.

Die Versuchsvorrichtung ist aus Hochdruckschichtpressstoffplatten gefertigt und misst 1390×200×31 mm. Der thermodynamische Ausdehnungskoeffizient des Verbundwerkstoffs liegt mit $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}$ (INTERNATIONAL COMMITTEE OF THE DECORATIVE LAMINATES INDUSTRY 2015, RESOPAL GMBH 2024) im Bereich von Baustahl. Die temperaturbedingten Materialausdehnungen von Objekt, Klebstoff und Coating können in diesem Aufbau jedoch nicht von der Faser getrennt werden und gehen wechselwirkend in die temperaturbedingten Dehnungen ein. Gleichzeitig gelten bei der Dehnungsübertragung die von HER & HUANG (2011) analysierten Wechselwirkungen der genannten Messmaterialien. Aus beiden Zusammenhängen folgt, dass sowohl Dehnungs- als auch Temperaturkalibrierung individuell für die in der Praxis verwendete Zusammenstellung von Faser, Coating, Klebstoff und Objektmaterial durchgeführt werden muss, um Objektverformungen oder Dehnungen korrekt abbilden zu können. Die Messfaser ist, wie Abb. 3a) zu entnehmen, je Platte in einem zwei parallelen senkrechten Strängen verklebt.

Die Messumgebung simuliert die Umweltbedingungen an einer Kaimauer. Die Versuchsvorrichtung ist in einem Wassertank verschraubt, sodass die Platten der Vorrichtung zur Hälfte mit Salzwasser bedeckt sind. Untergebracht sind Wassertank und Vorrichtung in einer auf bis zu -20°C regulierbaren Kältekammer des Eislabors, das vom Max-Planck-Institut für Meteorologie und der Forschungsgruppe Meereis des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg betrieben wird (WERNER 2023).

3.3 Messablauf

Die miniaturisierte Kaimauer im Wassertank wird durch die Lufttemperatur allmählich gekühlt. Die Temperaturkurven von Raum- und Wassertemperatur sind in Abb. 3b) dargestellt. Zu den im Vorfeld definierten Temperaturzuständen 20°C, 15°C, 10°C, 5°C und 0°C werden zunächst zwei Messungen mit Neutralstellung der Deformationsplatte und anschließend zwei Messungen in Deformationsstellung ausgelöst. Aufgrund einer durchschnittlichen Epochendauer von 13,5 Minuten, beläuft sich die Temperaturveränderung im Wasser während der Epochen im Mittel auf ca. 0,1°C und wird damit als konstant angenommen. Nach der Chronologie der Temperaturzustände werden im Weiteren die Ergebnisse betrachtet.

4 Ergebnisse

Insgesamt zeigen die Ergebnisse für den pragmatischen Versuchsaufbau, der eine Kaimauer kleinskalig nachahmt, deutlich unterscheidbare Temperatur- und Dehnungsmuster und liefern in Bezug auf die zukünftige Verwendung an Kaimauern zusätzliche Erkenntnisse. Im Weiteren werden Methodik der Auswertung, Messergebnisse und die Validierung der Ergebnisse dargelegt.

4.1 Herangehensweise bei der Auswertung

Örtlich gesehen werden die fortlaufenden Positionen x im Messkabel, die mit Klebstoff fixiert sind, betrachtet. Wie zuvor erläutert wird sich im Folgenden auf Faserpositionen x unterhalb der Wasserlinie fokussiert. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit dient das Wasser als Referenzmedium für die Untersuchung, Temperaturzustände sind hier stabiler einstellbar als in Luft. Die betrachteten Faserabschnitte besitzen unter Wasser je Platte – die Wendepunkte der Faser am tiefsten Punkt eingerechnet – eine Länge von jeweils ca. 1,2 m. Bei der erwähnten örtlichen Auflösung von 20 cm ergeben sich fünf Messstellen je Platte. Durch eine B-DFOS interne Datenverarbeitung werden 23 Messstellen mit Abständen von ca. 5 cm generiert.

In der visuellen Analyse werden zunächst die Messdaten evaluiert, Fehlmessungen und Anomalien werden identifiziert und ggf. eliminiert. Bei der BFS-Messung stellen die Werte der Messstellen die Hochpunkte des Brillouin Gain Spektrums dar. Diese werden als BFS je Position abgetragen. Diese Darstellungen sind zunächst Kern der Ergebnisdarstellungen. Um zu zeigen, wie sich Temperatur- und Dehnungsänderungen auf die betrachteten Faserpositionen auswirken, werden sie zunächst getrennt betrachtet und durch Mittelwertbildung (eine Art grobe Approximation der Flächeninhalte unter den BFS) miteinander verglichen. Anschließend werden die Temperatur-BFS-Zusammenhänge der einzelnen Platten gegenübergestellt und die Fähigkeit der Versuchsvorrichtung zur Temperaturkalibrierung der Faser gezeigt.

4.2 Messung

Ergebnisse der Messungen sind BFS an jedem Punkt der Faser. Konkrete Messstellen werden durch die Zuordnung mehrerer BFS f_B zu einem diskreten Positionswert x in Abständen von 5 cm gebildet. Die Datenpunkte spiegeln die Peaks der Brillouin Gain Spektren wider. Die BFS beider Faserabschnitte sind in Abb. 4 dargestellt. Der Faserabschnitt des im Wasser

befindlichen Teils der Versuchsvorrichtung reicht bei der Deformationsplatte von Position 7,8 m bis 9,0 m und analog dazu bei der Kontrollplatte von Position 12,0 m bis 13,2 m. Beide BFS bewegen sich in einem Fenster von ca. 10,755 bis 10,790 GHz.

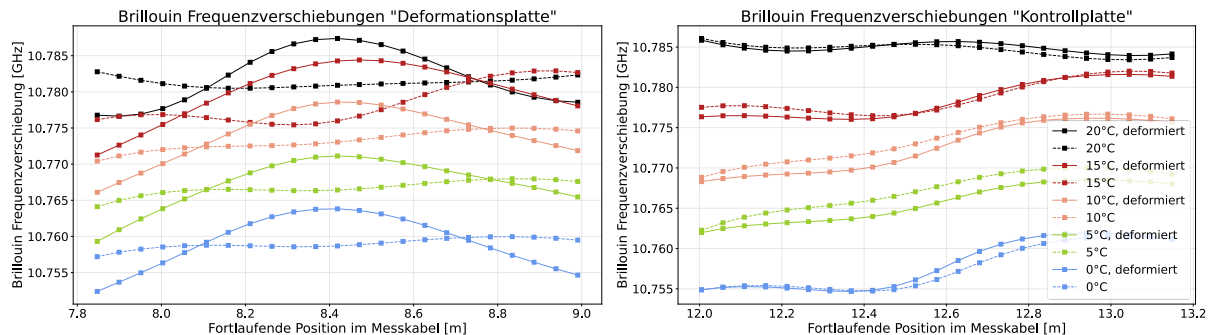


Abb. 4: Ergebnisdarstellungen im Detail und Gegenüberstellung der BFS von Deformationsplatte und Kontrollplatte zu unterschiedlichen Temperaturzuständen. Die einzelnen Verläufe setzen sich jeweils aus Doppelmessungen zusammen.

Hinsichtlich veränderter Temperaturzustände zeigen beide Platten, wie zu erwarten, ähnliche Verhalten. Abfallende Temperaturen äußern sich in einem konstanten, negativen Versatz im BFS. Besonders gilt das für die BFS-Verläufe der Temperaturzustände 10°C, 5°C und 0°C. Sie sind nahezu parallel, sowohl bei Neutralstellung als auch bei reproduzierbarer Deformationsstellung. Die BFS-Verläufe der Temperaturzustände 20°C und 15°C weichen *scheinbar* von denen der niedrigeren Temperaturzustände ab – insbesondere bei der Deformationsplatte ist dieser Effekt im BFS zu erkennen. Zurückzuführen sind diese Anomalien bei 20°C und 15°C auf abweichende Lufttemperaturzustände; außerhalb der BFS-Positionsabschnitte in Abb. 4 wird die Faser vom Medium Luft beeinflusst. Wichtig sind im Versuchsaufbau demnach auch die Temperaturdifferenzen zwischen der Luft und Wasser (vgl. Abb. 3b)). Visuell zeigt auch die Kontrollplatte leichte Abweichungen zwischen beiden Deformationsstellungen. Anhand nachträglicher Labormessungen der Versuchsvorrichtung mittels Laser Tracker wird festgestellt, dass diese aus leichten Scherungen der Versuchsvorrichtung durch die Deformationsstellung hervorgehen. Dennoch ist ein geringerer Versatz vernehmbar als bei der Deformationsplatte.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der BFS-Mittelwerte [GHz] je Platte und Temperaturzustand. Die Differenzen je Temperaturunterschied indizieren trotz unterschiedlicher Deformationsstellung (deformiert/neutral) keine signifikanten Dehnungen.

	Deformationsplatte			Kontrollplatte		
	deformiert	neutral	Differenz	deformiert	neutral	Differenz
20°C	10,7821	10,7813	0,0008	10,7849	10,7847	0,0002
15°C	10,7801	10,7783	0,0018	10,7784	10,7788	-0,0004
10°C	10,7742	10,7733	0,0009	10,7725	10,7735	-0,0010
5°C	10,7674	10,7667	0,0007	10,7657	10,7672	-0,0016
0°C	10,7593	10,7590	0,0003	10,7580	10,7576	0,0004
	RMSD:		0,0010	RMSD:		0,0009

Um im nächsten Abschnitt den linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Dehnung darstellen zu können, werden die mittleren BFS der fünf Temperaturzustände je Platte und Deformationszustand gebildet. Diese sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Werden lediglich die Temperaturzustände 15°C bis 0°C betrachtet, liegen die Differenzen der Platten zwischen benachbarten Temperaturzuständen zwischen 6,3 und 9,6 MHz. Die Differenzen zwischen Deformations- und Neutralstellung je Platte hingegen liegen fast eine Potenz niedriger und in einem Bereich von $\text{RMSD} = 1$ MHz. Dies kann darauf hindeuten, dass Temperaturen trotz Deformationsstellung im vorliegenden Messaufbau isoliert werden können. Im nächsten Abschnitt soll dies durch die Bestimmung des linearen Zusammenhangs beider Deformationsstellungen gezeigt werden.

4.3 Temperaturcharakteristika im Versuchsaufbau

Um den Temperaturkoeffizienten c_T zu berechnen, wird der lineare Zusammenhang zwischen Temperatur und BFS hergestellt. Das Ergebnis ist in Abb. 5 dargestellt.

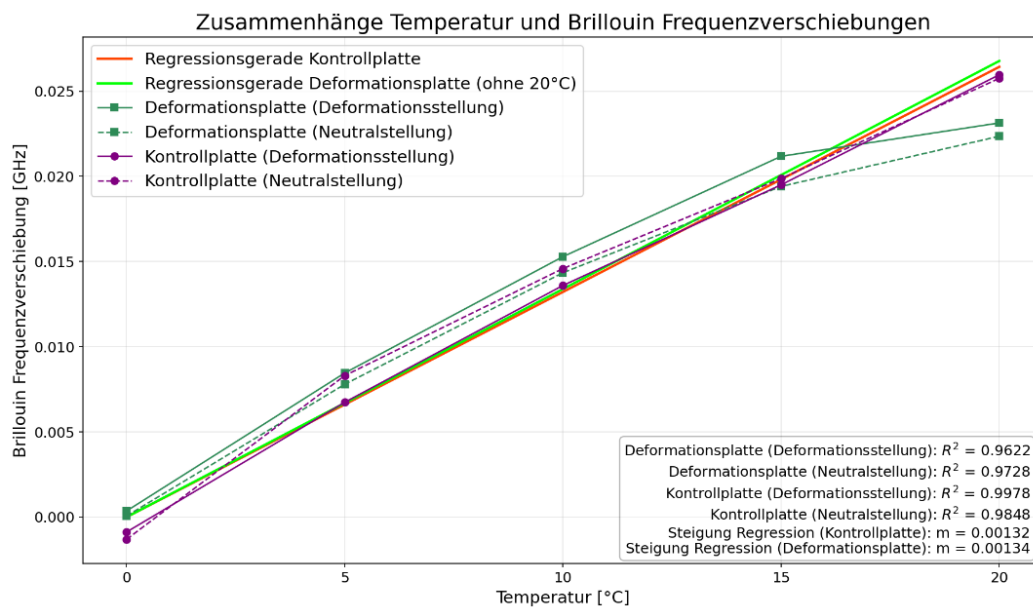


Abb. 5: Lineare Regression zwischen Temperatur und BFS. Um die Steigung zu verdeutlichen, sind die Geraden um den Achsenabschnitt 10,758 GHz reduziert. Zur Berechnung der Regressionsgeraden der Deformationsplatte wurden die Werte bei 20°C nicht berücksichtigt.

Die mittleren BFS wurden den Temperaturzuständen zugeordnet. Die Bestimmtheitsmaße R^2 validieren den linearen Zusammenhang. Als Ausreißer klassifiziert, gehen die Messungen der Deformationsplatte bei 20°C nicht in die Berechnung der Ausgleichsgeraden ein. Die Steigungen stellen den Temperaturkoeffizienten c_T dar. Für beide Regressionen lässt sich dieser zu $c_T = 1,3 \text{ MHz/}^\circ\text{C}$ berechnen. Der Achsenabschnitt beträgt bei beiden Geraden 10,758 bzw. 10,789 GHz. Ein Einfluss der Dehnung hätte zu unterschiedlichen Achsenabschnitten niedergeschlagen (NÖTHER 2010). Durch die nahezu identischen Geraden zeigt sich jedoch, dass die Dehnung für den vorliegenden Fall isolierbar ist.

4.4 Vergleich mit Fachliteratur

In der Literatur lassen sich Kalibrierwerte für verschiedene Faserzusammensetzungen finden. NÖTHER (2010) bestimmt in Labor-Kalibriervorrichtungen für eine Standard-Messfaser den Dehnungskoeffizienten c_ε mit 61,4 MHz/1000 μm und den Temperaturkoeffizienten c_T mit 1,3 MHz/°C. HOTATE et al. (2013) verwenden eine Faser mit einem Temperaturkoeffizienten c_T zwischen 0,9 und 1,1 MHz/°C. Die Vergleichswerte der Temperaturkoeffizienten bestätigen die Fähigkeit des Messaufbaus, eine Temperaturkalibrierung durchzuführen. In den Ergebnissen in Abb. 4 können an der Deformationsplatte Ausschläge in den Deformationszuständen von etwa 10 MHz festgestellt werden, was nach dem Dehnungskoeffizienten von NÖTHER (2010) ca. 163 μm entspricht. Die Differenzen an der Deformationsplatte in Tabelle 1 legen jedoch nahe, dass die Deformationen im Bereich von 1 MHz liegen müssten. Zwar weist der Hersteller eine Wiederholgenauigkeit von 100 kHz aus, diese konnte allerdings im Messaufbau nicht erreicht werden. Sie liegen in den mittleren Residuen zwischen den Doppelmessungen der niedrigen Temperaturzustände je nach Datenauswahl bei ca. 1-2 MHz. Das bedeutet, dass das Messsystem im vorliegenden Aufbau zwar eine niedrigere Wiederholgenauigkeit in der BFS-Messung besitzt, die Dehnungsunterschiede hätten sich jedoch in den Differenzen der Deformationsstellung der Deformationsplatte in Tabelle 1 zeigen müssen. Eine Eliminierung der Dehnung im Kalibrieraufbau scheint demnach wahrscheinlich.

5 Diskussion

Die geringen Mittelwert-Differenzen an der Deformationsplatte (Tabelle 1) können mehrere Ursachen haben. Die kurze Faserabschnitt, die parallele Verlegung der Messfaser in Kombination mit der leichten Wölbung der Versuchsvorrichtung (Instabilität bei Deformationsstellung) oder der Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft während der Messungen bieten physische Erklärungsansätze. Ein dehnungsbedingter Einfluss kann zumindest entkräftet werden. Zu Validationszwecken wurde bei 0°C eine dritte Deformationsstellung mit doppeltem Deformationsvektor \vec{r}_{defo} gemessen. Das Ergebnis deckt sich mit den bisherigen Befunden: Die Dehnung wird durch Mittelwertbildung ebenfalls eliminiert. Allerdings können softwareseitige Gründe nicht ausgeschlossen werden. In weiteren Untersuchungen verfolgt werden sollten nach Meinung der Autorinnen und Autoren die Länge der betrachteten Faserabschnitte in Kombination mit Luft/Wasser Temperaturunterschieden.

Sollten sich die Befunde der Dehnungseliminierung anhand weiterer Labor- sowie Praxisuntersuchungen identifizieren und reproduzieren lassen, könnten bestimmte Messaufbauten im DFOS-Monitoring mit Dehnungsmesskabeln entwickelt werden, mit denen sich Dehnungs- oder Temperatureinflüsse weiter separieren lassen. Diese These muss jedoch weiter untersucht werden, um abschließend bestätigt werden zu können. Eine Erkenntnis der Untersuchung ist, dass sich im vorliegenden Versuchsaufbau, der keiner klassischen Labor-Kalibriereinrichtung folgt, Temperatur und Dehnung getrennt betrachten lassen. Mindestens der Temperaturkoeffizient c_T ist anhand dieses einfachen Aufbaus bestimmbar. Ein Vorteil daran ist, dass nicht nur das Messkabel kalibriert werden kann, sondern zudem Materialeigenschaften wie das Dämpfungsverhalten vom eingesetzten Klebstoff berücksichtigt

werden (vgl. HER & HUANG 2011). Eine Herausforderung bei der Isolierung der Einflüsse stellt indes die Kalibrierung von Messfasern hinsichtlich der Dehnung dar. Mithilfe eines geometrischen Modells oder größeren Deformationszuständen könnte die Nachvollziehbarkeit der Dehnungseinflüsse erreicht werden.

Des Weiteren sind in den Ergebnissen Herausforderungen in Bezug auf die Messung in zwei Medien identifiziert worden. Für gleichbleibende Temperaturdifferenzen zwischen Luft und Wasser in den Temperaturzuständen 10°C, 5°C und 0°C (Deformationsplatte) können visuell gute Ergebnisse erzielt werden. Hohe Abweichungen bei den Temperaturunterschieden Luft/Wasser (Deformationsplatte: 20°C) oder bei abrupten Schwankungen während der Messung (Deformationsplatte: 15°C) kommt es zu vergleichsweise großen Schwankungen im BFS.

6 Fazit & Ausblick

Zwar ist beim Monitoring mittels DFOS oft die Summe aller Einflussgrößen, die geometrische Bauwerksveränderungen hervorrufen, maßgeblich. Jedoch führen unter Umständen schwankende Temperaturunterschiede zu Veränderungen der Materialstruktur der Faser und somit zu Dehnungsänderungen, die nicht Teil der Bauwerksbewegung sind. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit eine praxisnahe Versuchsvorrichtung entworfen, um mit B-DFOS die mechanisch und thermisch bedingten Einflüsse auf die faseroptische Messung am miniaturisierten Anwendungsfall zu untersuchen. Mit der Versuchsvorrichtung ist es einerseits möglich, reproduzierbare Deformationen, sprich Dehnungen, zu erzeugen. Andererseits war durch die Messung in einer Kältekammer die Schaffung definierter Temperaturzustände möglich. In der Kältekammer sind mit zwei unterschiedlichen Deformationsstellungen strukturiert Messungen zu fünf verschiedenen Temperaturzuständen von 0 bis 20°C gemessen worden.

Zunächst konnten praktische Erkenntnisse hinsichtlich der Auswirkungen von zwei Umgebungsmedien Luft und Wasser gewonnen werden. In der Grenzschicht gibt es keine klaren Übergänge, hohe Temperaturunterschiede zwischen Luft und Wasser scheinen vielmehr Auswirkungen auf die Positionskomponente zu haben. Dies gilt es in Zukunft weiter zu untersuchen. Des Weiteren deuten die Ergebnisse darauf hin, dass sich individuell für den Messaufbau trotz unterschiedlicher Dehnungseinwirkungen Temperaturen isolieren lassen. Je Dehnungszustand ergeben sich nahezu identische lineare Zusammenhänge zwischen Temperatur und BFS, worauf der nahezu identische Achsenabschnitt bei 10,789 GHz hindeutet. Der Temperaturkoeffizient c_T wurde mit 1,3 MHz/°C – hier zeigt sich die Fähigkeit des Messaufbaus zur Temperaturkalibrierung. Ob bzw. inwiefern die in parallelen Doppelsträngen verlegten Fasern eine In-situ Kalibrierung an einer Kaimauer ermöglichen, muss jedoch untersucht werden.

Danksagung

Dank für die Unterstützung und Bereitstellung des Eislabors gilt Niels Fuchs und Lea Nupnau von der Forschungsgruppe Meereis des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg.

Literatur

- BADO, M. F. & CASAS, J. R. (2021): A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. In: *Sensors*, 21 (5), S. 1818-1901. DOI:10.3390/s21051818.
- BAO, X., SMITH, J. & BROWN, A.W. (2002): Temperature and strain measurements using the power, line-width, shape, and frequency shift of the Brillouin loss spectrum. In: *SPIE 4920, Advanced Sensor Systems and Applications*, Shanghai, 09.09.2002. DOI:10.1117/12.481989.
- 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 2025)*, Karlsruhe, 07.-09.04.2025. DOI:10.5445/IR/1000180374.
- FEINDT, F. & JESSEN, I. (2024): Anwendung und Erfahrungen mit der Nachrechnungsrichtlinie der Hamburger Hafenbehörde für Kaimauern und Uferwände. In: *Der Prüferingenieur*, (64), S. 67-73.
- FIBRISTERRE SYSTEMS GMBH (2020): Distributed fiber-optic Brillouin sensing. The fTB 5020 series. Technical documentation. fibrisTerre Systems GmbH, Berlin.
- GLIŠIĆ, B., POSENATO, D. & INAUDI, D. (2007): Integrity monitoring of old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering. *14th International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, California.
- HARTOG, A.H. (2017): An introduction to distributed optical fibre sensors. Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group.
- HER, S.-C. & HUANG, C.-Y. (2011): Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors. In: *Sensors*, 11 (7), S. 6926-6941. DOI:10.3390/s110706926.
- HOTATE, K., ZOU, W., YAMASHITA, R.K. & HE, Z. (2013): Distributed discrimination of strain and temperature based on Brillouin dynamic grating in an optical fiber. In: *Photonic Sensors* 3 (4), S. 332-344. DOI:10.1007/s13320-013-0130-7.
- INTERNATIONAL COMMITTEE OF THE DECORATIVE LAMINATES INDUSTRY (2015): Technical Leaflet: Technical characteristics and physical properties of HPL. URL: https://www.prohpl.org/assets/uploads/prohpl/files/TL_150623_technical_characteristics_and_physical_properties_of_HPL.pdf. (letzter Zugriff: 9. Januar 2026).
- LANCIANO, C. & SALVINI, R. (2020): Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors. *Sensors*, 20 (7). DOI:10.3390/s20071924.
- LI, C., HE, W., LUO, Y. & ZOU, Y. (2019): Temperature Control Measurement of Bridge Foundation Concrete based on the Optical Fiber Sensing Technology. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1288 (1), S. 12082. DOI:10.1088/1742-6596/1288/1/012082.
- LIENHART, W., MONSBERGER, C.M., KALENJUK, S., WOSCHITZ, H. (2018): High Resolution Monitoring of Retaining Walls with Distributed Fibre Optic Sensors and Mobile Mapping Systems. In: *Asian Pacific Workshop Structural Health Monitoring (APWSHM 2018)*, Hong Kong, 12-15.11.2018.
- LIENHART, W., BUCHMAYER, F., KLUG, F. & MONSBERGER, C.M. (2019): Distributed fibre-optic sensing applications at the Semmering Base Tunnel, Austria. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 172 (4), S. 148-159. DOI:10.1680/jsmic.20.00006.

- MKP GMBH (2025): Carolabrücke. Gutachten zur Ursache des Teileinsturzes. URL: <https://www.dresden.de/media/pdf/Strassenbau/Gutachten-Carolabruecke.pdf> (letzter Zugriff: 9. Januar 2026).
- MONSBERGER, C.M., LIENHART, W. & MORITZ, B. (2018): In-situ assessment of strain behaviour inside tunnel linings using distributed fibre optic sensors. In: *Geomechanics and Tunnelling*, 11 (6), S. 701-709. DOI:10.1002/geot.201800050.
- NÖTHER, N. (2010): Distributed fiber sensors in river embankments: Advancing and implementing the Brillouin optical frequency domain analysis. Technische Universität Berlin, Dissertation. Berlin, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).
- PARKER, T.R., FARHADIROUSHAN, M., HANDEREK, V.A. & ROGER, A.J. (1997): A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9 (7), S. 979-981. DOI:10.1109/68.593372.
- RAINNEWS (2019): Experten stellen Instandhaltungsmängel an der Morandi-Brücke fest. URL: <https://www.rainews.it/tgr/tagesschau/articoli/2019/08/tag-Morandi-Bruecke-Genova-b1b70579-db0f-4de9-a6ed-d20f8ebdeebb.html> (letzter Zugriff: 9. Januar 2026).
- RESOPAL GMBH (2024): Resopal HPL. Produktdatenblatt. URL: https://www.resopal.de/media/Technical_Resources/de_rp/produktdatenblatt_resopal_hpl_01.pdf (Letzter Zugriff: 9. Januar 2026).
- SMITH, J., BROWN, A., DEMERCHANT M. & BAO, X. (1999): Simultaneous distributed strain and temperature measurement. In: *Applied optics*, 38 (25), S. 5372-5377. DOI:10.1364/ao.38.005372.
- WERNER, E. (2023): Measuring sea ice thickness. Exploring the feasibility of echo sounders for close-range determination of sea ice draft. In: *Hydrographische Nachrichten, Journal of Applied Hydrography*, 125 (2), S. 12-16. DOI:10.23784/HN125-02.