

Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Messung der Brillouin-Frequenzverschiebung für die faseroptische Bestimmung der Temperaturverteilung

Aleksander Wosniok

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Zusammenfassung

Auf der Grundlage der in DIN EN 61757-2-2:2017 beschriebenen Standardisierungsmethoden wurden in dieser Arbeit wichtige Leistungsparameter von vier kommerziellen Messsystemen zur orts aufgelösten faseroptischen Erfassung der temperatur- und dehnungsabhängigen Brillouin-Frequenzverschiebung untersucht. Gemäß der oben genannten Norm konzentrierte sich hier die Ermittlungsprüfung auf messtechnische Aspekte reiner Temperaturmessungen. Dabei diente die Ermittlung von einem festgelegten Satz dreier Betriebsverhaltenskenngößen in Form von quantitativen Angaben des Messfehlers, der Wiederholgenauigkeit sowie der räumlichen Unsicherheit einem Vergleich der getesteten Messsysteme.

Alle faseroptischen Messungen wurden mit einer Faserschleife ausgeführt, d. h. als Sensorkonfiguration der Messfaser wurde eine Schleifenanordnung gewählt. Die Messverfahren der getesteten Messsysteme basierten somit auf der Brillouin-optischen Zeit- bzw. Frequenzbereichsanalyse. Die Betriebsverhaltenskenngößen wurden ferner bei unterschiedlichen Werten zweier messtechnischer Parameter, des Frequenzschrittes und der Mittelungsrate, für Standardeinstellungen der Laserleistungswerte der in die Sensorfaser einzukoppelnden Laserlichtsignale ermittelt. Auf diesem Weg lassen sich relevante Aussagen zur Optimierung der Messgenauigkeiten in Bezug auf Messdauer treffen.

Keywords: Faseroptischer Sensor, orts aufgelöste Brillouin-Sensorik, verteilte faseroptische Temperaturmessung, Brillouin-Frequenzverschiebung, Betriebsverhaltenskenngößen.

Einleitung

Vor dem Hintergrund der weltweit steigenden wirtschaftspolitischen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von kritischen Anlagen, wie Kraftwerke, Rohrleitungen, Deiche sowie Straßen- und Bahnnetz, bieten örtlich auflösende faseroptische Temperaturmessverfahren ein ausgezeichnetes Tool für lückenlose Überwachung über kilometerlange Strecken. Aufgrund der Materialeigenschaften der faseroptischen Sensoren, ihrer geringen Abmessungen, Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und Einsetzbarkeit unter hohem Druck sowie in einer explosionsgefährdeten Umgebung, kann der Einsatzbereich dieser Sensoren auf weitere industrielle Bereiche erweitert werden. Dazu zählt beispielhaft die Bohrlochüberwachung sowie Monitoring von Starkstromnetzen.

Die in den letzten Jahren vorangetriebenen Arbeiten zur Festlegung von Rahmenbedingungen zwecks Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen

faseroptischen Temperaturmesssystemen mündeten in einer Vereinheitlichung der Standards im Rahmen der im Jahr 2016 veröffentlichten Norm IEC 61757-2-2 und ihrer deutschen Fassung DIN EN 61757-2-2:2017 [1]. Der Gültigkeitsbereich dieser Norm erstreckt sich über alle orts aufgelösten faseroptischen Temperatursysteme (engl.: distributed temperature sensing - DTS) auf Basis von temperaturabhängigen Lichtstreuungseffekten in Lichtwellenleitern (LWL), die als orts auflösende Sensoren benutzt werden. DTS basiert somit auf der messtechnischen Nutzung sowohl der elastischen Rayleigh-Streuung als auch der unelastischen Lichtstreuarten in Form der Raman- und der Brillouin-Streuung.

Die vorliegende Arbeit liefert einen quantitativen Vergleich zwischen vier kommerziellen faseroptischen Brillouin-basierten Messsystemen unterschiedlicher Hersteller. Die dabei durchgeführten Temperaturtests dienten der Ermittlung der drei relevanten in der Norm festgelegten

Betriebsverhaltenskenngrößen. Dazu zählt der Messfehler sowie die Wiederholbarkeit und die räumliche Unsicherheit der Temperaturmessung. Diese Leistungsparameter sind ferner in einer Schleifenanordnung der faseroptischen Sensoren untersucht worden. Die möglichen Sensorkonfigurationen der Brillouin-Messtechnik sind im nächsten Abschnitt dargelegt.

Grundlagen der Brillouin-Messtechnik

Die Brillouin-basierten Messverfahren gehören zu den weit verbreiteten faseroptischen Methoden für die orts aufgelöste Dehnungs- und Temperaturmessung über kilometerlange Messstrecken. Die im Handel kommerziell erhältlichen Geräte verwenden die bekannten Ansätze zur Bestimmung der sogenannten Brillouin-Frequenzverschiebung ϑ_B sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Die messtechnischen Eigenschaften der beiden Messprinzipien sind in [2] und [3] detailliert vorgestellt. Im Allgemeinen können die Brillouin-Systeme entweder als Reflektometer betrieben oder als eine faseroptische Brillouin-Analyse realisiert werden. Die Messungen auf Basis der Brillouin-Reflektometrie werden ferner mit einer einseitig offenen Sensorfaser ausgeführt. Dies wiederum bedeutet, dass die Laserlichtsignale (Pump-Signale) zur Erzeugung der Brillouin-Streuung an einem Faserende eingekoppelt werden. Durch eine zusätzliche Stimulierung der Brillouin-Streuung, bei einer Einkopplung von weiteren frequenzverschobenen Laserlichtsignalen (Probe-Signalen) an dem zweiten Faserende in die entgegengesetzte Richtung, bietet die faseroptische Brillouin-Analyse dagegen höhere Messgenauigkeiten. Die hier erforderliche Schleifenanordnung der Sensorfaser ist jedoch bedingt durch die Lichteinkopplung an den beiden Faserenden nicht für jede Anwendung realisierbar.

Bei den für die hier vorgestellten Untersuchungen relevanten Analyse-Verfahren, BOTDA (engl.: Brillouin Optical Time Domain Analysis) und BOFDA (engl.: Brillouin Optical Frequency Domain Analysis), wird die Brillouin-Frequenzverschiebung ϑ_B aus den aufgenommenen lorentzförmigen Brillouin-Verstärkungsspektren ermittelt. ϑ_B entspricht ferner dem Frequenzwert beim jeweiligen Maximum der Brillouin-Spektren, d. h. der Frequenzverschiebung, die an jedem Ort entlang der Messfaser zu einer maximalen Brillouin-Streuung führt. Die Erfassung der ortsverteilten Brillouin-Spektren entlang der Sensorfaser erfolgt dabei durch Abscannen des Frequenzbereiches um den Wert ϑ_B . Das Abscannen selbst wird durch eine schrittweise

Änderung der Frequenzverschiebung zwischen den Pump- und Probe-Signalen mit einem konstanten Frequenzschritt realisiert. Abb. 1 zeigt beispielhaft einen Verlauf der Brillouin-Verstärkungsspektren entlang der hier untersuchten 4,5 km langen Messstrecke. Die Verschiebung der Brillouin-Spektren in Bereichen S1 und S2 (siehe Abb. 2) zu höheren Frequenzwerten ist temperaturbedingt, dies verursacht durch Temperaturanstieg bis auf 60 °C. Im Gegenteil zu BOFDA, erfordert der BOTDA-Ansatz eine zusätzliche Mittelung vieler Einzelmessungen zwecks Verringerung des Signal-Rausch-Verhältnisses (engl.: signal-to-noise ratio - SNR).

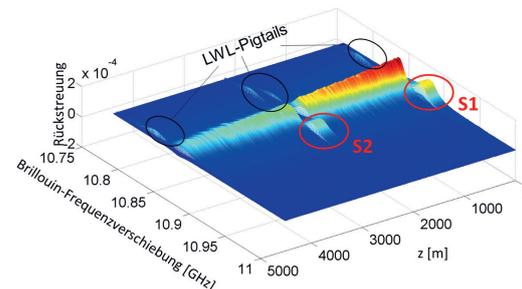


Abb. 1: Messung der Brillouin-Verstärkungsspektren entlang der getesteten Sensorstrecke im BOFDA-Verfahren.

Unabhängig von der Sensorkonfiguration und dem gewählten Messverfahren lässt sich die Temperatur- bzw. Dehnungsverteilung mittels folgender Gleichung bestimmen:

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

wobei C_T und C_ε die Fasermaterial- und wellenlängenspezifischen Temperatur- bzw. Dehnungskoeffizienten darstellen. Der Bezugswert ϑ_{B0} in Gl. (1) ist als eine stark von der Faserkerndotierung abhängige charakteristische Brillouin-Frequenzverschiebung einer ungedehnten Faser bei einer Referenztemperatur T_0 zu verstehen. Bleibt die Sensorfaser mechanisch entlastet (ungedehnt), so lassen sich mit einem bekannten Wert von ϑ_{B0} aus jedem gemessenen Wert ϑ_B direkte Rückschlüsse über die Temperaturverteilung entlang dieser Messfaser ziehen. Der in Abb. 1 präsentierte Frequenzversatz zwischen den gemessenen ϑ_B -Werten der Sensorfaser und den an die Sensorfaser angespleißten Verbindungsfasern (LWL-Pigtails) weist bedingt durch eine konstante Umgebungstemperatur sowie die vorhandene mechanische Entkopplung auf ihre unterschiedlichen ϑ_{B0} -Werte hin. Dies wiederum belegt somit geringe Unterschiede in der Faserkerndotierung der Sensorfaser und der LWL-Pigtails.

Versuchsanordnung

Die untersuchten Betriebsverhaltenskenngrößen wurden im Prüfaufbau gemäß Abb. 2 bei drei konstanten Temperaturwerten (-10°C , 20°C und 60°C) separat für die sich in einer kalibrierten Temperatorkammer VTL 4003 befindenden Faserabschnitte S1 und S2 (202 m bzw. 204 m lang) bestimmt. Als Sensorfaser wurde eine Singlemode-Standardfaser SMF28e eingesetzt.

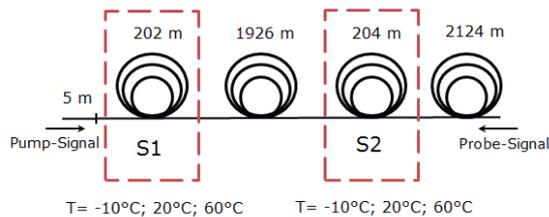


Abb. 2: Sensorkonfiguration der Testfaser - Schleifenanordnung.

Der Zustand der Sensorfaser lässt sich durch die optischen Verluste entlang der gesamten Länge der Faser quantifizieren. Abb. 3 zeigt den Verlauf der optischen Dämpfung entlang der Teststrecke gem. Sensorkonfiguration in Abb. 2. Der Dämpfungsverlauf in Abb. 3 stellt realitätsnahe Dämpfungswerte dar, die bei Sensorapplikation bzw. -integration für die Aufgaben des Zustandsmonitorings zur Überwachung von ausgedehnten Objekten und Anlagen realisierbar sind.

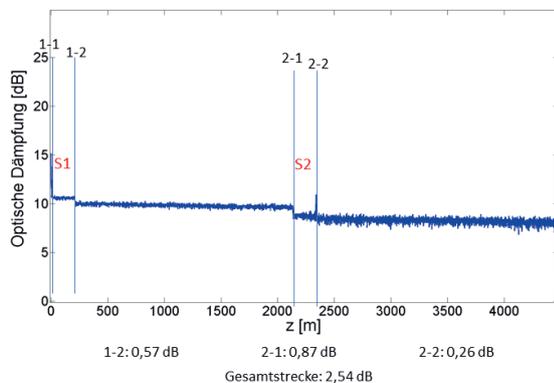


Abb. 3: Optische Dämpfung entlang der Testfaser.

Drei von den vier getesteten Geräten nutzten das BOTDA-Verfahren. Bei einem weiteren Gerät handelte es sich um ein BOFDA-Messsystem.

Die Pump- und Probeleistungen der an den beiden Enden der Sensorfaserstrecke einzukoppelnden Laserlichtsignale wurden stets nach den Standardvorgaben des jeweiligen Herstellers eingestellt.

Das Abscannen des Frequenzbereiches zwecks Ermittlung der temperaturabhängigen

Brillouin-Frequenzverschiebung ϑ_B erfolgte in vorgebbaren Frequenzschritten von 1 MHz, 2 MHz bzw. 4 MHz.

Die gewählte Mittelungsrate im BOTDA-Verfahren variierte zwischen 2^{10} , 2^{13} und 2^{15} . Die konstante Ortsauflösung lag bei 1 m und der Messpunktabstand im Bereich um 20 cm.

Prüfverfahren zur Leistungsbewertung

Die Messungen zur Ermittlung der Betriebsverhaltenskenngrößen aller vier Messsysteme sind in einem klimatisierten Labor bei einer stabilisierten Temperatur ($23,5 \pm 0,5$) $^{\circ}\text{C}$ durchgeführt worden. Die Gewährleistung einer möglichst konstanten Betriebstemperatur ist eine wichtige Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Darüber hinaus sind vor der Ausführung der Tests die Aufwärmzeiten der jeweiligen Geräte einzuhalten.

Die Leistungsbewertung erfolgte zwecks erweiterter Vergleichbarkeit bei unterschiedlich voreingestellten Messparametern [Anzahl der Mittelungen (gilt nur für BOTDA), Frequenzschritt]. Die Messungen wurden stets zwanzig Mal für jeden Messparametersatz und einen konstanten Temperaturwert der zu untersuchenden Bereiche S1 sowie S2 (siehe Abb. 2) wiederholt. Die auf diese Weise aufgenommenen Temperaturspuren dienten somit zur Berechnung aller drei Betriebsverhaltenskenngrößen. Die detaillierte Vorgehensweise zur Kennwertberechnung des Temperaturmessfehlers, der Temperaturwiederholgenauigkeit sowie der räumlichen Temperaturunsicherheit ist in [1] nachzuschlagen.

Im Allgemeinen wird die Messgenauigkeit der Messsysteme mit dem Temperaturmessfehler wiedergegeben, während die beiden anderen Kenngrößen die Reproduzierbarkeit der ortsverteilten Messung beschreiben. Der Messfehler wird somit als Höchstwert der Differenz zwischen einem zentrierten und gleitenden Mittelwert der gemessenen Temperatur und einer Referenztemperatur (dem in S1 sowie S2 konstanten wahren Wert der Temperatur) in den beiden temperierten Bereichen S1 und S2 gedeutet. Die Glättung der ermittelten Temperaturmittelwerte erfolgt dabei zentriert über 51 Messpunkte.

Die Temperaturwiederholbarkeit soll als ein geglätteter Verlauf der erweiterten Messunsicherheit der Temperaturmessdaten an jedem Messort gegeben durch eine entsprechende zweifache Standardabweichung des Temperaturmittelwertes verstanden werden. Wird für jede einzelne Temperaturabtastspur eine zweifache Standardabweichung über 51 örtlich

aufeinander folgende Temperaturwerte gebildet, so entspricht die räumliche Temperaturunsicherheit den jeweiligen aus zwanzig Messungen ermittelten Mittelwerten dieser zweifachen Standardabweichung. Die räumliche Temperaturunsicherheit gibt somit die örtliche Reproduzierbarkeit der Temperaturwerte an.

Ergebnisse

Die Norm [1] schreibt vor, dass die zu untersuchenden Betriebsverhaltenskenngrößen für drei unterschiedliche Messzeiten zu bestimmen sind. Ferner handelt es sich um die kürzeste durch das DTS-Messsystem zur Verfügung gestellte Zeit, eine empfohlene Zeit und die längstmögliche Zeit. Aufgrund der Differenzen in den Messzeiten aller vier getesteten Messgeräte werden die geforderten unterschiedlichen Messzeiten einheitlich zwecks bestmöglicher Vergleichbarkeit über den Parametersatz [Anzahl der Mittelungen (gilt nur für BOTDA), Frequenzschritt] wie folgt definiert:

- [2¹³, 4 MHz] – kürzeste Zeit
- [2¹³, 2 MHz] – empfohlene Zeit
- [2¹³, 1 MHz] – längste Zeit

Tab. 1 zeigt alle ermittelten Messfehlerwerte in Abhängigkeit von der Temperatur für die drei oben angegebenen Messzeiten.

Da das System B messtechnisch einen Einsatz einer Nachlauffaser erfordert, konnten für dieses Gerät keine Kenngrößen im Abschnitt S2 bestimmt werden. Die in diesem Fall erforderliche Verlängerung der Messstrecke hätte die in Abb. 2 gezeigte Sensor-konfiguration verändert und somit die Vergleichbarkeit der Messwerte beeinträchtigt. Zwecks Sicherstellung der Vergleichbarkeit wurde hier auf die Verlängerung der Messstrecke verzichtet.

Tab. 1 zeigt, dass sich mit den getesteten Brillouin-basierten Systemen Messgenauigkeiten von 0,3 °C bis 0,4 °C erreichen lassen. Die Messfehlerwerte zeigen jedoch allgemein Temperatur- und Ortsabhängigkeiten, je nachdem für welchen Abschnitt (S1 oder S2) die Werte ermittelt worden sind. Dieses Verhalten ist durch die in [4] thematisierte Dämpfung der Brillouin-Verstärkungsspektren in Abhängigkeit sowohl von der gewählten Pump- und Probeleistung der Laserquellen als auch von der Fasertemperatur selbst zu erklären. Werden die in Abb. 1 gezeigten Spektren bei unterschiedlichen Werten der Pump- und Probeleistung aufgenommen, so verändert sich die Höhe und die Breite der Spektren entlang der Faserstrecke, was den Messfehler und die weiteren Leistungs-

parameter ortsabhängig beeinflussen kann. Darüber hinaus sind die Höhe und die Breite der Brillouin-Spektren temperaturabhängig. Wie in [4] gezeigt, führen die Unterschiede in der Fasertemperatur auch zur Dämpfungsänderung der erfassten Brillouin-Spektren.

Tab. 1: Ermittelte Messfehlerwerte in °C - Anzahl der Mittelungen: 2¹³ (nur im Zeitbereichsverfahren)

Temperatur [°C]	Frequenzschritt [MHz]		
	1	2	4
S1 – Messsystem A			
-10	0,36	0,46	0,43
20	0,42	0,40	0,42
60	0,29	0,31	0,33
S2 – Messsystem A			
-10	0,46	0,42	0,37
20	0,72	0,65	0,71
60	0,43	0,43	0,42
S1 – Messsystem B			
-10	0,33	0,34	0,35
20	0,35	0,34	0,34
60	0,42	0,42	0,40
S1 – Messsystem C			
-10	0,56	0,44	0,40
20	0,41	0,47	0,41
60	0,33	0,34	0,35
S2 – Messsystem C			
-10	0,50	0,38	0,35
20	0,47	0,45	0,49
60	0,61	0,66	0,81
S1 – Messsystem D			
-10	0,61	0,65	0,62
20	0,56	0,58	0,61
60	0,58	0,57	0,59
S2 – Messsystem D			
-10	0,54	0,54	0,54
20	0,49	0,50	0,49
60	0,46	0,47	0,48

Entgegen der allgemeinen Erwartung, dass sich am Anfang der Faser im Abschnitt S1 die höchste Messgenauigkeit erreichen lässt, wurden für das Messsystem D gerade im Abschnitt S2 kleinere Messfehler ermittelt. Dies kann ein Indiz für eine nicht optimale Anpassung der Pump- und Probeleistung sein. Eine weitere Optimierung der Laserleistung könnte hier auch in der Verbesserung der Messfehlerwerte und der Reproduzierbarkeit der Messung resultieren.

Im Allgemeinen lässt sich die Messzeit sowohl durch die Herabsetzung der Mittelungsrate als auch durch die Erhöhung des Frequenz-

schritten reduzieren. Vergleichbar kurze Messzeiten wie bei [2¹³, 4 MHz] lassen sich somit auch bei [2¹⁰, 1 MHz] erreichen. Tab. 2 zeigt die quantifizierten Leistungsunterschiede für die beiden Messparametersätze aller drei BOTDA-Systeme. Tab. 2 belegt auch, dass die durch die Erhöhung der Mittelungsrate erwartete Verbesserung der Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit im Fall der mit der Mittelungsrate von 2¹⁵ durchgeführten Messungen zweier Messsysteme nicht bestätigt werden kann. Ferner resultiert die deutliche Erhöhung der Mittelungsrate in den signifikant längeren Messzeiten. Dabei wird die Sensorfaser über längere Zeiten leichten Temperaturschwankungen der Temperaturkammer ausgesetzt, was wiederum die ermittelten Messfehlerwerte beeinträchtigt. Die Verkleinerung des Frequenzschrittes im BOFDA-System bis auf 0,5 MHz führte zum gleichen Effekt.

Tab. 2: Normierter Vergleich der Betriebsverhaltenskenngößen in Abhängigkeit von dem Frequenzschritt und der Anzahl der Mittelungen – BOTDA-Messsysteme

Frequenzschritt [MHz] / Mittelungsrate	Messsystem		
	1.	2.	3.
Messfehler			
1 / 2 ¹⁰	0,99	0,82	0,98
4 / 2 ¹³	1	1	1
1 / 2 ¹⁵	---	0,95	0,98
Höchstwert der Temperaturwiederholbarkeit			
1 / 2 ¹⁰	1,01	1,04	1,00
4 / 2 ¹³	1	1	1
1 / 2 ¹⁵	---	1,15	0,63
Höchstwert der räumlichen Temperaturunsicherheit			
1 / 2 ¹⁰	1,20	1,04	1,13
4 / 2 ¹³	1	1	1
1 / 2 ¹⁵	---	1,16	1,02

Die relevanten Messergebnisse zu der untersuchten Temperaturwiederholbarkeit sind in Abb. 4 – Abb. 6 dargestellt. Die ersten zwei Diagramme belegen die Temperaturabhängigkeit dieses Leistungsparameters. Abb. 6 zeigt dagegen eine messbare Verschlechterung der Temperaturwiederholbarkeit bei Erhöhung des Frequenzschrittes von 2 MHz auf 4 MHz.

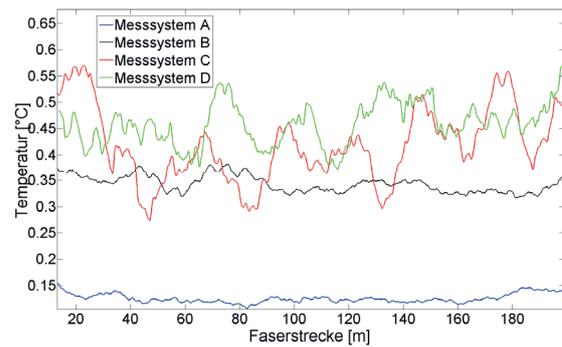


Abb. 4: Temperaturwiederholbarkeit für S1; T = -10 °C, Frequenzschritt: 2 MHz, Anzahl der Mittelungen: 2¹³ (nur im Zeitbereichsverfahren)

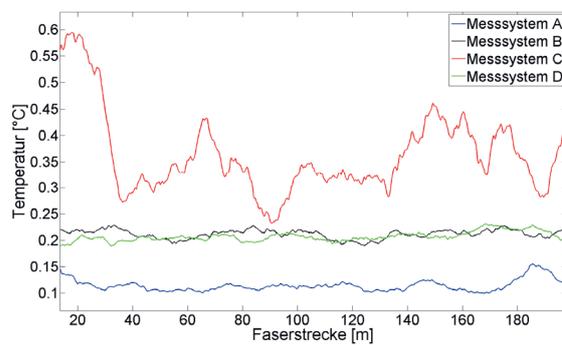


Abb. 5: Temperaturwiederholbarkeit für S1; T = 60 °C, Frequenzschritt: 2 MHz, Anzahl der Mittelungen: 2¹³ (nur im Zeitbereichsverfahren)

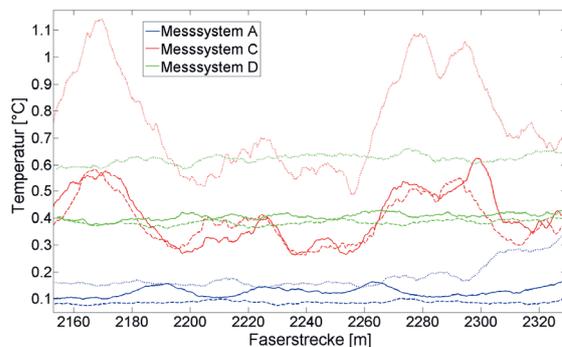


Abb. 6: Temperaturwiederholbarkeit für S2; T = 60 °C, Frequenzschritt: 1 MHz (gestrichelte Linie) / 2 MHz (durchgezogene Linie) / 4 MHz (gepunktete Linie), Anzahl der Mittelungen: 2¹³ (nur im Zeitbereichsverfahren)

Die in Tab. 3 temperaturübergreifend zusammengefassten genauesten Höchstwerte der Temperaturwiederholbarkeit zeigen, dass schon mit einem Frequenzschritt von 2 MHz optimierte Leistungsparameterwerte realisierbar sind.

Tab. 3: Höchstwerte der Temperaturwiederholbarkeit in °C - Anzahl der Mittelungen: 2^{13} (nur im Zeitbereichsverfahren)

Abschnitt	Frequenzschritt [MHz]		
	1	2	4
Messsystem A			
S1	0,12	0,16	0,22
S2	0,10	0,27	0,29
Messsystem B			
S1	0,28	0,24	0,39
Messsystem C			
S1	0,56	0,57	0,64
S2	0,58	0,62	0,60
Messsystem D			
S1	0,27	0,23	0,34
S2	0,41	0,39	0,58

Wie in Abb. 7 - Abb. 9 gezeigt, sind die erwähnten Temperatureffekte auch in den Verläufen der räumlichen Temperaturunsicherheit zu erkennen.

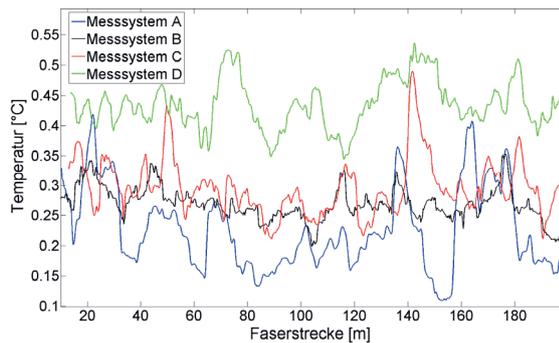


Abb. 7: Räumliche Temperaturunsicherheit für S1; $T = -10$ °C, Frequenzschritt: 2 MHz, Anzahl der Mittelungen: 2^{13} (nur im Zeitbereichsverfahren)

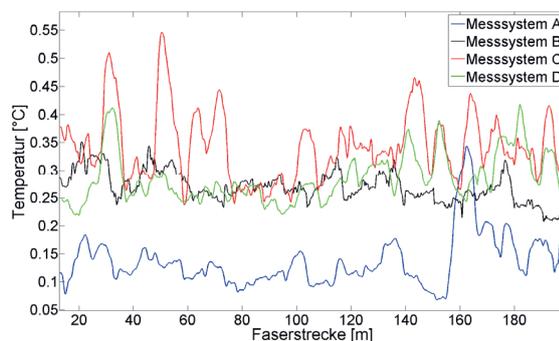


Abb. 8: Räumliche Temperaturunsicherheit für S1; $T = 20$ °C, Frequenzschritt: 2 MHz, Anzahl der Mittelungen: 2^{13} (nur im Zeitbereichsverfahren)

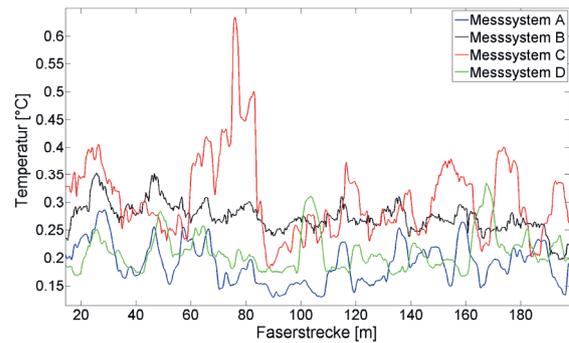


Abb. 9: Räumliche Temperaturunsicherheit für S1; $T = 60$ °C, Frequenzschritt: 2 MHz, Anzahl der Mittelungen: 2^{13} (nur im Zeitbereichsverfahren)

Anhand der in Abb. 10 präsentierten Verläufe der Temperaturunsicherheit und der in Tab. 4 angegebenen Höchstwerte lässt sich generell feststellen, dass die Erhöhung des Frequenzschrittes auf 4 MHz auch zur Verschlechterung dieser Kenngröße führen kann.

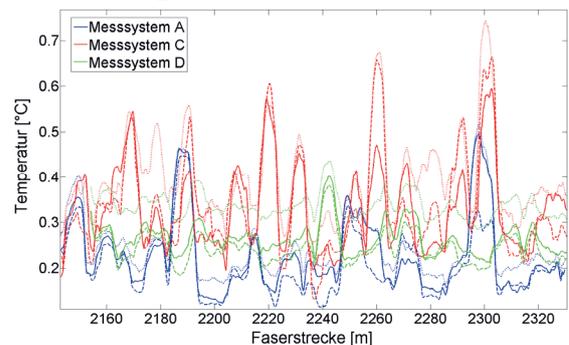


Abb. 10: Räumliche Temperaturunsicherheit - für S2; $T = 60$ °C, Frequenzschritt: 1 MHz (gestrichelte Linie) / 2 MHz (durchgezogene Linie) / 4 MHz (gepunktete Linie), Anzahl der Mittelungen: 2^{13} (nur im BOTDA)

Tab. 4: Höchstwerte der räumlichen Temperaturunsicherheit in °C

Abschnitt	Frequenzschritt [MHz]		
	1	2	4
Messsystem A			
S1	0,29	0,29	0,37
S2	0,45	0,49	0,52
Messsystem B			
S1	0,33	0,35	0,35
Messsystem C			
S1	0,51	0,49	0,44
S2	0,46	0,41	0,47
Messsystem D			
S1	0,39	0,33	0,40
S2	0,37	0,38	0,41

Schlussfolgerungen

Die ermittelten Betriebsverhaltenskenngößen weisen Temperatur- und ortsabhängige Differenzen auf. Der dabei erreichte geringste Messfehler liegt bei 0,29 °C für das Messsystem A, 0,33 °C für die Messsysteme B und C, sowie 0,46 °C für das Messsystem D. Die Messgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der auf der Bestimmung der Brillouin-Frequenzverschiebung basierenden Temperaturmessung können durch die Wahl der Leistungswerte der Pump-Probe-Lasersignale beeinflusst werden. In Bezug auf die Optimierung der Messunsicherheiten führen die von den Herstellern voreingestellten Standardwerte somit nicht zwangsläufig zum erwarteten bzw. vorgegebenen Niveau der untersuchten Kenngrößen. Vielmehr sollen die Pump- und Probe-Leistungen vor der eigentlichen Messung anwendungsbezogen an die Länge der Messstrecke, die optischen Verluste und die gewählte Ortsauflösung angepasst werden.

In vielen Anwendungsfällen wird von der Messtechnik neben präzisen Messergebnissen die Einhaltung kurzer Messzeiten gefordert. Auf Basis der durchgeführten Prüfuntersuchungen liefern alle drei im Zeitbereichsanalyseverfahren getesteten Messsysteme bei der Mittelungsrate von 2^{13} und dem Frequenzschritt von 2 MHz relativ kurze Messzeiten, die zu keinem relevanten Genauigkeitsverlust führen. Eine vergleichbare Effizienz wurde im Frequenzbereichsanalyseverfahren beim Frequenzschritt im Bereich von 1 bis 2 MHz erreicht. Eine genauere Frequenzabtastung mit dem Schritt von 0,5 MHz erwies sich als nicht zielführend.

Literaturnachweis

- [1] DIN EN 61757-2-2:2017; doi: 10.31030/2833739
- [2] M. A. Soto, Distributed Brillouin Sensing: Time-Domain Techniques, *Handbook of Optical Fibers*, ,1-91 (2017); doi: 10.1007/978-981-10-1477-2_7-1
- [3] A. Wosniok, Distributed Brillouin Sensing: Frequency-Domain Techniques, *Handbook of Optical Fibers*, ,1-25 (2017); doi: 10.1007/978-981-10-1477-2_8-1
- [4] A. Wosniok, Untersuchungen zur Unterscheidung der Einflussgrößen Temperatur und Dehnung bei Anwendung der verteilten Brillouin-Sensorik in der Bauwerksüberwachung, *Dissertation TU Berlin*, (2017); doi: 10.14279/depositonce-3828