

Einsatz von faseroptischen Sensoren in der Kältetechnik

Bestimmung von Temperaturverteilungen in Luftströmungen

Malte Dirks^{1*}, Steffen Grohmann^{1,2}

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Engler-Bunte-Ring 21,
76131 Karlsruhe,
Deutschland
malte.dirks@kit.edu

² Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT),
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen,
Deutschland
steffen.grohmann@kit.edu

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Bei der experimentellen Untersuchung von luftbeaufschlagten Wärmeübertragern stellt die Bestimmung der Lufttemperaturen über den gesamten Strömungsquerschnitt eine messtechnische Herausforderung dar. In Folge von Temperaturdifferenzen über den Querschnitt ist eine hohe Ortsauflösung der Temperaturmessung erforderlich. Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Messung von Temperaturverteilungen mit hoher Ortsauflösung sind Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensoren, bei denen in den Kern einer Glasfaser eingeschriebene Mikrostrukturen den Brechungsindex des Faserkerns periodisch modulieren. Eine Änderung der Temperatur wirkt sich auf den Brechungsindex und die Gitterkonstante des FBG aus und verändert so die reflektierte Bragg-Wellenlänge. Mittels geeigneter Kalibrierung kann so die Temperatur an der Stelle des Bragg-Gitters gemessen werden, wobei eine Vielzahl von Messstellen (FBGs) in einer einzelnen Glasfaser realisiert werden können. Auf diese Weise kann zum einen der Verdrahtungsaufwand und zum anderen der Wärmeeintrag gegenüber einem Messaufbau mit herkömmlichen Temperatursensoren deutlich reduziert werden.

Das Manuskript stellt die Kalibrier- und Messmethodik für die Temperaturmessung in Luftströmungen mittels FBG-Sensoren vor. Darüber hinaus werden experimentelle Messergebnisse präsentiert, die in einem Windkanal gewonnen wurden und die Vorteile des Messsystems aufzeigen.

Stichwörter:

Temperaturmessung, Faseroptische Messsysteme, Lamellenwärmeübertrager

1 Einleitung

Bei der experimentellen Untersuchung von Lamellenwärmeübertragern stellt die Bestimmung der über den Strömungsquerschnitt gemittelten Temperaturwerte auf der Luftseite eine messtechnische Herausforderung dar. Um auch bei auftretenden Temperaturdifferenzen über den Querschnitt den Temperaturmittelwert möglichst exakt bestimmen zu können, ist eine hohe Ortsauflösung der Temperaturmessung erforderlich. Mit herkömmlicher Temperaturmesstechnik, wie beispielsweise Thermoelementen oder Widerstandsthermometern, ist dies mit einem hohen Verdrahtungsaufwand verbunden. In der Kälte- und Kryotechnik führt die hohe Zahl an Leitungen zusätzlich zu einem Wärmeeintrag, der das Messergebnis insbesondere bei geringen Kälteleistungen negativ beeinflusst. Eine mögliche Alternative sind Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensoren. Bei diesen Glasfasersensoren führt eine Temperaturänderung zu einer Änderung des Brechungsindex sowie der Gitterkonstante der FBGs und damit der reflektierten Bragg-Wellenlänge. Mit Hilfe einer geeigneten Kalibrierung kann aus der reflektierten Wellenlänge die Temperatur an der Stelle des FBGs bestimmt werden. Da auf einer Glasfaser eine Vielzahl von Messtellen realisiert werden kann, ermöglichen FBG-Sensoren eine erhebliche Reduzierung des Verdrahtungsaufwands und gleichzeitig des Wärmeeintrags. Weitere Vorteile sind außerdem die Unabhängigkeit von elektromagnetischer Interferenz, die elektrische Passivität sowie der geringe Durchmesser der Sensoren. Der geringe Bauraum ist insbesondere für die Messung in Luftströmungen von Bedeutung, da so auch die Beeinflussung der Luftströmung minimiert werden kann. Im folgenden Manuskript wird zunächst das Funktionsprinzip der FBG-Messtechnik erläutert und im Anschluss eine Kalibriermethodik für den Einsatz von FBG-Sensoren in der Kälte-technik vorgestellt. Abschließend werden Messergebnisse aus einem Windkanal präsentiert, die die Notwendigkeit einer ausreichenden Ortsauflösung bei der Temperaturmessung in Luftströmungen verdeutlichen.

2 Aufbau und Messprinzip von FBG-Sensoren

FBG-Sensoren zählen zu den faseroptischen Sensoren. Sie sind in der Regel aus drei Schichten aufgebaut, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Der Kern dient zur Übertragung des einfallenden sowie reflektierten Lichtstrahls. Umgeben wird er von einem Mantel, der Streulicht in den Kern zurück reflektiert, um Übertragungsverluste zu reduzieren. Möglich wird dies durch einen höheren Brechungsindex im Kern gegenüber dem Mantel. Die äußere Hülle bildet eine Schutzschicht zur Abschirmung vor äußeren Einflüssen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Faser in eine Kapillare einzuführen, um sie vom Prozessmedium zu separieren und vor mechanischen Einflüssen aus der Umgebung zu schützen.

In den Kern der Faser werden sogenannte Gratings eingebracht. Dies sind lokale Änderungen des Brechungsindex n der Faser. Für das Erzeugen der Gratings gibt es eine Vielzahl von Methoden. Meistens erfolgt eine Bestrahlung mittels UV-Laserstrahlung und Phasenmasken oder Interferometern. Die Änderung des Brechungsindex kann dabei über die Intensität der Bestrahlung gesteuert werden. Abbildung 2.2 illustriert das Messprinzip der FBG Sensoren. Die in rot dargestellten Gratings bilden das Bragg-Gitter, an dem das eingestrahlte Licht reflektiert wird. Dabei wird nicht das komplette Spektrum reflektiert, sondern nur eine spezifische Bragg-Wellenlänge λ_B pro FBG. Die Bragg-Wellenlänge λ_B ist durch die Gitterperiode Λ und den Brechungsindex n festgelegt.

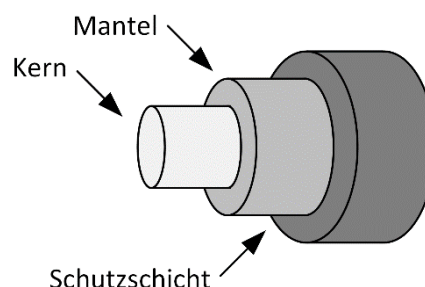


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau von FBG-Sensoren.

Sie lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$\lambda_B = 2n\Lambda. \tag{2.1}$$

Die Gitterperiode Λ ist vom Abstand der Gratings zueinander abhängig und unterscheidet sich zwischen den einzelnen FBGs. Jedes FBG reflektiert somit eine spezifische Wellenlänge. Das restliche Spektrum des eingestrahlichten Lichts kann das Grating ungehindert passieren. Auf diese Weise können mehrere FBGs pro Sensor realisiert werden. Die Anzahl der FBGs ist dabei durch die Breite des Spektrums des eingestrahlichten Lichts begrenzt, da jede Messstelle einen eigenen Wellenlängenbereich benötigt, um Überschneidungen zwischen den reflektierten Wellenlängen zu vermeiden. Für Temperaturmessungen liegt ein üblicher Wellenlängenabstand bei 4 nm, sodass bei einer typischen Bandbreite von 100 nm des eingestrahlichten Lichts theoretisch 25 Messstellen pro Sensor möglich sind. Zusätzlich wird die Anzahl der Messstellen durch die Länge der FBGs auf der Faser, die bei ca. 1 cm liegt, begrenzt. Die Bestimmung der Temperatur mittels FBG-Sensoren basiert auf einer Verschiebung der reflektierten Wellenlänge in Folge der Dehnung und der Änderung des Brechungsindex der Glasfaser in Abhängigkeit der Temperatur. Die Temperatur lässt sich aus der Änderung der Bragg-Wellenlänge mit der Formel

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B,0}} = (\alpha_\Lambda - \alpha_n)T \tag{2.2}$$

berechnen. Darin sind α_Λ der Wärmeausdehnungskoeffizient und α_n der thermooptische Koeffizient der Glasfaser. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient von Glas sehr gering ist, überwiegt der Effekt durch die Änderung des Brechungsindex deutlich. Formel 2.2 berücksichtigt dabei nur die Effekte, die zu einer Änderung der Bragg-Wellenlänge aufgrund einer Temperaturänderung führen. Daneben ist eine Verschiebung der Bragg-Wellenlänge auch durch mechanische Einflüsse möglich. Dieser Effekt wird für die Dehnungsmessung mittels FBG-Sensoren bspw. in Bauwerken genutzt. Für die Temperaturmessung mit FBG-Sensoren ist es deshalb nötig, die Faser vor mechanischen Einflüssen von außen, die zur Dehnung, Biegung oder Torsion der Faser führen können, zu schützen. Eine geeignete Möglichkeit dazu ist, die Faser in eine Edelstahlkapillare einzuführen. [1,2]

Für Temperaturen oberhalb von 0°C kommen FBG-Sensoren zur Temperaturmessung bereits in verschiedensten Bereichen wie z.B. in der Geothermie oder der Temperaturüberwachung von Gaspipelines zur Anwendung [3]. Bei tieferen Temperaturen sinkt die Sensitivität der Sensoren aufgrund der Stoffeigenschaften der Glasfaser deutlich [4,5].

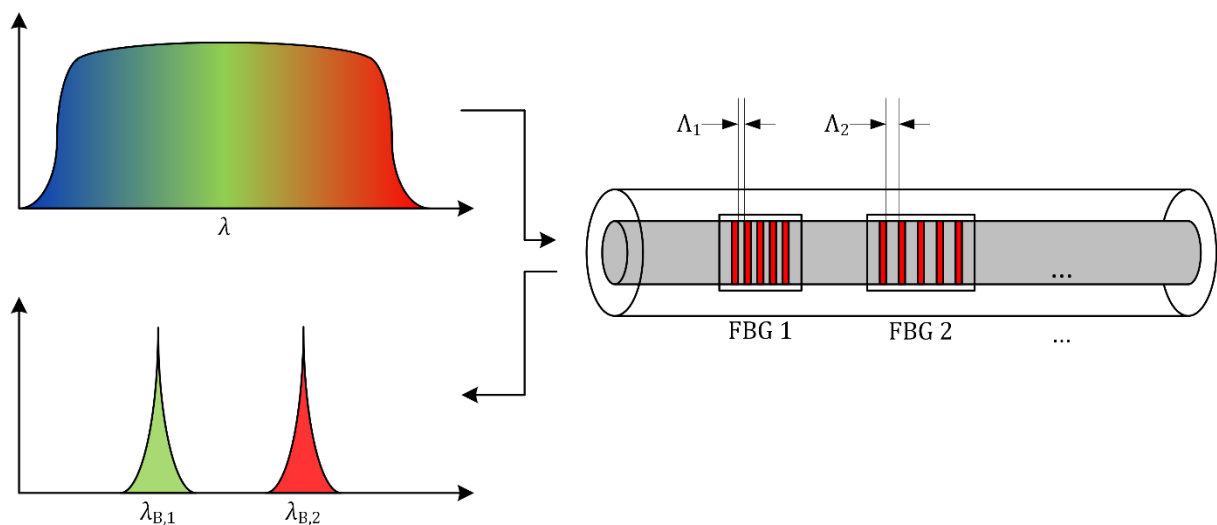


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Messprinzips von FBG-Sensoren.

Um die Sensitivität der Sensoren in diesem Temperaturbereich zu erhöhen, können die Fasern mit Polymeren oder Metallen beschichtet werden, die einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten haben [3]. Durch die Beschichtung der Sensoren mit verschiedenen Metallen wie bspw. Zink, Kupfer oder Blei ist der Einsatz von FBG-Sensoren auch bei kryogenen Temperaturen bis zu 4,2 K mit ausreichender Sensitivität möglich [5]. Aufgrund der Stoffeigenschaften der Beschichtungsmaterialien führt dies allerdings zu einem nicht linearen Verhalten und Hysterese der Sensoren [6]. Deshalb sind bei diesen Sensoren für die Anpassung der Kalibrierfunktion Polynome höherer Ordnung nötig, um diesen Effekt abbilden zu können [7]. Eine sensorspezifische Kalibrierung der FBG-Sensoren im gewünschten Temperaturbereich ist dementsprechend von zentraler Bedeutung für einen verlässlichen Einsatz der FBG-Sensoren bei tiefen Temperaturen.

3 Kalibrierung der FBG-Sensoren

3.1 Kalibriereinrichtung

Für den Einsatz der FBG-Sensoren zur Temperaturmessung müssen diese zunächst im relevanten Temperaturbereich kalibriert werden, um den Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung und der Wellenlängenverschiebung zu bestimmen. Da eine Veränderung der Ausrichtung oder Biegung der Sensoren im Vergleich zur Kalibrierung ein systematischer Fehler durch die veränderte Dehnung der Faser verursachen würde, muss die Kalibrierung der Sensoren in einer möglichst identischen Lage zur späteren Messsituation erfolgen. Zudem sollte auch ein direkter Kontakt zu Feuchtigkeit vermieden werden, weil einige Beschichtungen auf Polymerbasis sensitiv auf veränderte Feuchtigkeitsbedingungen reagieren, wie Vorversuche gezeigt haben.

Für die Kalibrierung von FBG-Sensoren zum Einsatz in einem Windkanal wurde eine neue Kalibriereinrichtung konstruiert, die die genannten Anforderungen erfüllt. Sie besteht aus einem Kupferblock mit Referenzsensoren, der mittels eines Umwälzthermostaten temperiert werden kann. Der Block besteht aus zwei spiegelverkehrt aufgebauten Hälften mit einer Länge von 80 cm und einer Breite von 12 cm. Abbildung 3.1 zeigt den unteren der beiden Quader. Auf der Innenseite sind in beide Hälften jeweils vier halbrunde Nuten eingefräst, die einen Radius von 0,6 mm aufweisen. Beim Zusammensetzen der beiden Quader ergeben sich somit runde Kanäle, in die die FBG-Sensoren für die Kalibrierung eingeführt werden. Die Nuten haben dabei einen Abstand von 10 mm zueinander. Der Randabstand rechts und links beträgt jeweils 45 mm, um sicherzustellen, dass keine Randeinflüsse im Bereich der FBG-Sensoren auftreten. Um die thermische Kontaktierung der beiden Hälften zu verbessern sind diese außerdem miteinander verschraubt. Für die Temperierung der Blöcke sind auf der äußeren Seite der Blöcke jeweils sieben Kupferrohre 8 x 1 mm in dafür passende Nuten eingelötet. Diese sind am Beginn und Ende jeweils über Flüssigkeitsverteiler miteinander verbunden. Die Verteiler weisen einen Innendurchmesser von 16 mm auf, wodurch eine gleichmäßige Verteilung der Strömung auf alle Kanäle gewährleistet werden kann. Dies wurde zuvor mittels CFD-Simulationen überprüft. Bei einem Kalibrierdurchgang können somit vier Sensoren mit einer Länge von bis zu 80 cm gleichzeitig kalibriert werden.



Abbildung 3.1: CFD Darstellung des unteren Quaders der Kalibriereinrichtung.

Der Temperaturbereich der Kalibriereinrichtung ist im Wesentlichen durch das verwendete Temperierfluid und die Leistung des verwendeten Thermostaten beschränkt. Im Rahmen der in diesem Manuskript vorgestellten Messergebnisse wurde ein Temperaturbereich zwischen -25 und $+60^{\circ}\text{C}$ angestrebt. Als Temperierfluid wurde in diesem Fall eine 50%ige Mischung aus Antifrogen N[®] und Wasser gewählt. Um eine möglichst optimale Temperaturhomogenität entlang des Blocks zu erreichen, werden die beiden Hälften in entgegengesetzte Richtung durchströmt, sodass sich auch die minimalen Temperaturdifferenzen des Temperierfluids bei der Durchströmung des Blocks ausgleichen. Zur Wärmedämmung des Blocks wurde AF Armaflex[®] mit einer Gesamtstärke von 64 mm verwendet.

Für die Bestimmung der Temperaturreferenz sind insgesamt 15 Pt100 Widerstandsthermometer der Klasse AA nach DIN EN IEC 60751 [8] in die beiden Hälften des Kupferblocks integriert. Die Sensoren haben einen Abstand von 5 cm zueinander und sind jeweils abwechselnd im oberen und im unteren Block eingeschraubt. Der Abstand der Sensoren zur Mittelebene mit den FBG-Sensoren beträgt 5 mm. Die thermische Kontaktierung der Referenzsensoren an den Kupferblock wurde zusätzlich mit Wärmeleitpaste verbessert. Abbildung 3.2 zeigt die Kalibriereinrichtung im zusammengesetzten Zustand. Rechts und links sind in weiß die Leitungen der Pt100 Sensoren zu erkennen. Von oben ist bereits der erste FBG-Sensor eingeführt, dessen oranges Kabel zu erkennen ist.

Die Messdatenaufzeichnung sowie die Steuerung der Kalibriereinrichtung erfolgt mittels LabVIEW [9]. Die Pt100 Widerstandsthermometer werden mit Hilfe eines Multidatenloggers 34972A der Firma Keysight ausgelesen. Die Unsicherheit der Widerstandbestimmung liegt im relevanten Messbereich bei $\pm 0,008 \Omega$. Für die Bestimmung der Bragg Wellenlängen wird ein FS22SI Braggmeter der Firma HBM eingesetzt, das bis zu acht FBG-Sensoren gleichzeitig auslesen kann. Der messbare Wellenlängenbereich liegt zwischen 1500 und 1600 nm. Die Unsicherheit der Wellenlängenmessung beträgt dabei ± 2 pm. Für die Temperierung kommt ein Julabo F32 ME Umwälzthermostat zum Einsatz, der ebenfalls direkt über LabVIEW [9] angesteuert wird.

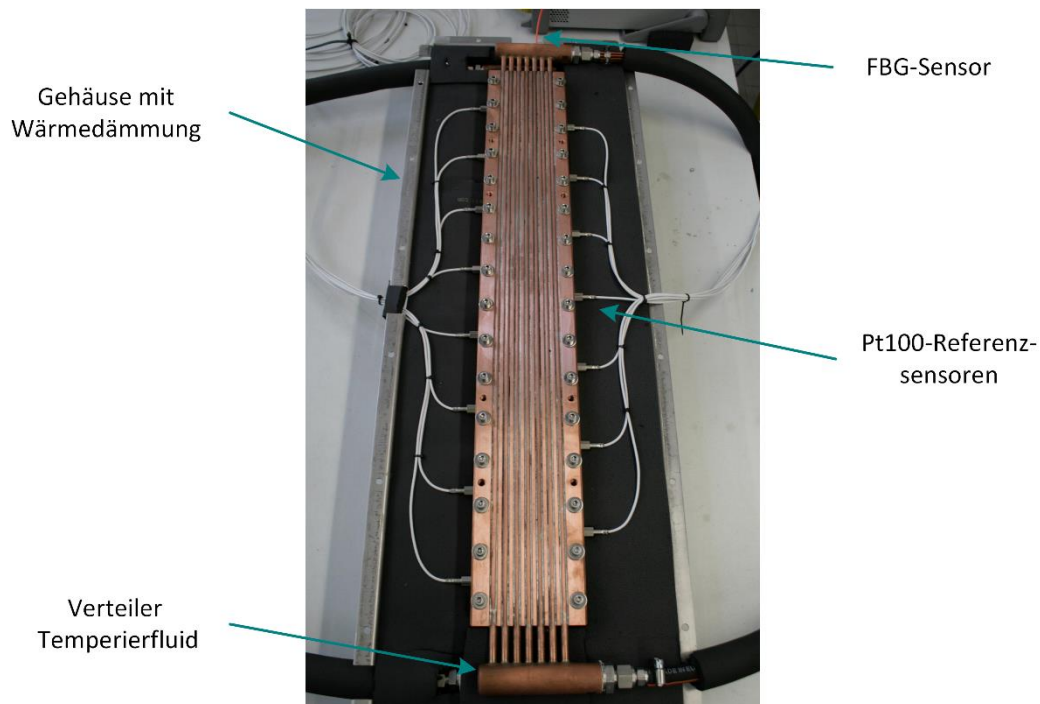


Abbildung 3.2: Kalibriereinrichtung mit Referenzsensoren.

3.2 Ablauf und Ergebnisse der Kalibrierung

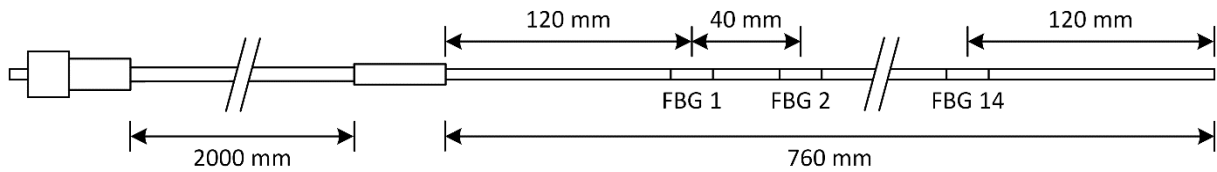


Abbildung 3.3: Konfiguration der verwendeten FBG-Sensoren.

Der Aufbau der verwendeten FBG-Sensoren ist in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt. Zur Erhöhung der Sensitivität im angestrebten Temperaturbereich sind die Sensoren mit Polyimid beschichtet. Um sie vor mechanischen Einflüssen zu schützen, sind die Fasern in eine Edelstahlkapillare mit einem Außendurchmesser von 1 mm gekapselt. Die Sensoren haben eine Länge von 760 mm. Auf den ersten und letzten 120 mm jedes Sensors befinden sich jeweils keine Gratings. Dazwischen sind die jeweils 14 Gratings pro Sensor äquidistant mit einem Abstand von 40 mm zueinander verteilt. Der Wellenlängenabstand der Gratings zueinander beträgt 5 nm. Im Anschluss an die Kapillare befindet sich eine Übergangshülse, an die eine 2 m lange Leitung zum Braggmeter anschließt.

Für die im Rahmen dieses Manuskript vorgestellten Ergebnisse wurden die FBG-Sensoren in einem Temperaturbereich zwischen -25 und 60°C kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte an statischen Messpunkten in Schritten von 5 K. Dazu wurde zunächst die gewünschte Zieltemperatur im Kalibrierblock mit Hilfe des Thermostaten eingestellt. Nach dem Erreichen des stationären Zustandes wurden pro Messpunkt jeweils 100 Werte mit einer Messrate von 5 s aufgezeichnet. Nach Abschluss der Kalibrierung erfolgte die Anpassung der Kalibrierfunktion in Origin [10]. Da die Sensoren mit Polyimid beschichtet sind, kann nicht mehr von einem linearen Verhalten ausgegangen werden, wie de Lima Filho et. al. [5] und Wang et al. [7] gezeigt haben. Von Chiuchiolo et al. [11] wurden gute Ergebnisse für Polyimid beschichtete Sensoren mit einem Polynom sechster Ordnung erzielt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund des geringeren Temperaturbereichs im Vergleich zu Chiuchiolo et al. [11] ein Polynom fünfter Ordnung verwendet, da ab diesem Grad keine signifikante Verbesserung des Anpassungsergebnisses mehr erreicht werden konnte. Da die Änderung der Wellenlänge im kalibrierten Temperaturbereich bei unter 1 nm liegt, wurde für die Anpassung der Kalibrierdaten die Wellenlängenverschiebung verwendet.

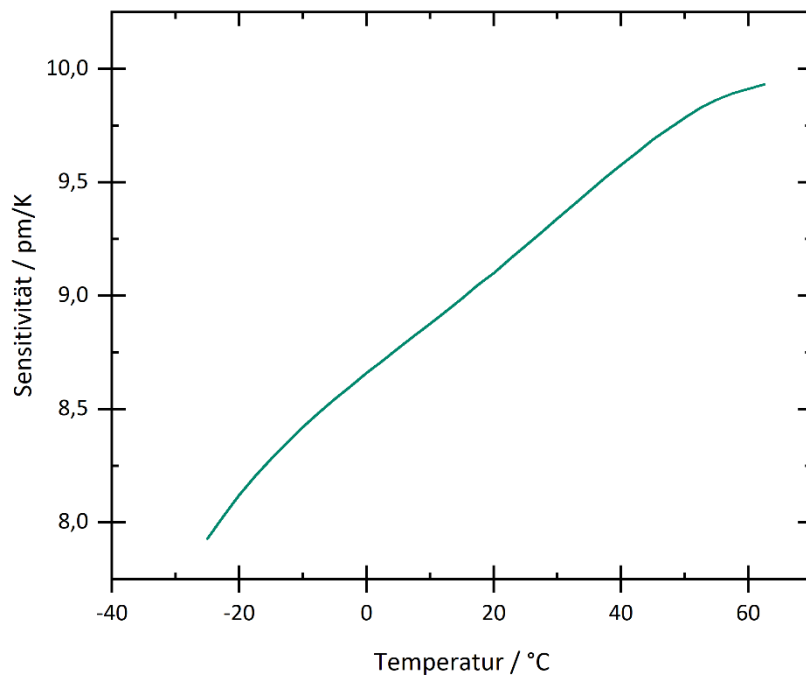


Abbildung 3.4: Sensitivität eines FBGs als Funktion der Temperatur.

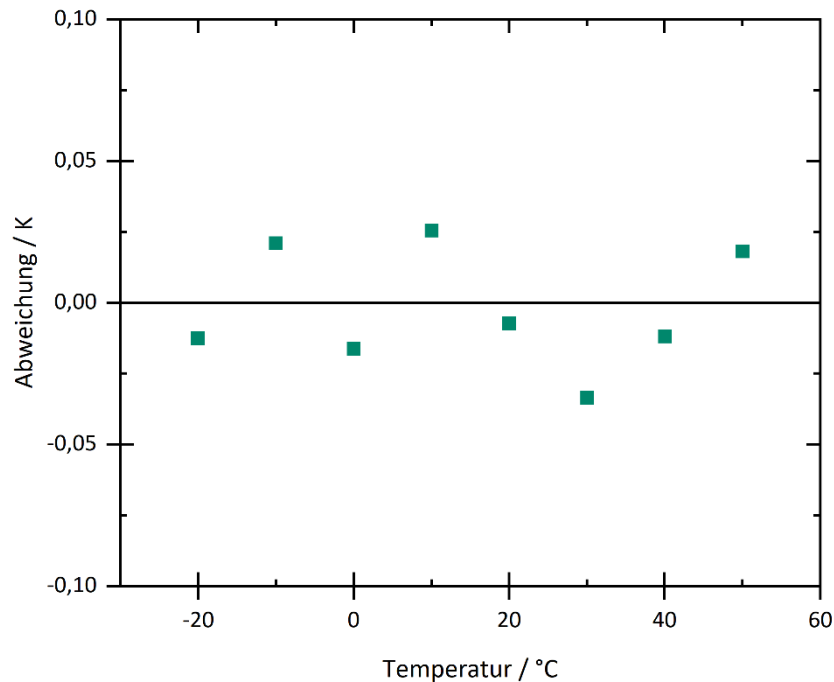


Abbildung 3.5: Abweichung der Messwerte bei absteigender Temperatur von der Kalibrierfunktion eines FBGs.

In Abbildung 3.4 ist die Sensitivität im untersuchten Temperaturbereich dargestellt. Abgebildet ist beispielhaft die Kurve für das erste Grating auf dem ersten Sensor. Die Ergebnisse lassen sich identisch auf alle weiteren Gratings übertragen. Wie zu erkennen ist, sinkt die Sensitivität im untersuchten Temperaturbereich von 9,9 auf 7,9 pm/K und damit um über 20 %. Die durchschnittliche Sensitivität der FBG-Sensoren im untersuchten Temperaturbereich beträgt 9,1 pm/K. Bei einer Unsicherheit des Braggmeters von ± 2 pm folgt entsprechend ein Unsicherheitsbeitrag von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,25$ K. Die Unsicherheit der Temperaturbestimmung des Kalibrierblocks beträgt $\pm 0,1$ K. Insgesamt ergibt sich nach einer Unsicherheitsberechnung gemäß GUM [12] eine Unsicherheit der Temperaturmessung des einzelnen FBGs von $\pm 0,33$ K mit einem Konfidenzintervall von 95 %. Im Vergleich zu einem Pt100 der Klasse AA, dessen maximale Unsicherheit im untersuchten Temperaturbereich bei $\pm 0,2$ K liegt, ist die Unsicherheit der FBGs damit $\pm 0,13$ K höher. Dieser Nachteil wird durch die potentiell hohe Anzahl an Messstellen für die Bestimmung eines Temperaturmittelwertes aber mehr als kompensiert.

Um eine mögliche Hysterese, die für polymerbeschichtete Sensoren in der Literatur bspw. von de Lima Filho et al. [5] beobachtet wurde, auszuschließen, wurde die Kalibrierprozedur bei der ersten Kalibrierung mit absteigender Temperatur in Schritten von 10 K wiederholt. In Abbildung 3.5 ist auch hier beispielhaft die Abweichung der Messpunkte des Kalibrierdurchlaufs bei absteigender Temperatur von der Kalibrierfunktion des ersten FBGs dargestellt. Wie zu erkennen ist, tritt bei der gewählten Kalibriemethodik in Kombination mit den verwendeten FBG-Sensoren keine Hysterese auf. Die maximale Abweichung zwischen Kalibrierfunktion und den Messpunkten beträgt 0,3 pm. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von 0,03 K. Somit ist es ausreichend, die Kalibrierung mit aufsteigender Temperatur durchzuführen.

4 Einsatz der FBG Sensoren in einem Windkanal

Nach der erfolgreichen Kalibrierung wurden die FBG-Sensoren in einem Windkanal zur Untersuchung von Lamellenwärmeübertragern installiert. Der Windkanal kann zur Untersuchung der Wärmeübertrager auf die gewünschte Lufteintrittstemperatur eingestellt werden. Da der Fokus des Manuskripts auf der Temperaturmessung mittels FBG-Sensoren liegt, wird an dieser Stelle nicht auf die weiteren Eigenschaften des Prüfstands eingegangen. Abbildung 4.1 zeigt den Strömungsquerschnitt des Windkanals mit den Positionen der FBGs. Der Kanal hat eine Höhe von 5 cm und eine Breite von 38 cm. Am Ein- und Austritt der Wärmeübertrager sind mit einem Abstand von 5 cm zum Wärmeübertrager jeweils vier FBG-Sensoren installiert. In der Höhe sind die Sensoren äquidistant verteilt.

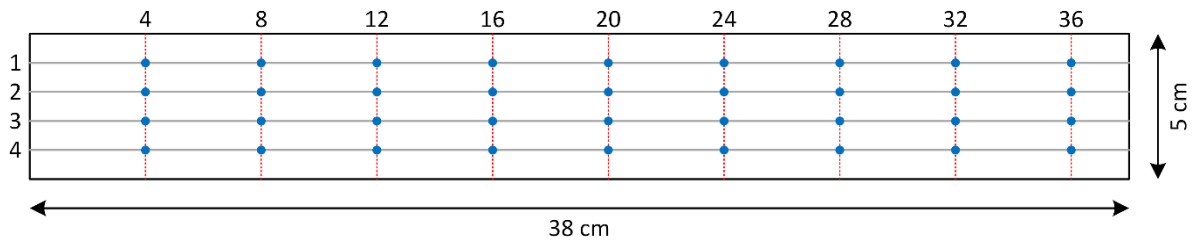


Abbildung 4.1: Positionierung der FBGs (blau) über den Strömungsquerschnitt des Windkanals in cm.

Pro Sensor befinden sich neun FBGs im Strömungsquerschnitt, die in Abbildung 4.1 in blau dargestellt sind. Außerhalb des Rahmens sind zusätzlich die exakten Positionen der FBGs als Abstand in cm beginnend in der oberen, linken Ecke des Kanals angegeben. Für die Versuche wurden die Sensoren so montiert, dass auf der rechten Seite jeweils ein Wandabstand von 4 cm zum ersten FBG vorhanden ist. Auf der linken Seite ergibt sich dementsprechend ein Abstand von 2 cm. Über den Strömungsquerschnitt verteilt befinden sich somit insgesamt 36 Messstellen in jeder Messebene.

Um die FBG-Messung zu validieren, wurden zu Beginn Messungen bei Umgebungstemperatur ohne Betrieb des Wärmeübertragers durchgeführt. Dazu wurde der Windkanal bei einem Volumenstrom von 45 m³/h auf Umgebungstemperatur temperiert. Bei diesem Volumenstrom ergibt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,66 m/s. Nach Erreichen des stationären Zustandes wurden über einen Zeitraum von einer Stunde insgesamt 720 Messwerte aufgezeichnet, aus denen anschließend der Mittelwert gebildet wurde. Abbildung 4.2 zeigt die Temperaturverteilungen am Ein- und Austritt des Wärmeübertragers. Zur Veranschaulichung der Gradienten sind die Temperaturen zusätzlich farblich illustriert. Jedes Feld entspricht dabei einer Fläche von 4 cm x 1 cm um die FBGs. Der schwarze Rahmen stellt die Wand des Windkanals dar. Wie zu erkennen ist, ergeben sich sehr homogene Temperaturfelder. Der Temperaturmittelwert aller Messstellen liegt am Eintritt bei 26,14°C und am Austritt bei 26,16°C. Die angestrebte Umgebungstemperatur von 26,19°C wurde somit sehr gut erreicht. Da die Temperaturen inner- und außerhalb des Windkanals nahezu identisch sind, gibt es in diesem Fall keinen Wärmeeintrag aus der Umgebung durch die Wand des Windkanals. Eine Temperierung des Windkanals ist allerdings trotzdem nötig, um die Temperatur im Inneren konstant zu halten, da die Abwärme des Lüfters abgeführt werden muss. Der maximale Temperaturgradient $T_{\max} - T_{\min}$ innerhalb der Eintrittsebene beträgt 0,44 K; der der Austrittsebene ist mit 0,40 K nur unwesentlich geringer. Die Gradienten liegen in einem plausiblen Bereich und sind auf die Temperierung zurückzuführen. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messebenen liegt mit nur 0,02 K mehr als eine Größenordnung unterhalb der Messunsicherheit. Dementsprechend wird durch die FBG-Sensoren kein relevanter Wärmestrom aus der Umgebung gemessen und die Validierung wird somit als erfolgreich angesehen.

T Eintritt / °C

	4	8	12	16	20	24	28	32	36
1	26,24	26,18	26,10	26,02	26,05	25,92	26,06	26,26	26,20
2	26,24	26,17	26,28	26,15	26,13	26,19	26,01	26,13	26,14
3	26,13	26,05	26,07	26,01	25,95	26,04	25,99	26,07	26,04
4	26,26	26,36	26,25	26,24	26,20	26,22	26,21	26,21	26,15

T Austritt / °C

1	25,96	26,02	26,01	26,02	26,05	26,14	26,18	26,21	26,19
2	26,10	26,10	26,08	26,11	26,15	26,18	26,21	26,20	26,17
3	26,20	26,23	26,21	26,15	26,12	26,13	26,09	26,10	26,05
4	26,24	26,26	26,33	26,36	26,23	26,27	26,27	26,22	26,16

Farbskala	
Temperaturen / °C	25 27

Abbildung 4.2: Temperaturverteilungen am Ein- und Austritt der Messstrecke bei einer Umgebungstemperatur von 26,19°C.

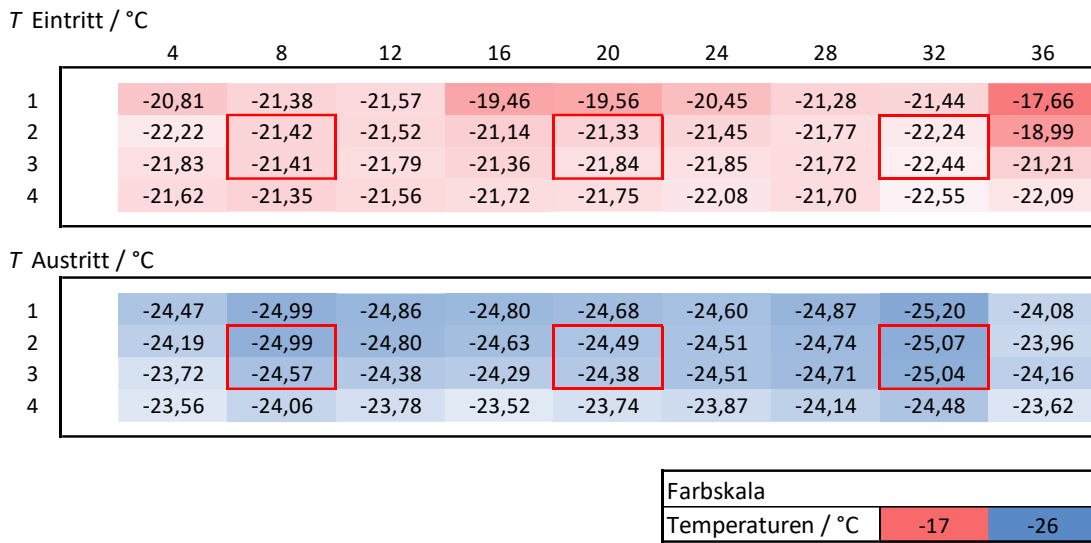


Abbildung 4.3: Temperaturverteilungen am Ein- und Austritt der Messstrecke bei Betrieb des Verdampfers.

Nach der Validierung der FBG-Messung wurde der Lamellenwärmeübertrager im Windkanal in Betrieb genommen, der im vorgestellten Fall als Verdampfer betrieben wurde. In Abbildung 4.3 sind die Temperaturverteilungen für die Messung mit Betrieb des Verdampfers dargestellt. Der Volumenstrom der Luft ist mit $45\text{m}^3/\text{h}$ identisch zur vorhergehenden Messung bei Umgebungstemperatur. Die Temperaturskala wurde im Vergleich zu dieser Messung deutlich erweitert. Es zeigt sich, dass bei der Betriebsmessung deutlich höhere Temperaturgradienten innerhalb der Ebenen auftreten. In der Eintrittsebene ergibt sich bei einer mittleren Temperatur von $-21,32^\circ\text{C}$ ein maximaler Gradient von $4,88\text{ K}$. Der Temperaturgradient in der Austrittsebene ist mit $1,68\text{ K}$ deutlich niedriger. Der Mittelwert liegt hier bei $-24,40^\circ\text{C}$. Der hohe Gradient in der Eintrittsebene ist auf eine zu geringe Durchmischung und Homogenisierung der eintretenden Luft nach der Temperierung zurückzuführen. Als Ergebnis aus den Messungen werden hier Maßnahmen für eine bessere Durchmischung der Luft vor dem Eintritt in den Messbereich ergriffen.

Durch die hohe Ortsauflösung der FBG-Sensoren ist es möglich, Temperaturgradienten innerhalb des Strömungsquerschnitts messtechnisch zu erfassen. Um den Effekt einer zu geringen Ortsauflösung der Temperaturmessung zu verdeutlichen, wurden zusätzlich die Mittelwerte der in Abbildung 4.3 rot umrandeten Sensoren gebildet. Dies soll eine Temperaturmessung bspw. mit drei Widerstandsthermometern simulieren. Tabelle 4.1 zeigt den Vergleich der Mittelwerte von allen und den rot umrandeten FBG-Sensoren. Die Mittelwerte weichen in der Eintrittsebene um $0,45\text{ K}$ und in der Austrittsebene um $0,35\text{ K}$ voneinander ab. Es zeigt sich, dass die Mittelwerte aus den rot umrandeten Sensoren dabei jeweils geringer sind. Der Einfluss der kälteren Strömung im Zentrum würde hier durch die geringe Ortsauflösung überschätzt. Für die Berechnung der Leistung des Wärmeübertrager ist insbesondere die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittsebene von Interesse. Auch hier ergibt sich eine Differenz von $0,1\text{ K}$ zwischen den verschiedenen Mittelwertbildungen. Da die Temperaturdifferenz linear in die Berechnung des Wärmestroms eingeht, führt diese Abweichung bei der geringen Temperaturdifferenz von $2,98\text{ K}$ somit auch zu einer Unterschätzung des Wärmestroms um ca. 3% .

Tabelle 4.1: Vergleich verschiedener Temperaturmittelwerte

Berücksichtigte Sensoren	$T_{m,\text{ein}}$ °C	$T_{m,\text{aus}}$ °C	ΔT K
Alle FBGs	-21,32	-24,40	3,08
Rot umrandete FBGs	-21,77	-24,75	2,98

Darüber hinaus reduziert sich die Unsicherheit des Temperaturmittelwertes durch die hohe Messstellenanzahl deutlich. Ein aus der Messung mit drei Pt100 Widerstandsthermometern bestimmter Mittelwert hat eine Unsicherheit von $\pm 0,12$ K. Der Mittelwert der FBG-Messung mit 36 Messstellen weist lediglich eine Unsicherheit von $\pm 0,06$ K auf. Trotz der höheren Unsicherheit der Einzelmessstelle resultiert durch die hohe Messstellenanzahl somit eine nur halb so große Unsicherheit des Mittelwertes. Die Ergebnisse zeigen, dass es durch den Einsatz der FBG-Sensoren möglich ist, die Temperaturgradienten innerhalb der Luftströmung im Windkanal aufzulösen. Die hohe Ortsauflösung ermöglicht es außerdem, die Temperaturmittelwerte mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen.

Schlussfolgerungen

FBG-Sensoren stellen aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlicher Temperaturmesstechnik eine sehr gute Alternative für die Bestimmung von Temperaturverteilungen in Luftströmungen dar. Die vorgestellte Kalibriereinrichtung und -methodik erlauben es die FBG-Sensoren im erforderlichen Temperaturbereich zwischen -25 und 60°C zu kalibrieren. Der Temperaturbereich der Kalibrierung lässt sich leicht durch die Wahl eines anderen Temperierfluids erweitern, sodass auch Kalibrierung bei tieferen Temperaturen problemlos möglich ist. Bei der aufgezeigten Kalibriermethodik traten in Kombination mit den verwendeten FBG-Sensoren keine Hystereseeffekte auf.

Anhand erster Messergebnisse der FBG-Sensoren in einem Windkanal zur Untersuchung von Lamellenwärmeübertragern konnte die Notwendigkeit einer ausreichenden Ortsauflösung bei der Temperaturmessung in Luftströmungen aufgezeigt werden. Diese lässt sich mit Hilfe der FBG-Sensoren mit einem deutlich geringeren Installationsaufwand im Vergleich zu herkömmlicher Messtechnik erreichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Hill, K. O., Meltz, G., Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview, *Journal of Lightwave Technology* 15 (1997), 8, 1263-1276
- [2] Bernhard, F., *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014
- [3] Bhaskar, C. V. N., Pal, S., Pattnaik, P. K., Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement, *Results in Optics* 5 (2021), 100130
- [4] Mahakud, R., Kumar, J., Prakash, O., Dixit, S. K., Study of the nonuniform behavior of temperature sensitivity in bare and embedded fiber Bragg gratings: experimental results and analysis, *Applied Optics* 52 (2013), 31, 7570-7579
- [5] de Lima Filho, E. S., Baiad, M. D., Gagné, M., Kashyap, R., Fiber Bragg gratings for low-temperature measurement, *Optics express* 22 (2014), 22, 27681-27694
- [6] Lupi, C., Felli, F., Brotzu, A., Caponero, M. A., Paolozzi, A., Improving FBG Sensor Sensitivity at Cryogenic Temperature by Metal Coating, *IEEE Sensors Journal* 8 (2028), 7, 1299-1305
- [7] Wang, Y.-L., Tu, Y., Tu, S.-T., Development of Highly-Sensitive and Reliable Fiber Bragg Grating Temperature Sensors With Gradient Metallic Coatings for Cryogenic Temperature Applications, *IEEE Sensors Journal* 21 (2021), 4, 4652-4663
- [8] DIN EN 60751:2009-05, Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC_60751:2008), Deutsche Fassung EN_60751:2008, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [9] LabVIEW 2018, National Instruments, Version 18.0, Software
- [10] OriginPro 2021, OriginLab Corporation, Version 2021 (9.8), Software
- [11] Chiuchiolo, A., Palmieri, L., Consales, M., Giordano, M., Borriello, A., Bajas, H., Galtarossa, A., Bajko, M., Cusano, A., Cryogenic-temperature profiling of high-power superconducting lines using local and distributed optical-fiber sensors, *Optics letters* 40 (2015), 19, 4424-4427
- [12] ISO/IEC Guide 98-3, Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections – Evaluation of measurement data), Joint Committee for Guides in Metrology, 2008