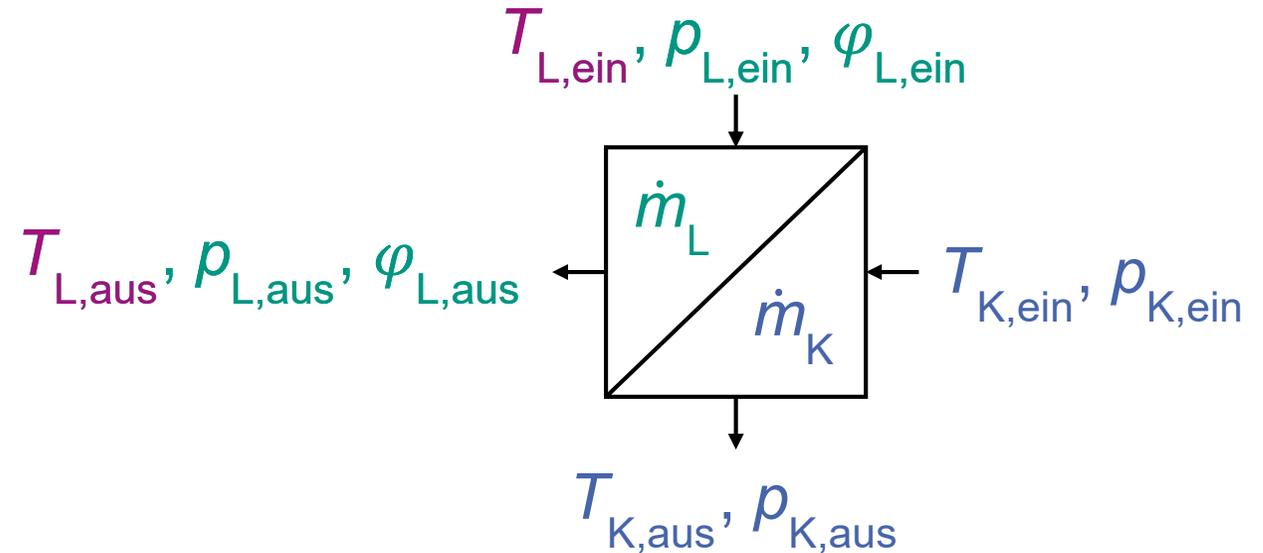


Einsatz von faseroptischen Sensoren in der Kältetechnik

Bestimmung von Temperaturverteilungen in Luftströmungen

M. Dirks, S. Grohmann / DKV-Tagung Magdeburg / 17.11.2022

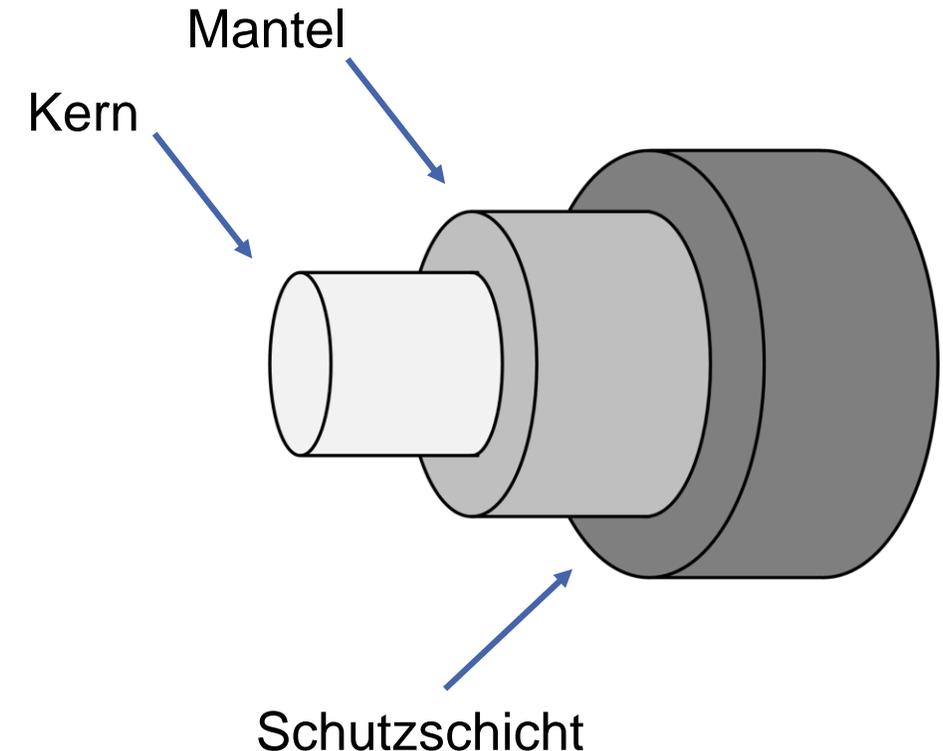
Motivation



- Ganzheitliche energetische Bewertung von Lamellenwärmeübertragern erfordert genaue Kenntnis der luft- und kältemittelseitigen Zustandsgrößen
 - Herausforderung insbesondere die Bestimmung der über den Strömungsquerschnitt gemittelten Temperaturen auf der Luftseite
- ➔ Einsatz von Faser-Bragg-Gitter(FBG)-Sensoren

Aufbau und Vorteile von FBG-Sensoren

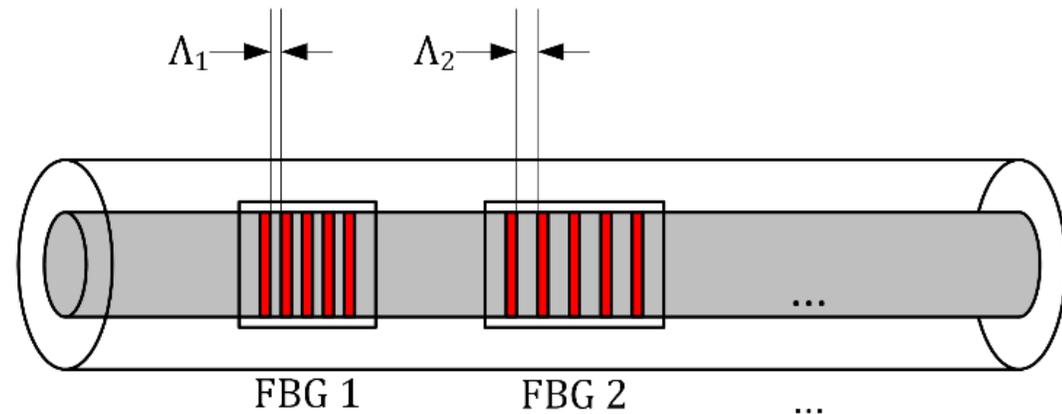
- FBG-Sensoren zählen zu den faseroptischen Sensoren
- Dreischichtiger Aufbau:
 - Kern dient zur Übertragung des Lichts
 - Mantel reduziert Übertragungsverlust
 - Schutzschicht zu Abschirmung nach außen
- Vorteile von FBG-Sensoren:
 - Hohe Messstellenanzahl auf einem Sensor realisierbar
 - Geringer Verdrahtungsaufwand
 - Geringer Wärmeeintrag
 - Sensorlänge quasi unbeschränkt



Funktionsprinzip von FBG-Sensoren

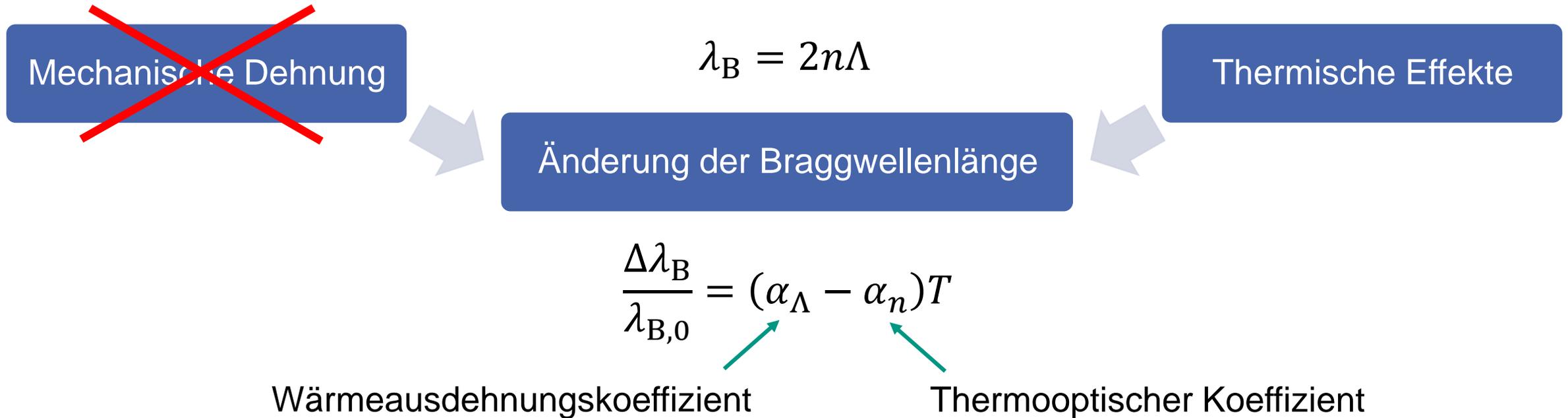


Braggmeter



$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

Temperaturmessung mittels FBG-Sensoren



- Gemessen wird Änderung der Braggwellenlänge
- Für Temperaturmessung muss mechanische Dehnung verhindert werden
- Änderung des Brechungsindexes überwiegt
- Geeignete Beschichtungen können die thermische Dehnung erhöhen [1]

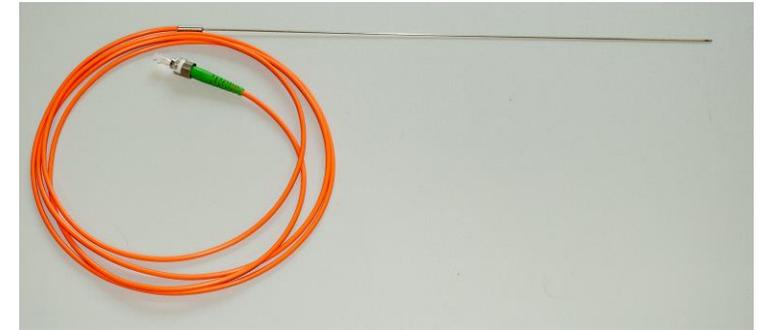
Messkette FBG-Sensoren



Messrechner mit
z.B. LabVIEW®

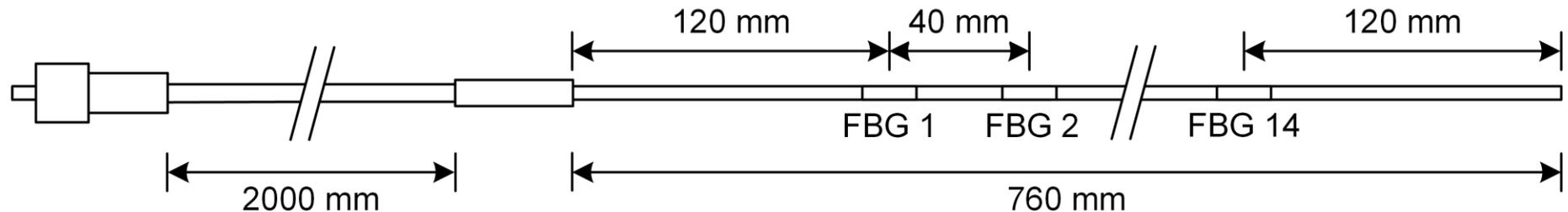


Braggmeter [2]



FBG-Sensoren

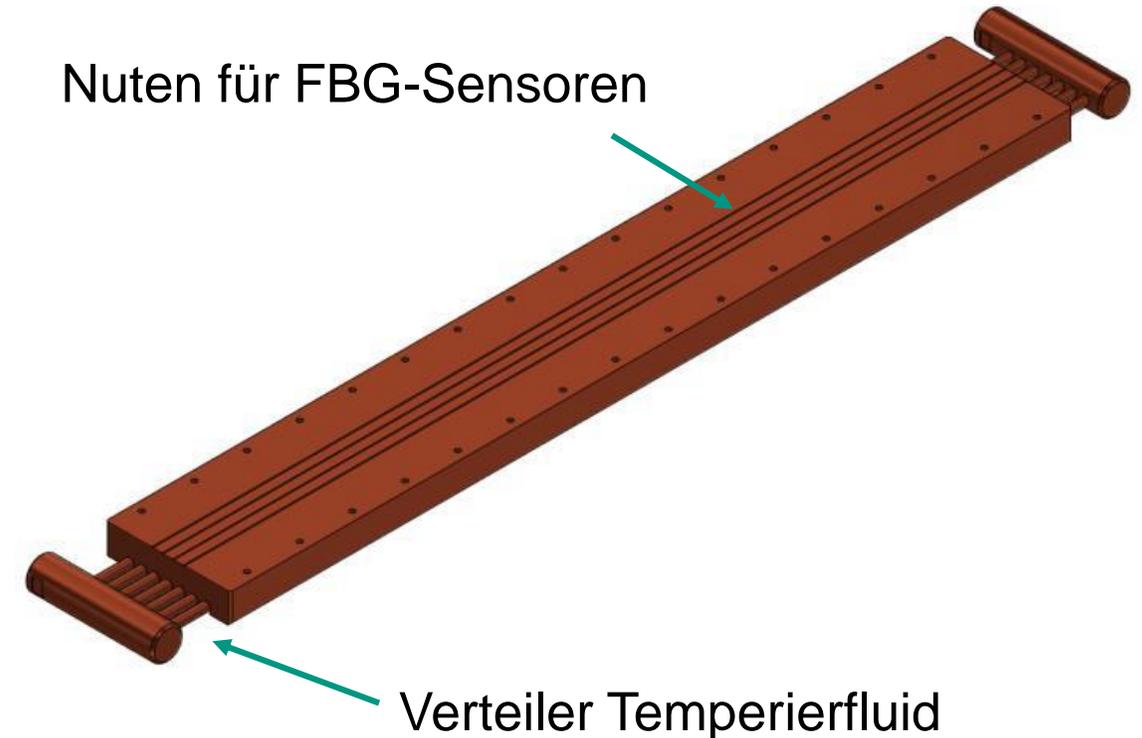
Konfiguration der verwendeten FBG-Sensoren:



Kalibrierung erforderlich um $\lambda_B = f(T)$ zu erhalten

Kalibriereinrichtung

- Kalibriereinrichtung bestehend aus zwei Kupferblöcken, die spiegelverkehrt aufgebaut sind
- Gleichzeitige Kalibrierung von bis zu vier FBG-Sensoren
- Temperierung über Umwälzthermostat im Temperaturbereich zwischen -30 und 60°C möglich
- Temperierfluid fließt in den beiden Blöcken in entgegengesetzte Richtungen zur Optimierung der Temperaturhomogenität
- 15 Pt100-Widerstandsthermometer Klasse AA [3] als Temperaturreferenz



Aufbau Kalibriereinrichtung

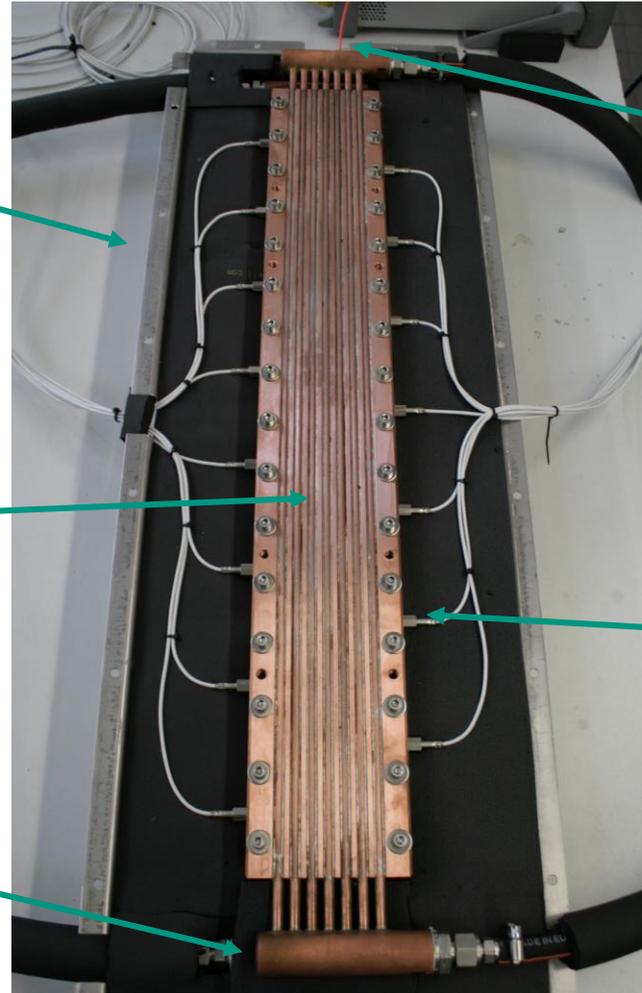
Gehäuse mit 64 mm Armaflex®
Wärmedämmung

FBG-Sensor

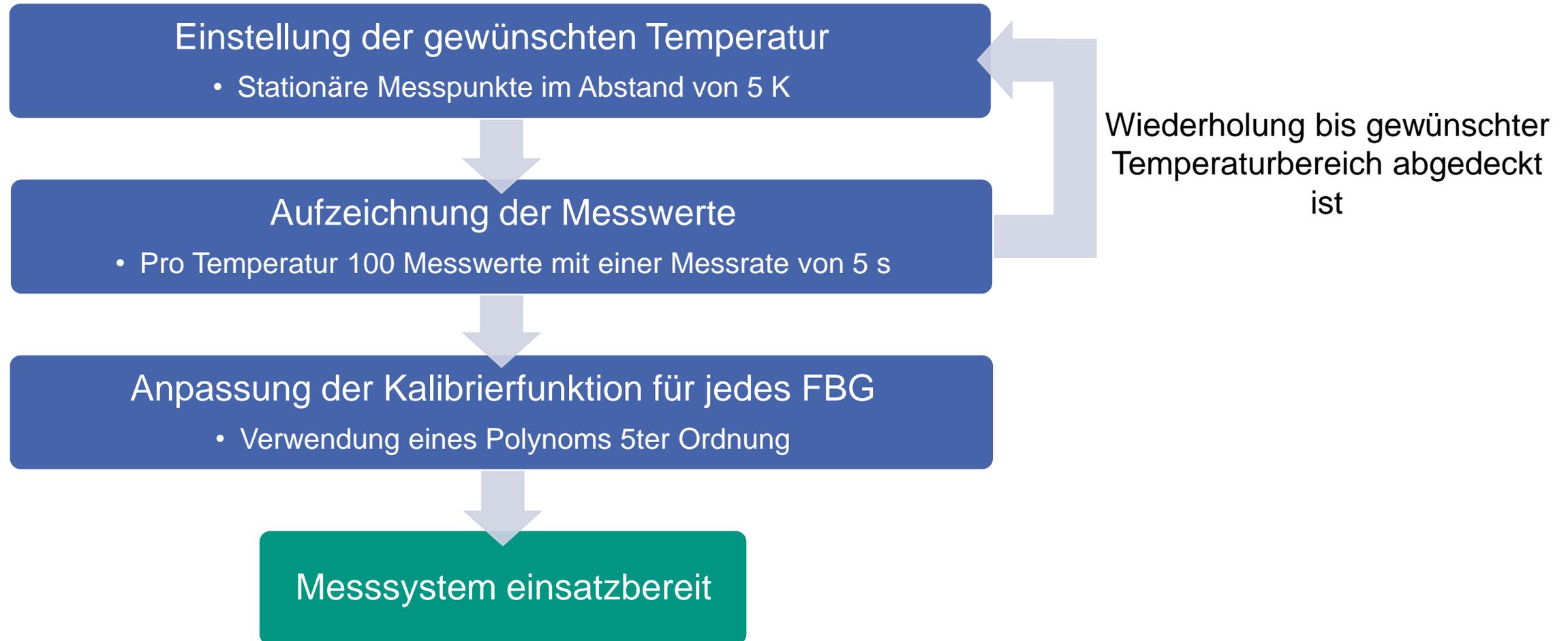
Eingelötete Rohre
Temperierung

Pt100-Referenzsensoren

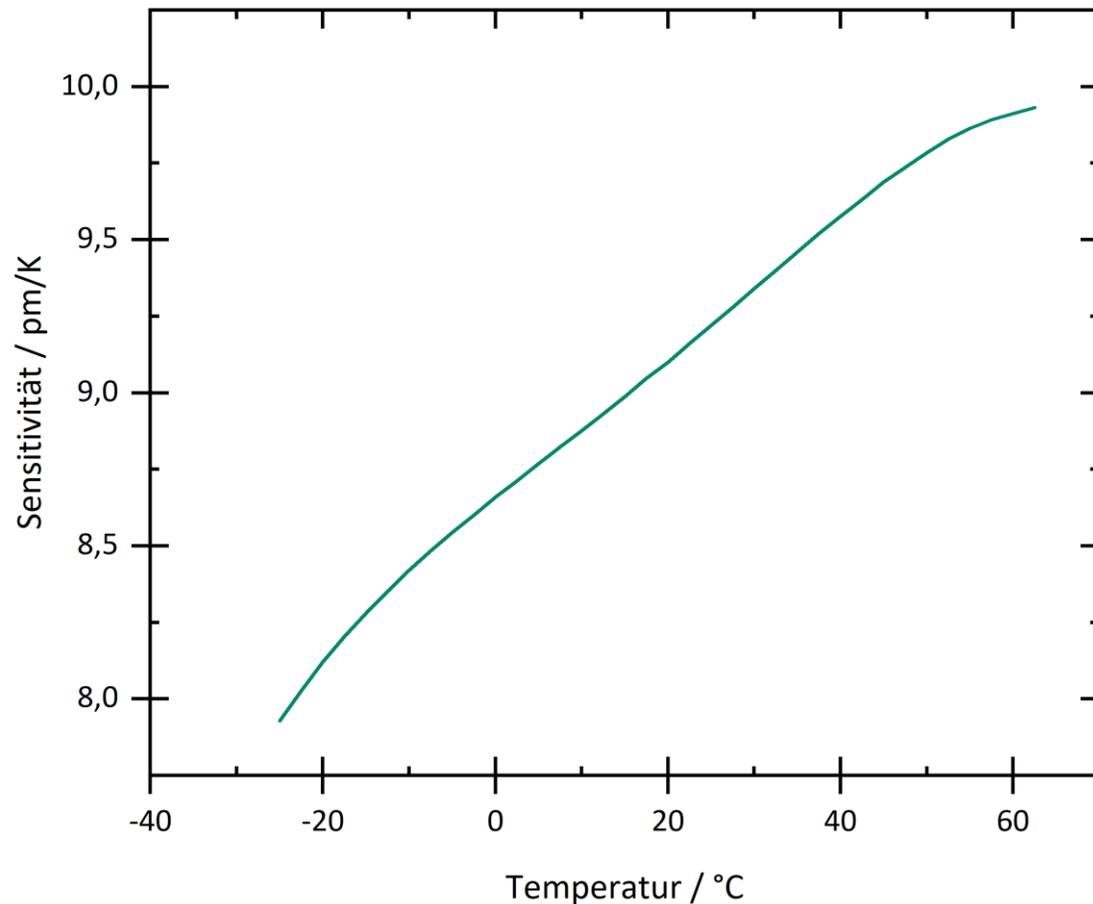
Verteiler Temperierfluid



Ablauf Kalibrierung



Ergebnis der Kalibrierung



- Durchschnittliche Sensitivität liegt im kalibrierten Temperaturbereich bei 9,1 pm/K

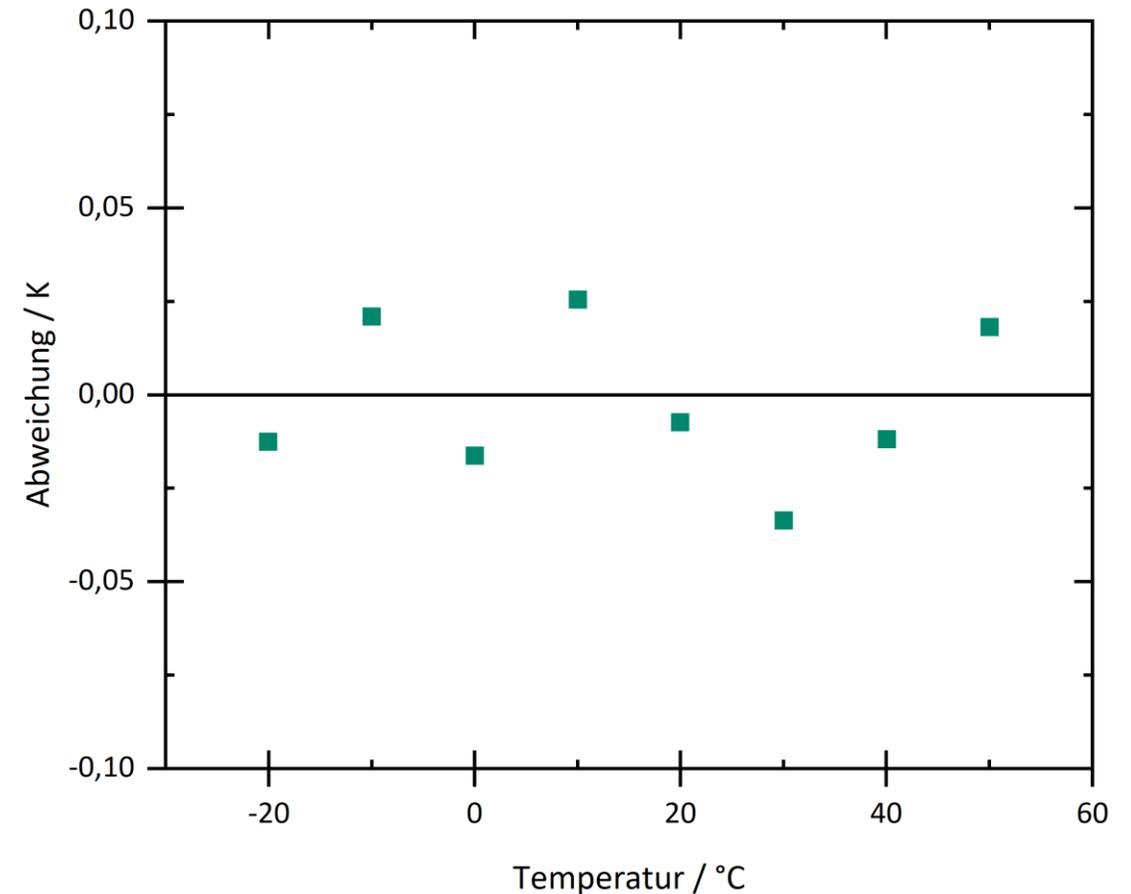
Unsicherheitsbeiträge

Braggmeter	$\pm 0,25$ K
------------	--------------

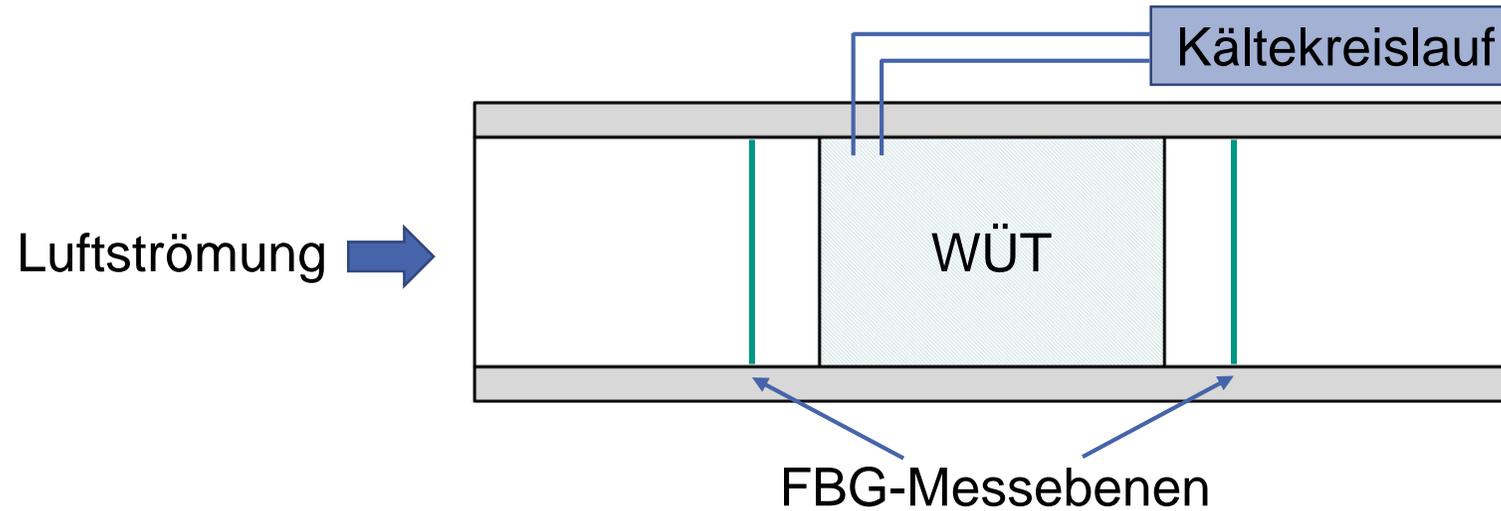
- Unsicherheit der FBG-Sensoren: $\pm 0,33$ K (Konfidenzintervall 95 % gemäß GUM[4])
- Unsicherheit der Einzelmessstelle
- Aufgrund hoher Messstellenanzahl wirkt sich diese bei Bestimmung von Temperaturmittelwerten nur gering aus

Untersuchung von Hystereseeffekten

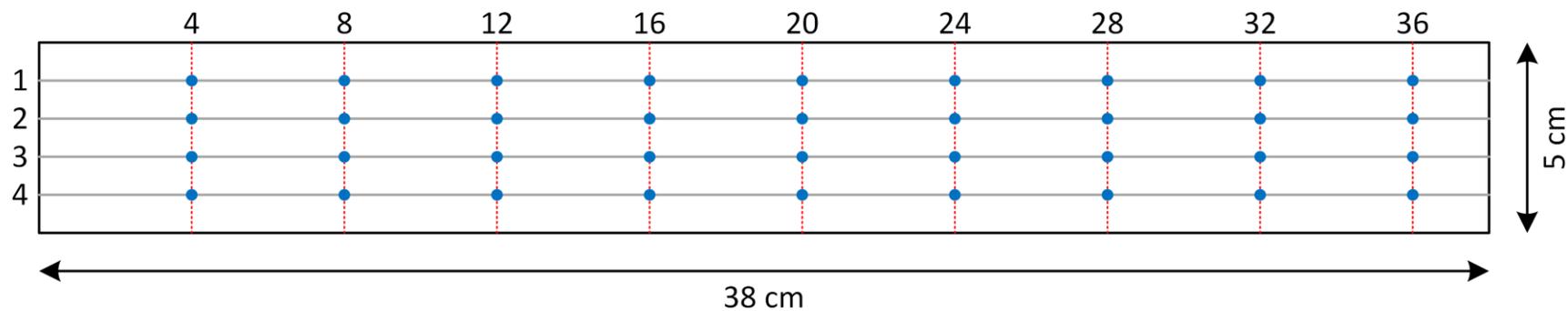
- Aus der Literatur insbesondere für polymerbeschichtete Sensoren Hysterese von mehreren Kelvin bekannt [5]
 - Zur Überprüfung wurde die Kalibrierung mit absteigender Temperatur wiederholt
 - Maximale Abweichung von 0,03 K zur Kalibrierfunktion im Bereich der Unsicherheit der FBG-Sensoren
 - Messwerte streuen zufällig um Kalibrierfunktion
- ➔ Mit vorgestellter Kalibriermethodik keine Hysterese zu beobachten



Messaufbau Windkanal



Anordnung der Messstellen:



Temperaturfelder Messung bei T_U

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

$$T_M = 26,14^\circ\text{C}$$

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

$$T_M = 26,16^\circ\text{C}$$

Randbedingungen: $T_U = 26,19^\circ\text{C}$
 $v_L = 0,66 \text{ m/s}$

Farbskala		
Temperaturen / °C	25	27

 Validierung der FBG-Messtechnik im Windkanal erfolgreich

Temperaturfelder mit Betrieb WÜT

T Eintritt / °C

	4	8	12	16	20	24	28	32	36
1	-20,81	-21,38	-21,57	-19,46	-19,56	-20,45	-21,28	-21,44	-17,66
2	-22,22	-21,42	-21,52	-21,14	-21,33	-21,45	-21,77	-22,24	-18,99
3	-21,83	-21,41	-21,79	-21,36	-21,84	-21,85	-21,72	-22,44	-21,21
4	-21,62	-21,35	-21,56	-21,72	-21,75	-22,08	-21,70	-22,55	-22,09

$$T_M = -21,32^\circ\text{C}$$

T Austritt / °C

1	-24,47	-24,99	-24,86	-24,80	-24,68	-24,60	-24,87	-25,20	-24,08
2	-24,19	-24,99	-24,80	-24,63	-24,49	-24,51	-24,74	-25,07	-23,96
3	-23,72	-24,57	-24,38	-24,29	-24,38	-24,51	-24,71	-25,04	-24,16
4	-23,56	-24,06	-23,78	-23,52	-23,74	-23,87	-24,14	-24,48	-23,62

$$T_M = -24,40^\circ\text{C}$$

Randbedingungen: $T_U = 19,97^\circ\text{C}$
 $v_L = 0,66 \text{ m/s}$

Farbskala	
Temperaturen / °C	-17 -26

 Temperaturfelder zeigen deutliche Temperaturgradienten über den Strömungsquerschnitt

Auswirkungen der Ortsauflösung

Gedankenexperiment: Vergleich der FBG-Messung mit drei theor. Pt100-Temperatursensoren

Temperaturfelder mit Betrieb WÜT

T Eintritt / °C

	4	8	12	16	20	24	28	32	36
1	-20,81	-21,38	-21,57	-19,46	-19,56	-20,45	-21,28	-21,44	-17,66
2	-22,22	-21,42	-21,52	-21,14	-21,33	-21,45	-21,77	-22,24	-18,99
3	-21,83	-21,41	-21,79	-21,36	-21,84	-21,85	-21,72	-22,44	-21,21
4	-21,62	-21,35	-21,56	-21,72	-21,75	-22,08	-21,70	-22,55	-22,09

$$T_M = -21,32^\circ\text{C}$$

T Austritt / °C

1	-24,47	-24,99	-24,86	-24,80	-24,68	-24,60	-24,87	-25,20	-24,08
2	-24,19	-24,99	-24,80	-24,63	-24,49	-24,51	-24,74	-25,07	-23,96
3	-23,72	-24,57	-24,38	-24,29	-24,38	-24,51	-24,71	-25,04	-24,16
4	-23,56	-24,06	-23,78	-23,52	-23,74	-23,87	-24,14	-24,48	-23,62

$$T_M = -24,40^\circ\text{C}$$

Randbedingungen: $T_U = 19,97^\circ\text{C}$
 $v_L = 0,66 \text{ m/s}$

Farbskala	
Temperaturen / °C	-17 -26

➔ Temperaturfelder zeigen deutliche Temperaturgradienten über den Strömungsquerschnitt

Auswirkungen der Ortsauflösung

Gedankenexperiment: Vergleich der FBG-Messung mit drei theor. Pt100-Temperatursensoren

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



Differenz von 0,1 K



Unterschätzung des luftseitigen Wärmestroms von 3%

- Zu geringe Ortsauflösung der Temperaturmessung führt zu systematischen Messfehlern
- Wirken sich direkt auf Bestimmung des Wärmestroms aus
- ➔ **FBG-Sensoren ermöglichen Temperaturmessung in Luftströmungen mit ausreichender Ortsauflösung**

Zusammenfassung

- FBG-Sensoren ermöglichen Messung von Temperaturfeldern in Luftströmungen mit:
 - hoher Ortsauflösung
 - geringem Verdrahtungsaufwand
 - geringem Wärmeeintrag durch das Messsystem
- Vorgestellte Kalibriereinrichtung ermöglicht Kalibrierung der FBG-Sensoren im gewünschten Temperaturbereich zwischen -30 und 60°C
- Erste Messungen in einem Windkanal zeigen, dass eine hohe Ortsauflösung erforderlich ist, um Temperaturgradienten in der Strömung aufzulösen und so die zielgerichtete energetische Optimierung von Wärmeübertragern zu ermöglichen

Eigenschaften von FBG-Sensoren bieten signifikante Vorteile für den Einsatz in der Kälte- und Kryotechnik

- [1] 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
- [2] HBM, [https://www.hbm.com/de/4604/fs22-industrial-braggmeter-optischer-interrogator/?product_type_no= FS22:%20Industrial%20BraggMETER](https://www.hbm.com/de/4604/fs22-industrial-braggmeter-optischer-interrogator/?product_type_no=FS22:%20Industrial%20BraggMETER), Zuletzt geprüft am 15. November 2022
- [3] DIN EN 60751:2009-05, Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC_60751:2008), Deutsche Fassung EN_60751:2008, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [4] 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
- [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