

Driftanalyse und Stabilisierung eines Faser-Bragg-Gitter-Interrogators

M.Sc. Marvin Friedemann, Dr.-Ing. Sebastian Voigt und Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Mehner

DGFT-Online-Workshop „Neueste Entwicklungen in der Sensortechnik“ 2020

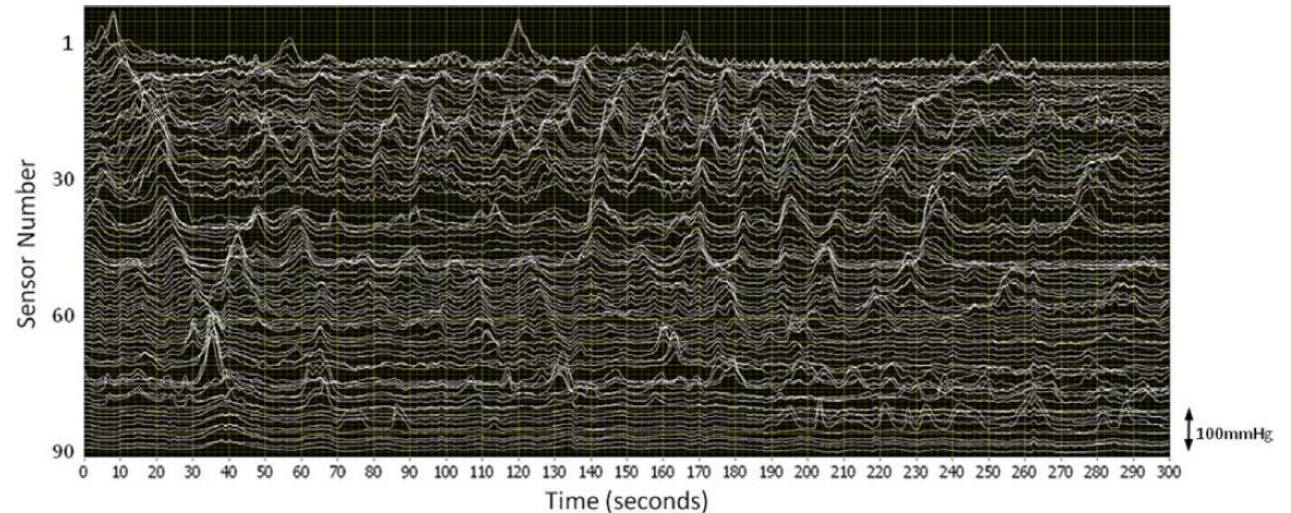
Kontakt: marvin.friedemann@etit.tu-chemnitz.de

Gliederung

- Einleitung
 - Motivation
 - Grundlagen & Sensorprinzip von FBGs
 - Komponenten des Interrogators
- Variation äußerer Einflüsse und deren Auswirkung
 - Betriebstemperatur
 - Luftdruck
 - Position des Interrogators
- Kompensationsstrategien
- Zusammenfassung

Einleitung: Motivation

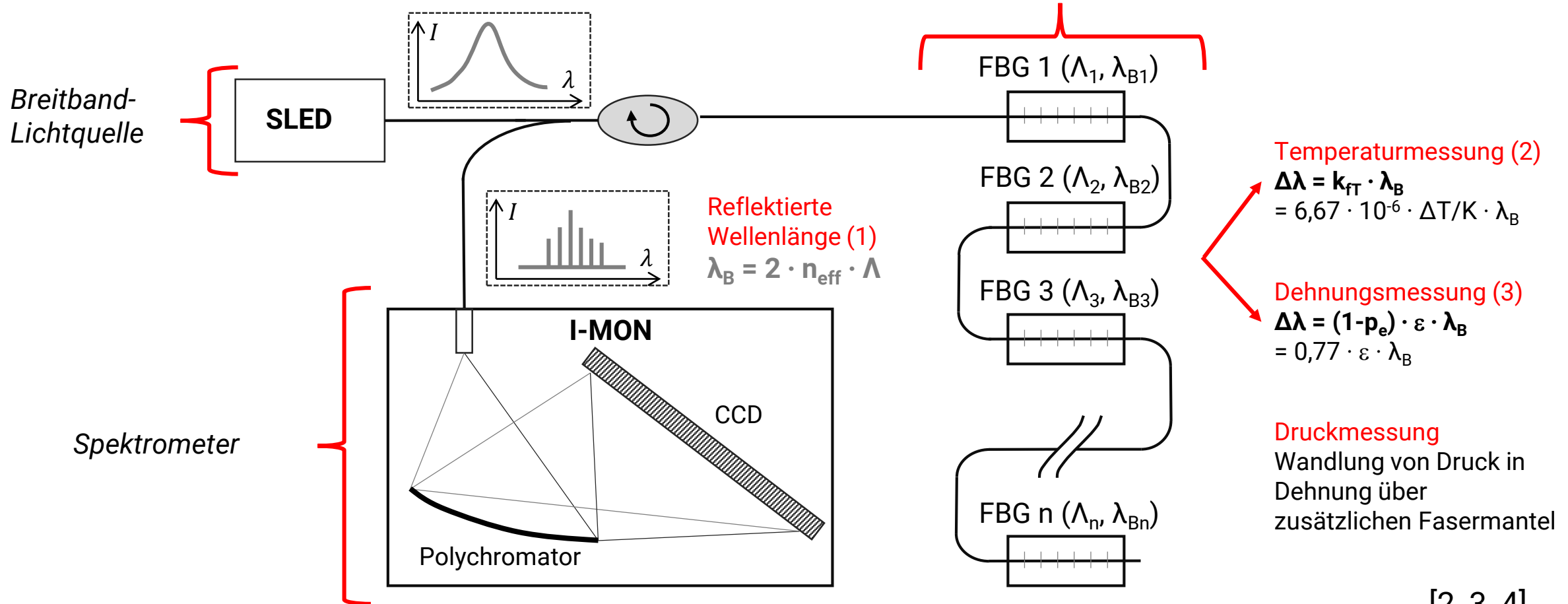
- Hohes Potential faseroptischer Sensoren für medizinische Anwendungen
- Insbesondere FBGs:
 - Biokompatibilität
 - Linearität
 - Großer Messbereich
 - Multiplexfähigkeit
 - Vollständige EMV



Manometrie-Katheter mit vielen FBG-Messstellen für Darm-Aktivität bzw. -Peristaltik und resultierende Signalkurven von Arkwright et al. [1]

Einleitung: Grundlagen & Sensorprinzip von FBGs

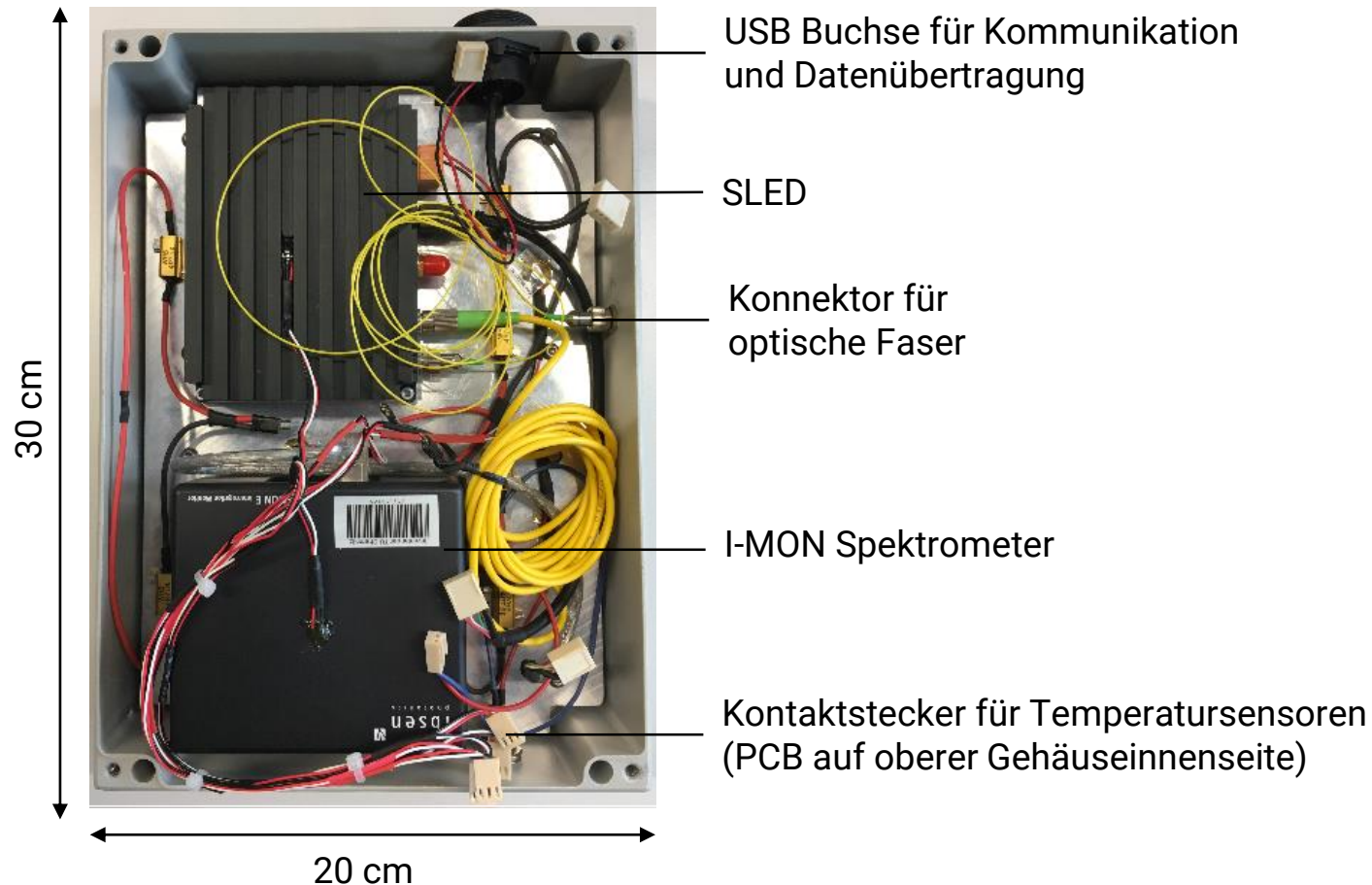
Optische Faser mit FBG (Vielzahl möglich)



[2, 3, 4]

Einleitung: Komponenten des Interrogators

Innenseite des Interrogator-Gehäuses:



Weitere Komponenten:

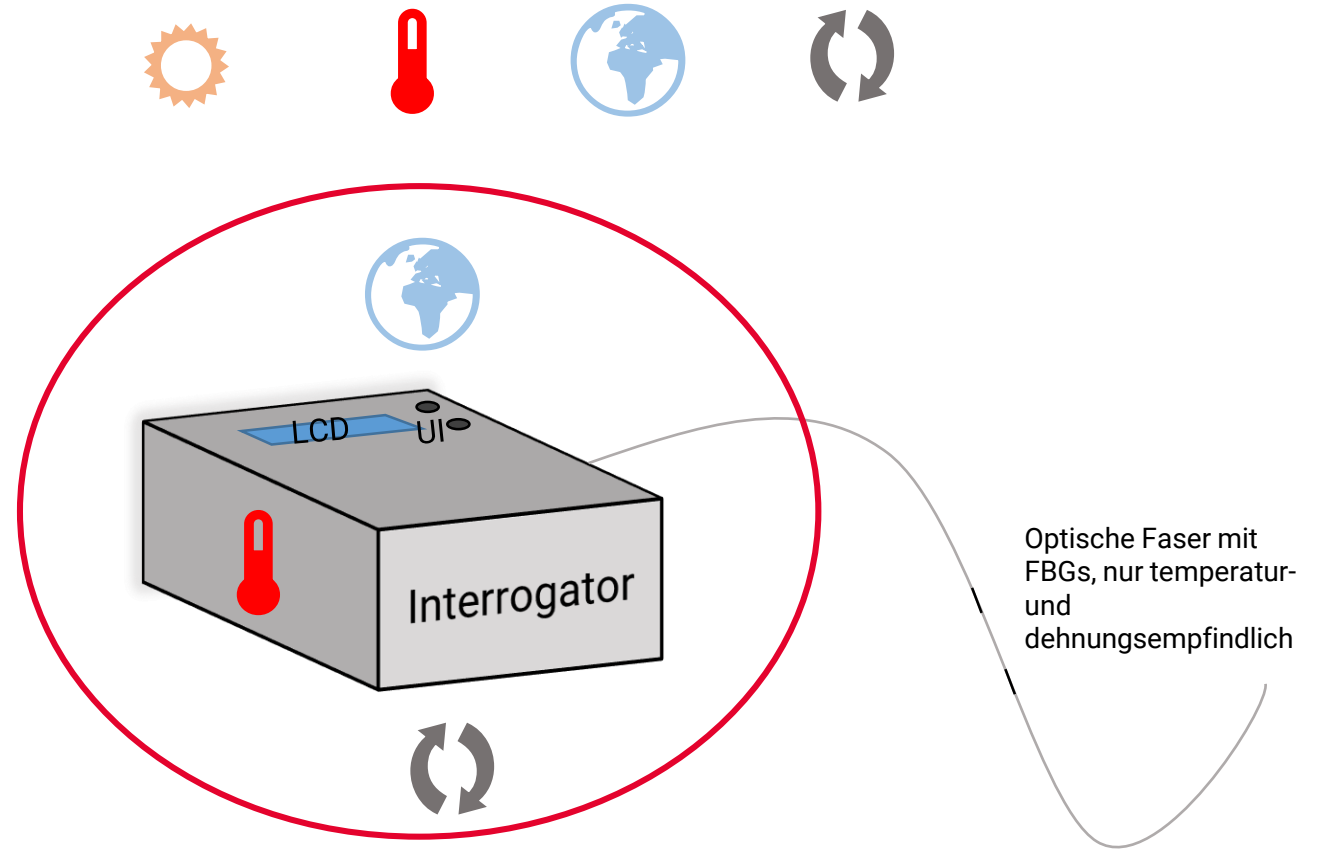
- **7 Temperatursensoren**
- **1 Barometrischer Luftdrucksensor**
- **1 Accelerometer**
- USB-hub
- μ C
- UI
- LCD

Externes Messequipment:

- **Pt1000 Temperatursensor für Umgebungstemperatur der Faser**

Variation äußerer Einflüsse

- Raumtemperatur ☀️
 - Kompensierbar durch Temperaturmessung und Gleichung (2) ✓
- Betriebstemperatur des Interrogators 🌡️
- Luftdruck 🌐
- Positionierung ↻️



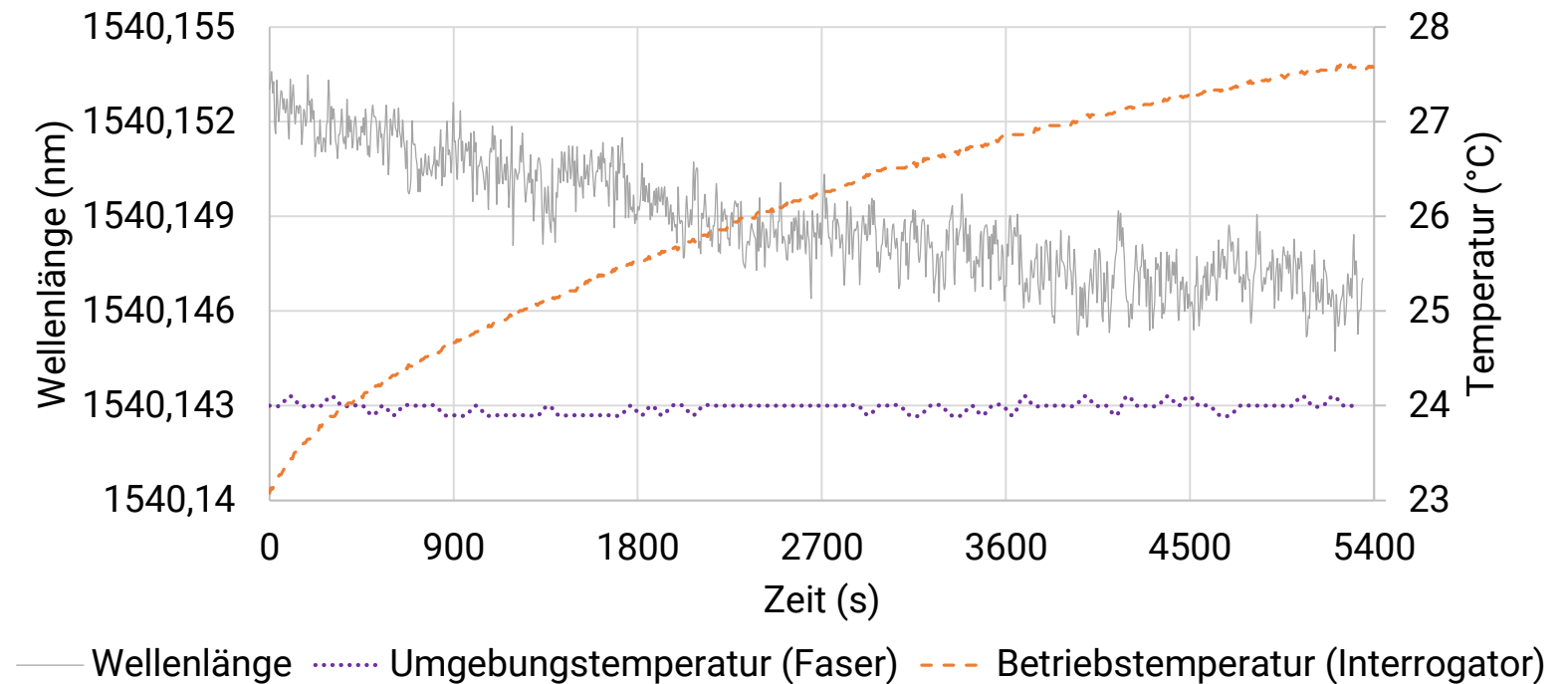
Interrogator: Reaktion auf äußere Einflüsse zu untersuchen

FBG: Reaktion auf äußere Einflüsse bekannt und beschreibbar

Wellenlängendrift in Abhängigkeit der Betriebstemperatur

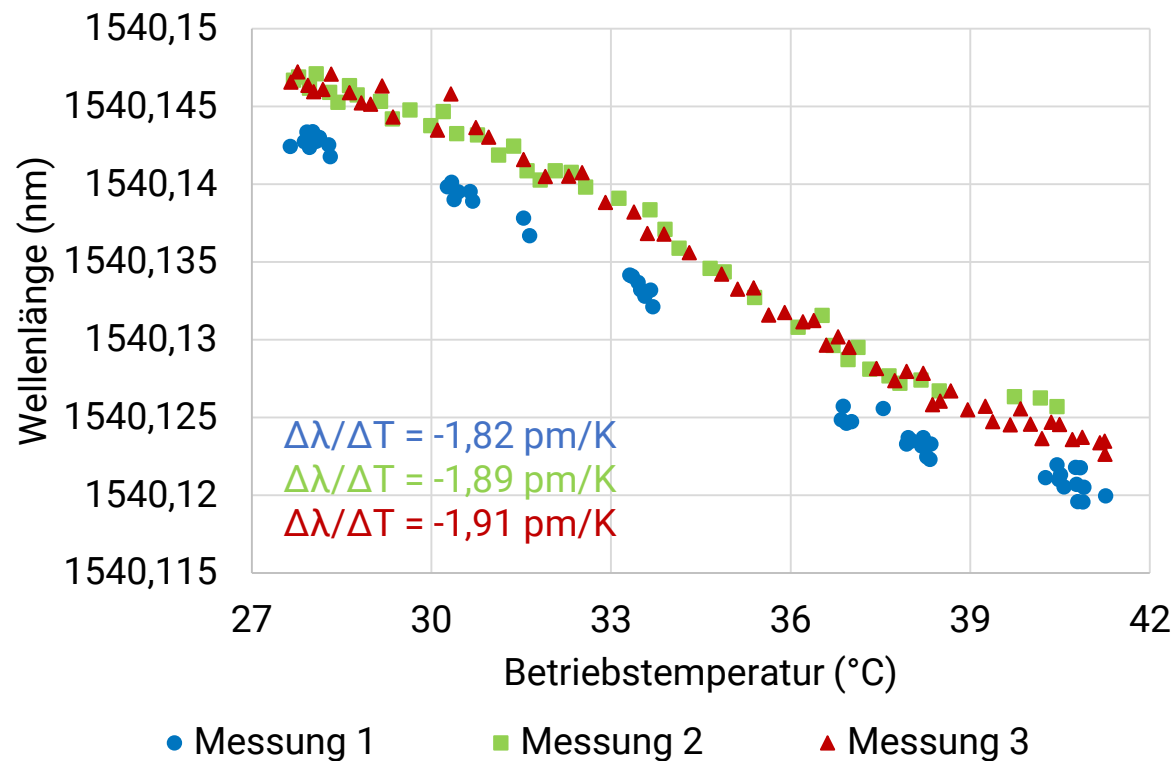
- Dehnungsfreies FBG, kompensierte Umgebungstemperatur
- Startvorgang des Messsystems: Temperatur im Gehäuse (Betriebstemperatur) steigt stetig an
- Drift in reflektierter Wellenlänge resultierend aus Anstieg der Betriebstemperatur

Zeitlicher Verlauf von Wellenlänge und Temperaturen (Startvorgang)



Quantifizierung der Wellenlängendrift durch Betriebstemperatur

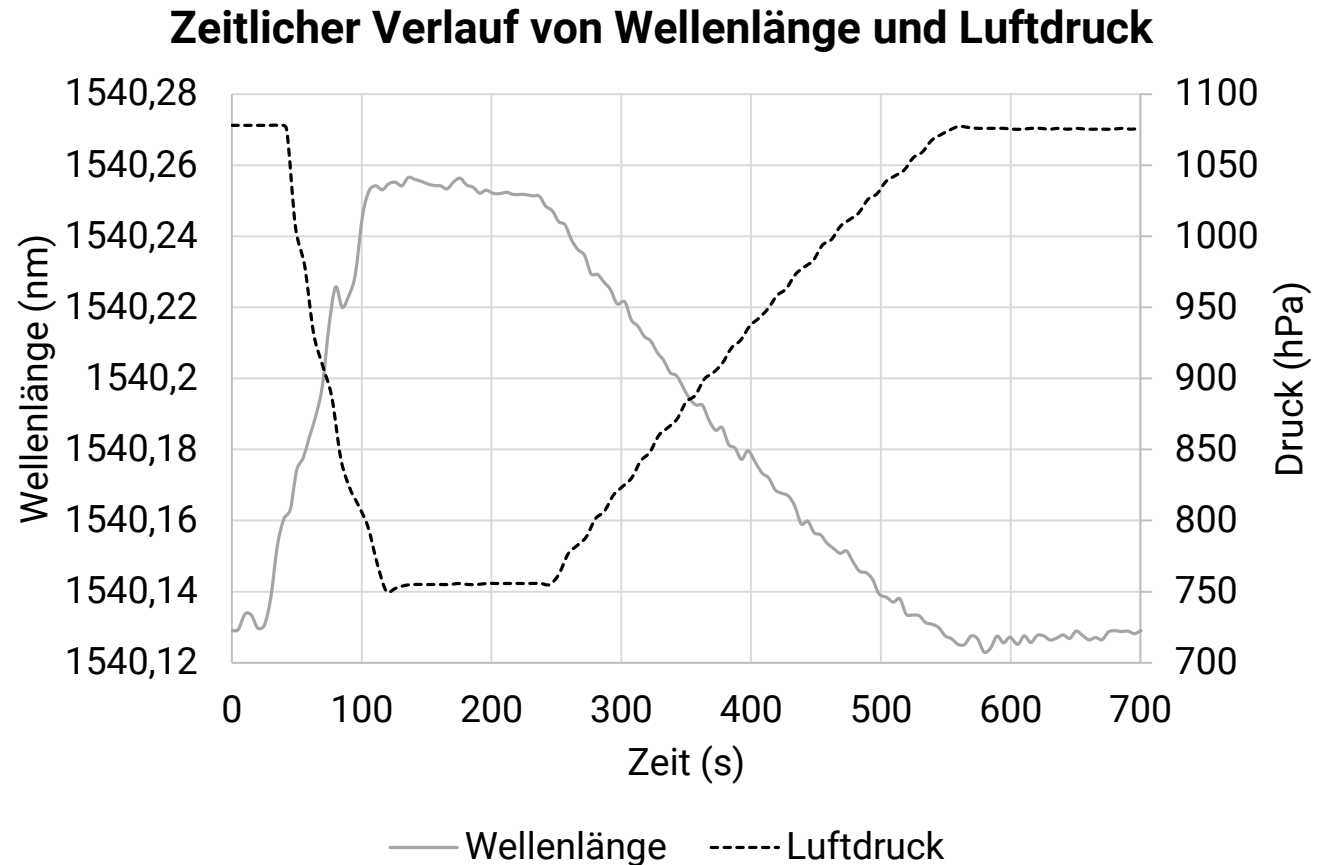
Wellenlänge vs. Betriebstemperatur



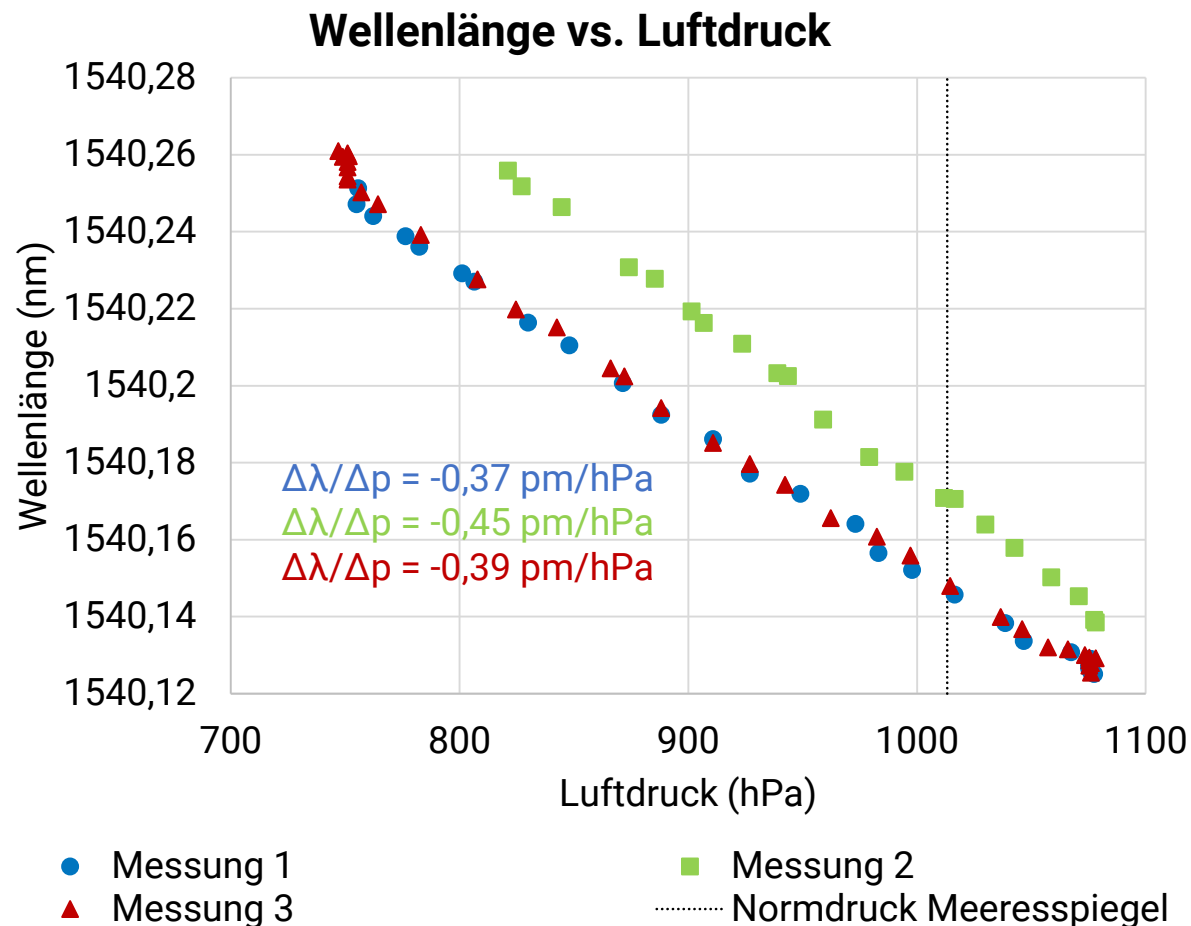
- Belastung des Interrogators mit Temperaturrampen ΔT_d
- Kompensation von Schwankungen der Umgebungstemperatur
- Anstiege der Graphen: Sensitivität gegenüber Betriebstemperatur
- Normalisierung mit Bragg Wellenlänge und Mittelung \rightarrow Driftkoeffizient
- $k_{dT} = -1,22 \cdot 10^{-6} \Delta T_d / K$
- Ursache ist Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex von Luft und thermische Ausdehnung der Optomechanik des Spektrometers [5, 6]

Wellenlängendrift in Abhängigkeit des Luftdruckes

- Große Schwankungen im Luftdruckverlauf [7]:
 - Geografische Lage
 - Barometrische Höhenformel
 - Meteorologische Einflüsse
 - 3 hPa pro 3 Stunden
 - 10 - 50 hPa pro Tag (Winter)
 - Luftbewegungen in Räumen
- Dehnungsfreies FBG, kompensierte Umgebungstemperatur
- Optische Glasfaser ohne Polymer-Mantel: nahezu keine Druckempfindlichkeit [8]



Quantifizierung der Wellenlängendrift durch Luftdruck

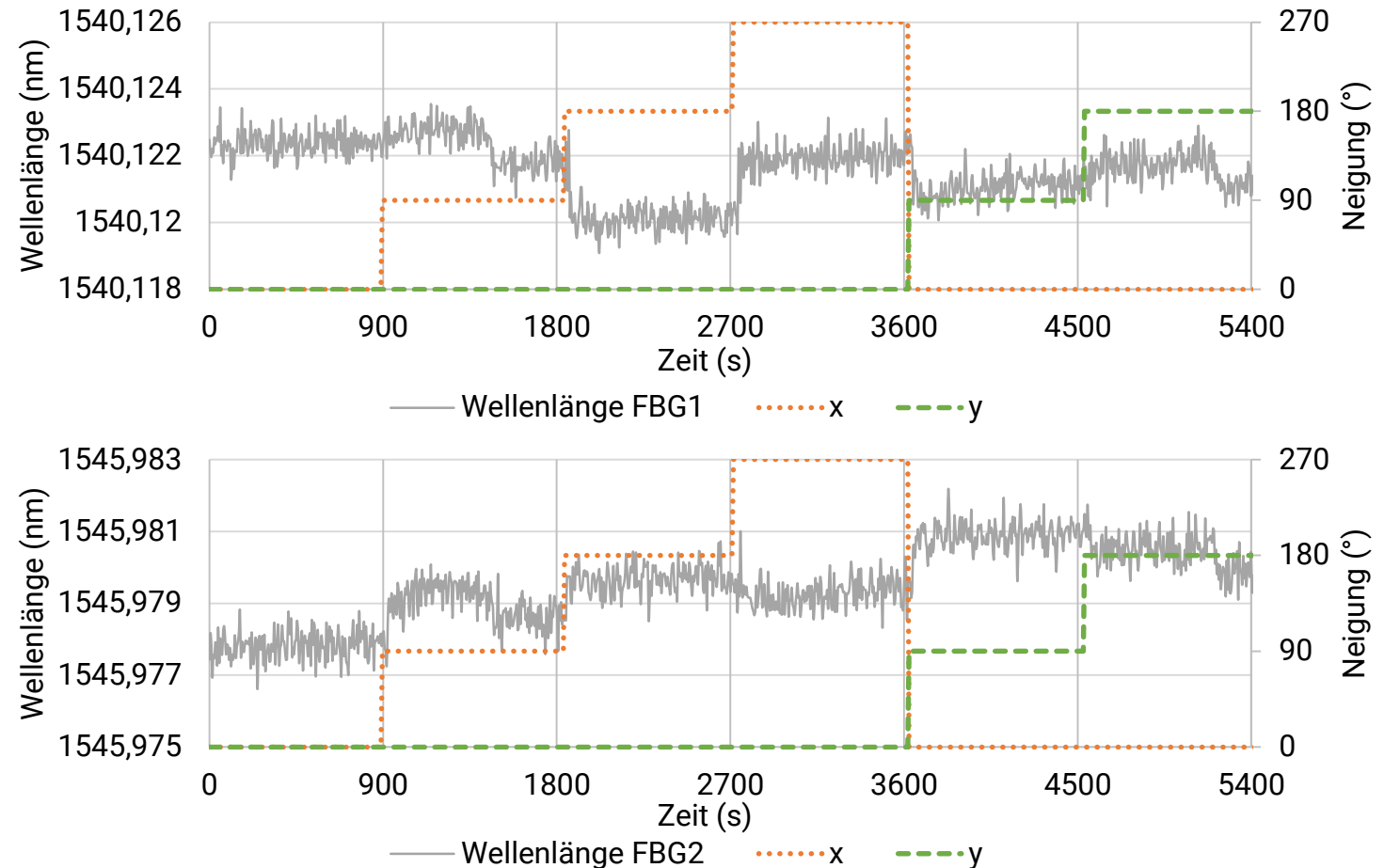


- Simulation von hydrostatischen Druckveränderungen Δp
- Kompensation von Schwankungen der Umgebungstemperatur
- Anstiege der Graphen: Sensitivität gegenüber Luftdruck
- Normalisierung mit Bragg Wellenlänge und Mittelung \rightarrow Driftkoeffizient
- $k_p = -2,61 \cdot 10^{-7} \Delta p/\text{hPa}$

Wellenlängendrift in Abhängigkeit der Positionierung des Interrogators

- Quaderförmiges Gehäuse des Interrogators → Verschiedene Lagepositionen mit je 90° Neigung möglich
- Verschiebung des Wellenlängen-Offsets bei Positionswechsel
- Keine Reproduzierbarkeit des Effektes, aber deutlich feststellbar
- Abhängig von der Bragg-Wellenlänge, z.B.:
 - $\lambda_{B1} = 1540,1 \text{ nm} \rightarrow \Delta\lambda > 3 \text{ pm}$
 - $\lambda_{B2} = 1545,9 \text{ nm} \rightarrow \Delta\lambda > 6 \text{ pm}$

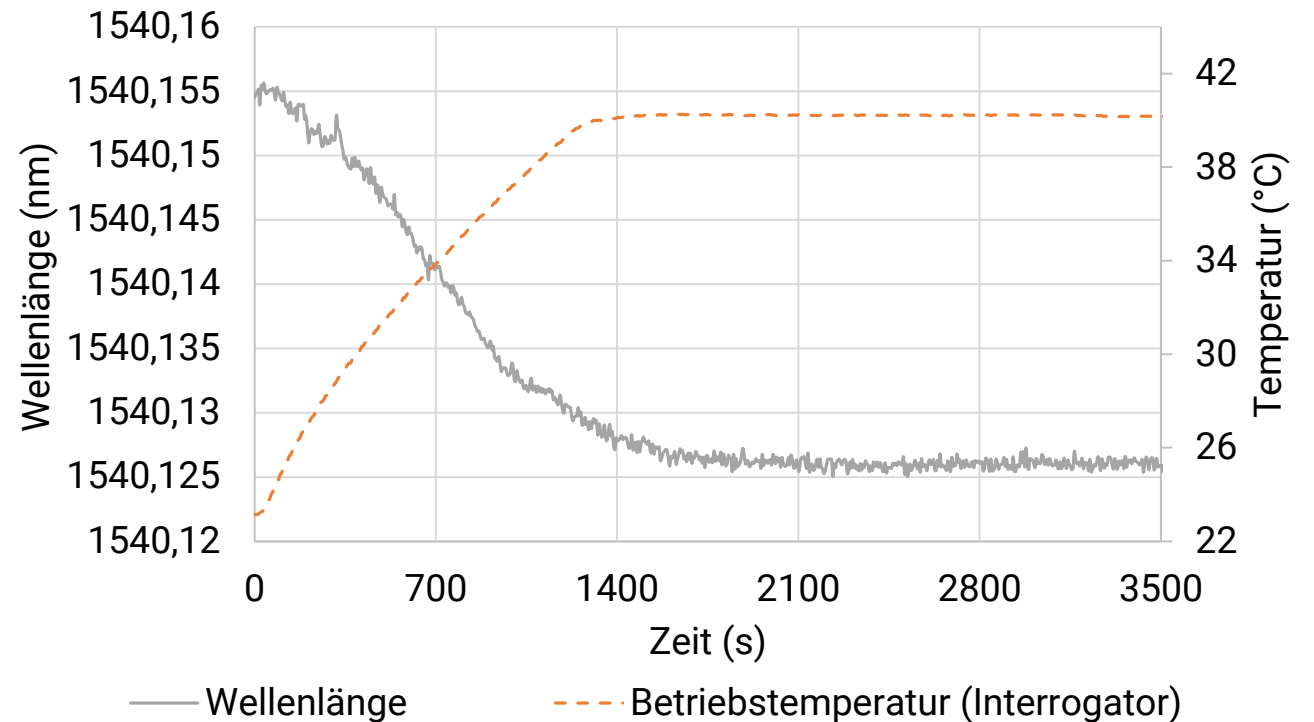
Zeitlicher Verlauf von Wellenlängen zweier FBGs und Neigung des Interrogators



Kompensationsstrategien: Betriebstemperatur

- Schwankungen der Temperatur innerhalb des Gehäuses (Wärmeeinwirkung von außen, elektrische Verluste, verschiedene Betriebsmodi, ...)
- Lösung: geregeltes Heizen des Messsystems mit Gehäuseheizung auf Basis von implementiertem PI-Regler
 - Konstante Betriebstemperatur, höher als Umgebungstemperatur
 - Wellenlängendrift resultierend aus der Betriebstemperatur nahezu eliminiert ✓

Zeitlicher Verlauf von Wellenlänge und Betriebstemperatur (Heizen)



Kompensationsstrategien: Luftdruck & Positionierung

- Unveränderte geografische Lage und konstante Positionierung des Interrogators während eines zusammenhängenden Messvorgangs ✓
- Meteorologischer Einfluss weiterhin existent
- Kurze Messzeiträume (wenige Minuten): vernachlässigbar aufgrund kleiner Wellenlängendrift ✓
- Langzeitmessungen:
 - Software basierte Kompensation mittels Referenzwerte
 - Kontinuierliche Aufzeichnung des Luftdruckes während Wellenlängenmessung
 - Subtraktion der durch Luftdruckveränderung induzierten Wellenlängenverschiebung:

$$\Delta\lambda = k_p \cdot \lambda_B = 2,61 \cdot 10^{-7} \Delta p/\text{hPa} \cdot \lambda_B \quad (4)$$

Zusammenfassung

- Inkonstante Einflussfaktoren Betriebstemperatur, Luftdruck und Positionierung des Interrogators führen zu Driftverhalten der Wellenlängenmessung
- Betriebstemperatur: $k_{dT} = -1,22 \cdot 10^{-6} \Delta T_d / K$
 - Kompensiert durch Gehäuseheizung → konstant geregelte Betriebstemperatur
- Luftdruck: $k_p = -2,61 \cdot 10^{-7} \Delta p / hPa$
 - Software-Kompensation für hohe Luftdruckschwankungen bzw. Langzeitmessungen
- Positionierung des Interrogators: Driftverhalten, nicht reproduzierbar
 - Konstante Position des Interrogators während Messzyklus unabdingbar

Ausblick

- Beschriebene Wellenlängendrift auf mechanische Struktur des Spektrometers zurückzuführen
 - Ähnliches Driftverhalten bei Spektrometern vergleichbarer Bauart zu erwarten
 - Kompensationsmaßnahmen je Messsystem mit eigenem Equipment realisierbar
 - Anpassungen in Hard- und Software notwendig
 - Erweiterung des Messbereichs durch Reduktion der Wellenlängendrift
 - Potentiell neue Anwendungsfelder mit entsprechend benötigter Genauigkeit erschließbar
- **Langzeitstabilität & höhere Präzision bei der Messung kleiner Signale**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und an...

- Die Organisatorinnen und Organisatoren der Tagung für die Möglichkeit der Präsentation dieser Arbeit
- Herrn Prof. Jan Mehner für die Möglichkeit der wissenschaftlichen Arbeit an seiner Professur Mikrosysteme und Medizintechnik
- Herrn Dr. Sebastian Voigt für die Einarbeitung und die Möglichkeit der Mitarbeit am Forschungsbereich faseroptische Sensoren
- Alle Kolleginnen und Kollegen der Professur Mikrosysteme und Medizintechnik für den herzlichen Empfang und die Einarbeitung nach dem Master-Abschluss

Literaturverzeichnis

- [1] J. W. Arkwright *et al.*, „Measurement of Muscular Activity Associated With Peristalsis in the Human Gut Using Fiber Bragg Grating Arrays“, *IEEE Sensors J.*, Jg. 12, Nr. 1, S. 113–117, 2012.
- [2] G. Rajan, Hg., *Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis CRC Press, S. 208–220, 2015.
- [3] M. M. Weneck, R. C. S. B. Allil, B. A. Ribeiro und F. V. B. de Nazaré, „A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors“ in *Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings*, C. Cuadrado-Laborde, Hg., InTech, 2013, S. 1–25.
- [4] S. Voigt, „Drucksensorkatheter auf Basis von Faser-Bragg-Gittern“. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, S. 47–48, 2011.
- [5] K. P. Birch und M. J. Downs, „An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air“, *Metrologia*, Jg. 30, Nr. 3, S. 155–162, 1993.
- [6] K. Gieck und R. Gieck, *Technische Formelsammlung*, 34. Aufl. München: Hanser, S. Z11, 2019.
- [7] B. Klose und H. Klose, *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*, 2. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, S. 107–121, 2015.
- [8] B. Budiansky, D. C. Drucker, G. S. Kino und J. R. Rice, „Pressure sensitivity of a clad optical fiber“ (eng), *Applied optics*, Jg. 18, Nr. 24, S. 4085–4088, 1979.