FBGS Tailored Fiber Optic Sensing Components & Solutions

Projekt Schlussbericht

Omnifuktionale, Multiplex-Fasersensoren für Aerospace Applikationen („OmniAerFiSens “)

Zuwendungsempfänger:	FBGS Technologies GmbH
Förderkennzeichen:	20Q2106
Projektlaufzeit:	01.05.2022 bis 30.04.2025

Projektleiter/-in: Dr. Christian Voigtländer

I. Kurze Darstellung zu

1. *Aufgabenstellung*

Das Ziel des Projekts OmniAerFiSens ist die Entwicklung faseroptischer, luftfahrttauglicher Multiparameter-Sensoren mit nahezu unbegrenzten Multiplexing-Möglichkeiten zur Messung von Temperatur, Überhitzung, Füllstand und Leckage in Flugzeugsystemen. Es gliedert sich in drei Hauptarbeitspakete: die Entwicklung hochtemperaturstabiler FBG-Sensoren für Temperaturen von 700°C (HAP 1), die Erarbeitung einer endlosen Multiplexing-Technologie zur Erhöhung der Sensoranzahl und Positionsgenauigkeit (HAP 2) sowie die Entwicklung eines neuartigen Füllstands- und Leckagesensors auf Basis eines Pump-and-Probe-Konzepts (HAP 3).

2. *Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde*

Die FBGS Technologies GmbH (FBGS) ist ein international tätiges Hightech-Unternehmen mit Sitz in Jena, das auf die Entwicklung und Herstellung von faseroptischen Sensoren und Messsystemen auf Basis der Faser-Bragg-Gitter-Technologie (FBG) spezialisiert ist. FBGS verfügt über umfassende technische Ausstattung, moderne Produktionsanlagen für die Faserverarbeitung und FBG-Herstellung sowie über hochqualifiziertes wissenschaftlich-technisches Personal, das langjährige Erfahrung in der Durchführung nationaler und internationaler Forschungs- und Entwicklungsprojekte besitzt.

Im Rahmen dieses Projekts bestanden enge Schnittstellen zwischen FBGS und Saab Avionics Systems (Schweden). Während FBGS für die Entwicklung, Herstellung und Laborvalidierung der faseroptischen Sensoren verantwortlich war, übernahm Saab die Integration und Erprobung der Sensoren unter realitätsnahen Einsatzbedingungen im Luftfahrtkontext. Durch diese enge Kooperation konnten die spezifischen Anforderungen der Luftfahrtindustrie – insbesondere hinsichtlich Temperaturbeständigkeit, Robustheit und Multiplexing-Fähigkeit – gezielt in die Entwicklung einfließen.

Darüber hinaus boten die vorhandenen Forschungseinrichtungen bei FBGS, wie Laseranlagen zum FBG-Einschreiben, Faserzieh- und Kalibriereinrichtungen sowie Messsysteme für Hochtemperatur- und Materialtests, optimale Voraussetzungen zur erfolgreichen Durchführung des Vorhabens.

3. *Planung und Ablauf des Vorhabens*

Das Vorhaben wurde entsprechend der Projektplanung in drei aufeinander abgestimmte Hauptarbeitspakete (HAP) gegliedert, die sich inhaltlich ergänzten und zeitlich überlappten. Bereits zu Projektbeginn wurden die technischen und organisatorischen Grundlagen gelegt, um eine effiziente Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern FBGS Technologies GmbH und Saab Avionics Systems zu gewährleisten.

Im Hauptarbeitspaket 1 (HAP 1) lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung und Optimierung hochtemperaturstabiler FBG-Sensoren. Dazu wurde zunächst der Prozess des FBG-

Einschreibens für hohe Temperaturen angepasst, geeignete Faser- und Beschichtungstypen wurden charakterisiert und ein Packaging-Konzept für den Langzeiteinsatz bis 700 °C entwickelt. Nach erfolgreicher Prozessvalidierung erfolgte die Herstellung von Sensormustern, die in verschiedenen thermischen Belastungstests erprobt und schließlich an Saab für weiterführende Tests unter Realbedingungen übergeben wurden.

Parallel dazu wurde im Hauptarbeitspaket 2 (HAP 2) das Konzept der „endlosen Multiplexing-Technologie“ vorangetrieben. Hier stand die Entwicklung einer neuen Einschreibetechnologie im Vordergrund, die die Erzeugung mehrerer tausend FBG-Messstellen in einer einzelnen Faser erlaubt. Neben der technischen Implementierung dieser Methode wurden auch Auswertealgorithmen zur präzisen Bestimmung der Wellenlängenposition und der Sensorabstände entwickelt.

Das Hauptarbeitspaket 3 (HAP 3) startete zeitversetzt, um auf den in HAP 2 entwickelten Technologien aufzubauen. Ziel war die Entwicklung eines neuartigen Füllstands- und Leckagesensors auf Basis eines Pump-and-Probe-Konzepts. Nach einer konzeptionellen Phase wurden mehrere Sensordesigns ausgearbeitet, aufgebaut und im Labor getestet. Die daraus resultierenden Sensorprototypen wurden in verschiedenen Messkampagnen unter statischen und dynamischen Bedingungen validiert, wobei insbesondere die Sensitivität, Reproduzierbarkeit und Reaktionsgeschwindigkeit untersucht wurden.

4. Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Hochtemperatursensorik mit Faser-Bragg-Gittern (FBG) war zum Projektbeginn bereits durch grundlegende Arbeiten geprägt. Frühere Untersuchungen zeigten, dass FBGs, die mit Femtosekundenlasern nach dem Typ-II-Verfahren eingeschrieben werden, Temperaturmessungen bis etwa 1000 °C ermöglichen [1,2]. Diese Gitter beruhen auf einer strukturellen Veränderung der Glasmatrix und zeichnen sich durch hohe Temperaturstabilität, aber auch durch erhöhte Streuverluste aus. Durch gezielte Steuerung der Einschreibeparameter konnten diese Verluste zwar reduziert werden, der Einsatz in langen Sensorarrays bleibt jedoch weiterhin begrenzt.

Parallel dazu wurden Femtosekundenverfahren wie das Punkt-für-Punkt- und das Phasenmaskeneinschreiben etabliert, die das Schreiben durch den Faserschutzmantel erlauben. Damit konnten kommerzielle Sensoren bis ca. 300 °C realisiert werden. Bei höheren Temperaturen versagen jedoch polymerbasierte Coatings, sodass der Einsatz metallbeschichteter Fasern erforderlich ist. Diese sind bislang nur eingeschränkt nutzbar, da sie eine aufwändige Nachbearbeitung erfordern. Im Bereich der Schutzkonzepte für hohe Temperaturen besteht daher weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf, insbesondere für Anwendungen mit hohen mechanischen und thermischen Anforderungen, wie in der Luftfahrt.

Ein weiterer technologischer Bezugspunkt war das Multiplexen einer hohen Anzahl von Sensoren in einer einzigen Faser. Klassische statische Verfahren sind hierbei durch lange Prozesszeiten limitiert. Die von FBGS entwickelte Ziehturm-Gittertechnologie erlaubt dagegen das kontinuierliche, „blinde“ Einschreiben der Gitter während des Faserziehens und ermöglicht dadurch stabile Sensoren mit hoher Reproduzierbarkeit.

[1] Mihailov, S.J.; Smelser, C.W.; Grobnic, D.; Walker, R.B.; Lu, P.; Ding, H.; Unruh, J. Bragg gratings written in All-SiO2 and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask. J. Lightwave Technol. 2004, 22, 94–100.

[2] Martinez, A.; Khrushchev, I.Y.; Bennion, I. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser. Electron. Lett. 2005, 41, 176–178.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Saab Avionics Systems erfolgte während der gesamten Projektlaufzeit sehr eng und zielgerichtet. Saab übernahm insbesondere die Definition der anwendungsrelevanten Anforderungen aus Sicht der Luftfahrt und stellte Prüfbedingungen für die Validierung der Sensorkonzepte bereit. Regelmäßige technische Abstimmungen und gemeinsame Workshops ermöglichten eine kontinuierliche Abstimmung der Entwicklungsziele und Versuchsergebnisse. Zudem erfolgte ein intensiver Austausch zu Prüfmethoden und Teststandards, um die Sensoren an reale Einsatzbedingungen anzupassen.

II. Eingehende Darstellung

1. Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP1.1 Entwicklung eines geeigneten Einschreibeprozesses für Hochtemperatursensoren auf Basis von Femtosekunden oder Nanosekunden Laser Technologie

Generell kann eine Unterscheidung zwischen Typ I und Typ II gemacht werden. Bei Typ I Modifikationen handelt es sich um leichte Änderungen in der Glasmatrix. Bei Typ II Modifikationen wird die Glasmatrix mehr oder weniger geschädigt und es entstehen kleine Risse. Diese weisen eine deutlich höhere Temperaturstabilität auf, besitzen aber auch Nachteile bei den spektralen Eigenschaften und mechanischen Festigkeit der Faser.

Für die Erzeugung hochtemperaturstabiler FBGs über 700 °C, wurden drei Ansätze untersucht:

- Typ II-Modifikationen mit UV-Laserpulsen
- Typ I-Modifikationen mit Femtosekundenlasern
- Typ II-Modifikationen mit Femtosekundenlasern

UV-Laserpulse:
Bei Tests zum Einschreiben von Typ II-Gittern mit Einzelpulsen zeigten sich unkontrollierbare Gitterformen und stark schwankende Reflexionen. Aufgrund der fehlenden Reproduzierbarkeit wurde dieser Ansatz verworfen.

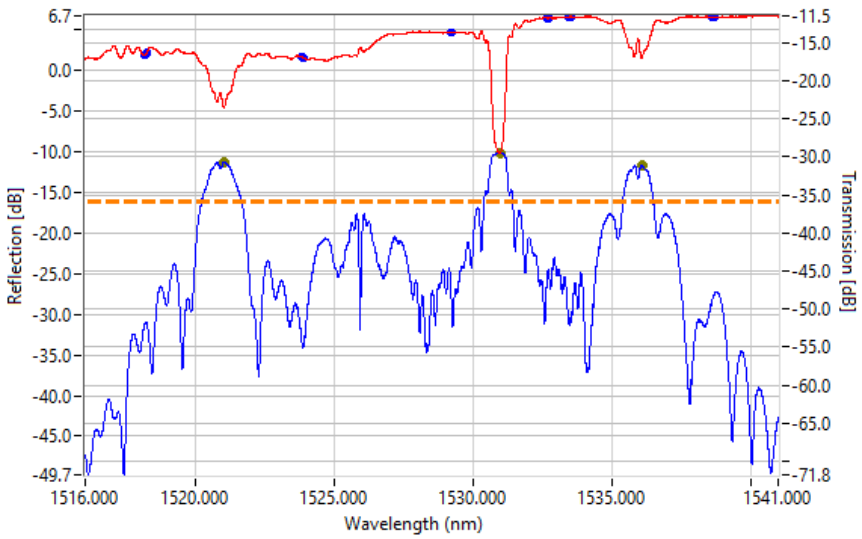


Abbildung 1: Reflexions- und Transmissionsspektrum eines Typ-II-Arrays eingeschrieben mit UV-Laserpulsen

Typ I mit Femtosekundenlasern:

Diese Gitter erreichten zwar hohe Reflexionen (R > 90 %), bei 700 °C nicht langzeitstabil und verschwanden mit der Zeit. Typ I-Gitter sind daher für Hochtemperaturanwendungen ungeeignet.

Typ II mit Femtosekundenlasern:

Erste Einschreibeversuche ergaben übermäßig starke Reflexionen mit ungeeigneten spektralen Profilen. Durch laterale Verschiebung der Modifikationen konnte zwar die Reflexion über den Überlapp zwischen Modifikation und geführter Mode gezielt beeinflusst werden. Nachteilig erwies sich aber die deutlich gesteigerte Doppelbrechung der Gitter.

Durch entwickelte Anpassungen konnte der Fokusbereich verkleinert werden und damit konnten Reflexion und Doppelbrechung gezielt reduziert werden. So entstanden Typ II-Gitter mit einstellbarer Reflexion und stabilen, gaußähnlichen Profilen.

Zur Erzeugung von Arrays wurde die Justageprozedur für Phasenmasken mit unterschiedlichen Perioden weiter optimiert, bis Gitter mit geeigneten spektralen Eigenschaften hergestellt werden konnten.

Zur Unterscheidung von Typ I- und Typ II-Gittern wurde anstelle eines langwierigen Ausheizens (8–12 h) eine schnelle Methode entwickelt: Typ II-Gitter zeigen bei rotem Laserlicht deutlich stärkere Streuung. Tests vor und nach dem Ausheizen bestätigten die Zuverlässigkeit dieser Methode.

Das anschließende Ausheizen bei Temperaturen über 700 °C stabilisiert die Gitter, führt jedoch zu einer deutlichen Reduktion der mechanischen Festigkeit, wie Biegetests zeigten. Daher ist ein Schutzkonzept für die Faser notwendig (entwickelt in AP 1.3).

Neben Standardfasern wurden auch FBGs in Goldcoating-Fasern eingeschrieben. Nach Entfernung des Coatings konnte der gleiche Einschreibprozess verwendet werden. Diese Fasern sind bei 700 °C dauerhaft einsetzbar.

AP1.2 Erzeugung von Prototyparrays

Mit dem in AP 1.1 entwickelten Femtosekunden-Einschreibeaufbau konnten zunächst Einzelsensoren mit Typ II-Modifikationen erfolgreich in Standard-Telekomfasern mit entferntem Acrylat-Coating eingeschrieben werden. Anschließend wurden Arrays mit 3–5 Gittern gefertigt, charakterisiert und für Temperversuche eingesetzt.

Durch weitere Prozessoptimierungen konnten die spektralen Eigenschaften der Gitter verbessert und das Einschreiben reproduzierbarer gemacht werden. Das nachfolgende Spektrum (Abbildung 2: Reflexionsspektrum eines Arrays mit 4 Sensoren vor und nach dem Ausheizen) zeigt ein Array mit 4 Sensoren, die nahezu identische spektrale Eigenschaften besitzen. Das Array wurde 7 h bei 808 °C ausgeheizt. Nach dem Ausheizen zeigte sich eine klarere Peakstruktur, während die Reflexion nahezu unverändert blieb. Eine leichte Blauverschiebung der Bragg-Wellenlängen trat auf – typisch für ausgeheizte Typ II-Gitter. Dieser Prozess wurde auch schon früher in der Literatur beschrieben.

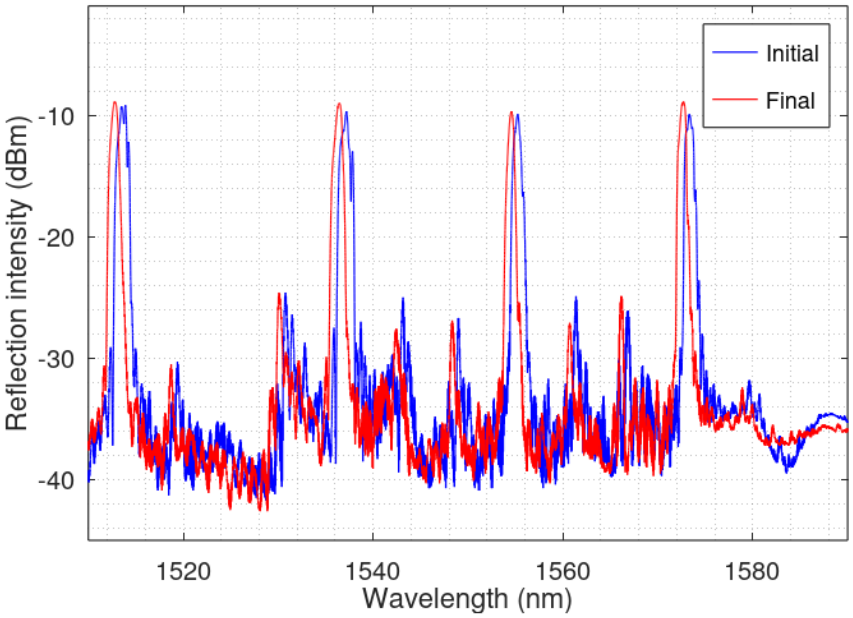


Abbildung 2: Reflexionsspektrum eines Arrays mit 4 Sensoren vor und nach dem Ausheizen

Messungen der Doppelbrechung vor und nach dem Ausheizen ergaben Werte meist unter 10 pm.

Weiterhin wurde ein Array mit 11 Typ II-Gittern hergestellt, um die Breitbandverluste zu bestimmen. Dazu wurde am Faserende zusätzlich ein Typ I-Gitter eingeschrieben. Die gemessene Reduktion seiner Reflexion während des Einschreibens der Typ II-Gitter diente zur Bestimmung der Verluste. Die Auswertung ergab eine mittlere Dämpfung von nur 0,02 dB pro Gitter. Damit wurde gezeigt, dass sich auch größere Arrays mit der entwickelten Methode herstellen lassen, ohne dass signifikante Verluste auftreten.

Schließlich wurde ein Array mit 30 Sensoren erfolgreich in eine Faser eingeschrieben. Dieses Array wurde 24h bei 850°C ausgeheizten. Den spektralen Verlauf während der Ausheizphase kann man in der nachfolgenden 2D-Grafik erkennen. Hierbei ist die Reflexion als Farbverlauf über die Zeit und Wellenlänge aufgetragen. Mit diesem Ergebnis konnte ein wesentliches Projektziel erreicht werden.

AP1.3 Entwicklung eines Sensorpackagings für > 700 °C

Zu Beginn des Arbeitspakets wurden Voruntersuchungen zur Materialauswahl für hochtemperaturstabile Sensorfasern durchgeführt. Da FBGS über die Technologie verfügt, FBGs direkt durch das Coating einzuschreiben, wurde zunächst geprüft, ob transparente Coatings existieren, die Temperaturen bis 700 °C aushalten. Es zeigte sich jedoch, dass alle transparenten Coatings deutlich niedrigere Temperaturgrenzen haben. Das temperaturbeständigste transparente Coating ist Polyimid, das nur bis etwa 300–350 °C stabil bleibt.

In Temperversuchen wurde beobachtet, dass Polymercoatings ab etwa 600 °C nahezu vollständig verbrennen. Unterhalb dieser Schwelle bleiben teilweise verkohlte Rückstände auf der Faseroberfläche. Für Anwendungen oberhalb der maximal zulässigen Temperatur muss die Faser daher im betroffenen Bereich zusätzlich geschützt werden.

Als Alternative zu Polymercoatings wurden metallbeschichtete Fasern betrachtet. Eine Übersicht der maximalen Einsatztemperaturen zeigte, dass nur goldbeschichtete Fasern langfristig Temperaturen um 700 °C standhalten können. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde daher entschieden, ein Schutzkonzept auf Basis goldbeschichteter Fasern zu entwickeln.

Coatingmaterial	**Angegebenen Höchsttemperatur**
Akrylat	~80°C
Ormocer	200°C
Polyimide	300-350°C
Aluminium	400°C
Kupfer	600°C
Gold	700°C

Coatingentfernung

Bei metallbeschichteten Fasern muss das Coating vor dem Einschreiben der Gitter entfernt werden. Ziel war die Entwicklung einer reproduzierbaren Methode, die die Faseroberfläche möglichst wenig beeinträchtigt. Vier grundlegende Ansätze wurden untersucht:

- Mechanisches Entfernen,
- Chemisches Entfernen
- Thermisches Entfernen und
- Entfernung durch Auflösungsprozess im flüssigen Metallbad.

Beim mechanischen Entfernen wurde ein spezieller Aufbau entwickelt, bei dem die Goldschicht mit einer scharfen Metallklinge abgeschält wird. Zwei Stahldrähte dienten als

präzise Führung, um die Glasfaser nicht zu beschädigen. Es zeigte sich, dass es oft genügt, den geschlossenen Goldmantel an einer Stelle zu öffnen, da die Goldschicht keine feste Haftung mit der Glasoberfläche besitzt. Allerdings führte die mechanische Belastung häufig zu einer deutlichen Reduktion der mechanischen Stabilität der Faser, weshalb diese Methode nur eingeschränkt geeignet ist.

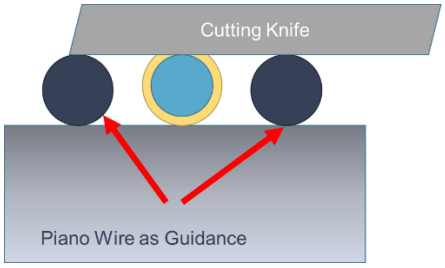


Abbildung 3: Schematische Darstellung der mechanischen Coatingentfernung

Beim thermischen Entfernen wurde unter anderem versucht, das Gold lokal mit einem Faserspleißgerät zu schmelzen. Der erzeugte Lichtbogen erreicht Temperaturen über 2000 °C, allerdings verhindert die hohe Wärmeleitfähigkeit des Goldes ein lokales Aufschmelzen. Wird die Schicht jedoch an einer Stelle beschädigt, kann das Gold schmelzen und sich aufgrund der Oberflächenspannung zur Seite ziehen. Bei einer anderen Methode wurde ein Heizdraht verwendet, der um die Faser gewickelt wurden und mit einem konstanten Strom zu glühen gebracht wurde. Dadurch konnte auch das Coating lokal entfernt werden. Da die Faser bereits Temperaturen über dem Schmelzpunkt von Gold ausgesetzt ist, reduziert diese Methode auch die mechanische Festigkeit der Faser.

Die besten Ergebnisse wurden mit einer chemischen Entfernung unter Verwendung einer Jodlösung erzielt. In diesem Prozess wir das Gold herausgelöst und es entsteht ein Gold-Iod-Komplex in der Lösung. Dabei wurde die Faser entweder vollständig in die Lösung eingetaucht oder es wurde ein Tropfen der Lösung auf die zu behandelnde Stelle gegeben. Das Eintauchverfahren erwies sich als deutlich effektiver, während die Tropfenmethode Rückstände hinterließ. Typische Bearbeitungszeiten lagen zwischen 8 und 12 Stunden. Nach der Reinigung mit Wasser zeigte sich eine saubere Glasoberfläche, und in diesen Fasern konnten anschließend Typ-II-Gitter erfolgreich eingeschrieben werden.

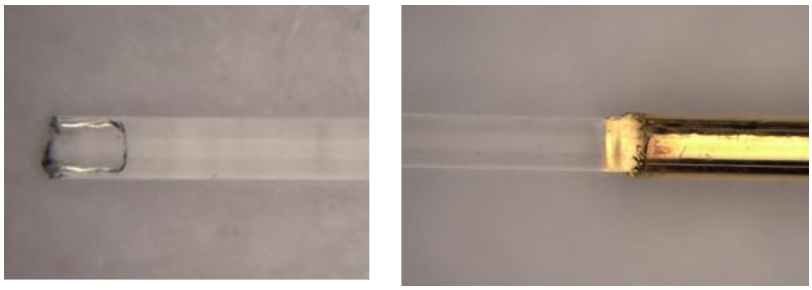


Abbildung 4: Entmantelte Goldbeschichtet Faser

Entwicklung eines Schutzkonzepts

Nach dem Einschreiben der Gitter muss die Faser vor äußeren Einflüssen geschützt werden. Ziel war ein Konzept, das sowohl mechanischen Schutz bietet als auch andere Einflüsse wie Feuchtigkeit vom Glas fernhält.

1. Direkt aufgebrachter Schutzmantel:

Hierbei wird ein hochtemperaturbeständiges Material direkt auf die Faser aufgebracht. Dieses Material steht sowohl mit der freigelegten Glasoberfläche als auch mit dem ursprünglichen Coating in Kontakt. Mögliche Materialien sind Metalle (z. B. Gold) oder zementartige, keramische Substanzen. Beide Optionen wurden zwar anfangs untersucht, da aber FBGS für die Beschichtung mit Gold keine Aufbauten bzw. Prozesse besitzt, wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

2. Schutz durch Kapillaren:

In dieser Variante wird die Faser in eine hochtemperaturfeste Kapillare (z. B. aus Edelstahl oder Glas) eingeführt, die hermetisch mit dem Coating verbunden wird. Zur hermetischen Versiegelung zwischen goldbesichteter Faser und einer Metallkapillare wurden Schweißversuche mit einem Mikrowelding-Gerät durchgeführt. Der Prozess zeigte eine Haftvermittlung zwischen Goldschicht und Stahlkapillare, allerdings kam es häufig zu einer Schwächung der Faser an der Schweißstelle durch lokale Überhitzung. Eine präzise Steuerung von Energie und Position des Schweißbogens ist entscheidend. Leider war es nicht möglich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln bzw. Geräten den Prozess so weit zu optimieren, dass zuverlässig Schweißverbindungen zwischen Kapillare und Faser hergestellt werden konnten.

Parallel wurden Hochtemperaturkleber als alternative Verbindungslösung untersucht. Zwei Klebstoffe mit einer Temperaturbeständigkeit bis 1600 °C zeigten hierbei sehr gute und stabile Ergebnisse. Nach mehrtägigem Ausheizen bei 700 °C blieben die Verklebungen mechanisch intakt. Zugversuche zwischen Kapillare und Faser zeigten eine ausreichende Stabilität. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie nicht auf metallbeschichtete Fasern beschränkt ist. Es können auch Fasern mit Polymerbeschichtung genutzt werden.

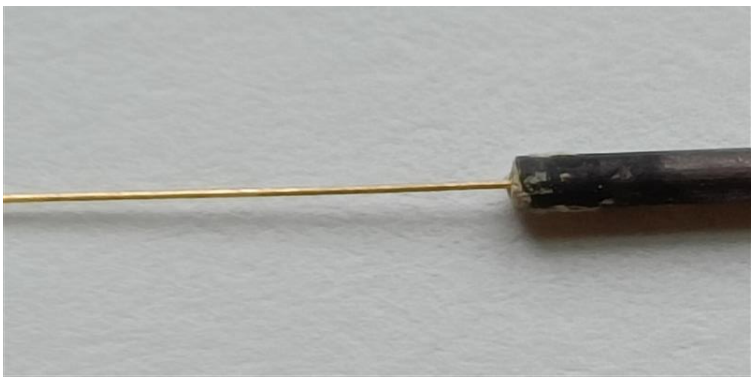


Abbildung 5: Goldbeschichte Faser verklebt mit einer Hochtemperatur-Stahlkapillare

Für Anwendungen mit kleinen heißen Zonen (< 200 °C außerhalb der Messstelle) können auch Fasern mit Polymerbeschichtung eingesetzt werden. In diesem Fall muss das Schutzkonzept mit der hochtemperaturbeständigen Kapillaren nur in der heißen Zone genutzt werden. Dies bringt den Vorteil, dass das Einschreiben der Typ-II-Gitter auch durch das Coating erfolgen kann. Somit ist der Sensor während des Herstellungsprozess deutlich einfacher zu handhaben, da eine Faser mit Coating wesentlich stabiler ist. Für Anwendungen, bei denen dies nicht möglich ist können die goldbeschichtete Faser in Kombination mit der metallischen Schutzkapillare verwendet werden.

AP1.4 Sensorkalibrierung und Laborerprobung

Für den zuverlässigen Einsatz der Sensoren ist die Kenntnis von Reflexions- und Wellenlängendrift bei konstanter Temperatur essenziell. Daher wurde ein kompakter Temperaturblockkalibrator mit hoher Temperaturgenauigkeit und geringem Volumen genutzt. Die Temperaturkonstanz des Blockkalibrators wurde bei 808 °C über einen Zeitraum von 100 h geprüft. Die Auswertung zeigt Schwankungen von weniger als ±0,5 °C und bestätigt damit die hohe Stabilität des Systems.

Damit die Sensoren stabil bei mehr als 700°C sind, wurde vorher ein extra Ausheizschritt bei einer höheren Temperatur durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Ausheiztemperatur 850°C nicht überschreiten sollte, dass sonst die mechanische Festigkeit der Faser zu stark beeinträchtigt wird. Daher wurden die Ausheizversuche bei etwa 800-850°C durchgeführt. In verschiedenen Tests wurden Ausheizzeiten von ca. 2-24h genutzt. Nach etwa 6h zeigte sich bereits eine ausreichende Temperaturstabilität.

Die Temperaturstabilität wurde danach über einen längeren Zeitraum überprüft. Das nachfolgende Array, eingeschrieben in einer Standard-Telekomfaser ohne Coating, wurde 45h bei 808°C gemessen. Die Reflexion ist konstant und zeigt keinerlei Abfall. Auch die gemessenen Wellenlängen der Gitter zeigen keine größeren Verschiebungen. Bei etwa 30h ist eine kleine Stufe im Wellenlängenverlauf sichtbar, die wahrscheinlich durch einen mechanischen Dehnungseffekt der Faser in Kapillaren im Ofen hervorgerufen wurde. Somit konnte gezeigt werden, dass in der Standard-Telekomfaser temperaturstabile Gitter erzeugt werden können.

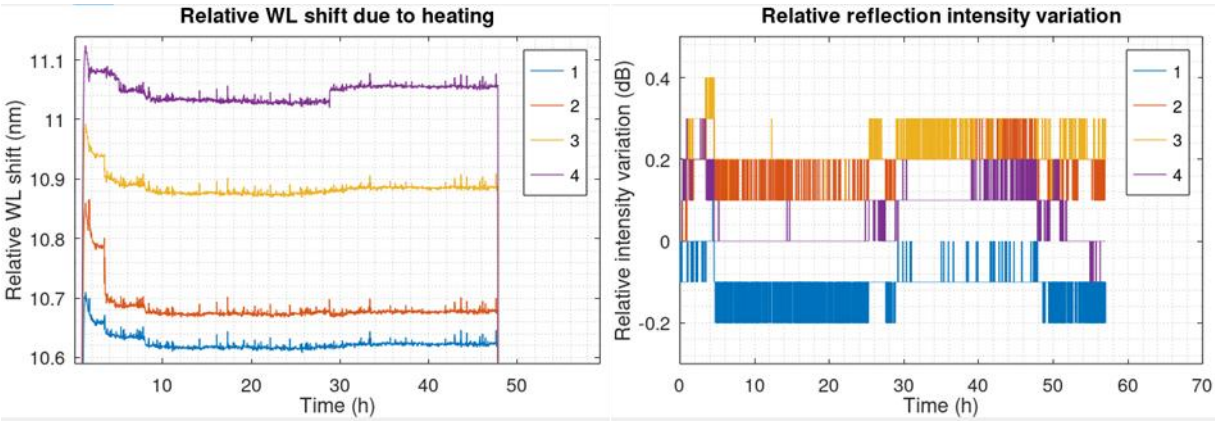


Abbildung 6: Array mit 4 Sensoren in SMF28-Faser bei 808°C für 45h. Links: Relative Wellenlängenänderung; Rechts: relative Änderung der Reflexion.

Auf Grundlage der entwickelten Prozesse wurden weitere Sensoren und Arrays in anderen Fasertypen eingeschrieben. Für Hochtemperaturanwendungen kamen dabei die goldbeschichteten Fasern zum Einsatz.

Für das Einschreiben der Gitter waren nur geringfügige Anpassungen der Einschreibeparameter erforderlich. Die gefertigten Typ-II-Gitter wurden anschließend bei 800 °C für 24 h ausgeheizt, um eine thermische Stabilisierung zu erreichen. Die Messungen zeigten, dass sich die Reflexion nach rund 17 h nicht weiter verändert und ab diesem Zeitpunkt ein stabiler Zustand erreicht wird.

Das Array wurde danach einem Langzeittest über 30 Tage bei 700 °C unterzogen. Während dieser Zeit wurden die Wellenlänge und Reflexion kontinuierlich aufgezeichnet. Die Reflexionswerte blieben nahezu konstant, nur geringe Änderungen traten synchron bei allen Sensoren auf – ein Hinweis auf instrumentelle Langzeitdrifts und nicht auf Gitterinstabilität. Damit gilt die Reflexion der eingeschriebenen Typ-II-Gitter als temperaturstabil bei 700 °C.

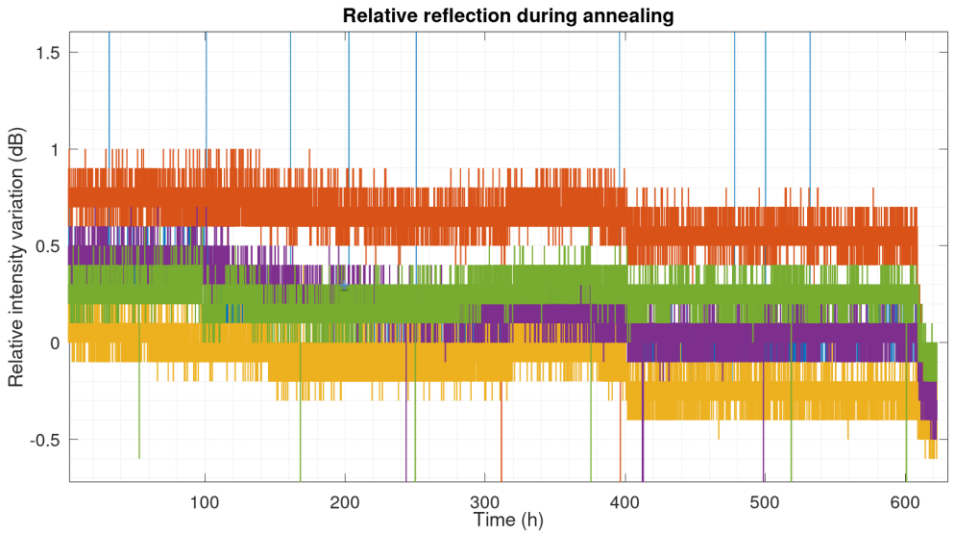


Abbildung 7: Relative Reflexionsänderung eines Arrays in goldbeschichteter Faser bei Langzeittest über 600h bei 700°C

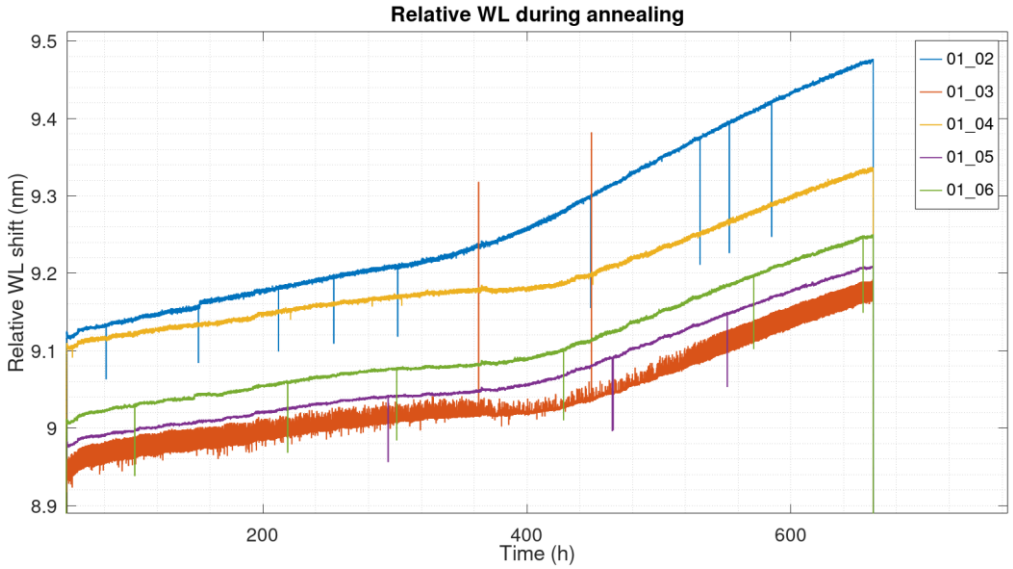


Abbildung 8: Relative Wellenlängenänderung eines Arrays in goldbeschichteter Faser bei Langzeittest über 600h bei 700°C

Anders zeigte sich der Verlauf der gemessenen Wellenlänge: Über den Testzeitraum wurde ein gleichmäßiger Anstieg der Wellenlänge aller Sensoren beobachtet. Da das Messsystem selbstreferenzierend arbeitet, kann ein Geräteeinfluss ausgeschlossen werden. Vergleichende Untersuchungen und Literaturhinweise deuten darauf hin, dass dieser Drift durch Kristallisationseffekte im Glas verursacht wird.

In anderen Fasertypen trat dieser Effekt nicht auf. Daher ist anzunehmen, dass die Drift vom Fasertyp bzw. der chemischen Zusammensetzung des Faserkerns abhängt. Für die

goldbeschichtete Faser konnten keine langzeitstabilen Parameter gefunden werden. Dies hatte keinen unmittelbaren Einfluss auf den Projektverlauf. In einer späteren Produktentwicklung können andere Fasertypen getestet werden.

AP1.5 Sensormusterherstellung für Testen @ Saab

In Abstimmung mit dem Projektpartner Saab wurde entschieden, die Bereitstellung der Sensorsamples erst nach Abschluss der Entwicklung des Schutzkonzepts vorzunehmen. Erste Sensoren ohne Schutz zeigten nach dem Tempern eine deutlich verringerte mechanische Stabilität und waren daher nicht für die geplanten Tests geeignet.

Saab macht verschiedene Hochtemperatur- und Vibrationstests, um das Verhalten der Sensoren unter realistischen Einsatzbedingungen zu untersuchen. Hierfür steht ein Prüfaufbau zur Verfügung, der das Vibrationsverhalten in einem Flugzeug gemäß industriellen Vorgaben simuliert. Die Versuche umfassen Vibrationstests nach Standard DO-160 §8, Kategorie R mit einer Testdauer von drei Stunden pro Sensorfaser.

Für diese Untersuchungen wurden bei FBGS unterschiedliche Sensorsamples gefertigt, deren Hauptziel die Überprüfung der mechanischen Stabilität unter Vibration ist. Dabei kam eine goldbeschichtete Hochtemperaturfaser zum Einsatz, die Temperaturen bis 700 °C standhält. Die Verbindung zwischen Faser und Hochtemperatur-Kapillare erfolgt über die in den vorangegangenen Arbeitspaketen entwickelte Klebetechnologie, die sich bereits in thermischen Tests als zuverlässig erwiesen hat.

In Abstimmung mit Saab wurde festgelegt, dass die Sensorfasern nur einseitig optisch ausgelesen werden müssen. Das gegenüberliegende Ende der Kapillare wird versiegelt, um die Stabilität des Aufbaus zu erhöhen. Die Länge der verwendeten Kapillaren beträgt 0,75 m.

Zur Ermittlung einer optimalen Ausführung wurden mehrere Iterationsstufen der Sensorsamples gefertigt, die sich in Befestigungsmethode, Klebstoffauftrag und Kapillarstruktur unterscheiden. Der schematische Aufbau zeigt eine goldbeschichtete Faser, die über einen Hochtemperaturkleber an einer Metallkapillare fixiert ist, während sich die Sensoren im Kapillarinneren befinden.

AP2.1 Entwicklung eines neuen Interferometers zum FBG-Einschreiben

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Herstellung von FBG-Sensorarrays mit einer Wellenlängenabweichung von weniger als 70 pm beim Einschreiben am Ziehturm. Zu Projektbeginn wurde deutlich, dass die Genauigkeit nicht allein durch das Interferometer bestimmt wird, sondern durch eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren. Eine umfassende Analyse identifizierte unter anderem die Interferometergenauigkeit, mechanische Schwingungen, Schwankungen der Faserziehkraft und des Faserdurchmessers sowie die Messgerätegenauigkeit als relevante Parameter.

Damit die im Projekt anvisierte hohe Sensoranzahl von 2000 erreicht werden kann, wurde eine mögliche Sensorkonfiguration definiert. Hierbei werden 20 Sensoren mit unterschiedlichen Wellenlängen eingeschrieben und diese Konfiguration wird 100-mal wiederholt. Am

Wiederholungspunkt muss das Interferometer wieder auf den Anfang zurückgesetzt werden. Dies bedeutet einen großen Sprung in der Wellenlänge. Da der Abstand der Sensoren immer gleich sein muss, ist für diesen Schritt eine deutlich höhere Beschleunigung notwendig. Dies führt auch dazu, dass die Achse stärker in Schwingung versetzt wird, die wiederum gedämpft werden muss. Hierfür werden Softwaretools eingesetzt, die die zeitabhängigen Winkelabweichungen der Interferometerachsen erfassen und eine präzise Anpassung der Motorparameter ermöglichen.

Messgerätegenauigkeit:
Die Genauigkeit der eingesetzten Messsysteme wurde durch wiederholte Messungen identischer Arrays analysiert. Dabei zeigte sich, dass Unterschiede in der Wiederholgenauigkeit und im Rauschverhalten der Geräte signifikanten Einfluss auf die ausgewerteten Wellenlängen haben. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass zur Erreichung der angestrebten Genauigkeit auch die Charakterisierung und Auswahl geeigneter Messgeräte entscheidend ist.

In der nachfolgenden Grafik werden die Ergebnisse der 4 verschiedenen Messsysteme miteinander verglichen. Hierbei wurde die gleiche Faser jeweils 5x mit einem Messsystem gemessen. Im Graph ist die Differenz der maximalen und minimalen Abweichung der Messungen dargestellt (Worst-Case-Szenario). Man sieht deutliche Unterschiede in der Wiederholgenauigkeit. Diese kommen im Wesentlichen durch die Messauflösung und das Rauschen der Systeme zustande.

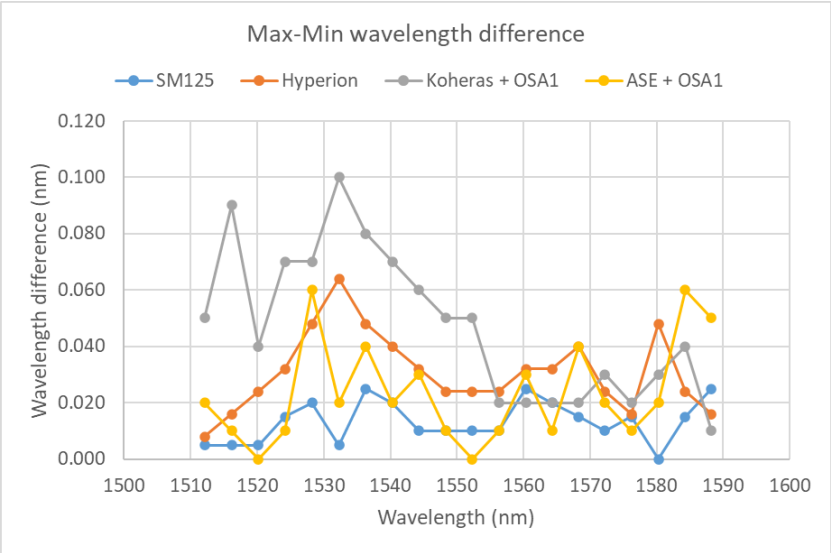


Abbildung 9: Wellenlängenabweichungen eines Arrays gemessen mit unterschiedlichen Messsystemen

Einfluss der Faserdurchmesserschwankungen:

Simulationen zeigten, dass Änderungen des Faser- und damit auch des Kerndurchmessers während des Ziehens die effektive Brechzahl der Mode und damit die Bragg-Wellenlänge beeinflussen. Bereits typische Durchmesserschwankungen von 0,3–0,5 µm können Wellenlängenabweichungen im Bereich von 50–70 pm verursachen.

Faserdurchmesser (µm)	Effektive Brechzahl	Wellenlängenabweichung (pm)

125	1.45467165	
124	1.45454144	-139
124.5	1.45460672	-69
124.8	1.45464572	-28
124.9	1.45465869	-14

Anpassung der Dispersion:

Die im Projekt geplanten Arrays besitzen einen recht großen Wellenlängenbereich, über den die Wellenlängengenauigkeit möglichst konstant sein muss. Da sich die Brechzahl aufgrund der Dispersion der Faser über den Wellenlängenbereich ändert muss dies bei der Einstellung der Wellenlänge mit in Betracht gezogen werden. Hierzu wurden Weiterentwicklungen in den Berechnungsalgorithmen der Dispersion in der Einschreibesoftware vorgenommen. Hierfür werden die Wellenlängen zu Beginn des Faserziehens gemessen und in der Software als Feedback übergeben, die daraus die Anpassungen den neuen Winkelpositionen der Motoren des Interferometers berechnet. Im nachfolgenden Diagramm sind die mit dieser Anpassung gemessenen Wellenlängengenauigkeiten dargestellt. Die Werte wurden an verschiedenen Stellen im Faserzug wiederholt. Es ist zu sehen, dass durch die Anpassungen die Wellenlängenschwankungen über den gesamten Messbereich unterhalb von 70pm liegen.

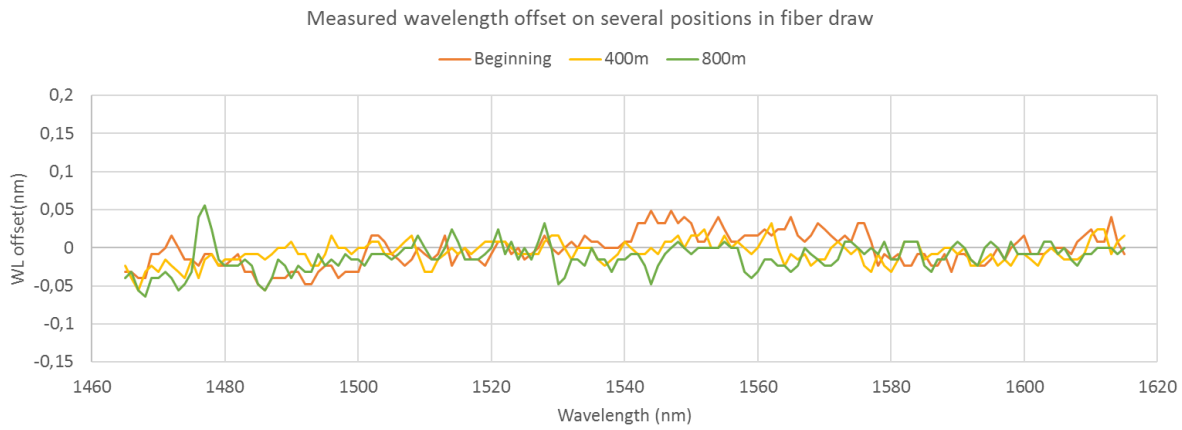


Abbildung 10: Relative Wellenlängenabweichungen von Breitbandarrays gemessen an unterschiedlichen Punkten während des Faserzugs

Räumliche Genauigkeit:

Neben der spektralen Stabilität wurde auch die Positionsgenauigkeit der Sensoren verbessert. Eine Rückkopplung der Ziehgeschwindigkeit an den Einschreibeprozess ermöglicht nun eine dynamische Anpassung der Positionierung. Dadurch konnte die räumliche Abweichung zwischen einzelnen Sensoren von zuvor mehreren Millimetern auf unter 1 mm reduziert werden.

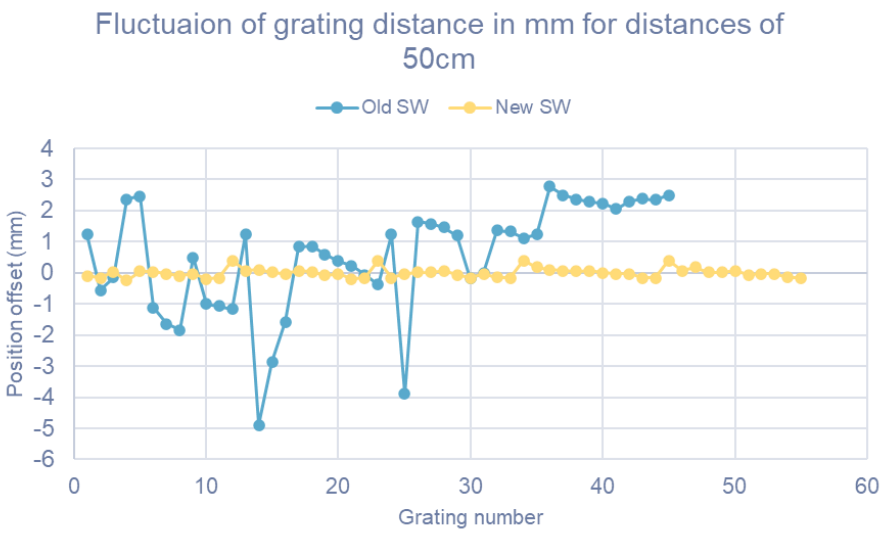


Abbildung 11: Verbesserung der räumlichen Positionsgenauigkeit durch Algorithmusanpassungen

AP2.2 Validierung des Interferometerkonzepts und Prototypherstellung von Sensorarrays

Im Rahmen der Validierungsphase wurden verschiedene Sensorarrays mit dem Interferometeraufbau am Ziehturm hergestellt, um die erreichbare Wellenlängenstabilität und -genauigkeit über lange Faserlängen hinweg zu untersuchen. Dabei lag der Fokus zunächst auf der Frage, wie stabil die Mittenwellenlänge der eingeschriebenen Gitter über die gesamte Länge der gezogenen Faser bleibt. Zu diesem Zweck wurden in mehreren Faserzügen in regelmäßigen Abständen Kalibrierarrays mit exakt definierten Zielwellenlängen eingeschrieben und ausgewertet. Um Einflüsse der Umgebung zu minimieren, wurden alle Messungen temperaturkompensiert, sodass Temperaturschwankungen im Labor keinen Einfluss auf das Ergebnis hatten.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Arbeitspakets lag auf der Untersuchung der Breitbandverluste, die bei einer hohen Gitteranzahl in einer Faser auftreten können. Da im Projekt bis zu 2000 Sensoren pro Faser vorgesehen sind, spielt die kumulierte Dämpfung eine zentrale Rolle.

Zur genaueren Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Einschreibeenergie und Breitbandverlusten wurden anschließend Arrays mit bis zu 5000 Gittern hergestellt. Dabei wurde die Einschreibeenergie systematisch variiert und die resultierenden Reflexionen sowie die Verluste außerhalb der Reflexionswellenlänge mit einem OTDR vermessen. Es zeigte sich, dass das Verhältnis aus Einschreibeenergie und Verlusten für niedrige Leistungen nahezu konstant ist. Bei Einschreibeenergie von mehr als 40%der maximalen Energie steigen die Verluste stärker an. Dieses Energielevel stellt daher einen optimalen Kompromiss dar, um hohe Reflexionswerte bei gleichzeitig moderaten Verlusten zu erzielen.

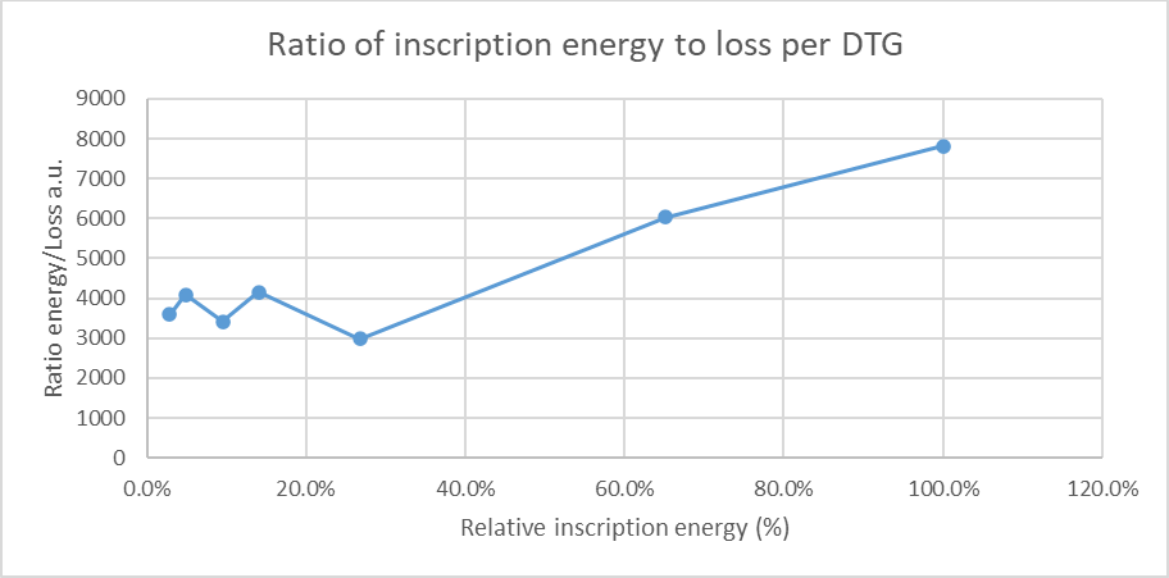


Abbildung 12: Verhältnis Einschreibeenergie und Verlusten über der Einschreibeenergie aufgetragen

Neben der Untersuchung der spektralen Eigenschaften wurde auch der Einfluss des Coatings auf die Wellenlängengenauigkeit und Stabilität eingehend analysiert. Das aufgebrachte Coating übt mechanische Spannungen auf die Faser aus, die zu leichten Wellenlängenverschiebungen führen können. Diese Spannungen können sich mit der Zeit verändern, insbesondere wenn sich Materialeigenschaften des Coatings (z. B. Schrumpfung, Relaxation) ändern. In mehreren Faserzügen wurden daher Beschichtungen mit unterschiedlichen Schichtdicken und Materialien getestet. Ziel war es, eine möglichst homogene und dünne Beschichtung zu erzielen, um Schwankungen der Wellenlänge zu minimieren.

Hierzu wurden verschiedene Coatingmaterialien und Applikationsdüsen verwendet, darunter auch eine speziell angepasste, vom Fraunhofer ISC entwickelte Materialvariante. Vergleichende Querschnittsaufnahmen zeigten, dass das bisher eingesetzte Ormocer-T bei sehr dünnen Schichtdicken aufgrund seiner hohen Viskosität zu elliptischen und ungleichmäßigen Beschichtungen führt, die sich zudem entlang der Faser verändern. Die weiterentwickelte Ormocer-T R&D-Variante hingegen ließ sich deutlich gleichmäßiger auftragen und zeigte eine wesentlich homogenere Schichtverteilung. Diese Verbesserung wirkt sich unmittelbar positiv auf die Wellenlängenstabilität aus, da lokale Spannungsunterschiede in der Beschichtung reduziert werden.

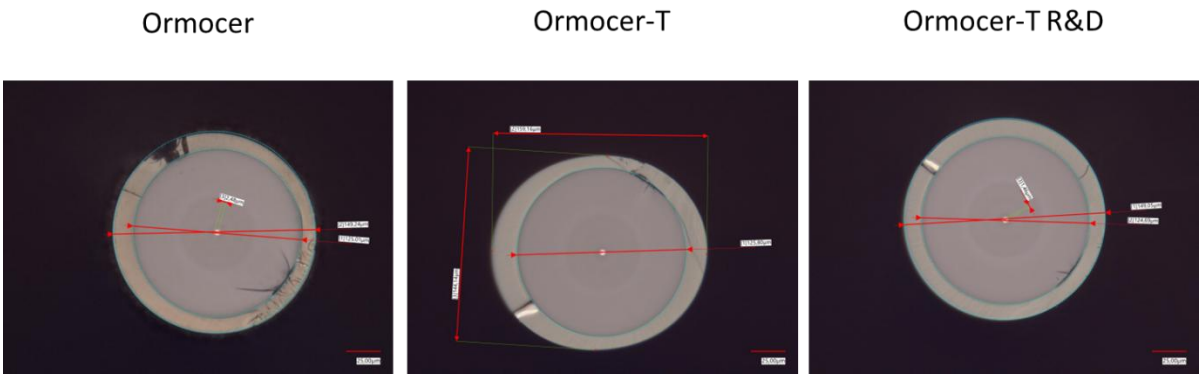


Abbildung 13: Faserquerschnitte mit unterschiedlichen Coatingmaterialien

Die Verringerung der Coatingdicke führt erwartungsgemäß zu einer leichten Reduktion der mechanischen Festigkeit der Faser. Für den vorgesehenen Einsatz in der Hochtemperatursensorik stellt dies jedoch kein gravierendes Problem dar, solange die Grundstabilität der Faser gewährleistet bleibt. Für die im folgenden Arbeitspaket geplanten Kalibrierungen wurden auf dieser Basis mehrere Arrays mit definierten Wellenlängen hergestellt. Diese Arrays dienen dazu, auch Materialvariationen der Preform systematisch zu erfassen und in zukünftigen Optimierungen zu berücksichtigen.

AP2.3 Sensorkalibrierung und Laborerprobung

Für die Nutzung der FBG-Sensorarrays zur präzisen Temperaturmessung war die Entwicklung geeigneter Kalibrierverfahren erforderlich. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Saab wurden mehrere Kalibrierstufen definiert, die den Anforderungen der Luftfahrt entsprechen.

Hierzu mussten die bestehenden Kalibrieraufbauten bei FBGS angepasst und optimiert werden. Die Hauptmessungen erfolgten mit einem Blockkalibrator im Temperaturbereich von −55 °C bis 200 °C. In ersten Testreihen wurden optimale Temperaturabstände zwischen den Messpunkten ermittelt. Dabei zeigte sich, dass sich die Coatingeigenschaften im Bereich von 0 °C bis 30 °C besonders stark ändern. Entsprechend wurden in diesem Bereich kleinere Temperaturintervalle gewählt.

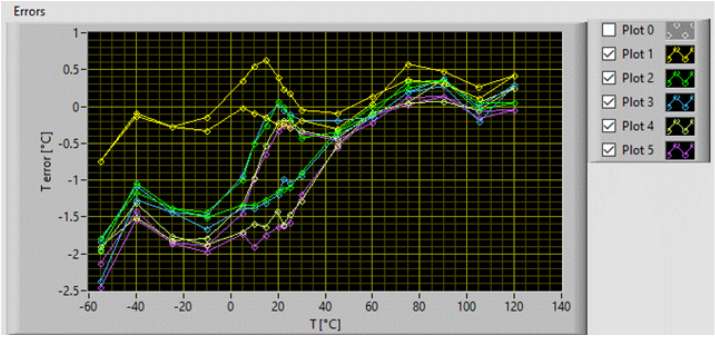
Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit wurden für jede Kalibrierung zwei vollständige Temperaturzyklen (von −55 °C auf 120 °C und zurück) durchgeführt. Jede Temperaturstufe wurde 10 Minuten konstant gehalten, um Messungen im thermischen Gleichgewicht zu gewährleisten. Die Wellenlänge der FBG wurde dabei kontinuierlich aufgezeichnet, um eine hochauflösende Temperaturabhängigkeit zu erhalten.

Statistische Reproduzierbarkeit und Einfluss der Faserproduktion

Zur Beurteilung der statistischen Schwankungen wurden Arrays aus unterschiedlichen Faserzügen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Abweichungen zwischen einzelnen Samples innerhalb einer Charge und zwischen verschiedenen Faserzügen unter 10 pm lagen. Dies entspricht einer Temperaturabweichung von weniger als 1 °C und wird als sehr gering bewertet.

Einfluss von Temperaturbelastung auf das Coating

Zusätzlich wurde untersucht, wie sich kurzzeitige thermische Belastungen bis 200 °C auf das Coating und damit auf die Kalibriergenauigkeit auswirken. Dazu wurden verschiedene Sensoren mehrfach kalibriert und zwischendurch wiederholt auf 200 °C erhitzt. Nach jeder Heizphase erfolgte eine erneute Kalibrierung.



Calibration data set
Plot 1 : T- Calib. before test
Plot 2 : T- Calib. after 40 minutes @200°C
Plot 3: T- Calib. after 30 minutes @200°C
Plot 4: T- Calib. after 90 minutes @200°C
Plot 5: T- Calib. after 30 minutes @200°C

Abbildung 14: Temperaturfehler von kalibrieten Proben nach einer Temperaturbehandlung von 200°C

Die Ergebnisse zeigten, dass sich insbesondere bei niedrigen Temperaturen nach den Hochtemperaturphasen steigende Messabweichungen ergeben. Diese werden auf eine Nachhärtung des Coatings zurückgeführt: Durch die Wärmeeinwirkung verändert sich die mechanische Spannung im Coating, was die temperaturabhängige Dehnung der Faser beeinflusst. Für Temperaturen über 40 °C ist dieser Effekt jedoch vernachlässigbar, sodass die Messgenauigkeit im vorgesehenen Einsatzbereich weitgehend stabil bleibt.

Langzeitverhalten und Alterung des Coatings

Um den Alterungsprozess und das mögliche Nachhärten über längere Zeiträume zu untersuchen, wurden Langzeittests bei 160 °C, 180 °C und 200 °C durchgeführt. Dabei blieben die Sensoren bis zu 500 h in konstanter Temperaturumgebung, wobei regelmäßig Temperaturkalibrierungen erfolgten. Zur Bewertung wurde die Wellenlängenabweichung bei 22,5 °C als Referenz herangezogen.

- Bei 160 °C zeigten sich bis 50 h keine signifikanten Änderungen; auch nach längerer Belastung betrug die Gesamtabweichung nur etwa 40 pm.
- Bei 180 °C wurde ein kontinuierlicher Abfall der Wellenlänge beobachtet.
- Bei 200 °C kam es zunächst zu einem starken Abfall bis etwa 120 h, danach kehrten sich die Werte wieder leicht um und stiegen an. Dieses Verhalten wurde bei mehreren Proben reproduziert.

Die Ergebnisse deuten auf ein Zusammenspiel aus beschleunigtem Altern und anschließendem Materialabbau des Coatings hin. Mikroskopische Untersuchungen bestätigten eine Verringerung des Coatingdurchmessers, jedoch ohne Beeinträchtigung der Schutzfunktion. Somit bleibt die Faser auch bei längeren Hochtemperaturbelastungen funktionsfähig.

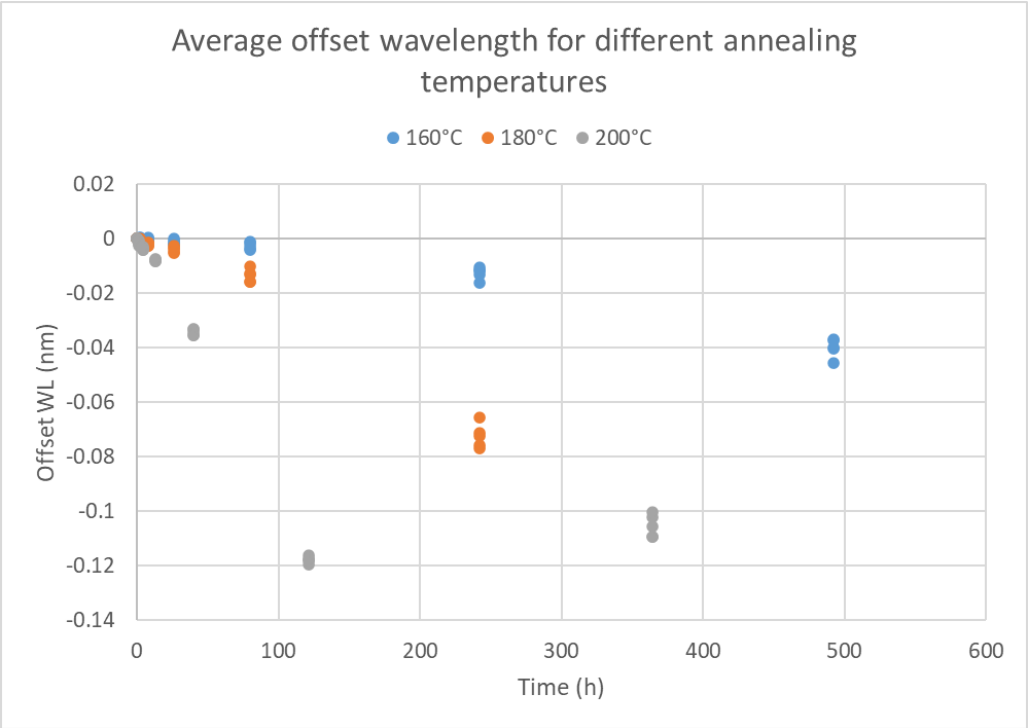


Abbildung 15: Wellenlängenabweichung durch Coating-Alterungseffekte

Aus den Langzeituntersuchungen lässt sich schließen, dass bei Temperaturen unter 100 °C über Zeiträume von mehr als zehn Jahren keine signifikanten Drift-Effekte zu erwarten sind. In typischen Anwendungen, in denen die Sensoren nur kurzzeitig hohen Temperaturen ausgesetzt sind, führen kumulative Effekte lediglich zu geringen Abweichungen. Eine detailliertere Untersuchung dieses Alterungsverhaltens wäre im Rahmen spezieller Anwendungen sinnvoll, liegt jedoch außerhalb des Umfangs dieses Projekts.

AP2.4 Sensormusterherstellung für Testen @ Saab

In Absprache mit Saab wurden verschiedene Sensorkonfigurationen definiert, bei der sich ein Wellenlängenmuster mehrfach wiederholt. Eine der Konfigurationen besteht aus einer Wellenlängenrampe mit 47 FBG, die sich 8x wiederholt. Insgesamt sind damit 376 Gitter in einer Faser. Der Abstand der Sensoren wurde recht klein mit 20mm gewählt. Dadurch muss bei dem Rücksprung von der hohen Wellenlänge auf die niedrige Wellenlänge ein großer Abstand überbrückt werden. Diese Faser mit der gleichen Konfiguration wurde mehrfach produziert und die einzelnen Fasern können dann in Reihe miteinander verbunden werden, damit lässt sich die Gesamtsensoranzahl noch weiter erhöhen. Die Wellenlängenabweichung war <70pm und damit wurde das Projektziel erfüllt.

AP3.1 Sensorkonzeptentwicklung für Füllstand und Leckagedetektion

In diesem Arbeitspaket soll ein Füllstands- bzw. Leckagesensor entwickelt werden. Hierfür wird ein Sensorkonzept nach der Pump-and-Probe-Technologie entwickelt. Das Konzept beruht darauf, dass gasförmige Substanzen eine geringere Wärmeleitung und

Wärmekapazität besitzen als flüssige Substanzen. Für das Messprinzip werden Fasersensoren zur Messung der Temperatur verwendet. Die Fasersensoren werden zusammen mit einem Heizdraht in eine Kapillare gebracht.

Wird diese Kapillare nun in eine Flüssigkeit eingetaucht so wird die Wärme der Kapillare unterhalb des Flüssigkeitslevels schnell weggeführt, als im gasförmigen Bereich. Dadurch messen die Sensoren in der Flüssigkeit eine niedrigere Temperatur als im gasförmigen Bereich. Aus dem Unterschied lässt sich das Flüssigkeitslevel ermitteln. Durch Verwenden von vielen Sensoren mit kurzen Abständen lässt die räumliche Auflösung des Sensors verbessern.

Konzeptentwicklung und Untersuchungen zur Sensitivitätssteigerung

Zur Steigerung der Sensitivität und zur Vermeidung elektrischer Komponenten im Tankbereich wurde parallel ein Konzept für ein optisch beheiztes Sensorsystem untersucht. Die Idee besteht darin, eine Faser so zu dotieren, dass sie optische Strahlung absorbiert und sich dadurch selbst erwärmt. Aus der Literatur ist bekannt, dass insbesondere im Bereich um 1.400 nm aufgrund der OH-Absorptionsbande eine erhöhte Absorption auftreten kann.

Zur Bewertung der Eignung wurden Breitbandabsorptionsmessungen verschiedener Faserproben im Bereich von 600 nm bis 2.100 nm durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten deutliche Unterschiede in der Absorption abhängig von der Dotierung. Fasern mit erhöhter Absorption in diesem Wellenlängenbereich könnten somit als optische Heizelemente eingesetzt werden.

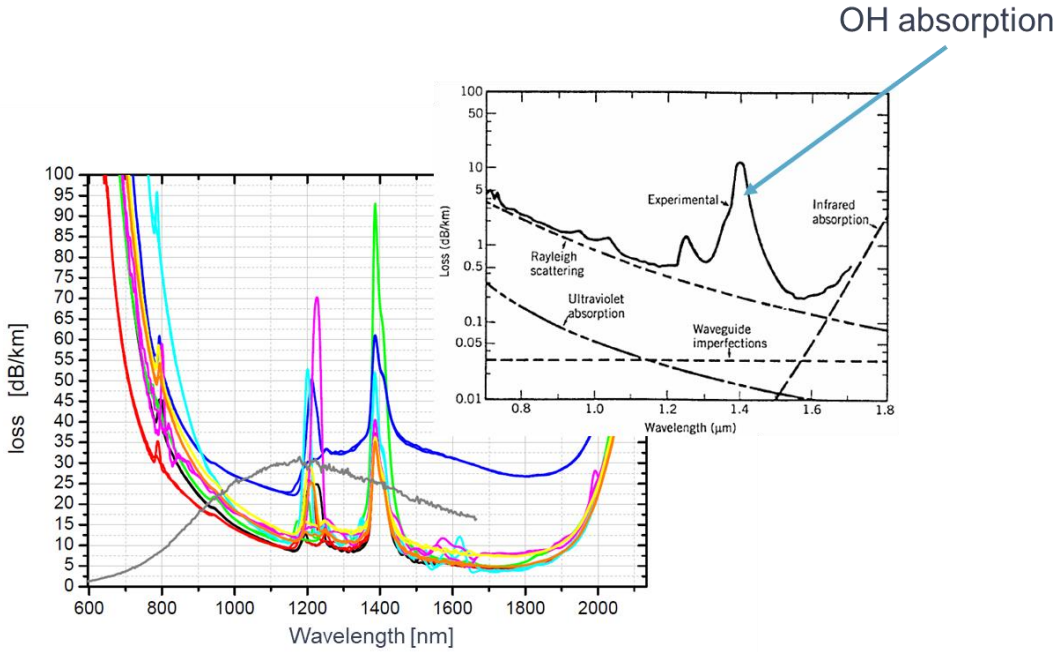


Abbildung 16: Dämpfungsmessung verschiedener Faser für optische Pump-and-Probe-Messung

Ein erweitertes Konzept sieht die Entwicklung einer Doppelkernfaser vor, bei der ein zweiter Kern aus einem stärker absorbierenden Material in die Standardfaser integriert wird. Dadurch wäre die Heizquelle direkt an den Sensorkern gekoppelt, was eine effizientere Energieübertragung ermöglicht und den Energiebedarf reduziert.

Experimentelle Untersuchungen und Designvarianten

Im weiteren Projektverlauf wurden verschiedene Designvarianten des Sensors entwickelt und experimentell getestet. In der ersten Ausführung wurde ein Heizdraht spiralförmig um eine Kapillare mit der Sensorfaser gewickelt und anschließend in Flüssigkeitsbehälter eingetaucht. Diese Anordnung führte jedoch zu einer ungleichen Temperaturverteilung, da die Wärmeübertragung entlang der Kapillare nicht homogen war.

Zur Verbesserung wurden zwei neue Designansätze erarbeitet, bei denen separate Metallkapillaren für Heizdraht und Sensorfaser verwendet werden.

- Beim ersten Design sind beide Kapillaren innerhalb einer größeren Schutzkapillare angeordnet. Dabei muss der Abstand zwischen Heiz- und Sensorkapillare konstant gehalten werden, was in der Praxis aufwendiger umzusetzen ist.
- Das zweite Design sieht eine starre Verbindung zwischen beiden Kapillaren vor, wodurch der Abstand fixiert ist. Diese Variante ist deutlich aufwändiger in der Herstellung, gewährleistet aber eine stabilere thermische Kopplung.

Basierend auf dem ersten Design wurden erste Funktionsmuster hergestellt und getestet. Dabei zeigte sich, dass kleinste Abstandsänderungen zwischen den Kapillaren zu messbaren Unterschieden im thermischen Verhalten führen. Um dies zu vermeiden, wurden verschiedene Stützstrukturen untersucht.

Bewertung des optischen Pump-and-Probe-Konzepts

Für das optische Pump-and-Probe-Prinzip wurden thermische Simulationen durchgeführt, um die Temperaturverteilung entlang der Faser bei homogener Dämpfung zu analysieren. Da die Dämpfung über die Faserlänge nahezu konstant ist, resultiert eine stärkere Erwärmung am Faseranfang als am Ende. Diese Inhomogenität stellt eine Herausforderung für eine gleichmäßige Sensitivität dar.

Zur Untersuchung möglicher Kompensationsstrategien wurden Versuche durchgeführt, bei denen verschiedene Fasertypen mit Laserstrahlung behandelt wurden, um lokal die Dämpfung zu erhöhen. Durch stark fokussierte Strahlung konnte zwar die Dämpfung deutlich gesteigert werden, jedoch verschlechterte sich dadurch die Lichtführung im Kern, da vermehrt Licht in den Mantel übertrat. Nutzbare Ergebnisse zur gezielten lokalen Erhöhung der Dämpfung konnten daher bislang nicht erzielt werden.

Eine alternative Möglichkeit wäre die Variation der Preformzusammensetzung entlang der Faserlänge, was jedoch einen sehr hohen technischen Aufwand bei der Preformherstellung erfordert.

Da der hierfür notwendige Entwicklungsaufwand die im Projekt verfügbaren Ressourcen deutlich überschreitet, wurde das Konzept der optischen Heizung im Pump-and-Probe-Ansatz nicht weiterverfolgt.

AP3.2 Entwicklung von einem Sensorprototyp

Auf Basis der in Arbeitspaket 3.1 entwickelten Konzepte wurden mehrere Sensorprototypen aufgebaut und im Labormaßstab getestet. Dafür wurden zunächst geeignete FBG-Sensordesigns festgelegt und in unterschiedlichen Faserzügen realisiert.

Da für diesen Einsatzzweck eine hohe Reflexion der Sensoren erforderlich ist, kamen hochphotosensitive Fasern zum Einsatz, die sich besonders gut für das interferometrische Einschreiben von Gittern eignen. In diese Fasern wurden Sensorreihen mit unterschiedlichen Gitterlängen eingebracht, um die Auswirkungen unterschiedlicher Geometrien auf das Messverhalten zu analysieren.

Da im Einsatz – insbesondere an der Gas-Flüssigkeits-Grenzschicht – starke Temperaturgradienten auftreten, ist eine kurze Gitterlänge vorteilhaft. Voruntersuchungen an Einzelsensoren zeigten, dass Gitterlängen von mehr als 5 mm zu deutlichen Peakverformungen führen, was die Auswertegenauigkeit reduziert. Entsprechend wurde eine Gitterlänge von maximal 5 mm als optimaler Kompromiss zwischen Auflösung und Stabilität festgelegt.

Für die Fertigung der Sensorarrays wurden Ziehversuche am Faserziehturm durchgeführt, bei denen Arrays mit bis zu 40 FBG eingeschrieben wurden. Diese Ziehturmgitterarrays wurden anschließend vollständig optisch charakterisiert und in die im vorherigen Arbeitspaket entwickelten Sensordesigns integriert.

Als erstes Designkonzept wurde eine Stahlkapillare verwendet, in die sowohl eine optische Faser mit 40 Faser-Bragg-Gittern (FBG) als auch ein Heizdraht integriert wurden. Der Heizdraht wurde über ein steuerbares Netzteil betrieben, sodass eine definierte Temperaturerhöhung entlang der Kapillare erzeugt werden konnte. Die gesamte Sensorstruktur wurde anschließend in einen Wassertank eingebracht, um das Messprinzip experimentell zu validieren. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Labormessaufbau zur Demonstration des Füllstands in einem Wasserbehälter.

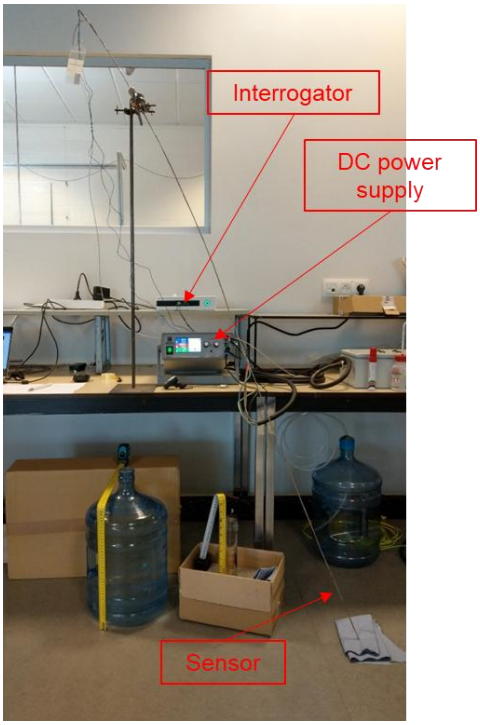


Abbildung 17: Aufbau zur Bestimmung des Füllstands in einem Wasserbehälter

Zur Bewertung der Prototypen wurde ein Mess- und Kalibrieraufbau konzipiert, mit dem verschiedene Sensorproben getestet werden konnten. Der Aufbau ermöglicht das Testen mit unterschiedlichen Flüssigkeiten sowie die gezielte Variation der Temperatur.

Als Testmedien wurden zunächst Wasser und anschließend auch Öl eingesetzt, um den Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften auf die Messgenauigkeit zu untersuchen. Die Beheizung des Sensors erfolgte über die angeschlossene Stromquelle, während die Auswertung der FBG-Signale mit dem von FBGS entwickelten Interrogator-System FBG-Scan durchgeführt wurde. Zusätzlich wurde ein externer Temperatursensor integriert, um Referenzmessungen zur Temperaturüberwachung und Vergleichskalibrierung zu ermöglichen.

Mit diesem Versuchsaufbau konnten die Prototypen unter realitätsnahen Bedingungen getestet und das Temperatur- und Füllstandsverhalten sowohl im kalten als auch im erhitzten Zustand detailliert analysiert werden.

AP3.3 Sensortest und Kalibrierung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden umfangreiche Messreihen mit den zuvor entwickelten Sensorkonzepten durchgeführt, um deren Verhalten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen systematisch zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden Ziehturmgitter-Arrays mit unterschiedlichen Konfigurationen hergestellt, die sich insbesondere in Sensorabstand, Sensorwellenlänge und Wellenlängenabstand unterschieden. Diese Arrays wurden anschließend in dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau getestet.

Zu Beginn erfolgten grundlegende Temperaturkalibrierungen der Sensorfasern. Hierbei wurden die Fasern ohne Schutzkapillare in einen Blockkalibrator eingebracht und zwischen –22,5 °C und 112,5 °C in gleichmäßigen Temperaturintervallen vermessen. Aus den dabei aufgenommenen Daten wurde die Abhängigkeit der Wellenlängenverschiebung von der Temperaturänderung bestimmt. Zur Beschreibung dieser Beziehung wurde ein quadratischer Ansatz gewählt, um die entsprechenden Kalibrierkoeffizienten zu ermitteln. Mit diesen Koeffizienten lassen sich Temperaturen aus gemessenen Wellenlängenänderungen präzise berechnen.

Im Anschluss daran wurden die Levelsensoren bei konstanter Heizspannung untersucht. Dabei wurde die zeitliche Entwicklung der Wellenlängenänderung entlang der Faser aufgezeichnet und ausgewertet. Die ersten Versuche erfolgten in Luft, um eine Referenzmessung unter gasförmigen Bedingungen zu erhalten. Es zeigte sich, dass entlang der Sensorlänge lokale Schwankungen in der Temperaturantwort auftraten. Ursache hierfür war die ungleichmäßige Wicklung des Heizdrahts um die Kapillare, wodurch sich die Heizleistung nicht überall gleichmäßig auf die Temperaturänderung auswirkte. Dieser Effekt ließ sich jedoch durch geeignete Kalibrierverfahren weitgehend kompensieren, sodass die Sensoren für die weiteren Untersuchungen zuverlässig eingesetzt werden konnten.

Darauf aufbauend wurden die Experimente systematisch für verschiedene Heizleistungen und Flüssigkeitstemperaturen wiederholt. Für die Auswertung wurden spezifische Algorithmen entwickelt, die eine zuverlässige Detektion des Flüssigkeitsspiegels ermöglichen. Dabei werden die zeitlichen Temperaturänderungen aller Sensorpunkte analysiert und miteinander verglichen, um aus relativen Änderungen den exakten Übergang zwischen Gas- und Flüssigphase zu bestimmen. Insbesondere Verfahren, die relative Temperaturänderungen über die Zeit bewerten, ermöglichten eine klare Identifikation der Übergangsbereiche.

Im statischen Fall – also bei konstanter Heizleistung – zeigte sich, dass Sensoren in der Flüssigkeit eine deutlich geringere relative Temperaturänderung aufweisen als Sensoren in

Luft. Die Grenzschicht zwischen beiden Zonen kann somit eindeutig anhand der relativen Temperaturänderung bestimmt werden. Vergleicht man die Temperaturverläufe zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z. B. nach 500 s und 1680 s), lässt sich die Füllstandsgrenze im Diagramm klar erkennen; sie ist in der rechten Grafik als gestrichelte Linie markiert.

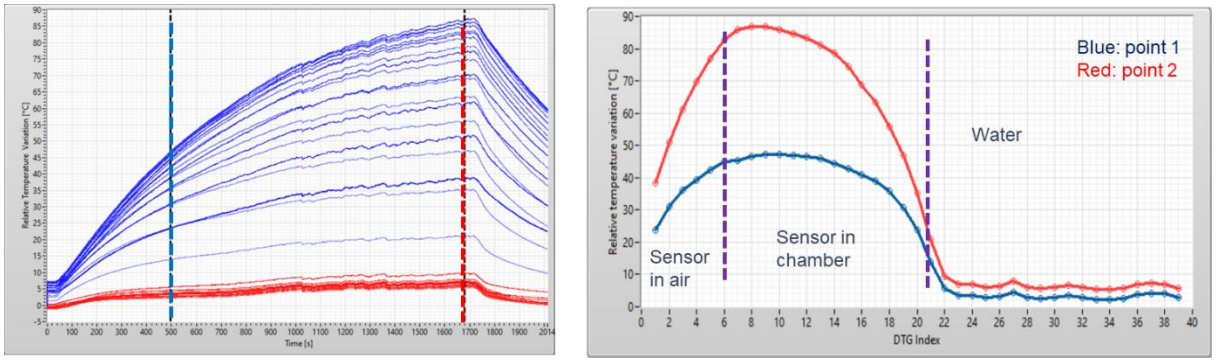


Abbildung 18: Statische Messung der Füllstandshöhe zu unterschiedlichen Zeiten

Ergänzend wurden nicht-statische Szenarien untersucht, um das Verhalten der Sensoren unter realistischeren Bedingungen zu evaluieren. Dazu wurden gezielt Verwirbelungen der Flüssigkeit durch einen Rührer erzeugt, um Strömungseinflüsse zu simulieren. Auch Szenarien mit starken Turbulenzen, bei denen Luftblasen in die Flüssigkeit eingetragen wurden, wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass Strömungen selbst nur geringe Auswirkungen auf die Temperaturprofile haben. Sobald jedoch Luftblasen im Medium vorhanden sind, verändert sich das thermische Verhalten deutlich, und die resultierenden Kurvenverläufe werden komplexer. In diesen Fällen konnten die entwickelten Algorithmen den Flüssigkeitsstand nicht mehr eindeutig bestimmen, sodass hier weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

AP3.4 Sensorvalidierung im Labor

Nach Abschluss der verschiedenen Kalibrierschritte wurden die entwickelten Sensoren in gezielten Laboruntersuchungen validiert. Ziel war es, die Funktionsfähigkeit der Sensoren bei der Bestimmung des Flüssigkeitsstands in einem Medium mit unbekannter Tiefe zu überprüfen. Dazu wurden die Sensoren in ein Flüssigkeitsbad eingetaucht und die gemessenen Temperaturverläufe ausgewertet, um den exakten Pegel der Flüssigkeit zu bestimmen.

Während dieser Tests zeigte sich, dass nicht nur die stationären Messwerte, sondern auch das zeitliche Verhalten der Sensoren eine entscheidende Rolle spielt. Durch die hohe Abtastrate des verwendeten Messsystems von über 100 Hz war es möglich, dynamische Änderungen im Temperaturverlauf präzise zu erfassen. Diese Eigenschaft ist insbesondere dann relevant, wenn sich der Flüssigkeitsstand ändert – beispielsweise in realen Tanksystemen während Beschleunigungs- oder Schwenkbewegungen.

Die Analyse ergab, dass die Detektionsgeschwindigkeit des Flüssigkeitsspiegels maßgeblich von der Sensorgröße, der Heizleistung und der Wärmekapazität der Flüssigkeit abhängt. Je nach Sensorgeometrie und Betriebsparametern wurden Ansprechfrequenzen im Bereich von wenigen Hertz ermittelt.

Die durchgeführten Versuche zeigten insgesamt eine sehr gute Stabilität und Reproduzierbarkeit unter statischen Bedingungen, also bei ruhender Flüssigkeit. Bei dynamischen Bedingungen – etwa bei Verwirbelungen oder starken Bewegungen im Tank – nahm die Genauigkeit der Detektion jedoch spürbar ab. Insbesondere bei turbulenten Strömungen konnte der Flüssigkeitsspiegel nicht mehr eindeutig und reproduzierbar bestimmt werden. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für weitere Anpassungen an der Sensorgeometrie und für die Entwicklung verbesserter Auswertealgorithmen, um auch in realitätsnahen Szenarien zuverlässige Messergebnisse zu erzielen. Diese weiteren Entwicklungen gehen über den Rahmen dieses Projekts hinaus.

AP3.5 Sensormusterherstellung für Testen @ Saab

Auf Basis der im Labor gewonnenen Erkenntnisse wurden Sensoren mit einem festgelegten und optimierten Design hergestellt. Dabei wurden die Konstruktionsparameter – wie Sensordurchmesser, FBG-Abstände, Heizleistung und Schutzkonzept – so gewählt, dass sie den Anforderungen der geplanten Umwelt- und Belastungstests entsprechen.

Parallel dazu wurde eine Testkampagne in Abstimmung mit Saab entwickelt. Die Kampagne diente der Validierung der Sensorkonzepte hinsichtlich mechanischer Stabilität, Temperaturbeständigkeit und Messgenauigkeit.

Da die vorherigen Laborversuche gezeigt hatten, dass turbulente Strömungen und Gaseinschlüsse in Flüssigkeiten die Messergebnisse stark beeinflussen können, wurden die abschließenden Tests unter definierten Laborbedingungen bei FBGS durchgeführt.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

FBGS hat die im Projektantrag angedachte Vorauskalkulation von Investment, Personalkosten, Material und Unteraufträgen im Wesentlichen eingehalten. Details dazu sind im Verwendungsnachweis zu finden.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten waren sowohl inhaltlich als auch vom Umfang her notwendig und angemessen, um die angestrebten Projektziele zu erreichen. Die Entwicklung luftfahrttauglicher, faseroptischer Sensoren mit hoher Temperaturbeständigkeit und erweiterter Multiplexfähigkeit stellte ein anspruchsvolles technologisches Vorhaben dar, das über den aktuellen Stand der Technik hinausging. Um die Zielparameter – insbesondere die Temperaturstabilität bis 700 °C, die Integration von bis zu 2000 Messstellen sowie die Entwicklung eines faseroptischen Füllstands- und Lecksensors – zu realisieren, war eine systematische Bearbeitung mehrerer aufeinander aufbauender Arbeitspakete erforderlich.

Die Arbeiten umfassten sowohl grundlegende Untersuchungen zu geeigneten Faser- und Coatingmaterialien als auch die Weiterentwicklung der Femtosekunden-Einschreibetechnologie. Ergänzend wurden geeignete Schutz- und Packaging-Konzepte für den Hochtemperatureinsatz entwickelt, um eine dauerhafte Stabilität der Sensoren sicherzustellen. Diese Schritte waren unverzichtbar, um die Technologie von einem Laborstadium in Richtung industrieller und luftfahrtspezifischer Anwendung zu überführen.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für die zukünftige Nutzung faseroptischer Sensortechnologien in der Luftfahrt und angrenzenden Industrien. Durch die erfolgreiche Entwicklung hochtemperaturbeständiger Sensoren mit robustem Schutzkonzept sowie der fortgeschrittenen Multiplexing-Technologie wurde ein signifikanter technologischer Fortschritt erzielt, der eine präzise Temperatur- und Füllstandsüberwachung unter extremen Bedingungen ermöglicht. Diese Entwicklungen eröffnen neue Anwendungsfelder, insbesondere für sicherheitsrelevante Überwachungsaufgaben in Flugzeugen, aber auch in Energie- und Industrieanlagen.

Die im Projekt erarbeiteten Technologien sollen in das bestehende Produktportfolio der FBGS Technologies GmbH integriert und über bestehende Vertriebskanäle vermarktet werden. Darüber hinaus wird durch die Kooperation mit Saab eine direkte Anbindung an luftfahrtspezifische Anwendungen gewährleistet, was den Transfer in konkrete Serienanwendungen erleichtert.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden keine neuen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse oder Veröffentlichungen anderer Forschungseinrichtungen oder Unternehmen bekannt, die unmittelbaren Einfluss auf die im Projekt bearbeiteten Themengebiete gehabt hätten. Somit konnten die geplanten Arbeiten unabhängig von externen Entwicklungen durchgeführt werden.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Veröffentlichungen zu den erzielten Ergebnissen vorgenommen. Auch sind derzeit keine weiteren Veröffentlichungen geplant, da die gewonnenen Erkenntnisse überwiegend unternehmensintern genutzt und im Hinblick auf eine spätere kommerzielle Verwertung vertraulich behandelt werden. Dennoch wurden die Projektergebnisse auf verschiedenen Fachmessen, wie der Sensor+Test, einem interessierten Fachpublikum vorgestellt. Diese Präsentationen dienten dazu, die technologischen Ansätze und Anwendungsmöglichkeiten potenziellen Nutzern und Industriepartnern näherzubringen und den Transfer in zukünftige Produktentwicklungen vorzubereiten.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Sachbericht Omnifuktionale, Multiplex-Fasersensoren für Aerospace Applikationen („OmniAerFiSens “)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Voigtländer, Dr. Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2025
	6. Veröffentlichungsdatum 29.10.2025
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) FBGS Technologies GmbH Franz-Loewen-Str. 3 07745 Jena	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 20Q2106
	11. Seitenzahl 35
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Invalidenstraße 48 10115 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Luftfahrtforschung (PT-LF), Bonn, 29.10.2025	

18. Kurzfassung

Ziel des Projekts war die Entwicklung omnifunktionaler, luftfahrttauglicher faseroptischer Sensoren mit nahezu unbegrenzten Multiplexing-Möglichkeiten zur Messung von Temperatur, Überhitzung, Füllstand und Leckage in Flugzeugen. Im Mittelpunkt standen drei technische Schwerpunkte: die Entwicklung hochtemperaturstabiler Sensoren, die Realisierung einer „endlosen“ Multiplexing-Technologie sowie die Entwicklung eines neuartigen Füllstands- und Leckagesensors auf faseroptischer Basis.
Im Bereich der Hochtemperatursensorik wurde der Prozess zur Herstellung temperaturbeständiger Faser-Bragg-Gitter (FBG) optimiert, um stabile Messungen bis 700 °C zu ermöglichen. Für das endlose Multiplexen wurde das Ziehturmgitterverfahren weiterentwickelt, sodass erstmals tausende Sensoren mit hoher Positions- und Wellenlängengenauigkeit in einer einzigen Faser realisiert werden konnten. Damit wird eine wesentliche Grundlage geschaffen, um elektrische Sensoren zu ersetzen und signifikant Gewicht und Verkabelungsaufwand in Flugzeugsystemen zu reduzieren.
Ein weiterer Fokus lag auf der Entwicklung eines Füllstandssensors auf Basis der Pump-and-Probe-Technologie. Hierbei wurde ein Messprinzip erarbeitet, das Temperaturdifferenzen zwischen Gas- und Flüssigphasen zur Füllstandserkennung nutzt.

19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis