

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK IOF

ABSCHLUSSBERICHT ZUM VERBUNDPROJEKT „QUANTENINSPIRIERTE, OMNIFUNKTIONALE FASERSENSORSYSTEME“
INNERHALB DES FÖRDERSCHWERPUNKTES REGIONALE UNTERNEHMERISCHE BÜNDNISSE FÜR INNOVATION DES BMFT

RUBIN QUANTIFISENS

„Quanteninspirierte, omnifunktionale Fasersensorsysteme“

Teilvorhaben

„Entwicklung von Faser-, Laser- und Quantentechnologie für Fasersensorik (FAQ)“

SACHBERICHT TEIL I: KURZBERICHT

Förderkennzeichen: 03RU1U071B

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 bis 31.08.2025

Gefördert durch das:

Bundesministerium für Bildung, Transfer und Raumfahrt

(Projektträger Jülich, Gründungs-, Transfer- und Innovationsförderung, Regionaler Strukturwandel (GTI 6))

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena

Projektleitung: Dr. Thomas Schreiber
Verbundleitung AG FuE: Dr. Stephanie Hesse-Ertelt

Mit Beiträgen von: Dr. Johannes Nold, Dr. Stefan Kuhn, Dr. Till Walbaum, Marco Plötner, Dr. Valerio Gili,
Josué Leon Torres

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Jena, Februar 2026

Gefördert durch:

Inhalt

I. Kurzdarstellung	3
1. Aufgabenstellung.....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3. Ablauf des Vorhabens und wesentliche Ergebnisse	4
4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4

Schlussbericht

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Das Teilvorhaben „Faser-, Laser- und Quantentechnologie für Fasersensorik“ (FAQ) leistet einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen des Gesamtziels des Vorhabens und verfolgt hierzu mehrere quantifizierte Teilziele. Dazu zählen die Entwicklung einer omnifunktionalen Fasertechnologie zur gezielten Verbesserung sensorischer Eigenschaften optischer Fasern sowie zur Erzeugung spezifischer Wellenlängen, die Entwicklung anwendungsspezifischer Lasersysteme zur Steigerung der Auflösung in der verteilten Fasersensorik sowie die Erforschung geeigneter Quellen und Konzepte für quantenbildgebende faseroptische Sensorsysteme.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

Zu Beginn des Projekts wurden Temperatur- und Dehnungsinformationen in Glasfasersensoren überwiegend mittels Rayleigh- und Brillouin-Messtechniken gewonnen. Die Nutzung von Standard-Telekomfasern führte dabei zu Einschränkungen, insbesondere hinsichtlich der eindeutigen Unterscheidung von Temperatur- und Dehnungseffekten sowie beim Kompromiss zwischen Reichweite und Signalstärke. Ansätze zur gezielten Entwicklung optimierter Fasern für Sensoranwendungen waren kaum vorhanden. Auch das Shape-Sensing mit Multikernfasern steckte noch in den Anfängen und war in Reichweite und Genauigkeit limitiert. Nichtlineare Effekte in photonischen Kristallfasern waren bekannt, jedoch fehlte eine zuverlässige Verfügbarkeit für kommerzielle Anwendungen. Lasersysteme mit den für neuartige, rückstrebasierte Messtechnik erforderlichen Eigenschaften standen kommerziell nicht zur Verfügung. Im Bereich photonischer Quantentechnologie war die MIR-Quantenmikroskopie ein sehr gefragtes Forschungsthema, das jedoch mehrere technische Einschränkungen aufwies, welche die Demonstration überzeugender Ergebnisse verhinderten. Der Mangel an stärker angewandter Forschungsarbeit hatte verhindert, dass sich diese aufkommende Technologie aus der Proof-of-Concept-Phase heraus in Richtung Anwendungen weiterentwickelt. Insbesondere fehlten im Stand der Technik die folgenden Entwicklungen:

- Aus Sicht einer ermöglichenden Technologie waren MIR-SPDC-Quellen ein wenig untersuchtes Thema, insbesondere im Hinblick auf die angestrebte Mikroskopieanwendung.
- Aus konzeptioneller Sicht fehlte der MIR-Quantenbildgebung das Verständnis dafür, wie praktische Probleme zu lösen sind, z. B. suboptimale Auflösung aufgrund intrinsischer SPDC-Grenzen, Fluss, Stabilität.

Eigene Vorarbeiten des Antragstellers zu Projektbeginn

Das Fraunhofer IOF hatte zum Projektbeginn eine etablierte Prozesskette zur Entwicklung von Spezialfasern – vom Design bis zur Integration in Lasersysteme. Schlüsseltechnologien zur Herstellung komplexer Faserdesigns, insbesondere mit Luftlochstrukturen und Hohlkernfasern, waren entwickelt und in Demonstratoren umgesetzt. Im Bereich Lasersysteme lagen umfassende Erfahrungen in Auslegung, Simulation und Charakterisierung, auch für anspruchsvolle Anwendungen wie LIDAR, vor. Die Expertise umfasste zudem nichtlineare Effekte, Modulationsverfahren und OFDR-Messungen. Im Feld der photonischen Quantentechnologie verfügte das IOF über international anerkannte Kompetenzen in Quantenbildgebung und Photonenpaarquellen, einschließlich patentierter Verfahren und portabler Bildgebungssysteme.

3. Ablauf des Vorhabens und wesentliche Ergebnisse

Im Teilvorhaben FAQ wurden in den einzelnen Teilaspekten der Innovationsbasis (IB) parallel verfolgt und folgende wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse erzielt:

IB 1 – Optische Fasertechnologie:

Die Entwicklung und Simulation von Spezialfasern erfolgte mit Fokus auf optimale Brillouin- und Rayleigh-Streuungseigenschaften. Um die Eigenschaften zu erreichen, zeigte sich, dass Aluminium-dotierte Kerne eine Möglichkeit darstellen und gleichzeitig Einmodigkeit gewährleisten können. Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Gasphasendotierung eine verbesserte Kernstruktur unterstützt. Zur inline-Temperung der Faser und damit der Steuerung der Rayleighstreuung wurde basierend auf theoretischer Modellierung ein vertikaler Ofen beschafft.

Untersuchungen an ESM- und AR-HC-Fasern ermöglichten eine optimierte Dispersion sowie die experimentelle Beobachtung sichtbarer FWM-Effekte mit spektraler Abstimmung (siehe IB2).

Verbesserte EDFA-Verstärker führten zu stabilen, rechteckigen Pulsen.

Eine hohe Positionsgenauigkeit in Multikernfasern konnte erzielt werden.

IB 2 – Streuungsbasierte Messtechnik:

Das Selbstheterodyn-Verfahren wurde für die Messung der Laserlinienbreiten etabliert.

Die Funktionalität von FWM in kommerziellen Fasern wurde bestätigt; in eigengefertigten Fasern gelang die Demonstration der Wellenlängenabstimmung.

SPDC-Photonenquellen wurden entwickelt und optimiert; alternative Kristalle ebenso geprüft. Miniaturisierte Quantenquellen und nichtlineare Interferometrie zeichneten sich durch breite Emission und eine ausreichend hohe Bildgebungsqualität aus.

IB 3 – Quanten- und Lasertechnologie:

Erbium-dotierte Faserverstärker erzielten sowohl hohe Spitzenleistungen als auch hohe Pulskontraste. Die Temperaturdrift im EOM führte zu Stabilitätsproblemen; alternative Regelungsansätze wurden zwar diskutiert, jedoch nicht umgesetzt.

IB 5 – Omnifunktionale Systemintegration:

Demonstratoren, wie die bildgebende Sonde, veranschaulichen erfolgreich Anwendungen mit hoher Auflösung.

Allgemein: Die Koordination des Managements und Controllings oblag dem Fraunhofer IOF. Strukturierte Abstimmungsprozesse und regelmäßige Treffen förderten die Kooperation zwischen den Partnern.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit der Projektpartner FBGS Technologies GmbH, Fraunhofer IOF, Active Fiber Systems GmbH, GRINTECH GmbH, heracle GmbH, Leibniz-IPHT und Luna Innovations Inc. erfolgte im Bündnis auf der Ebene einzelner Entwicklungsfelder der Innovationsbasis (IB). Es fanden regelmäßige Treffen der Projektpartner mit umfassender Berichterstattung statt; die Themen wurden in den Arbeitstreffen diskutiert und die Entwicklung einzelner Teilaspekte adressiert. Die Ergebnisse wurden in den weiteren Arbeitstreffen zusammengeführt und diskutiert. Die Erkenntnisse flossen in die Demonstratorentwicklung ein und konnten darüber verifiziert werden. Die Ergebnisse wurden auf Fachmessen, Tagungen, Workshops und Printmedien durch nationale und internationale Veröffentlichungen präsentiert.

Die beiden Hauptdemonstratoren wurden in Verantwortung von Unternehmenspartnern im Bündnis entwickelt. Der Demonstrator D1 „Navigierende, bildgebende, pathologische Sonde“ wurde von der FBGS GmbH koordiniert. Der Demonstrator D2 „Omnifunktionales, selbstlernendes Fasersensorsystem für die digitale Baustelle“ wurde von der Batix GmbH geführt.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK IOF

ABSCHLUSSBERICHT ZUM VERBUNDPROJEKT „QUANTENINSPIRIERTE, OMNIFUNKTIONALE FASERSENSORSYSTEME“
INNERHALB DES FÖRDERSCHWERPUNKTES REGIONALE UNTERNEHMERISCHE BÜNDNISSE FÜR INNOVATION DES BMFT/

RUBIN QUANTIFISENS

„Quanteninspirierte, omnifunktionale Fasersensorsysteme“

Teilvorhaben

„Entwicklung von Faser-, Laser- und Quantentechnologie für Fasersensorik (FAQ)“

SACHBERICHT TEIL II: EINGEHENDE DARSTELLUNG

Förderkennzeichen: 03RU1U071B

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 bis 31.08.2025

Gefördert durch das:

Bundesministerium für Bildung, Transfer und Raumfahrt

(Projektträger Jülich, Gründungs-, Transfer- und Innovationsförderung, Regionaler Strukturwandel (GTI 6))

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena

Projektleitung: Dr. Thomas Schreiber
Verbundleitung AG FuE: Dr. Stephanie Hesse-Ertelt

Mit Beiträgen von: Dr. Nicoletta Haarlammert, Dr. Johannes Nold, Dr. Stefan Kuhn, Dr. Till Walbaum,
Marco Plötner, Dr. Valerio Gili, Josué Leon Torres

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Jena, Februar 2026

Gefördert durch:

Inhalt

II. Eingehende Darstellung	3
1. Ziele und Ergebnisse	3
IB 1 – Optische Fasertechnologie	3
IB 2 – Streuungsbasierte Messtechnik	28
IB 3 – Quanten-und Lasertechnologie	34
IB 4 – Software & Data Analysis	52
IB 5 – Omnifunktionale Systemintegration	52
2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	57
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	59
4. Verwertbarkeit des Ergebnisses und Fortschreibung des Verwertungsplans	59
5. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	60
6. Veröffentlichungen und Präsentation der Ergebnisse	60

Schlussbericht

II. Eingehende Darstellung

1. Ziele und Ergebnisse

IB 1 – Optische Fasertechnologie

Im Rahmen der übergreifenden Abstimmung aller Partner wurden folgende Ziele definiert, die als Leitlinie für die einzelnen Arbeitsschritte dienen:

- Spezialfaserdesign für Brillouin- und Rayleigh-Streuung
- Konzeption und Design maßgeschneiderter Dispersion für FWM (ESM-Fasern und AR-HC-Fasern)
- Auswahl geeigneter Fasern und Durchführung von Lasersimulationen mit EDFA
- Festlegung neuer Faserdesigns mit verbesserten Rayleigh- und Brillouin-Streueigenschaften
- Erforschung von Kernmaterialien und Entwicklung von Preformen für Brillouin- und Rayleigh-Fasern in der 1. und 2. Iteration
- Untersuchung und Optimierung der Positions- und Brechzahlgenauigkeit in Mehrkernfasern (MCF)
- Entwicklung von Preformen für eine maßgeschneiderte Dispersion (ESM-Fasern und AR-HC-Fasern)
- Herstellung von Versuchspreformen für Fasern mit verbesserten Brillouin-Streueigenschaften
- Optimierung des Faserzugs für Fasern mit Brillouin- und Rayleigh-Eigenschaften
- Faserzug und Parametervariation zur Erzeugung maßgeschneiderter Dispersion (ESM-Fasern)
- Faserzug zur Demonstration relevanter Parameter bei AR-HC-Fasern
- Abgleich des theoretischen Simulationsmodells mit Messergebnissen von kommerziellen und eigenen Brillouin- sowie Rayleigh-Fasern
- Charakterisierung kommerzieller Erbium-dotierter Fasern
- Optimierung der Fasern für die Systemintegration bei Rayleigh- und Brillouin-Anwendungen

Entwicklungsfeld 1: Faserdesign und Simulation

AP 1.1.1_2 Spezialfaserdesign Brillouin, Rayleigh

Die Entwicklung des Spezialfaserdesignkonzeptes fokussierte sich im Projekt schwerpunktmäßig auf den Brillouin-Streueffekt weil dieser mehr Freiheitsgrade und somit ein größeres Optimierungspotenzial als der Rayleigh-Streueffekt bietet. Die folgenden Erläuterungen machen die vielfältigen Ansatzpunkte für die Faserentwicklung deutlich.

Die Brillouin-Streuung basiert auf einer inelastischen Wechselwirkung zwischen optischen Lichtwellen (Photonen) und akustisch-mechanischen Dehnungswellen (Phononen). Unter bestimmten Bedingungen findet eine Wechselwirkung zwischen diesen beiden Wellen statt, was in einer zurückgestreuten Welle mit leichtem Frequenzshift resultiert. Dieser Frequenzshift ist material-, Temperatur- und dehnungsabhängig und kann für verteilte Sensoren bewusst eingesetzt werden.

Zur Simulation der Wechselwirkung wurde ein Modell der Faser generiert, in das die radiale optische Brechzahlverteilung sowie die radiale akustische Schallgeschwindigkeitsverteilung V_a (akustische Brechzahl = reziproke Schallgeschwindigkeit) anhand eines bekannten chemischen Zusammensetzungsprofils modelliert wurde und hieraus die Eigenlösungen der skalaren Helmholtzgleichung (Gleichung 1) für die optische und die akustische Domäne ermittelt.

$$(\nabla_r^2 + k_i^2 \cdot n_i(r)^2) \cdot \mathbf{X} = \beta_i^{eff} \mathbf{X} \quad (1)$$

$\mathbf{X} = E$ (elektrisches Feld) oder u (elastisches Verschiebungsfeld)
 k_i – opt. oder akust. Wellenzahl:
 n_i – opt. oder akust. Brechzahl
 β_i^{eff} – opt. oder akust. Propagationskonstante

Aus der Literatur ist bekannt, dass es unter der Resonanzbedingung $\beta_{opt}^{eff} = 2 \cdot \beta_{akust}^{eff}$ zu einer Rückstreuung kommt. Bei bekannter optischer Wellenlänge λ muss die zugehörige Brillouin-Frequenz ν_B für jede akustische Mode gefunden werden, für die die Resonanzbedingung erfüllt ist. Aus den gefundenen Brillouin-Frequenzen und den Überlappfaktoren von optischer und akustischer Mode kann nun das Brillouin-Spektrum berechnet werden.

Aus den Eigenwertgleichungen ist ersichtlich, dass die radiale Verteilung der Materialeigenschaften n sowie V_a die Eigenwertgleichung maßgeblich beeinflusst. Die Ermittlung der Materialeigenschaften aus der Zusammensetzung erfolgte nach dem „unified materials approach“ von Ballato und Dragic aus der Literatur.¹

Im Projekt wurde sich in Absprache mit den Projektpartnern darauf verständigt, dass man bei einer Wellenlänge von 1,55 μm arbeiten möchte und ein optischer Singlemodebetrieb vorliegen soll. Bestenfalls sollte zudem der optische Wellenleiter analog zu Standard-Singlemodefasern aufgebaut sein ($NA \sim 0,12$, $\varnothing_{\text{Kern}} \sim 9 \mu\text{m}$, $V < 2,405$). Eine optische NA ca. 0,12 kann durch die Verwendung verschiedener Dotierungskonzentrationen und Co-Dotandenverhältnisse erreicht werden.

Germanium als Co-dotand in Standardfasern sowie Aluminium kristallisierten sich im Verlaufe des Projekts als vielversprechend heraus. Beide Dotanden haben spezielle, individuelle Einflüsse auf die optische und akustische Brechzahl infolge von Temperatur und/ oder Strain^{2,3} und führen somit potenziell bei Temperatur- oder Strainänderungen zu einer Änderung der Brillouin-Streubedingungen und damit zur Verschiebung der Brillouinfrequenz.

Mit Hilfe dieser erarbeiteten Simulationskonzepte wurde im Folgenden auf Basis der Kombination von Experiment und Simulation eine verbesserte Brillouinfaser erforscht.

AP 1.1.2_2 Konzept und Design für maßgeschneiderte Dispersion für FWM

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 1.1.2_2 wurde die Entwicklung maßgeschneiderter optischer Fasern für eine effiziente Vierwellenmischung (FWM) vorangetrieben. Das Ziel bestand darin, Fasern mit kontrollierter Dispersion zu entwickeln, um FWM-Prozesse im sichtbaren und NIR-Spektralbereich zu ermöglichen.

Bei FWM in optischen Fasern handelt es sich um einen nichtlinearen Effekt, bei dem zwei Pumpwellen mit den Frequenzen ω_1 und ω_2 zwei neue Wellen mit den Frequenzen ω_3 und ω_4 erzeugen. Sind die Pumpfrequenzen gleich, spricht man von einer entarteten FWM (degenerated four wave mixing - DFWM), bei der eine Pumpwelle mit der Frequenz ω_2 zwei symmetrisch um die Pumpfrequenz liegende Wellen erzeugt. Voraussetzungen für diesen Prozess sind die Erhaltung von Energie und Impuls sowie eine hohe räumliche und zeitliche Überlappung der Wellen entlang der Faser. Der Schwerpunkt dieses Arbeitspakets lag auf der Simulation von endlosen Einmodenfasern (ESM) und Hohlkernfasern (HCF) zur effizienten Erzeugung von FWM.

Endlessly-Single-Mode-Faser

¹ Dragic, P. D., Cavillon, M., Ballato, A. & Ballato, J. A unified materials approach to mitigating optical nonlinearities in optical fiber. II. B. The optical fiber, material additivity and the nonlinear coefficients. *Int J Appl Glass Sci* **9**, 307–318; 10.1111/ijag.12329 (2018).

² P. D. Dragic, S. W. Martin, A. Ballato, and J. Ballato, On the Anomalously Strong Dependence of the Acoustic Velocity of Alumina on Temperature in Aluminosilicate Glass Optical Fibers—Part I: Material Modeling and Experimental Validation, *Int J of Appl Glass Sci* **7**, 3–10, 10.1111/ijag.12137 (2016).

³ Deroh, M., Sylvestre, T., Chretien, J., Maillotte, H., Kibler, B., & Beugnot, J.-C., Towards athermal Brillouin strain sensing based on heavily germania-doped core optical fibers. *APL Photonics*, **4**, 030801. <https://doi.org/10.1063/1.5085640> (2019).

Endlessly-Single-Mode-Fasern (ESM-Fasern) eignen sich besonders für FWM, da sie über alle Wellenlängen hinweg einmodig sind und ihre effektive Modenfläche A_{eff} nahezu unabhängig von der Wellenlänge bleibt. Die Dispersion dieser Fasern lässt sich durch Anpassung des Lochdurchmessers d und des Lochabstands Λ gezielt steuern. Zur Vorhersage der Dispersion wurde ein COMSOL Multiphysics-Modell erstellt, in dem die Geometrie definiert und der Brechungsindex nach den Sellmeier-Gleichungen eingeführt wurde. Nach Berechnung der Moden wurde die Grundmode ausgewählt, um die charakteristische Dispersionskurve zu erhalten (siehe Abbildung 1).

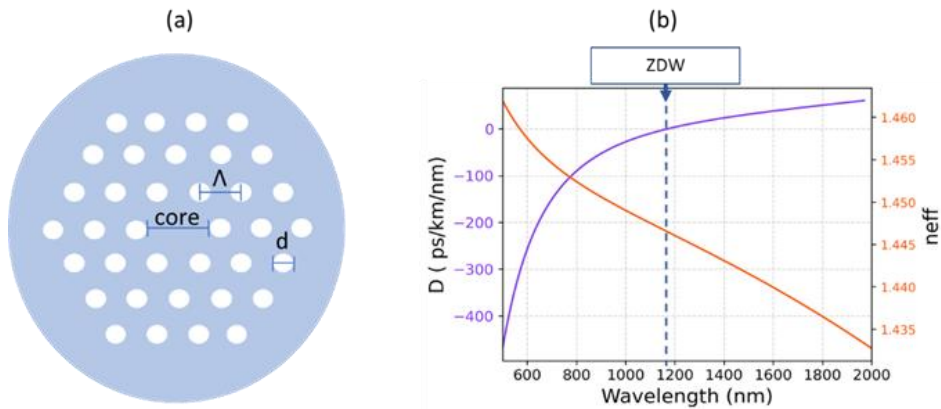


Abbildung 1: Geometrie sogenannter ESM-Faser (a) und Dispersionskurve (b): D : Dispersion, ZDW: Zero Dispersion Wellenlänge, n_{eff} : Effektive Indizes der Grundmode.

Um Licht im sichtbaren Bereich zwischen 500 und 600 nm zu erzeugen, muss die Zero-Dispersion-Wellenlänge (ZDW) auf ~ 800 nm verschoben werden. Dies wird durch eine Vergrößerung von Lochdurchmesser und Pitch ($\Lambda = 2,1\text{--}2,5 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0,8$) erreicht. Dabei sollte die Pumpwellenlänge leicht kürzer als die ZDW sein, sodass die Signalwellen gemäß dem Phasenabstimmungsdiagramm im Bereich von 500–600 nm entstehen (siehe Abbildung 2). Simulationen zeigen, dass Lichtwellen nahe 550 nm erzeugt werden können. Aufgrund der hohen Dispersion sind hierfür jedoch kurze Fasern und Laser mit ausreichend hoher Spitzenleistung erforderlich. Nichtlineare Simulationen mit einer Pulsdauer von 20 ps, einer Energie von 10 nJ und einer Faserlänge von 1 m bestätigen die Realisierbarkeit der FWM-Erzeugung im grünen Spektralbereich (siehe Abbildung 3). Dieses Konzept wird in weiteren Arbeitspaketen experimentell getestet.

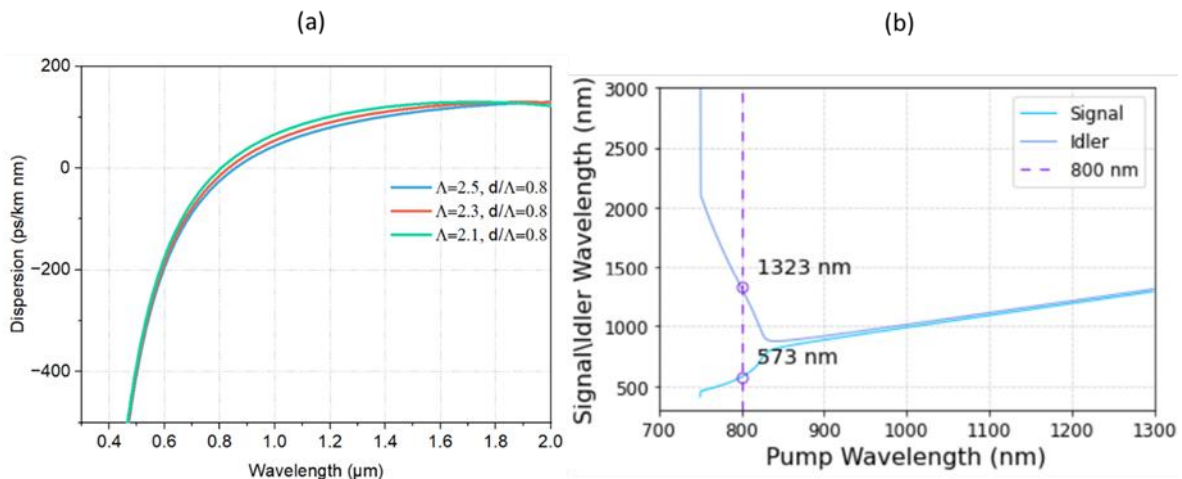


Abbildung 2: Dispersionskurve einer ESM-Faser für die FWM-Lichterzeugung bei 500–600 nm (a). Phase Anpassung mit einem 800 nm Laser.

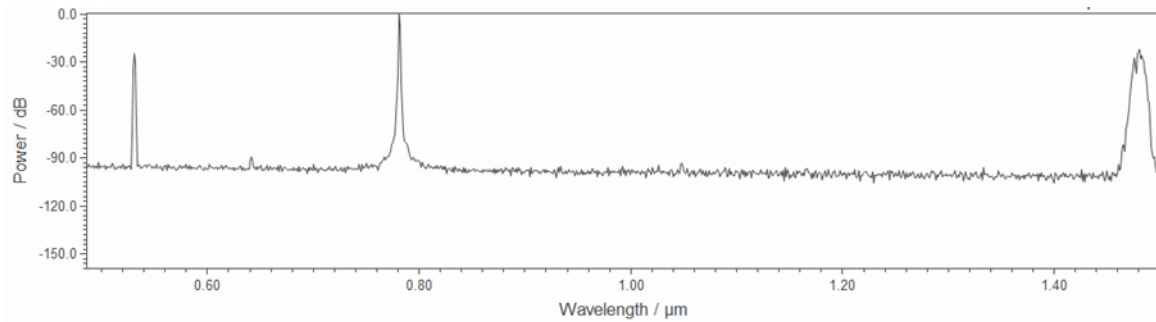


Abbildung 3: Simulation von FWM-Erzeugung mit einer ESM mit $\Lambda = 2,1$ und $d/\Lambda = 0,8$. Die angenommene Pulsdauer war 20 ps, Energie von 10 nJ und 1 m Faser.

Antiresonante Hohlkernfaser

Hohlkernfasern sind, wenn sie mit einem Gas für nichtlineare Effekte gefüllt sind, auch ein potentieller Kandidat für den Vierwellenmischprozess. In diesem Arbeitspaket konzentrieren wir uns auf das Design und Konzept antiresonanter Hohlkernfasern. Das Ziel besteht darin, eine Hohlkernfaser mit geringen Verlusten für Pump-, Signal- und Idlerwellenlängen zu entwerfen. Dies erfordert eine sorgfältige Untersuchung der Parameter des Faserdesigns. Ein Beispiel ist die Anzahl der Kapillaren (N), die den Durchmesser des Kerns sowie die möglichen Durchmesser der Kapillaren beeinflusst (Abbildung 4). Dies hat wiederum Einfluss auf das Verhältnis D_{core}/D_{cap} , das für das Singlemode-Verhalten der Faser verantwortlich ist. Wenn dieses Verhältnis $\sim 0,68$ beträgt, verhält sich die Faser wie eine ESM-Faser. Zudem sollte der Abstand zwischen den Kapillaren δ so klein wie möglich sein, um die radiativen Verluste gering zu halten. Die Wandstärke der Kapillaren (t) bestimmt die Bandbreite der Faser und sollte so angepasst werden, dass die Pump-, Signal- und Idlerwellenlängen alle im Übertragungsband der Faser liegen.

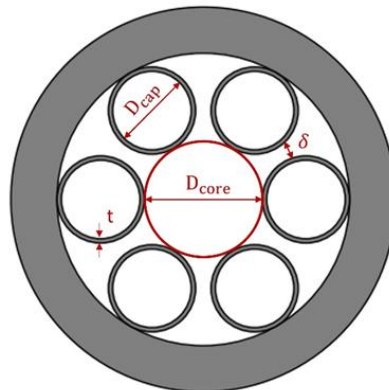


Abbildung 4: Links: Auslegung einer Hohlkern Faser (D_{core} = kern-Durchmesser, D_{cap} = kapillar-Durchmesser, t = kapillar-Wandstärke, δ kapillar-kapillar Abstand).

Wie beim ESM, wurde die Geometrie in Comsol erstellt und die optischen Moden und die Dispersion berechnet. Hier ist zu erwähnen, dass die Auflösung des Gitters in dem Simulationsfenster sehr hoch sein muss, um diese Faser zu modellieren. Die Auflösung betrug $\lambda/4$ und $\lambda/6$ in den Luft- bzw. Glasbereichen. Eine Beispiel Dispersionskurve ist in Abbildung 5 dargestellt.

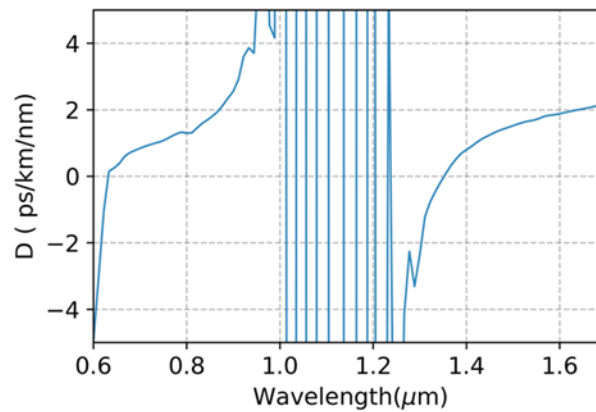


Abbildung 5: Dispersionskurve einer AR HCF mit $t \sim 0.5 \mu\text{m}$.

AP 1.1.3_2 Faserauswahl und Lasersimulation EDFA

Der Verstärker soll ein relativ großes Parameterfeld umfassen. Die Pulsdauer kann zwischen 3 ns und 20 μs bei einem Pulsabstand von 5 μs und 3 ms, wobei die Bedingung gilt, dass der Pulsabstand größer als die Pulsdauer ist. Die Pulsspitzenleistung bei einem Rechteckpuls am Verstärkerausgang soll 1 W erreichen. Die theoretischen Untersuchungen erfolgen im ungünstigeren Fall mit langen Pulsdauern von 20 μs und 0,5 ms Pulsabstand. Darauf ergibt sich ein Tastverhältnis $D = \frac{T_P}{T_{\text{Rep}}}$ von 0,04, was bedeutet, dass die mittlere Leistung nur diesen Faktor von der Spitzenleistung entspricht und damit für einen Single-Mode Telekomverstärker weitestgehend kein Problem darstellt. Der Projektpartner sieht bei seinen Turn-Key-Verstärkern sowohl Schwankungen in der Spitzenleistung der Rechteckpulse sowie eine Verformung der Pulse in Form einer Leistungsreduzierung im zeitlichen Verlauf des Pulses.

Eine erste Rechnung unter Annahme näherungsweise gleicher Dotierungsparameter und variierender Modenfelddurchmesser zeigt die Simulation ein geringes zeitliches Abklingverhalten der Pulsform. In Abbildung 6 sind drei Verstärker in normierter Amplitude mit gleicher Pulslänge von 0,3 μs dargestellt. Die Verstärkerfaser ist Erbium-dotiert und der Modenfelddurchmesser wurde variiert. Die Reduzierung der Amplitude entlang des verstärkten Pulsverlaufs ist bekannt als Verstärkersättigung. Dies beruht auf der Tatsache, dass nicht beliebig viel Leistung aus einem Verstärker extrahiert werden kann. Während die Vorderflanke des Pulses noch durch die gespeicherte Energie viel Verstärkung erfährt, ist für die Rückflanke nicht genügend Leistung zur Verfügung, um konstant gleiche Verstärkung beizubehalten. Es kommt zu der unerwünschten Pulsverformung.

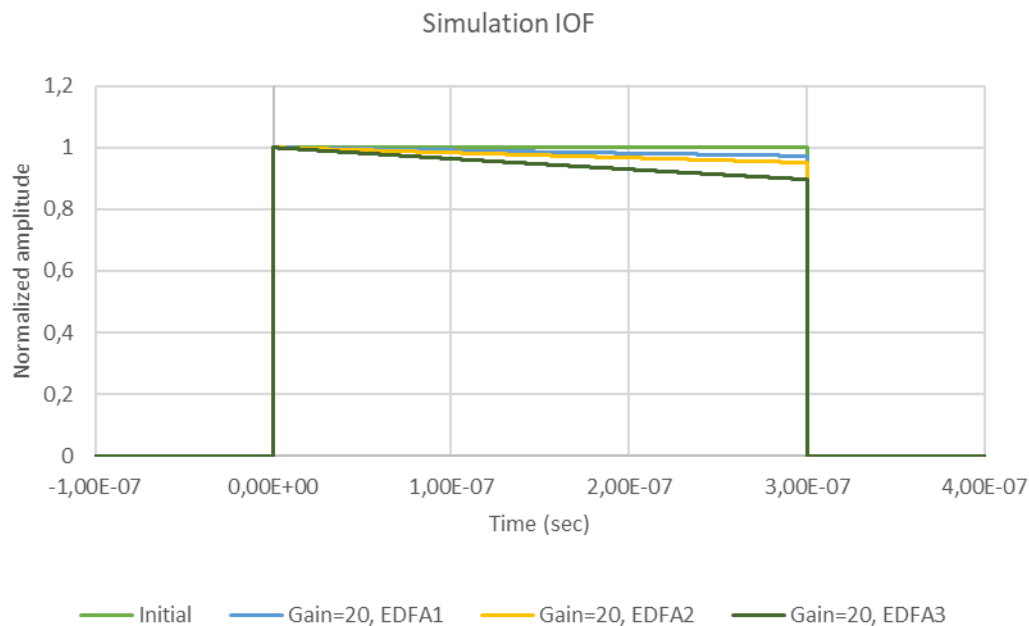


Abbildung 6: Amplitudenverlauf eines rechteckigen Eingangspulses mit Ausgangsleistungen entsprechend 1 W Spitzenleistung.

Dieses beschriebene Verstärkersättigung wird durch den Parameter der Sättigungsenergie charakterisiert¹. Diese hängt nur von den Parametern Verstärkerwellenlänge, Laserübergangsquerschnitte und Modenfeldfläche ab. Diese Designparameter sind praktisch festgelegt und ermöglichen nur sehr geringe Parametervariation. Die kommerziellen Faserhersteller bieten diese detaillierten Informationen nicht an.

Hersteller von Er-Faser gibt es eine Vielzahl, darunter: Coherent, CorActive, Fibercore, iXblue und nLight. In der Regel bieten alle Hersteller eine klassische Telekomfaser an, die nach Bedarf auch polarisationserhaltend erhältlich ist. Außer dem Modenfelddurchmesser sind keine Details zur Sättigungsenergie verfügbar, sodass kein Hersteller oder Faser bevorzugt werden kann.

Die Sättigungsenergie lässt sich allerdings experimentell bestimmen. Hierfür wurde ein linearer Verstärker mit einer möglichen Faser und passenden Modenfelddurchmesser für die vorhandenen Komponenten aufgebaut und deren zeitliche Response analysiert. Mit einer gepulsten Seed-Quelle wird ein 5-ns Rechteck-Puls mit 50 mW Spitzenleistung erzeugt und verstärkt. Analysiert wird die zeitliche Veränderung des Rechteckpulses mit verschiedenen Verstärkungen bzw. Ausgangsleistungen. In Abbildung 7 wird das Ergebnis dargestellt. Die experimentell bestimmte Pulsverformung in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung wird mit den simulierten Werten abgeglichen. Der einzige variable Parameter ist die Sättigungsfluenz, deren Werte an die experimentellen Kurven gefittet wird. Für diese Faser konnte eine Fluenz von 15 J/cm² ermittelt werden. Jetzt ist das Model für die Simulation vollständig und der ausgangsseitig pulsförmig stabile Verstärker kann untersucht werden.

¹ G. P. Agrawal, Applications of Nonlinear Fiber Optics (Academic Press, 2001)

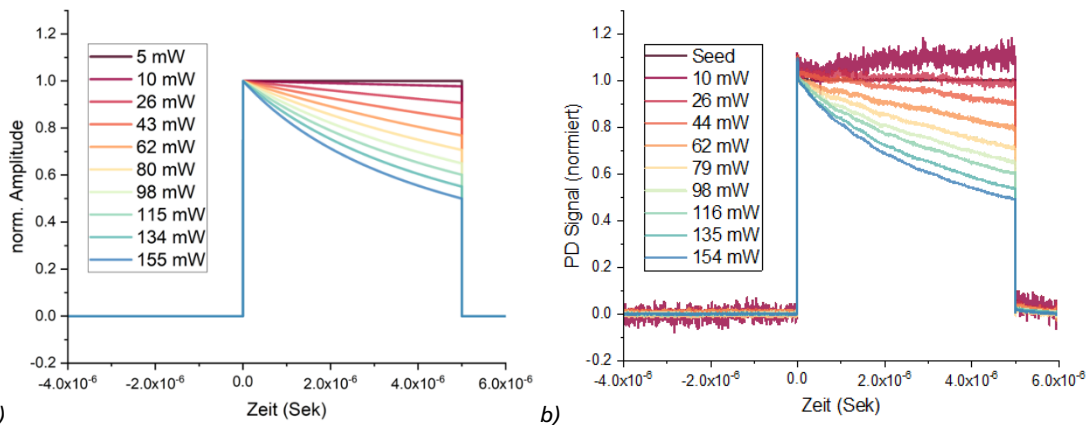


Abbildung 7: Zeitliche Verstärkersättigung, Vergleich zwischen a) Simulation und b) Experiment zur Generierung des Parameters Sättigungsfluenz.

Mit den gleichen Verstärkerparametern wird eine passender Eingangspulsform berechnet, mit deren am Ausgang ein rechteckige Pulsform bei >1 Watt Spitzenleistung erzielt wird.

Iterativ wird die Eingangform in den Verstärker so modifiziert, dass die zeitliche Verstärkersättigung den Puls am Ausgang in eine Rechteckform bringt.

Abbildung 8 zeigt das Ergebnis nach vier Iterationen: der zeitlich geformte Puls wurde während des Verstärkerprozesses in ein Rechteck geformt mit einer Variation der Amplitude um etwa 1 %. Dies entspricht dem Ziel des Meilensteins MS 1.

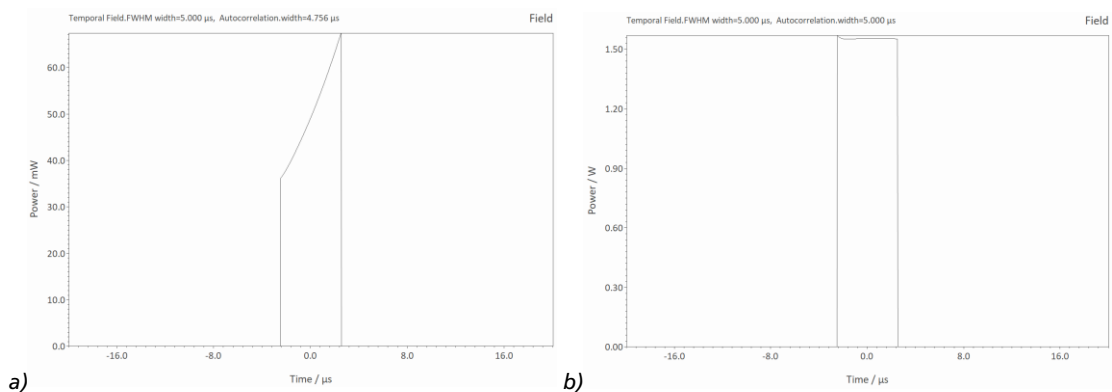


Abbildung 8: Zeitliche Pulsform a) vor und b) nach Verstärkung.

AP 1.1.41_2 Festlegung neuer Faserdesigns mit verbesserter Rayleighstreuung

Die Rayleigh-Streuung wird durch Dichtefluktuationen im lichttransportierenden Material bestimmt, die von der fiktiven Temperatur T_f des Kernglases und Konzentrationsfluktuationen in dotierten SiO₂-Gläsern beeinflusst werden. Die Stärke der Rayleigh-Streuung lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben, die verschiedene Einflussfaktoren wie Wellenlänge, Brechzahl und den Pockel'schen Photoelastischen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\alpha_{Rayleigh} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot k_B \cdot T_f \cdot K_T$$

Die Projektpartner wünschen eine lokale Veränderung der Rayleigh-Streuung entlang der Faserlänge, wobei die fiktive Temperatur T_f als einzige anpassbare Größe bleibt. Diese kann potenziell während des Faserzugs in einem Rohrofen in situ geändert werden. Eine Wärmebehandlung, bekannt als „inline Temperung“, ermöglicht die Beeinflussung der fiktiven Temperatur, die um mehrere Hundert K variiert werden kann.

Die Optimierung der Rayleigh-Streuung und die Anpassung an Sensoreigenschaften können potenziell durch die Verwendung von Standardsinglemode-Faserpreformen und eine sinusförmige Variation der Ofentemperatur erreicht werden. Dies führt zu einer gleichbleibend geringen Dämpfung und einer Feineinstellung der lokalen Rückstreuungseigenschaften durch Rayleigh-Streuung.

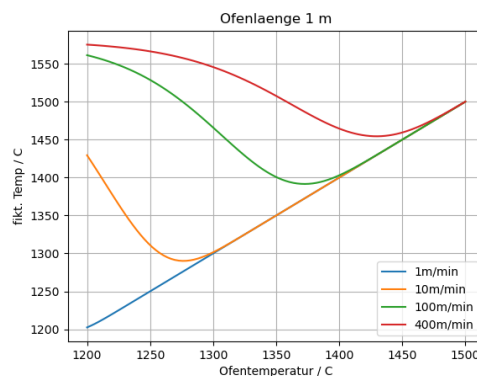


Abbildung 9: Fiktive Temperatur als Funktion der Rohrofentemperatur.

AP 1.1.42_2 Festlegung von Faserdesigns mit verbesserten Brillouin Streueigenschaften

Ein Faserdesign mit verbesserten Brillouin-Streueigenschaften soll die Unterscheidbarkeit von Temperatur- und Dehnungseinflüssen möglich machen. Wie bereits beschrieben bieten die Dotanden Aluminium und Germanium verschiedene Vorteile. Germanium erhöhte sowohl die optische als auch die akustische Brechzahl in SiO₂, während Aluminium die optische Brechzahl erhöht, die akustische aber senkt. Somit ist es möglich maßgeschneiderte Brechzahlprofile in unterschiedlichen Domänen zu erzeugen. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern LUNA und dem IPHT wurden mögliche Preformkandidaten für die Herstellung von Brillouin-Sensorfasern diskutiert und die zu erwartenden Brillouinspektren simuliert. Zwei konkrete Faserpreformtypen wurden evaluiert.

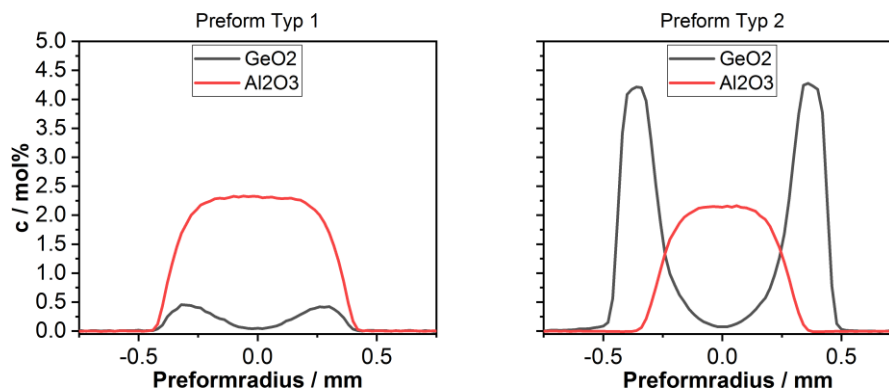


Abbildung 10: Konzentrationsprofile der Preform Typ1 (links) und Preform Typ 2 (rechts).

Preform Typ 1 und Typ 2 besitzen ein deutlich unterschiedliche Konzentrationsprofile an Al₂O₃ und GeO₂ (siehe Abbildung oben). Aus diesen Konzentrationsprofilen kann die optische und die akustische Brechzahl berechnet werden und ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die optische Brechzahl der Kerne ist im Bereich $4 \dots 5 \cdot 10^{-3}$ ($NA = 0,1 \dots 0,12$), sodass sie für Faserkerndurchmesser kleiner 10 μm in der optischen Domäne singlemodig sind. Aufgrund des deutlich unterschiedlichen Konzentrationsprofils weisen beide Materialien unterschiedliche akustische Eigenschaften/ Brechzahlprofile auf.

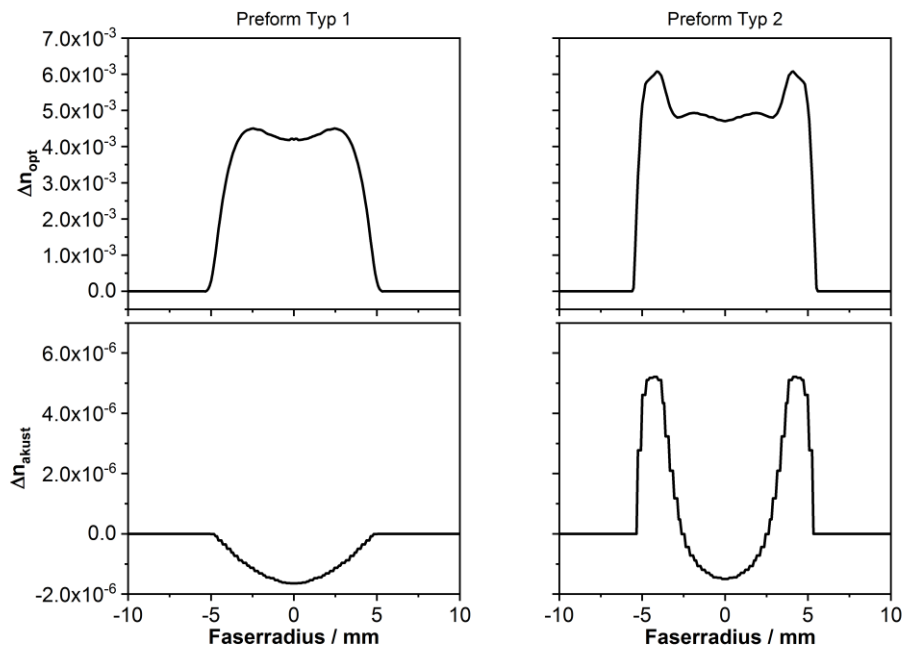


Abbildung 11: Berechnete optische (oben) und akustische Brechzahlprofile (unten) für die Preform Typ 1 (links) und Preform Typ 2 (rechts)

Preform Typ 1 zeigt im akustischen Bereich eine negative Brechzahl, wodurch das Material in der Faser akustisch anti-guiding wird und keine Brillouinsignale aus akustischen Kernmoden zu erwarten sind. Preform Typ 2 hingegen zeigt im akustischen Bereich schmale Segmente mit positivem Indexhub. In diesen Bereich können sich geführte Moden ausbilden.

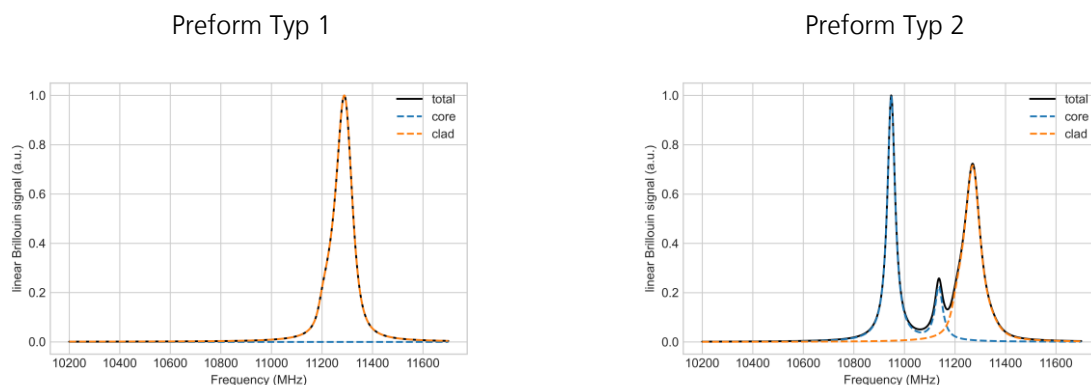


Abbildung 12: Simulierte Brillouinspektren für Preform Typ 1 (links) und Preform Typ 2 (rechts); Brillouinsignale aus akustischen Kernmoden in blau, Brillouinsignal aus akustischen Claddingmoden in grün

In der obigen Abbildung sind die simulierten Brillouinspektren zu Preform Typ 1 und Preform Typ 2 gezeigt. Wie erwartet, zeigt Preform Typ 1 ausschließlich Mantelmoden (Claddingmoden) und keine Kernmoden. Für den Einsatz als Brillouinfaser erscheint dieses Kernmaterial wenig geeignet. Ganz anders verhält sich Preform Typ 2. Hier besteht das Brillouinsignal aus der Interaktion mit zwei Kernmoden und einem Ensemble an Claddingmoden. Dies ist sehr interessant für den Einsatz als Brillouinsensor zur separaten Messung von Temperatur und Strain, denn die Moden interagieren mit unterschiedlich dotierten Materialien wodurch eine unterschiedliche Auswirkung auf Temperatur und Strain für Kern- bzw. Claddingmoden zu erwarten ist.

Die Preform Typ 2 wurde zur Weiterverarbeitung ausgewählt.

Entwicklungsfeld 2: Materialentwicklung und Preformherstellung

AP 1.2.4_2 Erforschung von Kernmaterialien und Preformrealisierungen für Brillouin und Rayleigh 1. Iteration

Die Realisierung der Preform wurde auf Basis der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen konzipiert, um eine optimal angepasste Preform mit einem entsprechend optimierten Kernmaterial zu gewährleisten. Die Auswahl und Entwicklung der Kernmaterialien erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem IPHT. Dabei wurde die in AP 1.1.42_2 beschriebene Preform Typ 2 identifiziert und für den Faserzug vorbereitet. Die Herstellung der Preform wurde am IPHT durchgeführt; anschließend erfolgte der Faserzug gemäß AP 1.3.9_2.

AP 1.2.5_2 Entwicklung Preformen für Brillouin und Rayleigh 2. Iteration

Im Rahmen des Projekts wurde das Faserdesign auf Basis der Brillouinuntersuchungen an den gezogenen Fasern (siehe AP 1.1.42_2, AP 1.3.9_2, AP 1.5.12_2) optimiert. Die Optimierung erfolgte zunächst durch Simulation und dann in enger Zusammenarbeit mit dem IPHT und Luna, wobei die zweite Iteration des Designs entwickelt und gefertigt wurde.

Eine Al-Ge-dotierte Preform mit Dual-Peak-Brillouinspektrum wurde realisiert, wobei beide Peaks unterschiedliche Sensitivitäten gegenüber Temperatur und Dehnung zeigen. Die Brillouinmessungen der ersten Faseriteration bestätigten eine differenzierte Temperaturantwort der Dual-Peak-Faser, während die Strainantwort beider Peaks nahezu identisch war. Da der Unterschied in der Temperaturantwort mit etwa 5 % gering war, erarbeiteten die Projektpartner ein Preformdesign mit erhöhter Konzentration der Dotanden Aluminium und Germanium, um die Temperaturantwort noch stärker zu modifizieren.

Die zweite Preformiteration wurde am IOF mittels Gasphasendotierung hergestellt, was die Abscheidung mehrerer Schichten ermöglichte und im Vergleich zur Lösungsdotierung einen größeren Kerndurchmesser ergab. Das Konzentrationsprofil der Preform sowie nähere Informationen zum Herstellungsprozess sind in AP 1.2.43_2 dargestellt.

Der Fokus hier lag auf den Brillouin-Eigenschaften der zweiten Iteration, die im Folgenden analysiert werden.

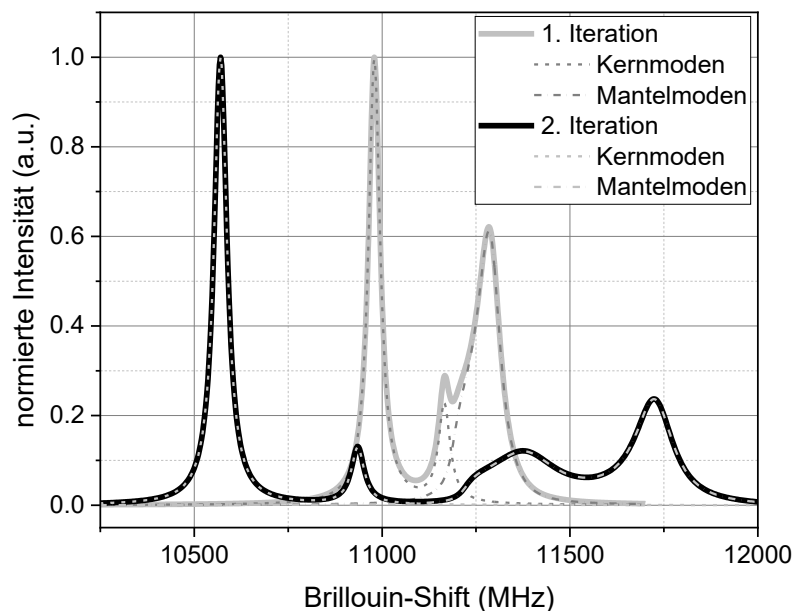


Abbildung 13: Simuliertes Brillouinspektrum 2. Iteration verglichen mit 1. Iteration.

Abbildung 13 zeigt das simulierte Brillouin-Spektrum der ersten und der beschriebenen zweiten Iteration. Beide Iterationen weisen Unterschiede und Ähnlichkeiten in den Spektren auf. In beiden Fällen sind Mantel- und Kernmoden klar getrennt und weiter voneinander separiert als bei Iteration 1. Bei der zweiten Iteration sind die Mantelmoden weniger definiert und zeigen zwei breite Peaks, während die Kernmodenpeaks (10570 MHz und 10931 MHz) scharf ausgeprägt sind.

Es ist bekannt, dass sich die Brillouinfrequenzen mit steigendem Germaniumgehalt zu kleineren Frequenzen verschieben, was mit den Simulationsergebnissen der gefundenen Kernmoden übereinstimmt. Die zweite Iteration zielt darauf ab, eine stärkere Trennung der Temperatur- und Strainantwort zu erreichen. Der größere Frequenzabstand zwischen den Peaks könnte jedoch einen erhöhten instrumentellen Aufwand erfordern, da ein größerer Scanbereich abgedeckt werden muss. Zudem gestaltet sich die Bestimmung der Peakverschiebung der breiten Mantelmodenpeaks möglicherweise herausfordernd, da die alleinige Auswertung der Position des Peakmaximums möglicherweise nicht ausreichend sein könnte. Es bleibt zu klären, welche Verbesserungen der Selektivität zwischen Temperatur- und Strainantwort notwendig sind, um diesen Mehraufwand in der praktischen Anwendung zu rechtfertigen.

AP 1.2.6_2 Erforschung der Positions- und Brechzahlgenauigkeit in MCF

Im Rahmen des Projekts wurde die subtraktive Herstellung von MC-Preformen erfolgreich umgesetzt. Dabei wurden durch gezielte Bohr- und Schleifverfahren präzise Löcher in das Substrat eingebracht, die anschließend mit geeignetem Kernmaterial befüllt und zur Faser ausgezogen wurden. Die erreichbare Positionsgenauigkeit in der Faser resultiert aus der Positionsabweichung der eingebrachten Löcher und der nicht mit Material gefüllten Querschnittsfläche in der mit Kernstäben bestückten Preform. Diese Abweichung wird dann durch das Verjüngungsverhältnis zwischen Preform und Faser in der Größe skaliert. Im Rahmen des Projekts wurde beispielsweise eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 50 μm mit einer Positionsabweichung von 2 % aus einem Kernstab (\varnothing 1 mm) der in der Preform eine Positionsgenauigkeit von 20 μm aufwies erzielt werden. Dabei betrug der Verjüngungsfaktor 20. Dies zeigt, dass mit steigenden Verjüngungsfaktoren anzustreben sind.

Diese maßgeblich aus dem Durchmesser Verhältnis zwischen Preform und Faser sowie dem Anteil der nicht mit quarzglasbasierten Materialien gefüllten Querschnittsfläche.

Um die erforderliche Präzision bei der Positionierung der Kerne zu gewährleisten, wurde das subtraktiv gefertigte Claddingmaterial vor der Bestückung mit Kernmaterial gestreckt und dabei auf Formerhalt geachtet. Die maximal tolerierbare Positionsabweichung in der Faser lässt sich durch das Durchmesser Verhältnis direkt auf die Preform übertragen. So konnte beispielsweise für einen Kerndurchmesser von 50 μm in der Faser und eine Positionsabweichung von 2 % bei einem eingesetzten Kernstab mit 1 mm Durchmesser eine Positioniergenauigkeit von 20 μm in der Preform erzielt werden. Dieses Vorgehen verdeutlicht, dass hohe Durchmesser Verhältnisse für eine verbesserte Positionsgenauigkeit anzustreben sind. Für die mechanische Einbringung von Bohrungen in Quarzglaskörper ist es ebenso vorteilhaft größere Löcher zu wählen, da diese mit stabileren Werkzeugen über größere Längen eingebracht werden können. Die zur Verfügung stehenden Bohrer erlauben ein Verhältnis von Bohrdurchmesser zu Länge von 1:100. Dies bedeutet, dass beispielsweise mit einem 2 mm Bohrer ein Loch über eine Länge von max. 200 mm eingebracht werden kann. Dies in Kombination mit dem steigenden Verjüngungsfaktor favorisiert große Löcher bzw. Kernstäbe sowie dicke Preformen für den Faserzug. Weiterhin ist zu beachten, dass zum Einbringen von Stäben in Löchern ein Spalt notwendig ist, so ergibt sich für das gleiche absolute Spaltmaß bei größeren Löchern und folglich dickeren Kernstäben ein Vorteil, da die gefüllte Fläche vom Verhältnis des Spaltmaßes zum Lochdurchmesser abhängt und dieser Flächenschwund zu einer Positionsverschiebung von nicht zentral in der Preform laufenden Kernen führt. Dies ist besonders bei nicht rotationssymmetrischen Kernanordnungen mit unterschiedlichen Abständen zum Zentrum zu beobachten, kann jedoch unter Kenntnis aller Größen, bereits während der Berechnung der Bohrpositionen für genau ein Spaltmaß und einen Kernstabdurchmesser, vorgehalten werden. Zumeist ist jedoch das verfügbare Kernmaterialvolumen begrenzt, so dass die in einen Stab eingebrachten großen Löcher durch einen Streckprozess des Claddingmaterials auf kleinere Dimension gebracht werden müssen. Hierzu ist es notwendig auf die jeweilige Struktur angepasste Prozessparameter zu verwenden, da die Löcher je nach lokaler Temperatur bzw. Viskosität unterschiedliches Verhalten aufweisen. Dies hat zur

Folge, dass diese Streckprozesse möglichst unter Verwendung niedriger Temperaturen und hoher Zugkräfte durchgeführt werden.

Im Verlauf der Arbeiten wurde eine 4-Kernfaser mit einer Positionstreuung von unter $1\ \mu\text{m}$ realisiert. Diese besitzt einen zentralen Kern und drei weitere Kerne, die auf einem gleichseitigen Dreieck angeordnet sind. Dabei wurde der Flächenschwund des zentralen Bohrlochs bei der Positionierung der äußeren Bohrungen entsprechend berücksichtigt. Für eine Faser mit kreisförmig angeordneten Kernen wurde der Nächste-Nachbar-Abstand bestimmt und mit den Mittelpunktabständen der skalierten Fitellipsen, die sich aus den während des Streckens entstehenden elliptischen Bohrlochern ergeben, verglichen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt.

Die in die elliptisch verformten Bohrlocher eingebrachten ummantelten Kernstäbe wiesen einen Außendurchmesser von $975\ \mu\text{m}$ auf, während die minimale Halbachsenlänge der Ellipse $1050\ \mu\text{m}$ betrug. Das resultierende Durchmesser Verhältnis lag bei $41,15$. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde die Preform für die erste Projektfaser entworfen.

Zur Charakterisierung der Brechzahlhomogenität wurden vom Leibniz-IPHT Proben mit einem Durchmesser von $1\ \text{mm}$ bereitgestellt und vermessen. Um eine fundierte Aussage zur Brechzahlgenauigkeit treffen zu können, wurde die verwendete Ausgangspreform tomographisch im Brechzahlprofil analysiert und diese Profile mit den an den gestreckten Stäben gemessenen Profilen verglichen.

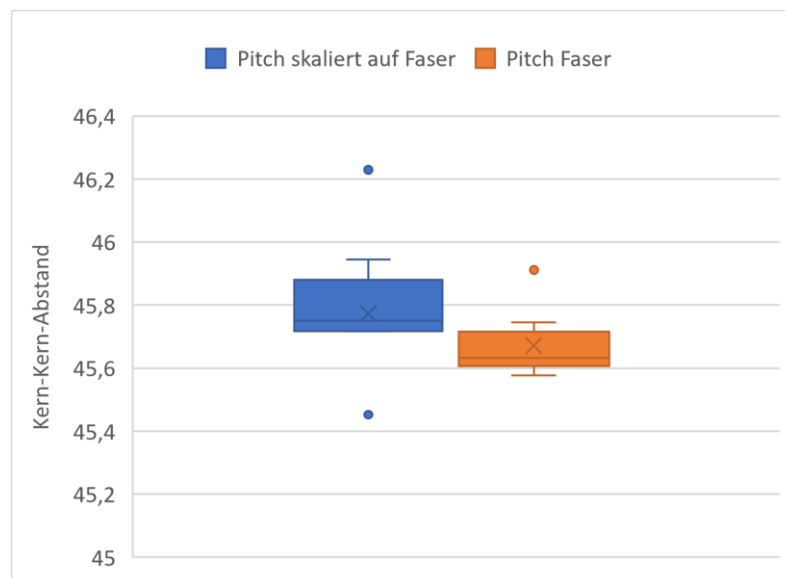


Abbildung 14: Vergleich der skalierten Mittelpunktabstände der Fitellipsen des gestreckten Claddingmaterials mit den Kern-Kern-Abständen in der realisierten Faser.

Für die Herstellung von MC-Preformen wurden zwei grundlegende Ansätze erfolgreich umgesetzt. Einerseits erfolgte der additive Aufbau aus einer Vielzahl von Quarzglasstäben, andererseits wurden im Rahmen eines Bohr- und Schleifprozesses gezielt Löcher für die Kernmaterialien in das Substrat eingebracht. Der additive Ansatz wurde anhand einer 16-Kernfaser realisiert. Da das verfügbare Kernmaterial nicht ausreichte, um die Struktur direkt im vergrößerten Maßstab zu erzeugen, kamen Kapillaren zum Einsatz, in die das Kernmaterial nach einem Streckvorgang eingebracht wurde. Die resultierende Struktur ist in Abbildung 18 dargestellt.

Die ermittelten Mittelpunkte der Löcher weisen eine relative Positionsabweichung von $1,8\ \%$ gegenüber den theoretisch vorhergesagten Werten auf. Die Durchmesser der erzeugten Löcher betragen $562 \pm 10\ \mu\text{m}$. Zur Herstellung der Faser wurden Kernmaterialstäbe mit einem Durchmesser von $530\ \mu\text{m}$ eingesetzt und anschließend zur gezeigten Faser ausgezogen. Aufgrund des Spalts zwischen den Löchern und den Kernstäben sowie des geringen Verjüngungsfaktors von $17,6$ ergab sich eine maximale Positionsabweichung von $2\ \mu\text{m}$, die insbesondere an den am weitesten vom Zentrum gelegenen Kernen auftritt.

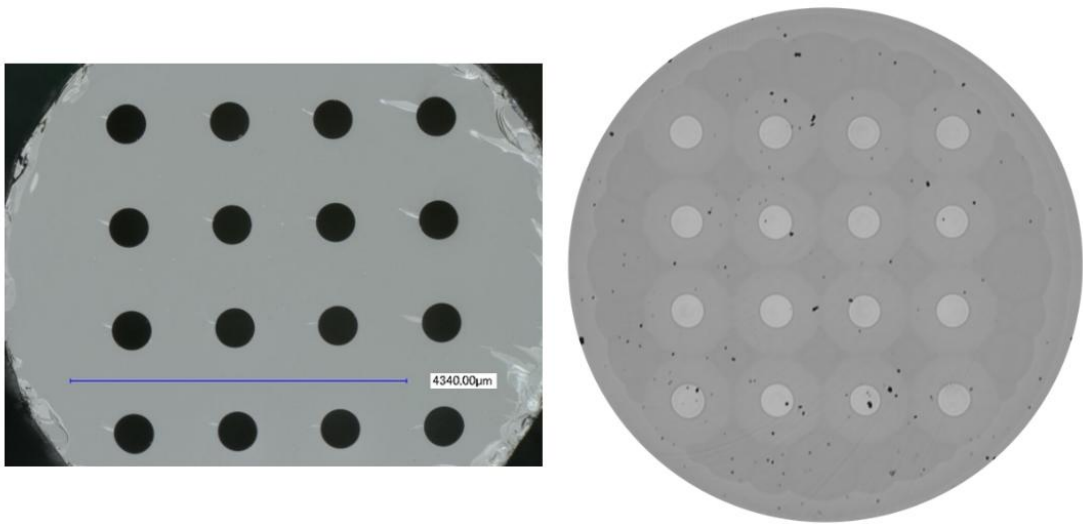


Abbildung 15: Additive aufgebaute und gestreckte MC-Preform vor dem Befüllen der Löcher mit Kernmaterial (links) und Mikroskopaufnahme der resultierenden Faser.

Auf der Seite der subtraktiven Herstellung der Zielfaser konnte gezeigt werden, dass ein Kernstab, welcher in eine 7,3 mm Bohrung eingebracht wurde, defektfrei verschmolzen werden konnte und dieser Prozess zur Herstellung der Zielfaser verwendet werden kann.

AP 1.2.7_2 Optimierung der Positions- und Brechzahlgenauigkeit in MCF und Erforschung der Reproduzierbarkeit

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Positionsgenauigkeit von Single-Mode-Kernen in einer 4-Kernfaser, wie sie vom Verbundpartner FBGS eingesetzt wird, erfolgreich optimiert. Die Optimierung erfolgte durch die Verwendung einer gebohrten Struktur, deren Löcher mit gestrecktem Kernmaterial verfüllt wurden. Hierfür wurden Lochstrukturen in 40 mm Quarzglasstäbe mit 6 mm großen Bohrungen erzeugt, welche im Anschluss auf 7,3 mm aufgeweitet und mit Kernstäben, bestehend aus einem Kern (\varnothing 1 mm) und Quarzglasschicht, befüllt wurden. Ein anschließender Heißprozess ermöglichte das defektfreie Verschmelzen der Kernstäbe mit dem umgebenden Glasmaterial. Kritisch in diesem Prozess ist die Oberflächenqualität der befüllten Löcher, so dass neben der nasschemischen Prozessierung, Plasmaintenpolitur als Alternativen zum Schleifen untersucht wurden. Als effizientestes Verfahren stellte sich dabei das Schleifen der gebohrten Löcher heraus, so dass die Löcher in einem mehrstufigen Prozess auf 7,3 mm aufgeweitet wurden.

Weiterhin wurden die Bohrungen in einen nominell dickeren Stab, Durchmesser 40 mm statt 30 mm, eingebracht und erlaubte einen größeren Abstand der Bohrungen von der Oberfläche des Stabes. Durch ein nachträgliches Anpassen dieser Außengeometrie konnte die minimale Wandstärke wieder auf die per Design geforderten 2,3 mm gebracht werden.

Die Ergebnisse dieses Prozesses sind in Abbildung 19 dargestellt. Dort ist der Glasstab mit den aufgeschliffenen Löchern vor der Reduktion des Außendurchmessers sowie die gemessenen Brechzahlprofile der als Kernstäbe verwendeten Preform abgebildet.

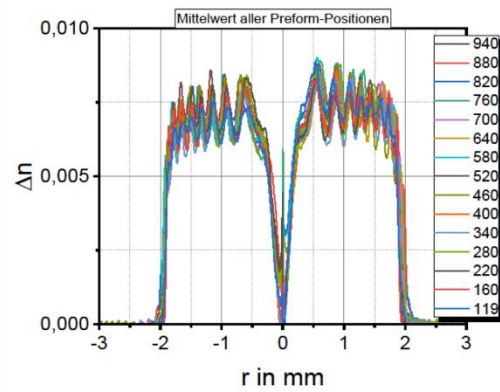
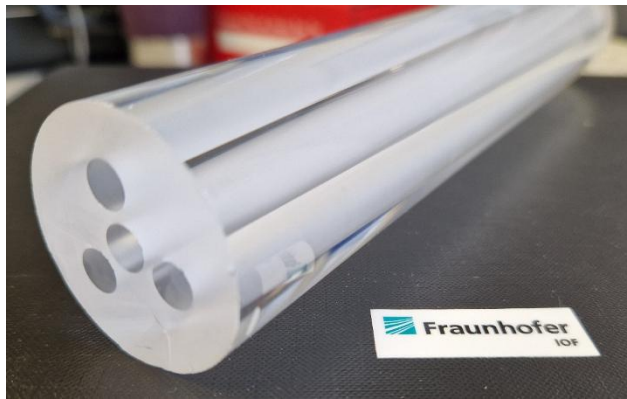


Abbildung 16: Foto der Preform mit aufgeschliffenen Löchern vor dem Abschleifen (links) und gemessene longitudinale Brechzahlprofile der für die Herstellung der Kernstäbe verwendeten Preform (rechts).

In die im Außendurchmesser reduzierte Preform wurden präzise gestreckte Kernstäbe (NA 0,14, Kerndurchmesser 1,92 mm bei einem Außendurchmesser von $7,15 \pm 0,05$ mm) aus einem selektierten Bereich einer Ge-dotierten Preform, deren longitudinaler Brechzahlverlauf in Abbildung 16 rechts gezeigt ist, eingebracht. Der Anfangsbereich der aufgebauten Preform wurde nach dem Rod-in-Tube-Verfahren zur Faser verzogen. In Abbildung 17 sind die resultierende Faser und deren Brechzahlprofil gezeigt. Die radial um den zentralen Kern in einem Winkel von 120° angeordneten Satellitenkerne befinden sich dabei auf einem Kreis mit einem Durchmesser von $75,75 \mu\text{m}$. Damit ergibt sich der Abstand zum zentralen Kern zu $37,875 \mu\text{m}$ und liegt somit im Zielbereich von $37,5 \mu\text{m}$ bis $38 \mu\text{m}$. Die restliche Preform wurde auf den vom Projektpartner FBGS gewünschten Durchmesser gestreckt und diesem für eigene Faserziehversuche übergeben.

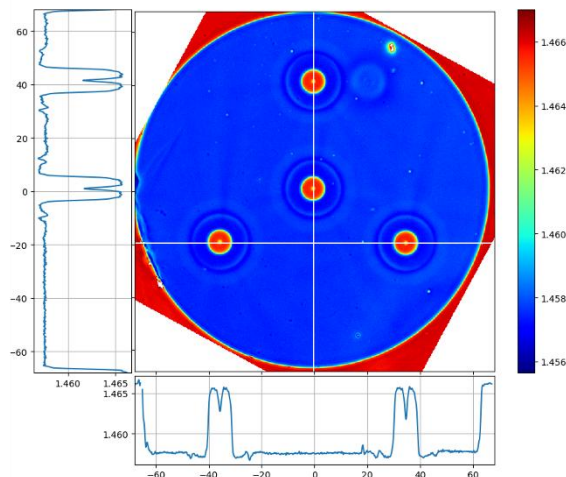
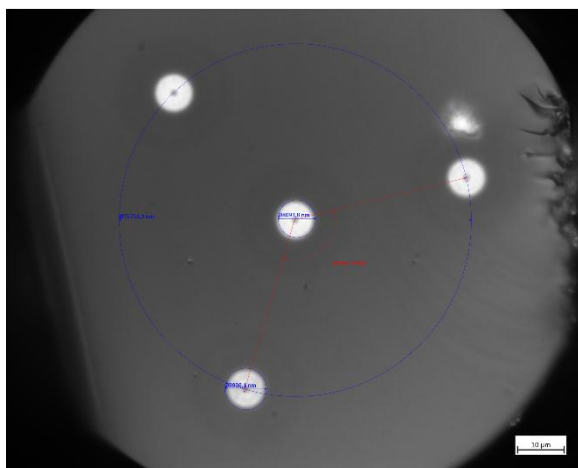


Abbildung 17: Mikroskopaufnahme der finalen Faser (links) und gemessenes Brechzahlprofil (rechts).

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde eine 4-Kernfaser erfolgreich entwickelt und im angestrebten Parameterbereich zur Positionsbestimmung demonstriert. Die gefertigten 200 m Faser wurden dem Projektpartner heracle für Proof-Tests und REM-Analysen zur Verfügung gestellt. Aus der hergestellten 10 cm langen Preform lassen sich insgesamt etwa 5,7 km Faser produzieren, wodurch die Grundlage für eine kosteneffiziente Fertigung dieses Fasertyps geschaffen wurde. Somit steht diese Technologie für zukünftige Anwendungen bereit und kann weiter genutzt werden.

AP 1.2.8_2 Entwicklung Preform für maßgeschneiderte Dispersion (ESM Fasern und AR HC Fasern)

Im Projekt wurden passende Fasergeometrien aus AP 1.1.2_2 umgesetzt. Preformen entstanden via dem Stack- und Draw-Verfahren, wobei Kapillaren, im richtigen Innen-/Außendurchmesser-Verhältnis, sowie Stäbe aus Roh-

ren und Quarzglasstäben gefertigt wurden. Aufgrund der dabei entstehenden größeren Oberfläche wurden verschiedene Reinigungsverfahren angewendet, um Kontaminationen zuverlässig zu entfernen. Die gereinigten Quarzglasprodukte wurden gemäß Abbildung 18 aufgebaut, in ein Hüllrohr eingeführt und die Innenräume der Kapillaren vom restlichen Preformvolumen abgeschlossen, um deren Kollaps im anschließenden Streckprozess zu verhindern. Die dabei entstehenden Zwischenformen dienen als Ausgangsstrukturen für folgende Faserzüge (AP 1.3.10_2).

Die Herstellung der Hohlkern-Preform (AR HC Faser) umfasst drei Hauptschritte: Vorbereitung eines Stacks, Strecken des Stacks, um den Kontakt zwischen inneren Kapillaren und äußeren Rohren zu optimieren, und das Ziehen des Canes. Für den Stack werden Kapillaren und Support-Stäbe in den durch das Design festgelegten Dimensionen gefertigt und entsprechend innerhalb des Hüllrohres gestapelt. Im sich anschließenden Streckschritt wird der Stack auf einer Drehbank etwas in seiner Länge unter Verwendung eines Wasserstoffbrenners gestreckt. Dies ist notwendig, um eine durchgängige Kontaktierung des Hüllrohres mit den Kapillaren entlang der Länge zu gewährleisten. Schließlich wird diese gestreckte Vorform zum Cane (Außendurchmesser ca. 4 mm) gezogen; wobei die Kapillaren mit einem geringem Überdruck (<10 mbar) beaufschlagt werden. Dadurch wird erreicht, dass die Kapillaren in den Canes eine signifikant reduzierte Ovalität aufweisen (Abbildung 19)

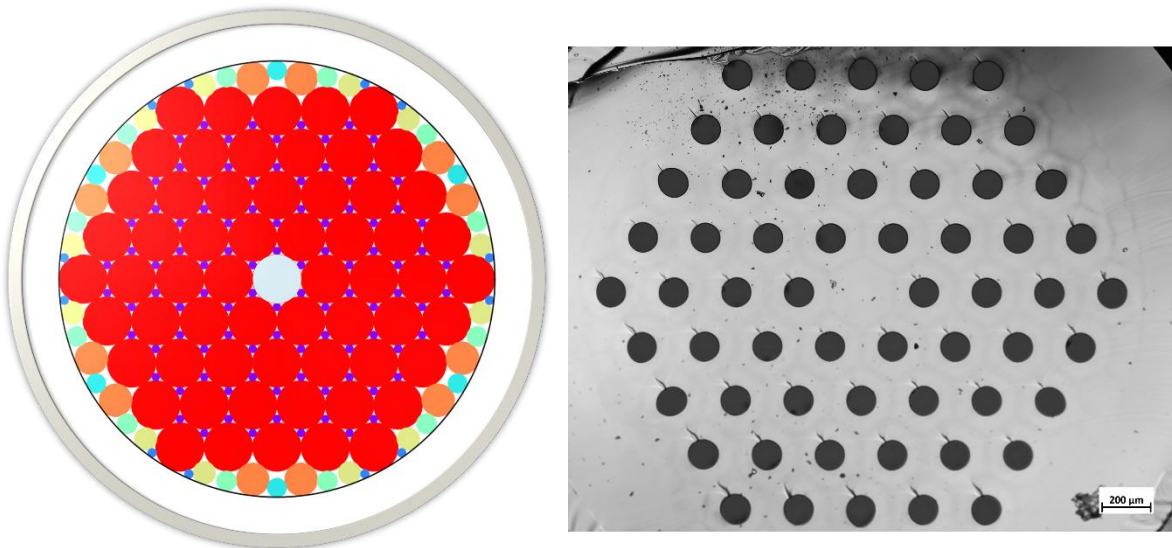


Abbildung 18: Schematischer Layoutplan der ESM-Faser, wobei der jeweilige Durchmesser der Elemente farblich codiert ist (links). Die roten Elemente entsprechen dabei den Kapillaren und das zentrale hellblaue Element ist ein Quarzglasstab mit gleichem Durchmesser. Mikroskopaufnahme einer erzielten Zwischenform nach vollständigem verschmelzen der äußeren Oberflächen der einzelnen Elemente (rechts).

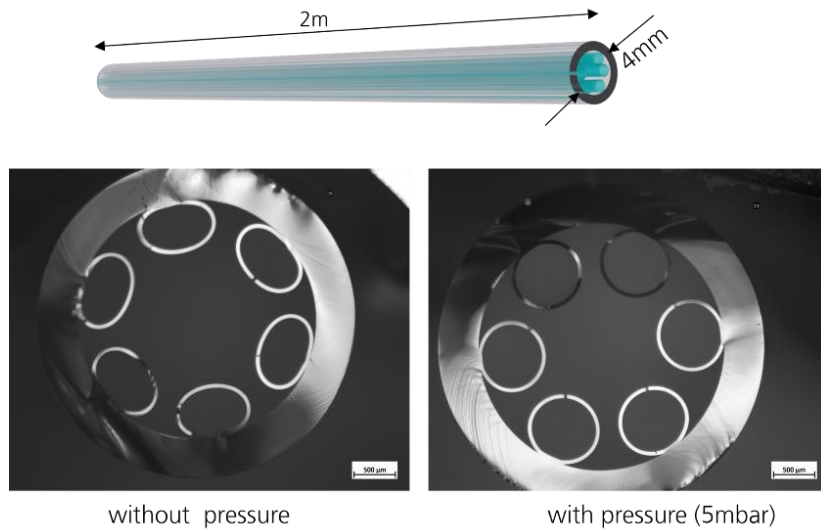


Abbildung 19: Querschnitt der Vorform ohne und mit (5 mbar) Überdruck in den Kapillaren während des Canezugs.

AP 1.2.43_2 Herstellung von Versuchspreforms für Fasern mit verbesserten Brillouin Streueigenschaften

Nach dem Faserdesign und der Festlegung der Materialkonzentrationen sowie simulierten Eigenschaften wurde am IPHT eine Preform erfolgreich im MCVD-Prozess hergestellt. Die zweite Iteration zur Optimierung der Brillouin-Eigenschaften wurde, im Gegensatz zur ersten Iteration, durch Gasphasendotierung am IOF gefertigt. Während die erste Iteration mittels Lösungsdotierung lediglich kleinere Kerne hergestellt werden können und hierbei eine relativ hoher Diffusionseinfluss auf das Brechzahlprofil vorliegt, ermöglicht die Gasphasendotierung größere Kerndurchmesser, wodurch der Diffusionseinfluss verringert wird. Der Einfluss der Diffusion auf das finale Profil hängt neben der Temperatur und Zeit auch von der Kerndimension ab. Das Verhältnis von Dicke des dotierten Bereichs und der Diffusionslänge ist hierbei entscheidend.

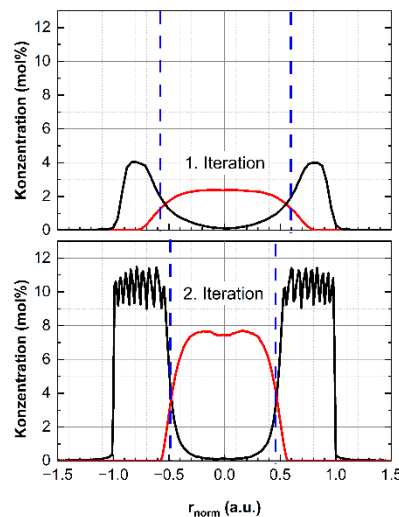


Abbildung 20: Vergleich der 1. Iteration (IPHT1687) mit 2. Iteration (IOF567), Grenze zwischen Al und Ge dotiertem Bereich mit blauer Linie markiert, die radiale Koordinate ist auf den Kernradius normiert.

Die Konzentrationsprofile beider Iterationen sind in Abbildung 20 dargestellt, die den Vergleich zwischen der ersten Iteration (IPHT1687) und der zweiten Iteration (IOF567) zeigt. Die Grenze zwischen den Al- und Ge-dotierten Bereichen ist durch eine blaue Linie markiert, und die radiale Koordinate ist auf den Kernradius normiert.

Das angestrebte Ziel einer höheren Konzentration wurde nahezu um den Faktor drei erreicht. Das Solution Doping Verfahren führt zu kleineren Kernen, was die Diffusion während der Heißprozesse stärker beeinflusst und unterschiedliche Schichtdickenverhältnisse verursacht. Die gestrichelten blauen Linien im Diagramm kennzeichnen die Grenze zwischen den Ge- und Al-Bereichen. In der zweiten Iteration sind die Flanken steiler, was den Überlapp der Bereiche verringert und sich auf das Brillouin-Spektrum auswirken kann, was durch Simulationen in AP 1.2.5_2 bestätigt wurde.

Entwicklungsfeld 3: Faserziehen und Beschichtungen

AP 1.3.9_2 Optimierung Faserzug Fasern für Brillouin und Rayleigh

Der Faserzug der im Projekt realisierten Preformen der 1. Iteration wurden nach Abstimmung mit den Projektpartnern am IPHT durchgeführt. Dabei wurden die Ziehtemperatur und die Zugkraft der Faser variiert, um deren Einfluss auf die resultierende Brillouinstreuung zu untersuchen. Die Fasern der zweiten Preform-Iteration wurden am IOF hergestellt, auch hier wurden Ziehparameter (Ziehtemperatur) variiert.

Das Brillouinspektrum änderte sich durch die Variation der Ziehparameter (Ziehtemperatur) nur unwesentlich. Dies ist in AP 1.5.12_2 näher erläutert dargestellt. Allerdings konnte ein deutlicher Effekt der Wickelung auf der Spule festgestellt werden: Die Brillouinfrequenz verschob sich entlang der Länge der aufgewickelten Faser, was auf eine allmähliche Änderung der Spannung und damit der Faserdehnung hindeutet. Dieser Effekt war bei allen gezogenen Fasern (sowohl 1. Iteration als auch 2. Iteration) beobachtbar.

In Absprache mit den Projektpartnern wurden in diesem Arbeitspaket keine Rayleighfasern gezogen. Die Rayleighaktivitäten wurden stattdessen beim Projektpartner FBGS gebündelt.

AP 1.3.10_2 Faserzug und Parametervariation maßgeschneiderte Dispersion (ESM)

Ausgehend von den in AP 1.2.8_2 realisierten Zwischenformen wurden Fasern mit optimierter Dispersion gezogen. Hierzu wurde jeweils ein Cane in ein Hüllrohr eingebracht und mit einem zweistufigem Druckanschluß versehen. Dadurch kann der vorliegende Druck im Raum zwischen Hüllrohr und Cane mit einem anderen Druck als die Luftlöcher innerhalb des Canes beaufschlagt werden. In Abbildung 21 sind hinsichtlich der resultierenden Lochgeometrie ausgewertete Mikroskopbilder aus einem Faserzug für unterschiedliche Überdrücke gezeigt. Klar zu erkennen ist, dass die Größe der resultierenden Löcher signifikant beeinflusst werden kann. Diese relative Vergrößerung hat auch eine Schwerpunktsverschiebung der jeweiligen Löcher und damit des Pitches zur Folge, welche über eine Anpassung des Faserdurchmessers jedoch kompensiert werden kann.

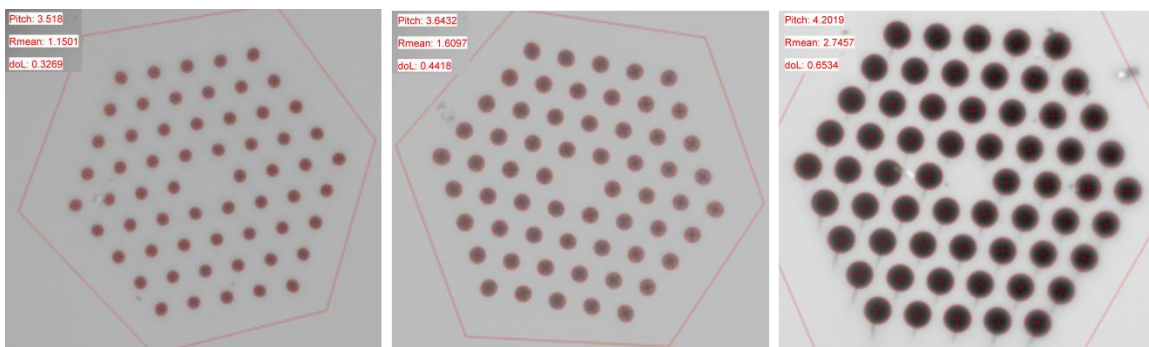


Abbildung 21: Mikroskopaufnahmen in gleicher Skalierung von resultierenden Fasern bei unterschiedlicher Druckbeaufschlagung der in der Zwischenform vorhandenen Löchern.

In weiteren Faserzügen wurden optimierte ESM-Fasern hergestellt. In Abbildung 22 sind Faserquerschnitte einer realisierten 150 m langen Faser (FWM_800_4) gezeigt. Durch eine Erhöhung der Druckbeaufschlagung der Struktur um 10 mbar konnte die in Abbildung 23 gezeigte Faser (FWM_800_5) realisiert werden. Diese Druck-erhöhung führte zu einem Anwachsen des Pitches ausgehend von 2,28 μm auf 2,6 μm , bedingt durch die größeren Luftlöcher (1,78 μm vs. 2,2 μm).

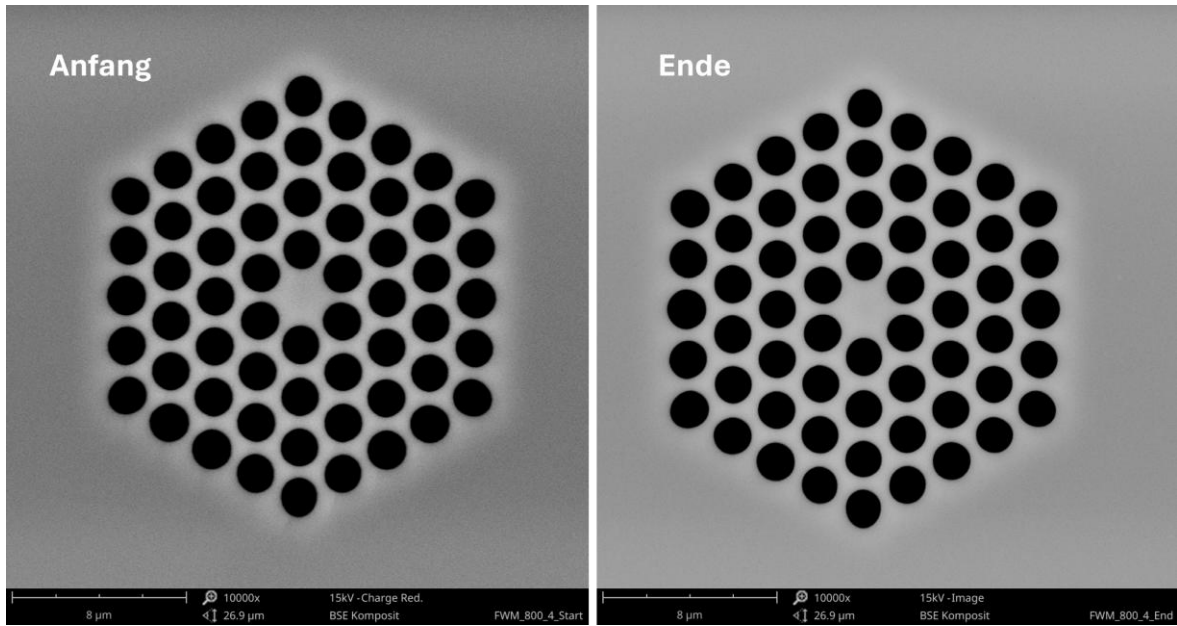


Abbildung 22: Elektronenmikroskopaufnahmen der Enden einer Faser (FWM_800_4) mit maßgeschneiderter Dispersion.

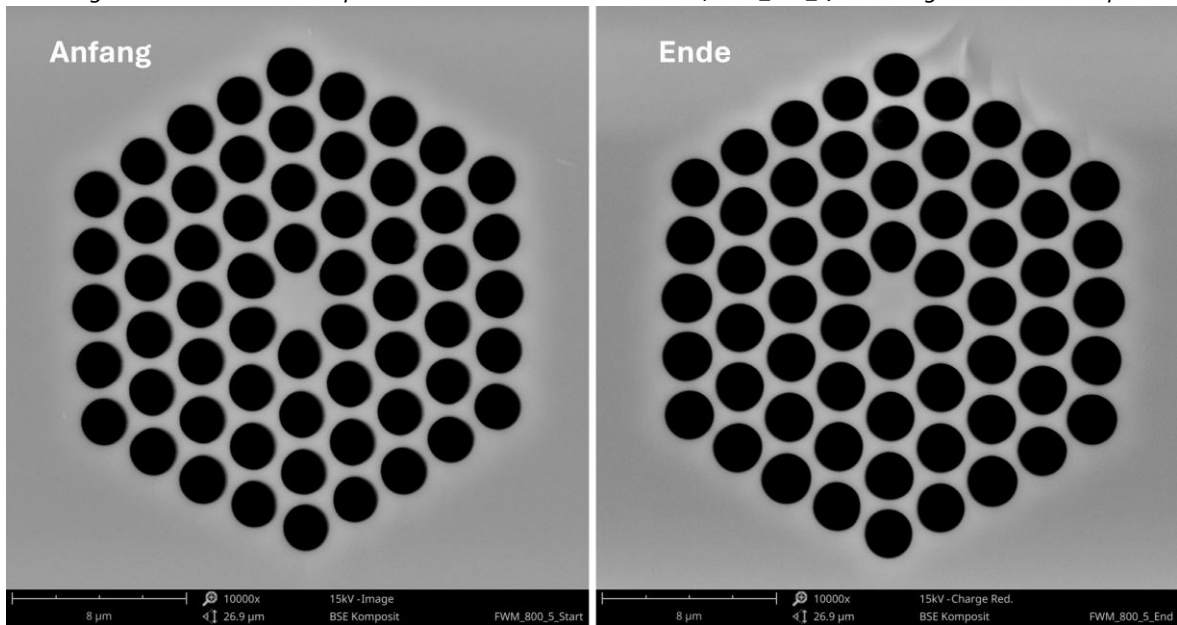


Abbildung 23: Elektronenmikroskopaufnahmen der Endflächen einer durch eine gezielte Erhöhung des Drucks in den Luftlöchern, um 10 mbar im Vergleich zur Faser FWM_800_4, realisierten Faser.

Ausgehend von den REM-Aufnahmen konnten die Strukturparameter der Fasern extrahiert werden und deren Dispersion numerisch bestimmt werden. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 24 gezeigt.

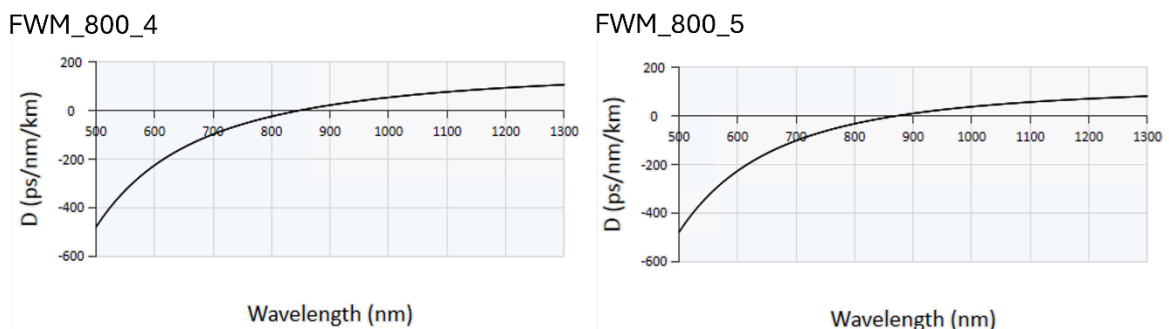


Abbildung 24: Mit den aus den REM-Aufnahmen extrahierten Strukturparametern berechnete Dispersionsverläufe.

AP 1.3.11_2 Faserzug und Parametervariation AR HC Faser

In diesem Arbeitspaket wurden aufbauend auf den in AP 1.2.8_2 entwickelten Preformen und Prozessen erstmals Fasern aus den hergestellten Canes gezogen. Hierzu wurden aus verschiedenen Canezügen geeignete etwa 2 m lange Stücke ausgewählt und mit einem Mantelrohr versehen, um die dünne äußere Glashülle der Mikrostruktur mechanisch zu stabilisieren. Für den Faserzug wurden zwei getrennte Druckzonen definiert: der Bereich innerhalb der Kapillaren sowie der restliche Cane-Querschnitt. Beide Zonen wurden unabhängig voneinander mit definiertem Gasdruck beaufschlagt. Entscheidend für reproduzierbare Ergebnisse ist hierbei eine dichte Verbindung der filigranen Kapillaren (Wandstärke ca. 50 μm) zu den Druckstufen, da Leckagen zu unkontrollierten Druckänderungen in den Kapillaren führen können. Mikroskopische Aufnahmen (siehe Abbildung 30) zeigen, dass unterschiedliche Druckkombinationen klar unterscheidbare Fasergeometrien erzeugen. Zudem wurde festgestellt, dass die Faser bei ausreichend hoher Zugspannung gefertigt werden muss, um ein durch Oberflächenspannung verursachtes Kollabieren der Kapillaren zu vermeiden.

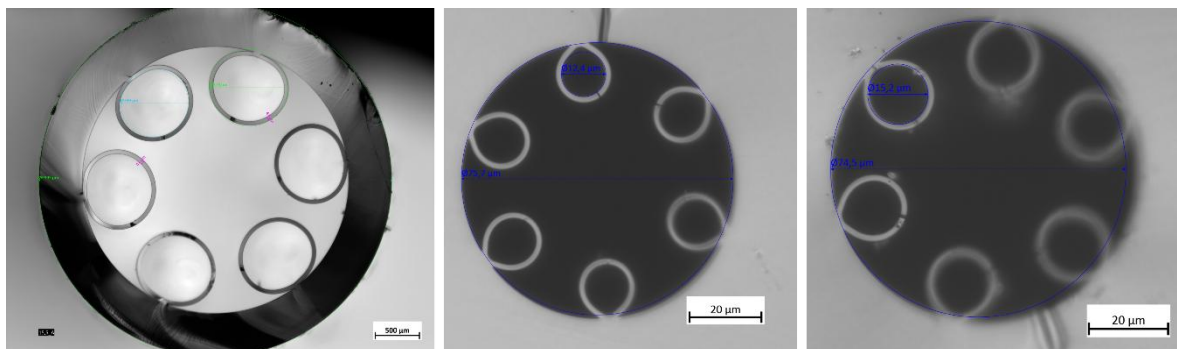


Abbildung 25: Mikroskopische Aufnahmen des für den Faserzug verwendeten Canes (links) und daraus resultierende Fasern bei unterschiedlichen Drücken innerhalb der beiden Bereiche.

Die Ergebnisse der ersten Faserziehungen basierten auf niedrigen Temperaturen und einer sehr geringen Abzugsgeschwindigkeit. Dies führte jedoch zu langen Rückkopplungszeiten in der Prozesssteuerung. Durch eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit um den Faktor 10 konnte der Prozess deutlich stabilisiert werden. Bei höheren Temperaturen konnten die erforderlichen Zugkräfte weiterhin erreicht werden, und Druckänderungen konnten nun unter stationären Bedingungen anhand der Mikroskopbilder zuverlässig ausgewertet werden.

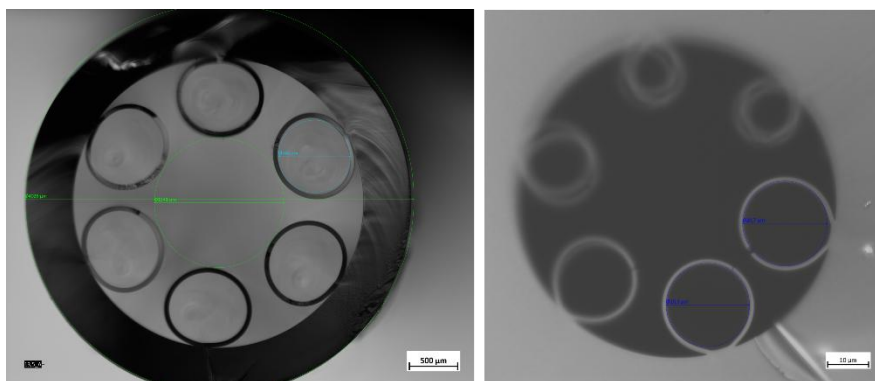


Abbildung 26: Mikroskopische Aufnahme des verwendeten Canes (links) und der beim Faserzug erzeugten Faser (rechts). Die ursprünglich gleich großen Kapillaren sind hierbei aufgrund einer aufgetretenen Leckage innerhalb des Druckanschlusses unterschiedlich weit vergrößert.

Nach mehreren Faserziehvorgängen konnten das Prozessverhalten und die Abhängigkeiten der Faserparameter umfassend verstanden werden, sodass schließlich eine Faser mit geeigneten und reproduzierbaren Zielparametern hergestellt wurde.

Es wurden 100 m der Faser gesammelt (siehe Abbildung 28), die vielversprechende Parameter aufwiesen und im AP2.2.17_2 charakterisiert wurden.

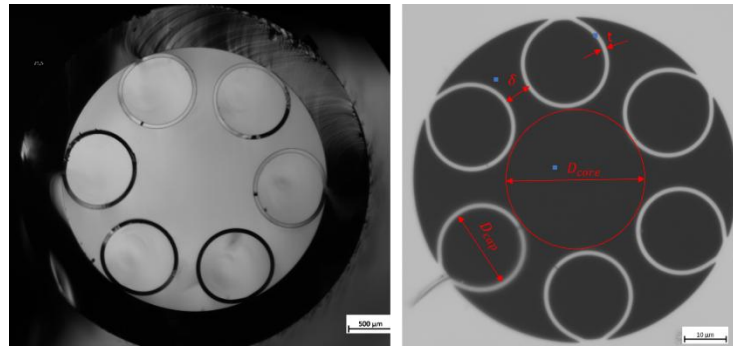


Abbildung 27: Querschnitt der (Links) Cane (Durchmesser = 4 mm) und (Rechts) Hohlkernfaser (Durchmesser 300 µm) mit optimaler Geometrie.

Tabelle 1: Parameter der in Abbildung (2) dargestellten Faser.

Kapillar wandstärke (t)	1.2 µm
Kapillar innendurchmesser	20 µm
Kerndurchmesser	35 µm
Abstand	6 µm
Faser Außendurchmesser	300 µm
Faser Innendurchmesser	78 µm
D_{core}	35
$\frac{D_{cap}}{D_{core}}$	0,60

Nach der Charakterisierung dieser Faser in AP2.2.17_2 wurde festgestellt, dass sie sehr hohe Verluste aufweist und weitere Iterationen zur Verbesserung erforderlich sind. Eine Möglichkeit, die Verluste zu verringern, besteht darin, das erste Antiresonanz-Übertragungsband der Faser zu nutzen. Dies erfordert jedoch eine dünnere Struktur.

Nach der Charakterisierung dieser Faser in AP2.2.17_2 wurde festgestellt, dass sie sehr hohe Verluste aufweist und weitere Iterationen zur Verbesserung erforderlich sind. Eine Möglichkeit, die Verluste zu verringern, besteht darin, das erste Antiresonanz-Übertragungsband der Faser zu nutzen. Dafür ist eine dünnere Struktur (< 750 nm) erforderlich. Um eine Faser mit einer solchen Ringstruktur herzustellen, haben wir eine ähnliche Vorform aus AP 1.2.8_2 verwendet. Während des Faserziehens setzten wir sowohl den zentralen Kernbereich als auch die Ringe unter Druck, um die erforderliche dünne Struktur zu erreichen.

Es zeigte sich, dass die Ringe, wenn sie sehr dünn werden, unterschiedliche Durchmesser erhalten. Je dünner die Struktur ist, desto empfindlicher reagiert sie auf kleine Abweichungen, die in den ursprünglichen Preform vorhanden waren (siehe Abbildung 29).

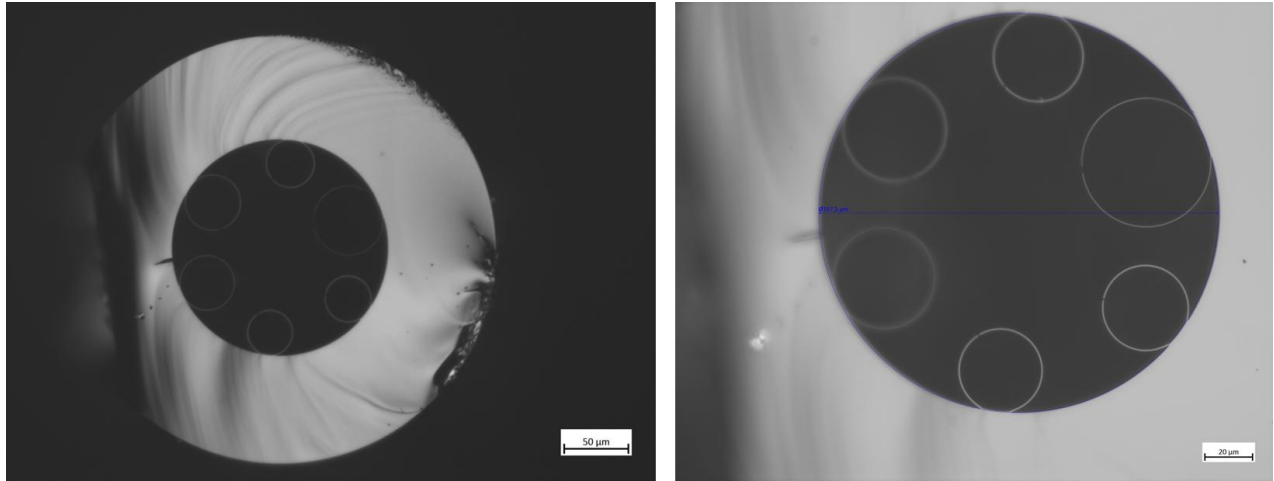


Abbildung 28: Querschnitt der HCF mit dünner Struktur

Dies war lediglich ein Test zur Faserherstellung, um die Machbarkeit der Nutzung des ersten Antiresonanz-Übertragungsbandes einer Hohlkernfaser zu überprüfen. Dies erwies sich jedoch aufgrund der extremen Empfindlichkeit der Faserstruktur gegenüber dem ausgeübten Druck als schwierig, als die Wandstärke dünner wurde.

Eine weitere Strategie, um verlustarme Hohlkernfasern zu ziehen, besteht darin, zusätzliche Ringe in die Ringstruktur einzufügen und somit eine Hohlkernfaser mit verschachtelter Struktur zu schaffen. Um diese Faser zu ziehen, muss eine völlig neue Prozesskette entwickelt werden, die ein neues Design, ein neues Stacking und eine neue Preformvorbereitung umfasst. Da diese Art von Preform jedoch sehr komplex ist, ist weitere Entwicklungszeit erforderlich, um eine sinnvolle Faser herstellen zu können.

Entwicklungsfeld 4: Laserstrukturierung

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Entwicklungsfeld.

Entwicklungsfeld 5: Fasercharakterisierung

AP 1.5.12_2 Abgleich des theoretischen Simulationsmodells mit Messergebnissen kommerzieller und eigener Brillouin-Fasern

Der Projektpartner LUNA stellte zu Beginn des Projekts dem IOF 14 verschiedene Testfasern zu Verfügung, an denen Brillouin-Spektren ermittelt wurden. Mit dem Interfiber Analysis IFA100 Messgerät wurden die Brechzahlen dieser Fasern gemessen und es wurden in einem ersten Schritt die Dotierungskonzentration aus dem bekannten Zusammenhang von Konzentration und Brechzahl abgeschätzt. Als Beispiel dient eine kommerzielle Standard-Singlemodefaser, deren gemessenes Brechzahlprofil im Folgenden gezeigt ist:

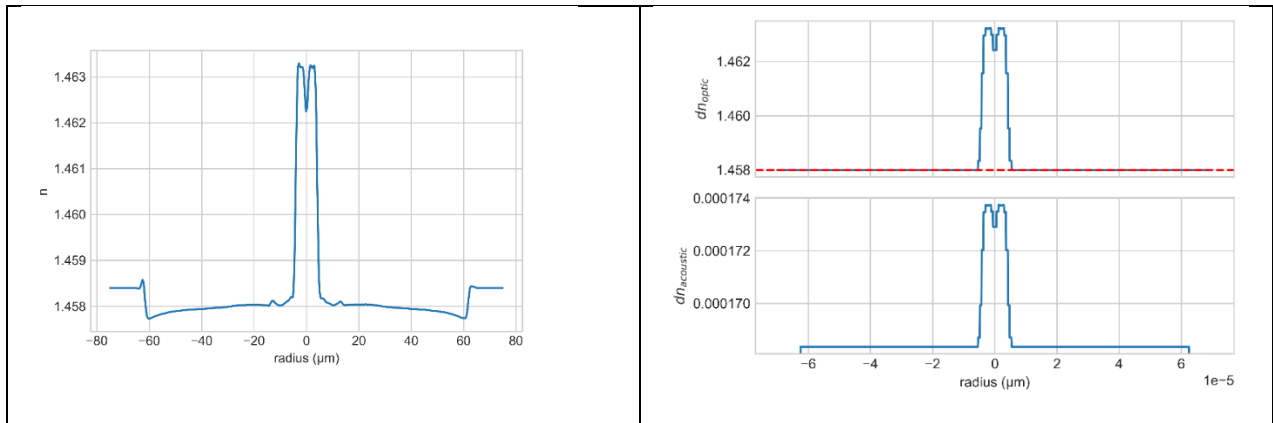


Abbildung 29: (links) gemessenes Brechzahlprofil einer kommerziellen Standard-Singlemodefaser. (rechts, oben) optisches Brechzahlprofil für Simulation; (rechts, unten) akustisches Brechzahlprofil für die Simulation, jeweils berechnet aus den Konzentrationen

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen GeO_2 -Konzentration und Brechzahlprofil kann hieraus das Dotierungsprofil ermittelt werden und somit sowohl die optische als auch akustische Brechzahl approximiert werden. Mit beiden Brechzahlprofilen und der bekannten optischen Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$ kann das Brillouin-Rückstreuungsspektrum simuliert werden. Das simulierte Spektrum ist verglichen mit dem gemessenen in Abbildung 30 dargestellt.

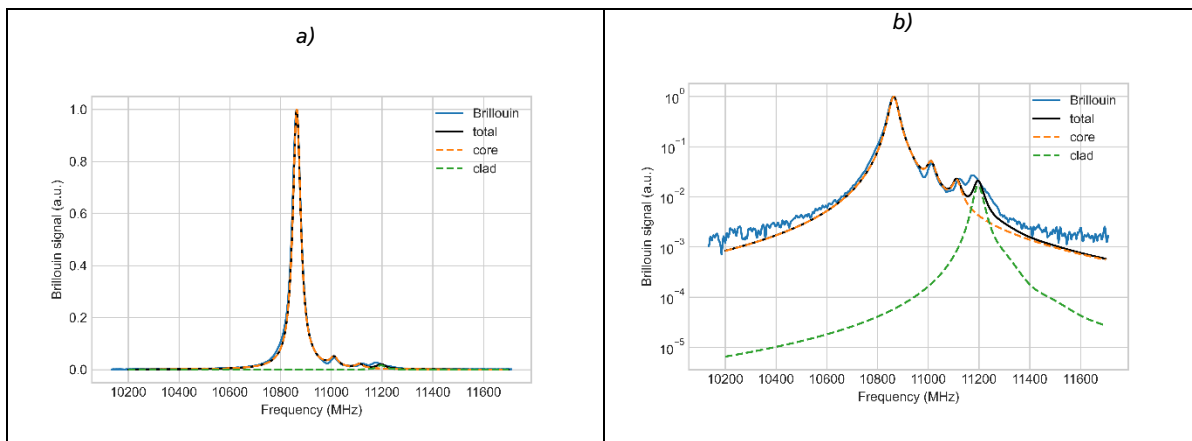


Abbildung 30: a) lineares gemessenes (blau) sowie simuliertes (schwarz, orange, grün) Brillouin-Spektrum; b) logarithmisches gemessenes (blau) sowie simuliertes (schwarz, orange, grün) Brillouin-Spektrum; die orange Kurve zeigt jeweils den Beitrag der Kernmoden und die grüne Kurve stellt den Beitrag der Claddingmoden dar.

Aus der obigen Abbildung kann eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation abgeleitet werden. Ähnlich gute Übereinstimmungen konnten für einen Großteil der 14 Fasern vom Projektpartner gefunden werden. Dies ist bemerkenswert, da in die Simulationen noch keine real gemessenen Konzentrationsprofile eingeflossen sind und nur die gemessenen Brechzahlprofile und Annahmen zu Dotierung.

Die in der 1. Iteration vorgestellte Faser (AP 1.1.42_2 und AP 1.2.4_2) wurde vom Projektpartner Luna hinsichtlich ihrer Brillouinstreuung vermessen und das folgende Brillouin-Spektrum konnte gewonnen werden, vgl. Abbildung 31.

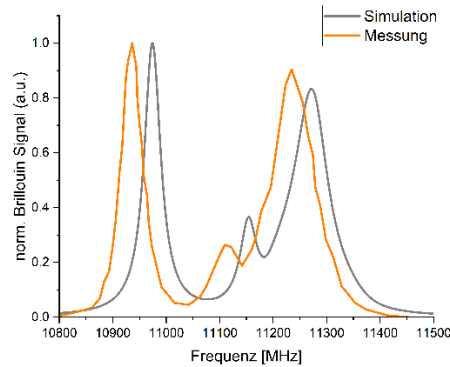


Abbildung 31: Messergebnisse von Luna zur Brillouinfaser 1, (rot) Brillouinfaser 1, (blau) Referenzfaser im Messsystem.

Messung und Simulation zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Lediglich ein konstanter Frequenzshift im gesamten Spektrum kann gefunden werden, was auf noch nicht perfekt passenden Materialparameter aus der Literatur im Modell zurückgeführt werden kann. Die ist aber im hier betrachteten Fall unerheblich für die Aussagekraft des Modells. Neben der Messung des Brillouin-Spektrums an sich wurde die Verschiebung des Spektrums mit variabler Temperatur und variablem Strain beim Projektpartner Luna durchgeführt und die Messergebnisse zeigen eine unterschiedliche Temperaturantwort der Kern- sowie der Claddingmoden (-peaks) aber eine gleiche Strainantwort beider Peaks. Die detaillierten Ausführungen sind dem Projektbericht von Luna zu entnehmen.

Gezeigt wird ein Ausschnitt der Messungen, die Temperaturantwort. Der Einfluss der Temperatur auf die Peaks (siehe Abbildung 31) bei ca. 10,95 GHz und 11,25 GHz ist unterschiedlich. Der Einfluss des Strain ist hingegen gleich.

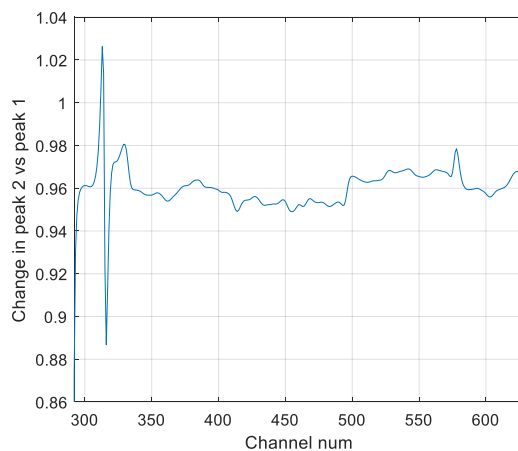


Abbildung 32: Messergebnisse von Luna zur unterschiedlichen Temperaturrespons der bei den Peaks.

In der zuvor dargestellten Abbildung 32 ist das Verhältnis des Temperaturshifts von Peak 1 (bei ~10,95 GHz) und von Peak 2 (bei ~11,25 GHz) dargestellt. Ein von 1 verschiedenes Verhältnis weist auf eine unterschiedliche Temperaturresponse hin und bestätigt die Annahmen, welche der Entwicklung der Faser zugrunde lag. Es kann also prinzipiell ein unterschiedliches Verhalten nachgewiesen werden, jedoch ist dieses mit nur 5 % Unterschied recht klein. Ein Ansatz zur Erhöhung dieses Unterschieds ist die Erhöhung der Konzentration, was in der 2. Iteration realisiert werden sollte und in einer Preform mit höherer Konzentration mündete (siehe AP 1.2.43_2).

Die Preform der zweiten Iteration wurde ebenso vom Projektpartner Luna vermessen und die ermittelten Spektren sind Abbildung 33 (links) dargestellt. Grau hinterlegt ist das aus der Preform simuliert Spektrum. Es zeigt sich eine gewisse Diskrepanz zwischen Simulation und Messung. Speziell die mit Kernmoden assoziierten Peaks bei ca. 10650 MHz und 11100 MHz weisen eine Verschiebung zu höheren Frequenzen hin auf. Der mit Mantelmoden assoziierte Peak bei ca. 11300 MHz zeigt hingegen eine Simulationsanaloges Verhalten.

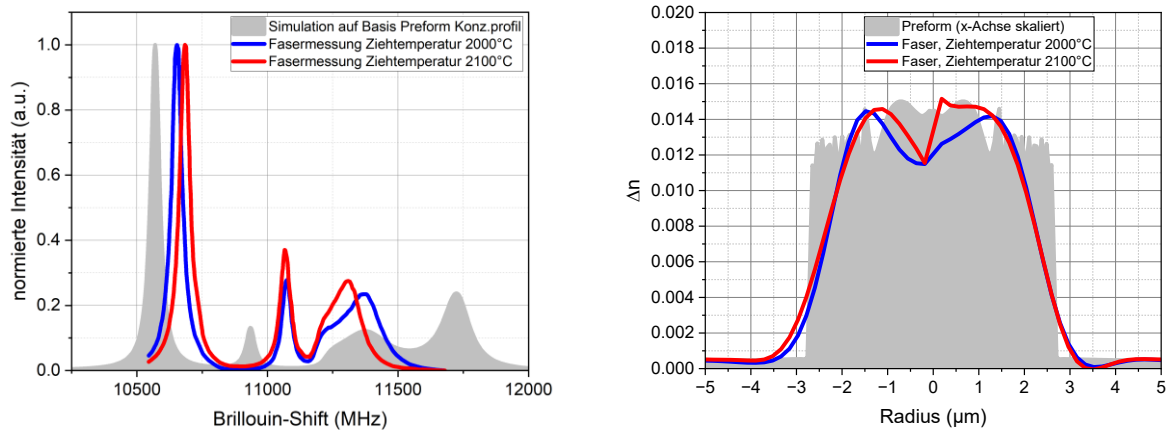


Abbildung 33: (links) Brillouin-Spektren der Preform (simuliert aus Preformprofil) und der Faser (gemessen); (rechts) Brechzahlprofil der Preform (skaliert auf Faserdimension) und der Fasern

Wie in 1.2.5_2 bereits beschrieben führen steigende Germaniumgehalte zu einer Frequenzverschiebung zu geringen Frequenzen und umgekehrt führen sinkende Germaniumgehalte zu steigenden Brillouin-Frequenzverschiebungen. Wirft man einen Blick auf Abbildung 33 (rechts), so sieht man dort grau hinterlegt das Brechzahlprofil der Preform (skaliert auf Faserdimension) und in rot und blau die tatsächlich in der Faser gemessenen Brechzahlprofile. Es ist offensichtlich, dass bei der Verarbeitung zur Faser eine starke Diffusion aufgetreten sein muss, sodass die Flanken des Profils stark abgeflacht sind. Außen an den Flanken war eine hohe Germaniumkonzentration präsent, welche offensichtlich durch Diffusionsprozesse im Randbereich reduziert wurden. Da die akustischen Kernmoden nur Überlapp mit den Germaniumbereichen am Rand hatten, ist die Verschiebung hin zu höheren Brillouin-frequenzen durch die Reduzierung der Peakgermaniumkonzentration durch Diffusion zu erklären.

Bezüglich der Verbesserung der Unterscheidbarkeit von Temperatur- und Strainantwort in der Faser der 2. Iteration muss konstatiert werden, dass sich im hier vorliegenden Fall keine Unterschiede in der Temperaturantwort der verschiedenen Peaks finden konnten. Jedoch wies nun der mit Mantelmoden assoziierte Peak bei ca. 11300 MHz eine von den Kernmodenpeaks (10650 MHz und 11100 MHz) verschiedene Strainantwort auf. Leider konnte bis zum Ende des Projekts der genaue Grund für dieses widersprüchliche Verhalten nicht entschlüsselt werden und bleibt ein wichtiger Aspekt für kommende Nachfolgeprojekte. Die Details zu den Messungen können dem Luna-Bericht entnommen werden.

AP 1.5.13_2 Abgleich der theoretischen Simulationsmodelle mit Messergebnissen Rayleigh-Faser

Die Arbeiten im Projekt wurden auf die Brillouin-Entwicklung sowie -simulation konzentriert. Die Fasern mit verbesserter Rayleighstreuung für den Demonstrator wurden vom Projektpartner FBGS beigesteuert. Die Ressourcen wurden auf die Bearbeitung der Brillouin-bezogenen Arbeitspakete konzentriert, da dies für die Erfüllung der Gesamtprojektziele und Demonstrator-Entwicklung notwendig war.

AP 1.5.14_2 Charakterisierung kommerzieller Er-Fasern

Für die Pulsverstärkung wichtiger Parameter ist die Sättigungsfluenz (Energie pro Fläche). Dieser Parameter wird von den Faserherstellern über das Datenblatt nicht herausgegeben, da dieser von den Wirkungsquerschnitten der Verstärkerfasern abhängen und sich damit direkt die chemischen Verbindungen im Kern herausfinden lassen. Für diese Charakterisierung wurde ein Aufbau aus faserintegrierten Komponenten entwickelt und in Abbildung 34 gezeigt.

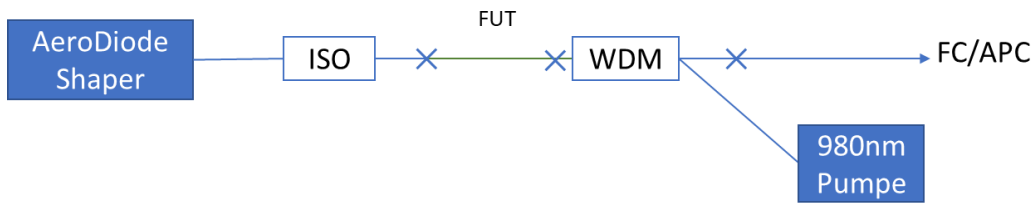


Abbildung 34: Aufbau zur Charakterisierung der Sättigungsfluenz (ISO: Isolator, FUT: Fiber under test, WDM: Wavelength Division Multiplexer).

Von dem Seedlaser wird ein Rechtecksignal erzeugt und verstärkt. Mittels Photodiode wird der Puls vermessen. Wie zu erwarten wird der Puls bei höherer Verstärkung verformt. Diese lässt sich mit Simulationsprogrammen sehr gut nachvollziehen. Charakterisiert wurde die Faser „ER80-8/125“ von Thorlabs. Es wurden verschiedene Verstärkerausgangsleistungen aufgenommen und die Verluste an den Komponenten und an den Spleißstellen berücksichtigt. Diese wurden anschließend in die Simulation übertragen, woraus die Sättigungsfluenz als variabler Parameter eingeht. Die Vergleichsergebnisse der genannten Faser ist in AP 1.1.3_2 gezeigt. Die Ergebnisse liegen sehr gut übereinander. Darauf konnte eine Sättigungsenergie von 15 J/cm^2 ermittelt werden. Dieser Wert ist nötig um den Laser in AP 3.4.27_2 zu realisieren. Für die Pulserzeugung lag der Fokus auf den polarisationsgeschalteten EDFA, wodurch für den konventionell geschalteten Laser keine weiteren Fasercharakterisierungen notwendig sind. Die neuartige Pulserzeugung mittels Polarisationschaltung (AP 3.4.28_2) benötigt den Wert der Sättigungsfluenz nicht, da dieser für die Pulsformung keinen Einfluss hat. Hier liegt der Vorteil, dass an die Faser keine unbekanntenen Faserparameter nötig sind, um eine Verstärkung für einen Dauerstrich-Laser zu erzielen.

Die mechanische Handhabbarkeit der verwendeten Fasern stellen für die vorhandene Spleißtechnik kein Problem dar. Die Standard Singlemode-Fasern mit $125 \mu\text{m}$ Außendurchmesser sind problemlos zu spleißen. Lediglich die Erbium-Ytterbium dotierte PM-Faser vom Exail zeigte nur dahingehend eine Herausforderung, dass sie nicht vom Spleißgerät als PM erkannt wurde. Hier profitierte das IOF von der End-View-Fähigkeiten der Geräte, wodurch die Polarisationsachsen erfolgreich von dieser und vielen weiteren PM-Fasern ausgerichtet werden kann. In Abbildung 35 sind die Endflächenbilder der passiven und aktiven Laserfaser für den polarisationsgeschalteten EDFA vor den Spleiß gezeigt.

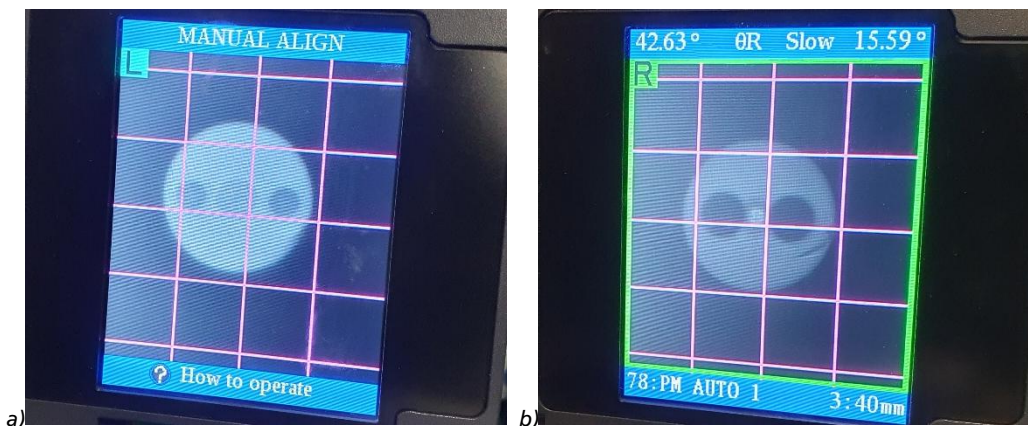


Abbildung 35: Endflächenbilder am Spleißgerät für a) Exail IXF-2C-EY-PM-12-130-0.10L1 und b) Coherent PM1550-XP.

Entwicklungsfeld 6: Faserkonfektionierung und Assembly

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Entwicklungsfeld.

Entwicklungsfeld 7: Fasersonden und Faserkabel

AP 1.7.15_2 Faseroptimierung für Systemintegration Rayleigh

Die Projektarbeiten fokussierten sich auf die Entwicklung und Simulation von Brillouin-optimierten Sensorfasern. Die Fasern mit optimierter Rayleighstreuung wurden vom Projektpartner FBGS entwickelt und bereitgestellt. Die Ressourcen wurden auf die Bearbeitung der Brillouin-relevanten Arbeitspakete konzentriert, da dies für die Erreichung der Gesamtziele des Projekts und die Entwicklung des Demonstrators erforderlich war.

AP 1.7.16_2 Faseroptimierung für Systemintegration Brillouin

Zur Realisierung des Demonstrators wurde die Faser der 1. Preformiteration am Leibniz-IPHT neu verzogen und an einen Kabelhersteller geschickt, dieser stellte hieraus ein Kabel her, welches gleichwohl die optimierte Rayleighfaser des Partners FBGS enthält.

Ziel ist die Verwendung des Kabels im Demonstrator zum Nachweis verbesserter Rayleigh (FBGS) und Brillouin (IOF, IPHT)-Eigenschaften.

Die Verarbeitung der Faser der 2. Iteration war aufgrund der langen Vorlaufzeiten für die Verarbeitung zum Kabel zeitlich nicht mehr möglich, weshalb nur die Faser der 1. Iteration im Demonstrator zum Einsatz kam.

IB 2 – Streuungsbasierte Messtechnik

Vorgegebene Ziele:

-
- Selbstheterodyn-Aufbau für spektrale Vermessung schmalbandiger Lasersysteme
- Spezifikation, Konzept Laser und SPDC Quelle für Mikroskop
- Auslegung & Realisierung Elektronik EDFA und Polarisationschaltung

Entwicklungsfeld 1: Systementwicklung für Ramanfasersonde

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Entwicklungsfeld.

Entwicklungsfeld 2: Systementwicklung für Ramanmikroskop

AP 2.2.17_2 Charakterisierung ESM Fasern und AR HC Fasern

Ein Testaufbau zur experimentellen Untersuchung des FWM-Effektes wurde entwickelt. Der Aufbau ist in Abbildung 36 zu sehen.

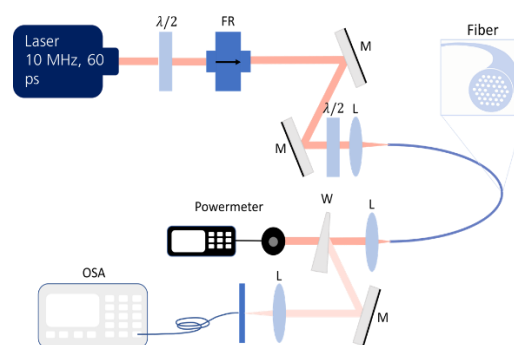


Abbildung 36: Experimenteller Aufbau zum Untersuchen von FWM in ESM Faser.

Der Aufbau besteht aus einer Quelle des Projektpartners AFS, die eine Leistung von 700 mW, Pulsdauer von 60 ps und Wiederholungsrate von 10 MHz hat. Für FWM in ESM ist besonders wichtig, eine lange Pulsdauer zu haben, um den „Walk-off“ zwischen erzeugten Wellen zu minimieren und dadurch die Effizienz des FWM-Prozesses zu erhöhen. Die Pulsdauer von 60 ps soll lang genug sein, um effizient FWM in ESM zu erzeugen.

Um den Aufbau zu verifizieren, wurde eine bekannte kommerzielle Faser benutzt: die polarisationserhaltende ESM von NKT Photonics. Das Laserlicht wurde in den Kern der sogenannten ESM-Faser gekoppelt und die Ausgangsspektren wurden gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt.

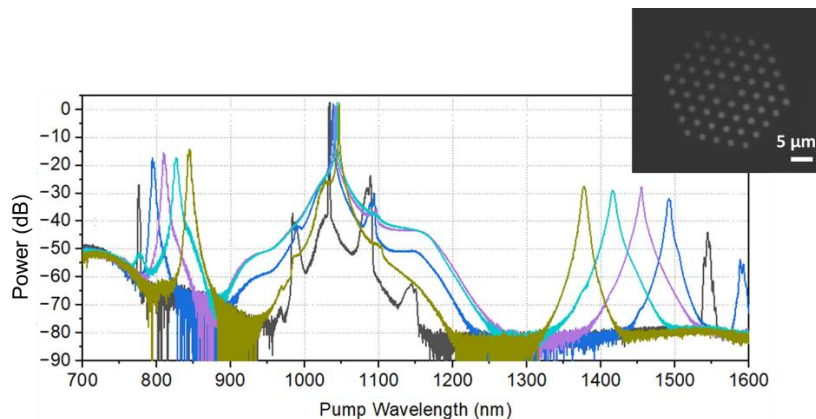


Abbildung 37: Ausgangsspektren der LMA PM 5 Faser mit verschiedene Pumpwellenlänge zwischen 1.030 nm und 1.050 nm.

Diese Ergebnisse zeigen, dass FWM mit dem oben genannten experimentellen Aufbau erfolgreich erzeugt wurde. Der Aufbau wurde dementsprechend verifiziert.

Weitere Fasern wurden mit diesem experimentellen Aufbau getestet. Zuerst wurde eine Faser mit einem Pitch von 2,4 µm und einem Kerndurchmesser von ~4 µm getestet und die experimentellen Ergebnisse sind in Abbildung 38 zu sehen. Hier wurde auch FWM bei unterschiedlichen Wellenlängen getestet. Wie an den blauen, lila und schwarzen Kurven ersichtlich, wurde FWM in dieser Faser generiert. Allerdings sind die erzeugten Wellen nicht so weit entfernt von der Pump-Wellenlänge, im Vergleich zu vorherigen Messungen (siehe Abbildung 37). Das liegt daran, dass die ZDW in dieser Faser bei einer kürzeren Wellenlänge liegen soll, im Vergleich zu der kommerzielle ESM-Faser.

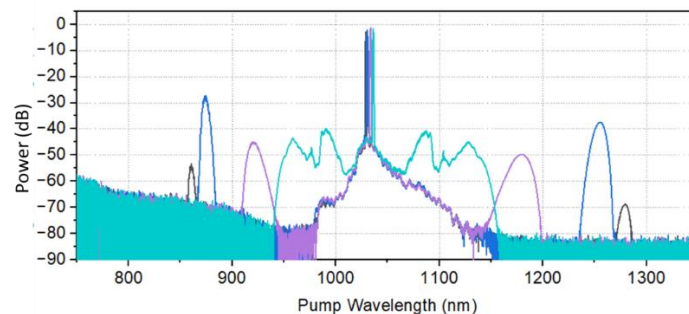


Abbildung 38: Ausgangsspektren der hergestellten ESM Faser bei verschiedenen Pump Wellenlänge zwischen 1.030 nm und 1.050 nm.

Weitere Faseriterationen wurden durchgeführt, wie in AP 1.3.10_2 dargestellt. In diesen Fasern wurde FWM nicht direkt beobachtet. Ein Grund dafür könnte der Polarisationszustand der Pumpe sein, der hier, im Gegensatz zur kommerziellen ESM-Faser, nicht erhalten wird.

AR-HCF

Zur Charakterisierung des Modenprofils und der Ausbreitungsverluste der in den vorangegangenen Schritten gezogenen Hohlkernfaser (AP 1.3.11_2) wird ein optischer Aufbau vorbereitet. Zur Charakterisierung der Faser wird eine breitbandige Lichtquelle mit Wellenlängenbereichen (900 nm - 1.200 nm) verwendet.

Das Licht wurde mit einer Linse in die Faser eingekoppelt und das Modenprofil am Ausgang der Faser mit einer InGaAs-Kamera beobachtet. Es ist wichtig, das Modenprofil bei der Lichteinkopplung zu beobachten, um sicherzustellen, dass das Licht in den Kern geleitet wird.

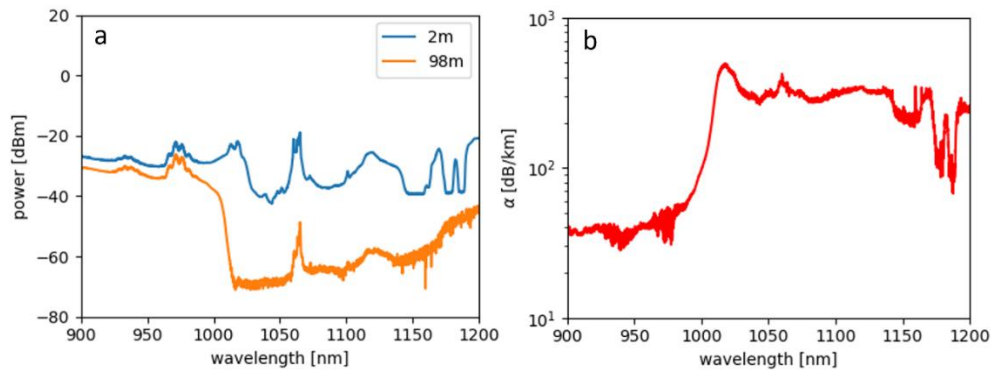


Abbildung 39: (a) Transmissionsspektrum einer Hohlkernfaser im Wellenlängenbereich von 900-1200 nm für zwei Faserlängen, d.h. 2 m und 98 m, und (b) aus (a) berechnete Dämpfung.

Die Dämpfung der Faser wird mit der Cut-Back-Methode bestimmt. Das erste Licht wird in eine 98 m lange Faser eingekoppelt und das Ausgangsspektrum aufgezeichnet. Die Faser wird auf 2 m gekürzt und die Spektren werden ohne Änderung der Einkoppelbedingungen erneut aufgenommen. Die Dämpfung der Faser wird nachfolgender Formel berechnet:

wobei T_1 und T_2 die gemessene Transmission der Faser bei zwei verschiedenen Längen L_1 und L_2 und die entsprechenden Faserlängen sind.

Es ist erkennbar, dass der Ausbreitungsverlust bei Wellenlängen zwischen 900 und 1.000 nm mit ~ 30 dB/km immer noch relativ hoch ist. Um die Transmission der Faser in diesem Wellenlängenbereich zu verbessern, muss die Dicke der Kapillarwand weiter reduziert werden, um das erste Anti-Resonanz-Band nutzen zu können. Nach mehreren Versuchen konnte jedoch keine sinnvolle Faser hergestellt werden, die für ein aussagekräftiges Experiment verwendet werden konnte.

AP 2.2.18_2 Selbstheterodyn-Aufbau für spektrale Vermessung schmalbandiger Lasersysteme

Der optisch monolithische Aufbau ist in Abbildung 40 dargestellt. Der Messaufbau ist ein klassisches Michelson-Interferometer. In einem Arm wird eine sehr lange Faser eingebaut, die länger als die Kohärenzlänge der Quelle ist. Im zweiten Arm wird ein akusto-optischer Modulator (AOM) integriert, welcher dafür sorgt, dass die optische Frequenz des Lichts um eine feste Frequenz (hier 200 MHz) verschoben wird. Das Messsignal am Ende des Interferometers wird mit einer Photodiode detektiert. Durch die Frequenzverschiebung erfolgt die Auswertung im die Schwebungsfrequenz von 200 MHz und erlaubt eine relativ störungsarme Messung. Polarisation ist ein äußerst kritischer Parameter bei der Signalüberlagerung, deswegen wird hier bei dem Aufbau die jedoch deutlich teurere polarisationserhaltende Faser benutzt, um auf eine monolithische Polarisationskontrolle zu vermeiden, welche bei langzeitstabilen Aufbauten umstritten sind.

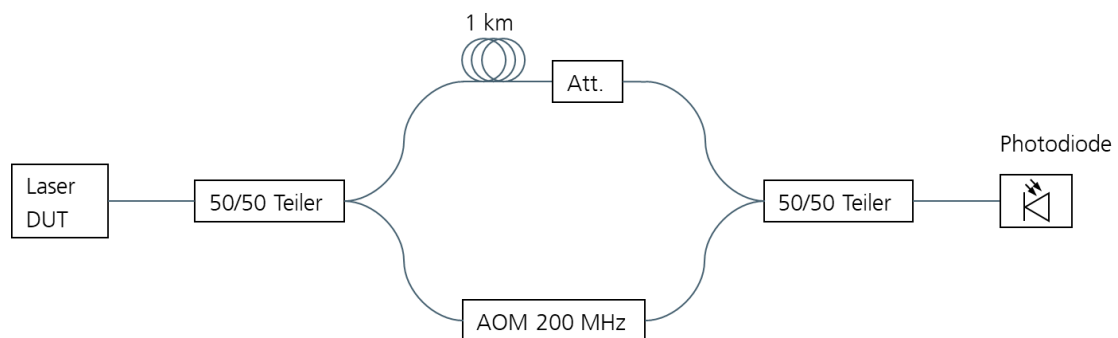


Abbildung 40: Aufbau der faserbasierten Messstrecke mit Laser (Device under test), AOM (Akusto optischer Modulator) und Abschwächer („Att.“ – Attenuator).

Auf Basis dieses Konzeptes ist der vollständig monolithische Aufbau realisiert worden. Die Faserlänge wurde auf 1,5 km verlängert, um sicherzugehen, dass die Faserlänge deutlich länger ist als die Kohärenzlänge (~800 m) des zu untersuchenden Lasers. Um den optischen Transmissionsverlust des AOMs auszugleichen, erfolgte ein Austausch des ersten Teilers in ein 30/70-Teiler, sodass auf der Photodiode nahezu gleiche Leistungen überlagert werden können ohne zusätzliche Dämpfungsglieder. Nach der Überlagerung wird mit einem Polarisator das optische Signal aus der Slow-Axis der PM-Faser transmittiert. Der Testlaser ist eine DFB1550P von Thorlabs mit 150 kHz Bandbreite laut Datenblatt. Aufgenommen wird das Photodiodensignal über 10 μ s Messzeit, durch eine Fourier-Transformation ins Frequenzspektrum überführt und über 100 Messungen gemittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 41 dargestellt. Der vermessene Laser zeigt eine Doppelpeak-Struktur. Ein Messfehler ist unwahrscheinlich, da ein anderer Testlaser eines anderen Herstellers dieses Verhalten nicht zeigt. Der gemessene Verlauf ist eine Überlagerung von verschiedenen Rauschquellen. Das eigentliche charakteristische und hier interessante Rauschen ist das Weiße Rauschen, typischerweise ein Lorentz-Profil. Hinzu kommt technisch bedingtes 1/f-Rauschen mit Gauß-Profil, welches durch Faserlänge dominanter wird. Die beiden Effekte überlagern und sind kaum voneinander trennbar. Daher wurde jeweils mit einem Gauss- und Lorentz-Fit die Linienbreite versucht zu bestimmen. Der interessante Lorentz-Fit ergibt 2 MHz. Der Datenblattwert ist nicht erreicht. Durch die Überlagerung der Rauscheffekte ist die Linienbreite nur am Messpunkt bestimmbar und nicht direkt aus der Laserquelle.

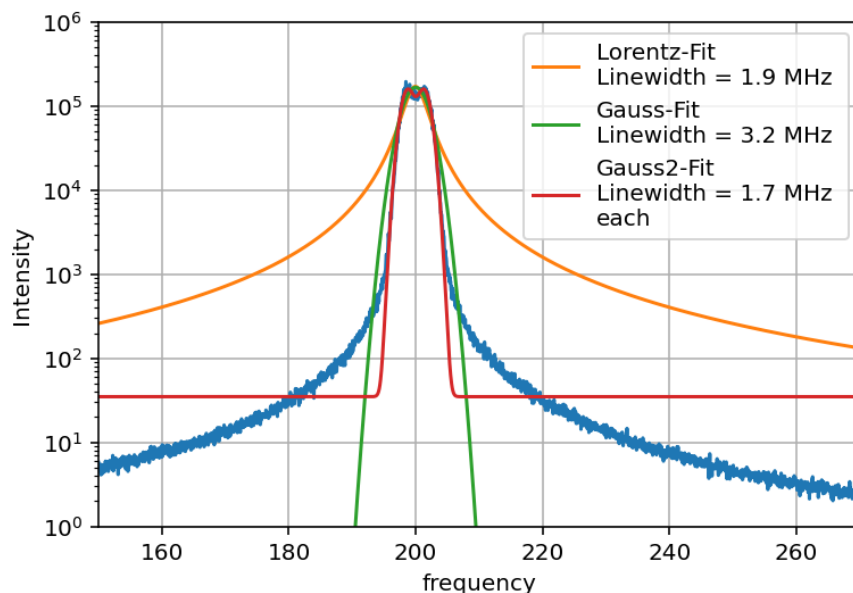


Abbildung 41: gemessene Signalbreite der DFB-Laserdiode, Intensität in logarithmischer Darstellung, die Frequenz in MHz.

Der Aufbau ist realisiert und kann genutzt werden, um den Chirp aus AP 3.4.30_2 zumindest teilweise messen zu können.

AP 2.2.19_2 Spezifikation, Konzept Laser und SPDC Quelle für Mikroskop

Eines der Ziele, die eine Photonenpaar-Lichtquelle erfüllen muss, besteht darin, ein nicht entartetes Photonenpaar zu generieren, das den VIS- und MIR-Spektralbereich abdeckt sowie eine große Bandbreite auf der infraroten Seite des Spektrums. Eine Bandbreite von 100 nm wäre ausreichend für unsere spezielle Bioprobe. Ziel des Arbeitspaketes ist daher die Definition der am besten geeigneten Wellenlängen und Kristallspezifikationen, um diese Anforderung zu erfüllen.

Als erste Option wurde eine Wellenlänge von 405 nm für den Pumplaser vorgeschlagen. Ein 405-nm-Pumplaser würde SPDC-Photonenpaare mit einem Spektrenprofil wie in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt, erzeugen. Der Signalstrahl hat eine geschätzte zentrale Wellenlänge bei 457 nm und eine spektrale Bandbreite von

0,24 nm. Die Simulation zeigt auch das Idler-Spektralprofil mit einer zentralen Wellenlänge bei 3500 nm und einer spektralen Bandbreite von 14,22 nm.

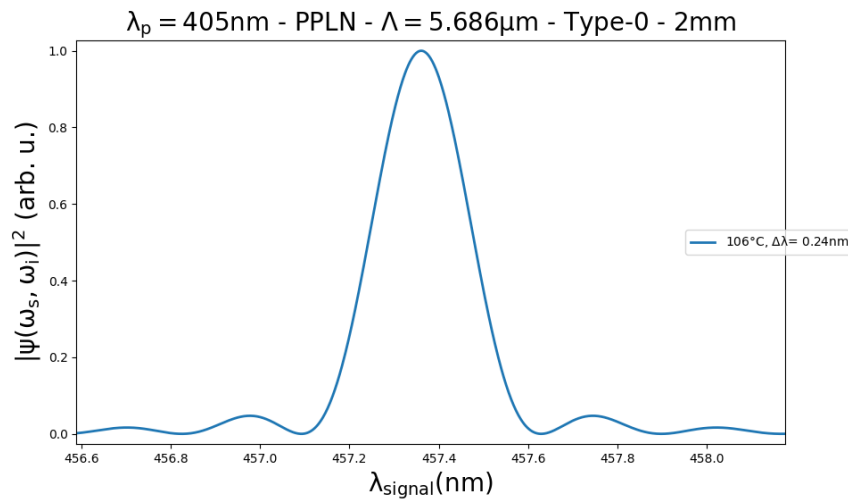


Abbildung 42: Spektralprofil des Signalstrahls für einen Quasi-Phasenanpassungsprozess, der einen 2 mm langen PPLN-Kristall pumpt. Die Bandbreite des Signalstrahls ist relativ schmal ($\Delta\lambda = 0,24 \text{ nm}$) im Vergleich zu seinem Zwilling photon (Idler, $\Delta\lambda = 14,22 \text{ nm}$).

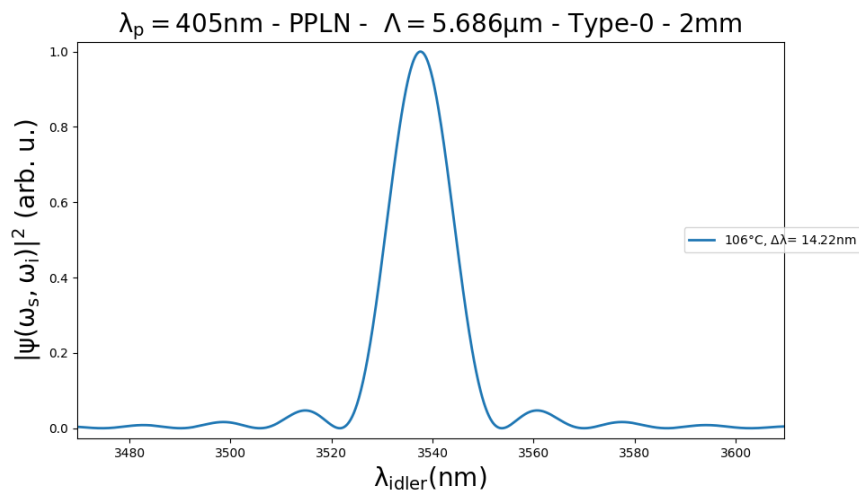


Abbildung 43: Spektralprofil des Leerlaufstrahls für einen Quasi-Phasenanpassungsprozess, der einen 2 mm langen PPLN-Kristall pumpt. Die geschätzte Bandbreite für den Leerlaufstrahl beträgt $\Delta\lambda = 14,22 \text{ nm}$, was wesentlich kleiner ist als die erforderliche Bandbreite ($\Delta\lambda \sim 100 \text{ nm}$).

Der Hauptgrund, warum der 405-nm-Pumplaser verworfen wurde, liegt in der schmalen Bandbreite des Leerlaufstrahls. Daher wurde nach weiteren Alternativen für Kristalleigenschaften gesucht, wie z.B. periodisch gepolte Chirp-Kristalle und andere Wellenlängen für den Pumplaser. Zu diesem Zweck wurde die Leistung eines Pumplasers mit einer zentralen Wellenlänge bei 632 nm simuliert und das spektrale Verhalten des SPDC-Photonenpaares analysiert. Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen das spektrale Profil der Signal- bzw. Idler-Strahlen.

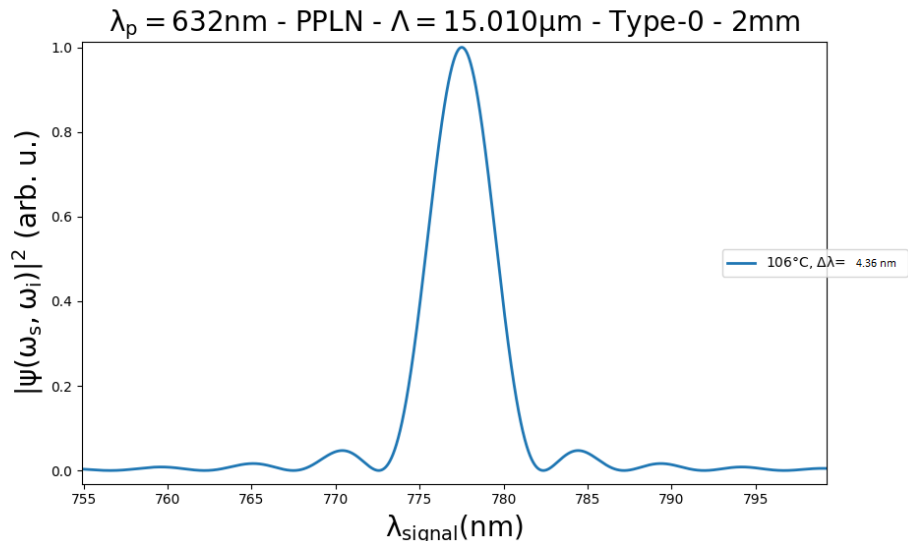


Abbildung 44: Signalstrahl zentriert bei 775,5 nm mit einer Bandbreite von 4,36 nm. Ein 2 mm langer PPLN-Kristall wird von einem 632-nm-Laser gepumpt.

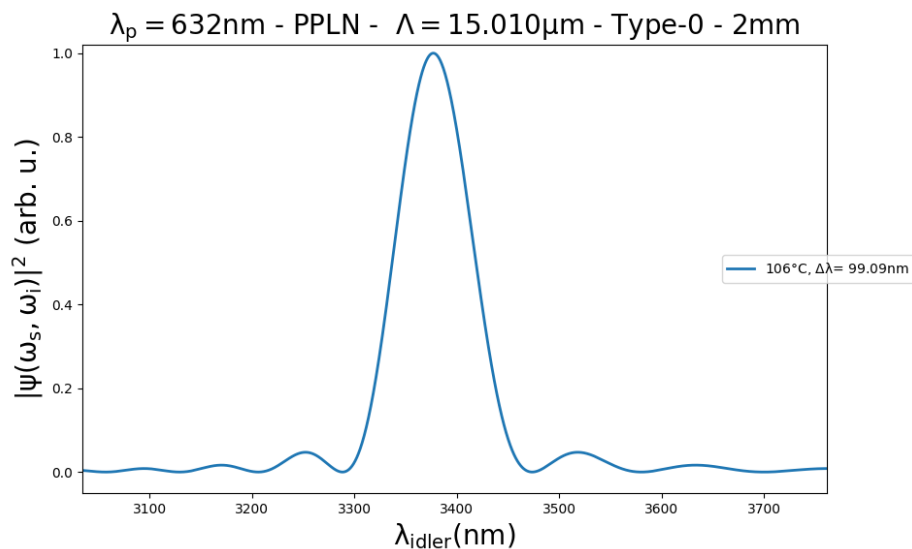


Abbildung 45: Leerlaufstrahl zentriert um 3380 nm mit einer Bandbreite von 99,09 nm. Ein 2 mm langer PPLN-Kristall wird von einem 632-nm-Laser gepumpt. Die größere Bandbreite wird durch Pumpen des Kristalls mit einer längeren Pumpwellenlänge erreicht.

Durch Pumpen des Kristalls mit einer längeren Pumpwellenlänge von 632 nm ermöglicht die Phasenanpassungsbedingung die Erzeugung einer deutlich größeren Bandbreite für das Photonenpaar. In diesem Fall wurde die Anforderung erfüllt und eine Bandbreite von 100 nm erreicht, sodass nun der Bioprobentest in einem einzigen Schuss sondiert werden kann, ohne dass die Kristalltemperatur eingestellt und die Wellenlänge angepasst werden müssen.

Im Berichtszeitraum fanden mehrere Treffen mit den Projektpartnern LASOS, PreciPoint und QOJ zur Design-Abstimmung statt; es ergaben sich zusammenfassend die folgenden wesentlichen Ergebnisse:

- Statt 405 nm sind ~620...650 nm deutlich besser geeignet, da dann kein Chirp beim PPLN notwendig sein wird; die exakte Wellenlänge wird durch LASOS vorgegeben.
- Die Linienbreite wurde festgelegt und die Laser-Power mit mindestens 70 mW höchstmöglich angesetzt.
- Die Zielwellenlänge wurde mit PreciPoint abgestimmt und beträgt 3,5 μm + VIS, da in diesem Bereich eine für Lipide interessante Bande liegt.

- Als nichtlinearer Kristall wird nicht ppKTP, sondern PPLN verwendet, da ppKTP um 3,5 μm eine Absorptionsbande hat und damit nicht gut geeignet ist.
- Die Detektion erfolgt zunächst über ein kommerzielles Spektrometer, mit der späteren Option, auf APD und Gitter für mehr Sensitivität zu wechseln.
- Die Schnittstelle Quelle-Mikroskop wird Freistrahler sein, da eine Faserkopplung zu hohen Verlusten aufweist.

Zur Verringerung des Hintergrundrauschens wurde ein Protokoll entwickelt und in den Laser integriert, der ähnlich wie bei Lock-in-Verstärkern funktioniert. Es handelt sich um einen elektrooptischen, bei 10 kHz laufenden Modulator, der permanent zwischen den H- und V-Polarisationskomponenten umschaltet. Dadurch wird ein Modulationssignal erzeugt, das dann verwendet werden kann, um den Beitrag des Hintergrundrauschens zu isolieren und aus dem eigentlichen Quantensignal zu entfernen. Weitere Details zur Entwicklung und Umsetzung des Lasers werden im Bericht von LASOS dargestellt.

Entwicklungsfeld 3: Systementwicklung FBG Messtechnik

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Entwicklungsfeld.

Entwicklungsfeld 4: Systementwicklung verteilte akustische Sensorik DAS (Rayleigh)

AP 2.4.20_2 Auslegung & Realisierung Elektronik EDFA und Polarisationschaltung

Der Aufbau der Elektronik für die Polarisationschaltung ist in Abbildung 46 schematisch dargestellt. Die Verstärker für die Spannung V_{Pi} wird direkt vom Hersteller des EOMs angeboten, welches die Bereitstellung der passenden Spannung sehr vereinfacht. Ein Pulsgenerator mit variabler Spitzenspannung und Offset-Level wird für die Charakterisierung verwendet. Die Spannungsversorgung mit Plus- und Minus-Spannung ist etwas ungewöhnlich aber wurde mit zwei DC-Netzteilen realisiert.

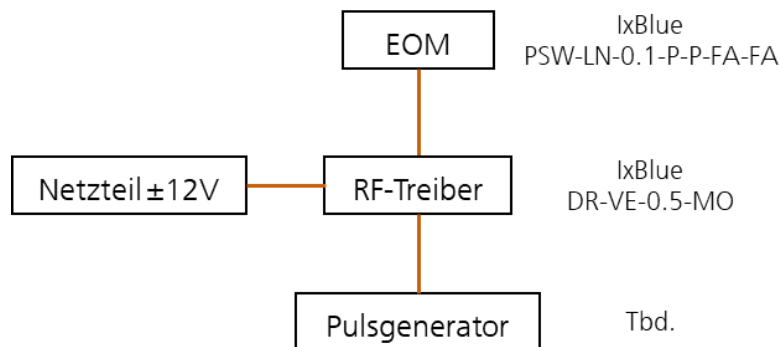


Abbildung 46: Elektronikaufbau.

Die Elektronik wird ergänzt um einen weiteren Pulsgenerator, welcher synchronisiert zum EOM den AOM ansteuert. Da der kommerzielle Treiber vom AOM digital geregelt ist, braucht es keine speziellen Leistungsvoraussetzungen, lediglich die Laufzeitunterschiede vom elektrischen und optischen Signal sind einzustellen.

Der zum Bearbeitungsstand des Berichts verwendete Pulsgenerator für den EOM ist ein Hewlett Packard 8082A, für den AOM ein Muko:Go von Liquid Instruments.

IB 3 – Quanten-und Lasertechnologie

Vorgegebene Ziele:

- Charakterisierung Quanteneigenschaften AR HC-Faser

- Evaluierung Bulk vs. Waveguide NLC
- Breadboard SPDC Quelle Interferometer
- Charakterisierung SPDC Quelle
- Charakterisierung und Optimierung SPDC Interferometer
- Erforschung und Charakterisierung pulsförmig stabiler EDFA (Pulsdauer und -züge)
- Erforschung und Charakterisierung polarisationsgeschalteter EDFAs

Entwicklungsfeld 1: Entwicklung von quanteninspirierten Lichtquellen

AP 3.1.21_2 Theoretische Beiträge zur FWM in ESM und AR HC Fasern

Die Simulation wurden mit Quantenrauschen in der nichtlinearen Schrödingergleichung (ein Photon pro spektralem Datenpunkt) durchgeführt. Analog Abbildung 3 erkennt man damit z.B. für eine ESM, dass die so klassisch aus der nicht-linear optischen Wechselwirkung resultierenden FWM bestimmte Bandbreiten aufweisen, insbesondere schmalbandig auf der Signalseite (VIS) und breitbandiger auf der Idlerseite (NIR).

Führt man die Simulationen mit Dispersion von Hollow-Core Fasern sowie den Gasdispersionen und Nichtlinearen Koeffizienten für eingefüllte Gase durch, die linear mit dem Druck skalieren, kann man Arbeitsparameter finden, bei denen theoretisch Wellenlängen im UV (266 nm) und bei 800 nm (NIR) entstehen. Hierzu ist ein realistischer Druck von 10 bar Argon in 5 cm Faser erforderlich. Als Laser könnte der im Initialinvest beschaffte Frequenzverdoppelte Ti:Sa Laser dienen.

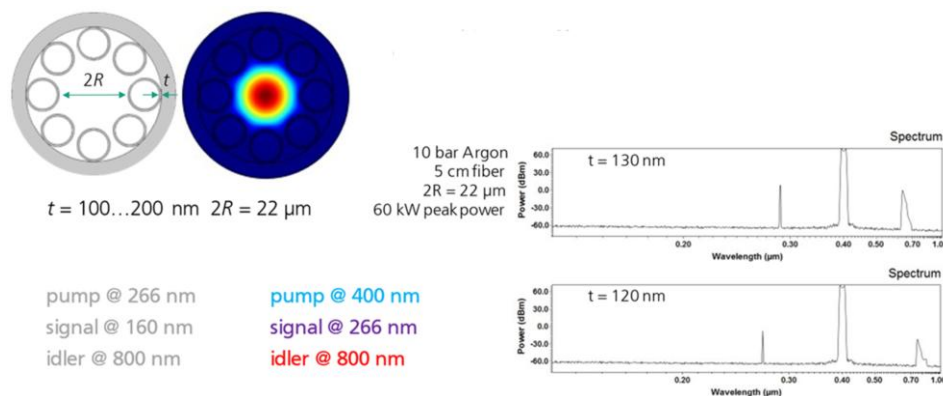


Abbildung 47: Resultate der Simulation von FWM in AR HC Fasern.

Entwicklungsfeld 2: Quanteninspirierte Messverfahren

AP 3.2.22_2 Charakterisierung Quanteneigenschaften AR HC Faser

Die ursprünglich in diesem Arbeitspaket vorgesehenen Arbeiten wurden aufgrund des erhöhten Aufwands in den sich mit der Faserherstellung beschäftigenden Arbeitspaketen in Abstimmung mit den Projektpartnern nicht durchgeführt, da die vorgesehenen Untersuchungen nicht für den zu realisierenden Demonstrator zwingend erforderlich waren. Die dadurch freigesetzten Kapazitäten wurden für die Realisierung der Sensorfaser und der Herstellung von AR HC-Fasern mit der Zielstellung geringer Dämpfung über große Längen aufgewendet

Entwicklungsfeld 3: Quantenquellen

AP 3.3.23_2 Evaluierung Bulk vs. Waveguide NLC

Zur Evaluierung nichtlinearer Kristalle (NLC) für Bulk- und Wellenleiter für die Entwicklung nichtklassischer Lichtquellen ist die Konzentration auf den Photonenfluss, der aus dem NLC und dem Transparenzfenster des Materials kommt, erforderlich. Der Photonenfluss wird durch einen parametrischen nichtlinearen Prozess zweiter Ordnung namens Spontane Parametric Down Conversion (SPDC) erzeugt, bei dem ein hochenergetisches Photon

(Pumpphoton) in zwei niederenergetische Photonen (Signal und Idrler) herunterkonvertiert wird. Die zwei abwärts-gewandelten Photonen können dieselben und unterschiedliche Wellenlängen haben, was die Energie- und Impulserhaltungsgesetze erfüllt.

Um den Photonenfluss zu untersuchen, muss dem Transmissionskoeffizienten des Mediums besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, der den gesamten erzeugten Photonenfluss beeinträchtigt.

Zudem bestimmt die Art der Phasenanpassungswechselwirkung durch den effektiven nichtlinearen Koeffizienten die maximale Anzahl von Photonen, die von dem NLC erzeugt werden. Am häufigsten verwendet werden Typ-0-Phasenanpassung oder Quasi-Phasenanpassung, Typ-I- und Typ-II-Phasenanpassung.

Das zur Anwendung erforderliche Transparenzfenster wird durch den Satz von Wellenlängen der Pump-, Signal- und Idrler-Photonen bestimmt, wobei diese Wellenlängen gleichzeitig stark vom Probenziel abhängen. Verschiedene nichtlineare Medien zeigen unterschiedliche Transparenzbereiche, die vom UV- (BBO-Kristall) bis zum MIR-Spektralbereich (AGS2-Kristall) reichen.

Es wurde experimentell gezeigt, dass wellenleiterbasierte Lichtquellen einen höheren Photonenfluss im Vergleich zu ihrem Bulk-Gegenstück erzeugen. Gleichzeitig gibt es jedoch bestimmte technische Einschränkungen bei der Herstellung von Wellenleitern, wie die Eignung für jedes gegebene Medium.

Im Folgenden werden spektrale Simulationen des erzeugten Photonenpaares für PPKTP-Kristalle gezeigt. PPKTP wurde gegenüber ähnlichen Kristallen aus drei Gründen ausgewählt, nämlich aufgrund seines relativ breiten Transparenzbereichs von 0,4 μm bis 4 μm , seiner Fähigkeit zur periodischen Polung (was den Zugang zu seinem effektivsten nichtlinearen Koeffizienten ermöglicht), sowie einer höheren Gesamttransmission.

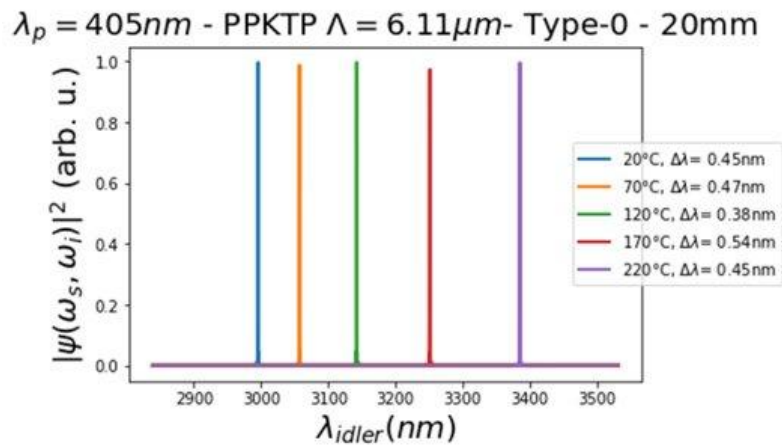


Abbildung 48: Spektrale Peaks des Idrler-Photons bei verschiedenen Temperaturen. Die Temperatur reicht von 20°C bis 220°C; abgedeckt wird ein Spektralbereich von 400 nm, der von 3000 nm bis 3400 nm reicht.

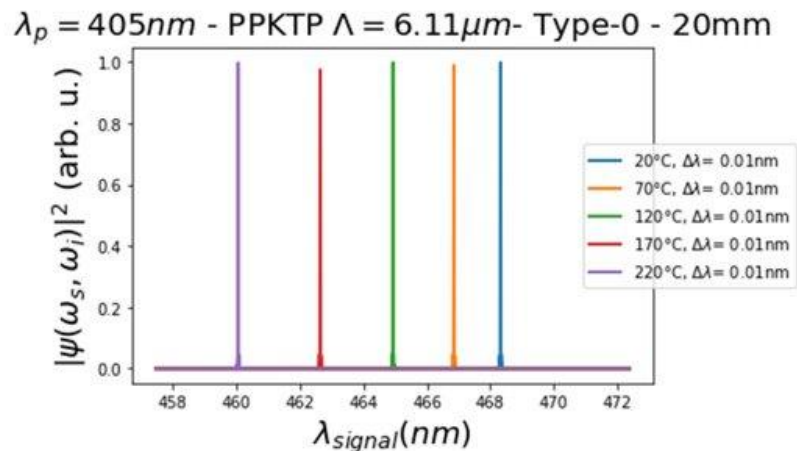


Abbildung 49: Spektrale Peaks des Signalphotons bei verschiedenen Temperaturen. Die Temperatur reicht von 20°C bis 220°C; abgedeckt wird ein Spektralbereich von 8 nm, der von 460 nm bis 468 nm reicht.

Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die simulierten Spektren des Photonenpaares; angegeben sind die Pumpwellenlänge, die Länge des Kristalls, die Art der Phasenanpassung, die Pump- und die Leerlaufwellenlänge. Abbildung 48 zeigt, dass das Idler-Photon einen Bereich von 400 nm abdeckt, wenn die Kristalltemperatur von 20 °C auf 220 °C eingestellt wird. Die Wellenlängenabstimmbarkeit bietet die Möglichkeit, eine hyperspektrale Bildgebung um 3000 nm durchzuführen. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die vorgenannten Parameter sehr flexibel sind und so gewählt werden können, dass beliebige Kriterien erfüllt werden, beispielsweise unterschiedliche Idler-Wellenlängen, die für Bioproben besser geeignet sind.

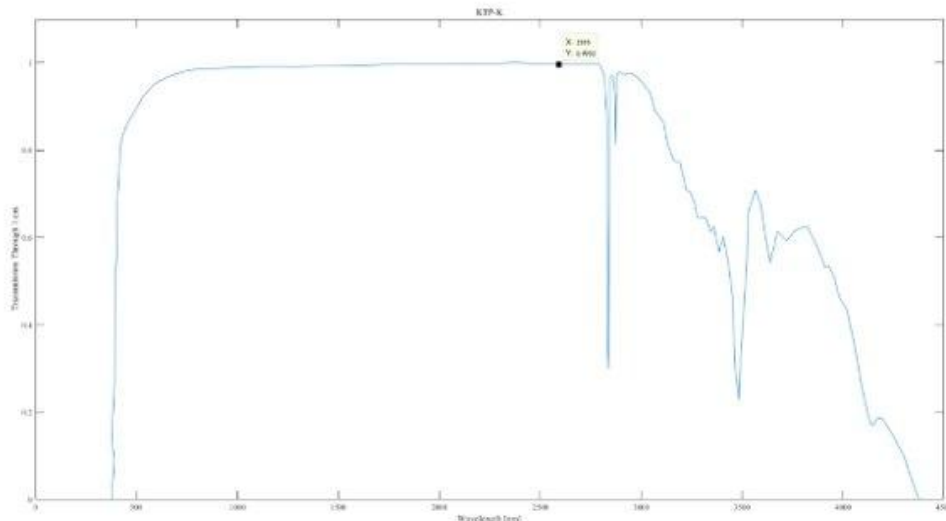


Abbildung 50: Transmissionsprofil des PPKTP-Kristalls, hergestellt von Raicol Crystals. Die Transmission für die interessanten Wellenlängen liegt über 65 %.

Abbildung 50 zeigt das Übertragungsprofil für PPKTP-Kristalle. Die Pumpwellenlänge hat mit 67 % die geringste Transmission, gefolgt vom Signalphoton mit einer Transmission von 89 % und dem Idler-Photon mit einer Transmission von 85 % um 3000 nm. Das Übertragungsprofil bleibt für beide Plattformen, Bulk und Waveguide, gleich. Die Hauptbeschränkung von PPKTP ist sein Transmissionsfenster, das nur bis zu 4000 nm reicht, was die Wellenlängen für die Untersuchung biologischer Proben begrenzt.

Um dies zu umgehen, würden im weiteren Projektverlauf zwei weitere nichtlineare Kristalle betrachtet werden: AgGaS₂ und LiGaS₂. Abbildung 51 zeigt ihre entsprechenden Transmissionsprofile.

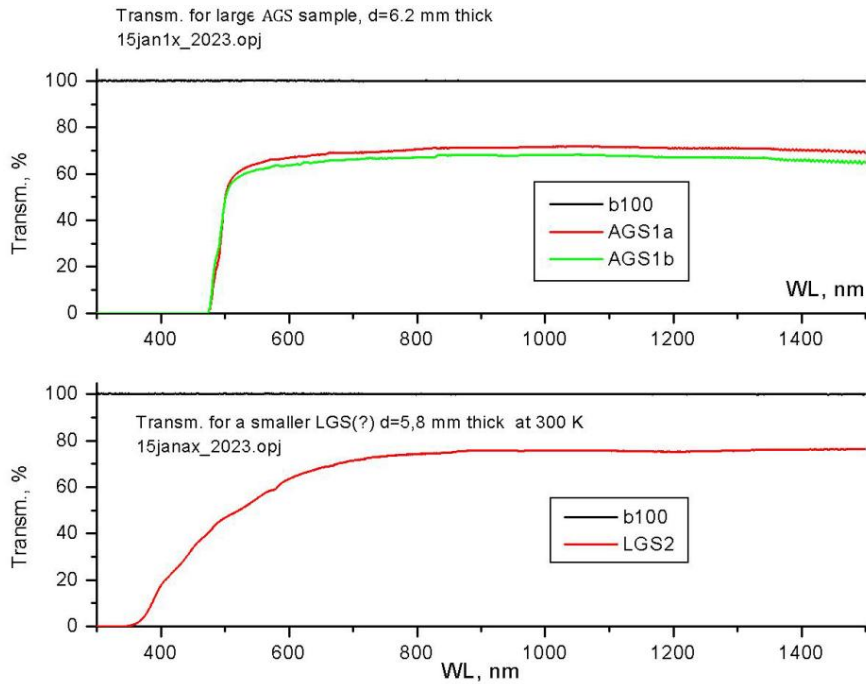


Abbildung 51: Transmissionsprofil für AgGaS₂ (oben) und LiGaS₂ (unten) für den VIS- und NIR-Teil des Spektrums. Die Profile zeigen eine hohe Transmission für eine Pump- (633 nm) und eine Signalwellenlänge (ca. 800 nm).

AgGaS₂ und LiGaS₂ verfügen über ein Transparenzfenster von bis zu 13 μm und bieten eine hohe Transmission für alle beteiligten Wellenlängen. Im Gegensatz zu PPKTP ist die Art der Wechselwirkung, die für sie verfügbar ist, nur die Phasenanpassung vom Typ I und Typ II, was bedeutet, dass die Phasenanpassung vom Typ 0 für diesen Kristalltyp nicht geeignet ist. Dies führt zu einem geringeren Photonenfluss und kann durch den relativ hohen effektiven nichtlinearen Koeffizienten und die große Leistungsschwelle, die AgGaS₂ und LiGaS₂ besitzen, ausgeglichen werden. Bisher sind diese Kristalle nur als Bulk-Material erhältlich. Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Zielwellenlängen für beide Kristalle.

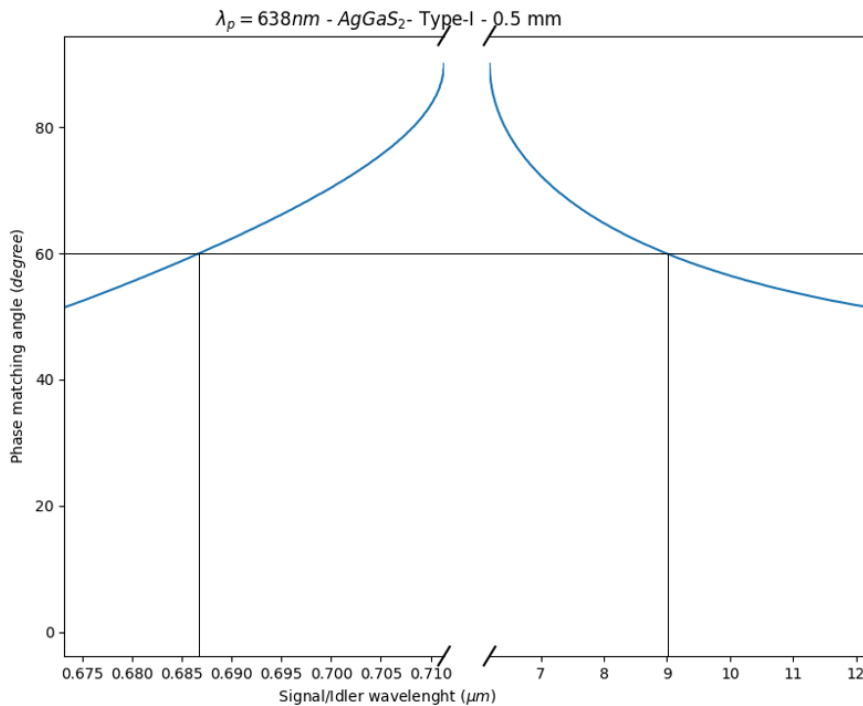


Abbildung 52: Zielwellenlängen für AgGaS₂, Typ-I-Phasenanpassungswechselwirkung. Das Diagramm zeigt einen Phasenanpassungswinkel von 60°, der durch Pumpen mit 0,638 µm eine Signalwellenlänge um 0,685 µm und eine Idler-Wellenlänge bei 9 µm erzeugt.

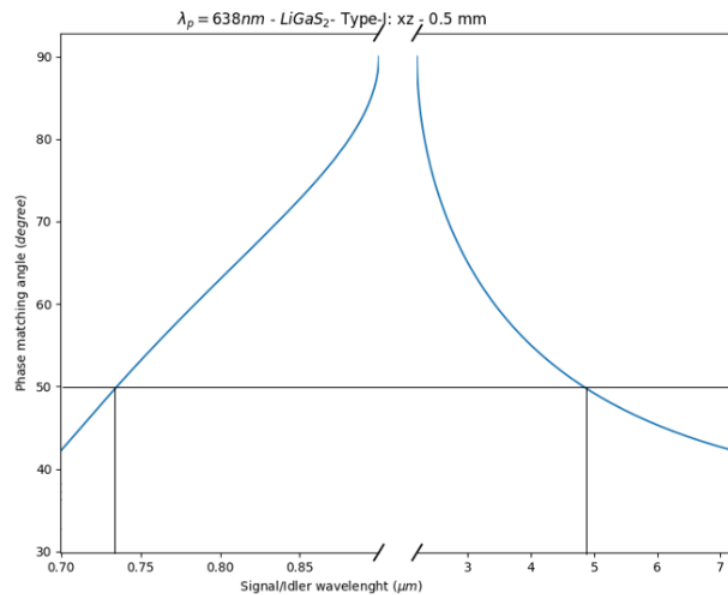


Abbildung 53: Zielwellenlängen für LiGaS₂, Typ-I-Phasenanpassungswechselwirkung. Das Diagramm zeigt einen Phasenanpassungswinkel von 50°, der durch Pumpen mit 0,638 µm eine Signalwellenlänge um 0,7 µm und eine Idler-Wellenlänge bei 5 µm erzeugt.

Aufgrund der Komplexität des Herstellungsprozesses von Wellenleitern für AgGaS₂ und LiGaS₂ wurden Bulk-Kristalle für die Anwendung verwendet. In einer ersten Phase kamen PPKTP und in einer weiteren Phase AgGaS₂ zum Einsatz. Der geringere Photonenfluss aus den Bulk-Kristallen kann durch eine höhere Pumpleistung ausgeglichen werden.

Weitere Experimente wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner QOJ durchgeführt, insbesondere im Hinblick auf einen Vergleich zwischen ppKTP und ppLN.

AP 3.3.24_2 Breadboard SPDC Quelle Interferometer

Ein transportables Breadboard wurde in enger Kooperation mit QOJ konzipiert und aufgebaut. Zudem erfolgte ein Experiment zur Leistungsbewertung, das schlussendlich das Design der miniaturisierten Quantenquelle unter Verwendung gechirpter, nichtlinearer ppLN-Kristalle bestätigte. Das AP 3.3.24_2 wurde dabei mit maßgeblicher Unterstützung des Fraunhofer IOF direkt beim Projektpartner QOJ bearbeitet.

AP 3.3.25_2 Charakterisierung SPDC Quelle

In diesem Arbeitspaket wurde eine SPDC-Photonenpaarquelle charakterisiert, die auf periodisch gepoltem Lithiumniobat (ppLN) und aperiodisch gepoltem Lithiumniobat (applN), auch gechirptes ppLN genannt, basiert. Das Chirpen der periodischen Polung wird durchgeführt, um eine größere spektrale Bandbreite der down-converted Photonen zu erreichen.

Begonnen wurde mit der numerischen Berechnung der Signal- und Idler-Emissionswinkel für einen ppLN-Kristall unter der Annahme einer Pumpwellenlänge von 640 nm und eines Typ-0-SPDC-Prozesses (Pump-, Signal- und Idler-Photonen sind alle vertikal polarisiert), vgl. Abbildung 54.

Die Diagramme wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner QOJ unter Verwendung eines vom Fraunhofer IOF entwickelten Codes erstellt. Das Idler-Photon ist im Bereich von 3,375 μm bis 3,450 μm und breitet sich in einem Winkel von $\pm 4^\circ$ aus. Umgekehrt wird das Signalphoton im Spektralbereich von 740 nm bis 780 nm mit einem Emissionswinkel von $\pm 1,8^\circ$ emittiert.

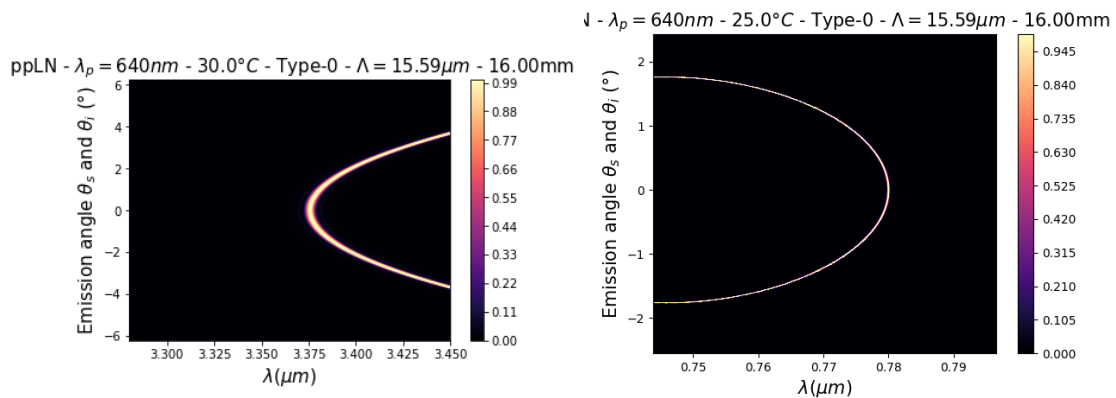


Abbildung 54: Winkelabhängige Emissionsspektren von Idler-Photonen (links) und Signalphotonen (rechts) für einen Typ-0-SPDC-Prozess in einem bei 640 nm gepumpten ppLN-Kristall.

Diese numerischen Ergebnisse wurden mit denen verglichen, die unter der Annahme eines appLN-Kristalls erhalten wurden, vgl. Abbildung 55.

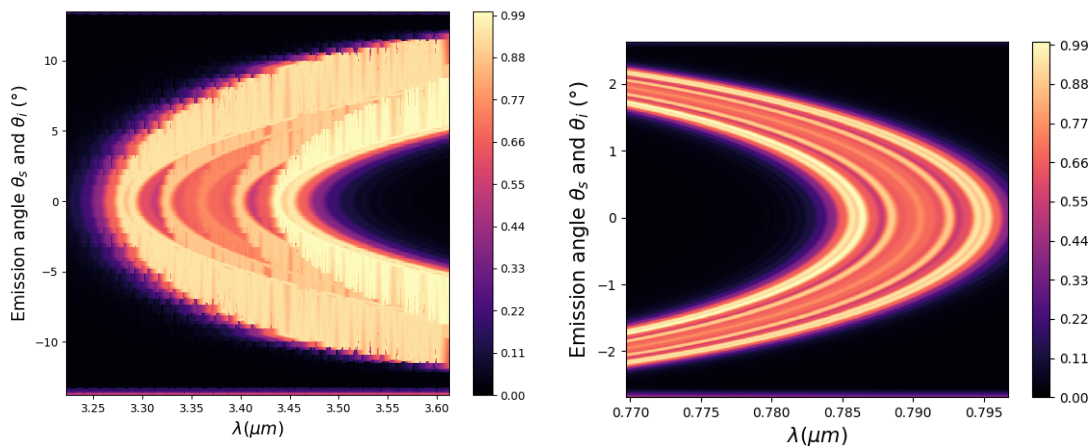


Abbildung 55: Winkelabhängige Emissionsspektren von Idler-Photonen (links) und Signalphotonen (rechts) für einen Typ-0-SPDC-Prozess in einem bei 640 nm gepumpten appLN-Kristall.

Der gechirpte gepolte Kristall weist im Vergleich zum ppLN breitere Photonenpaarspektren (3,25 μm – 3,60 μm für den Idler, 770 nm – 800 nm für das Signal) und Emissionswinkel ($\pm 12^\circ$ für den Idler, $\pm 2,2^\circ$ für das Signal) auf Fall.

Die letztgenannte Photonenpaarquelle wurde anschließend im Labor realisiert und mit einem Einzelphotonenspektrometer im sichtbaren Bereich charakterisiert, was die breite Natur der SPDC-Emission bestätigte, vgl. Abbildung 56.

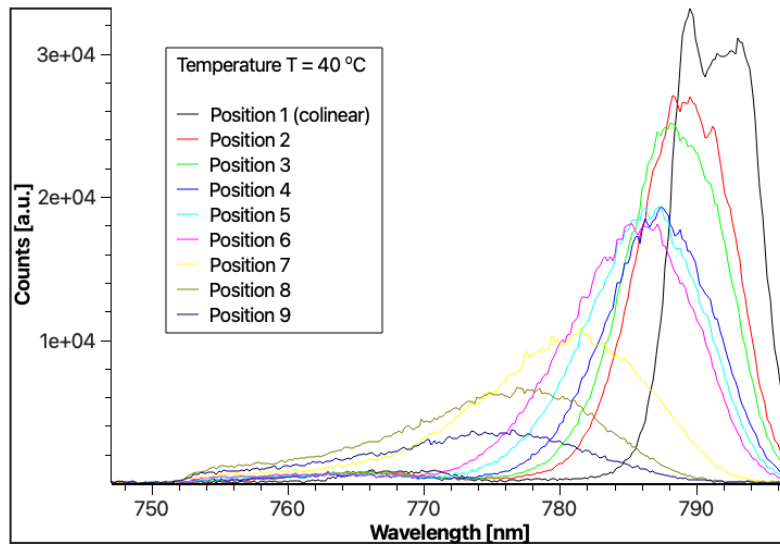


Abbildung 56: Gemessenes Emissionsspektrum des Signalphotons.

Um die Charakterisierung der SPDC-Quelle abzuschließen, wurde die lineare Abhängigkeit der zentralen Photonenwellenlänge von der Kristalltemperatur experimentell bestätigt und in Abbildung 57 dargestellt.

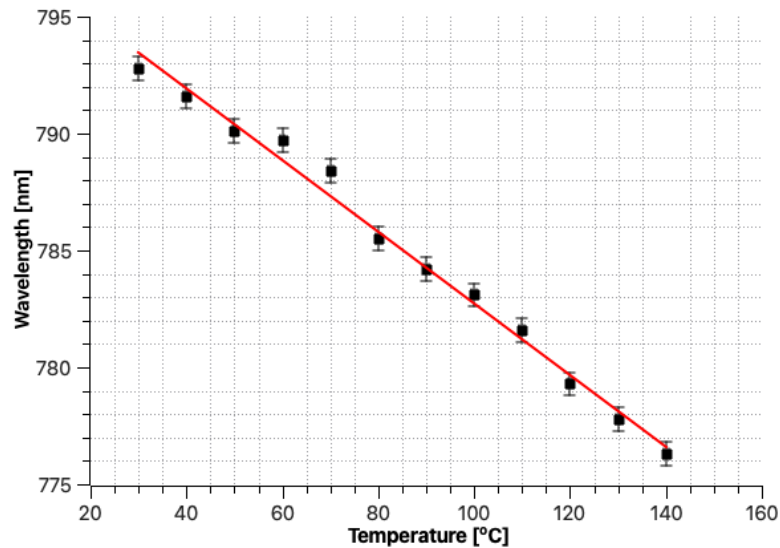


Abbildung 57: Gemessene lineare Abhängigkeit der zentralen Wellenlänge des Signalphotons von der Kristalltemperatur.

AP 3.3.26_2 Charakterisierung und Optimierung SPDC Interferometer

Der Entwurf und die experimentelle Implementierung eines nichtlinearen Interferometers zur Durchführung von Mikroskopie auf Basis undetektierter Photonen im mittleren Infrarot wurden vom Fraunhofer IOF in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner QOJ durchgeführt. Das Schema des Aufbaus ist in der Abbildung 58 dargestellt.

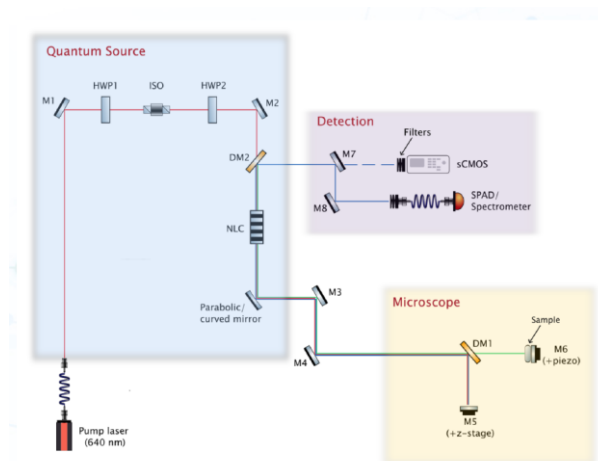


Abbildung 58: Skizze des nichtlinearen Interferometers für die Mikroskopie undetektierter Photonen im MIR.

Weitere Details zur Ausrichtung des Versuchsaufbaus sind im QOJ-Bericht dargestellt. Das Fraunhofer IOF hat weitere numerische Simulationen durchgeführt, um den Einfluss eines reflektierenden Objektivs für die Mikroskopie auf das Eingangsfotonenfeld zu untersuchen. Die Simulationen wurden unter der Annahme eines Thorlabs LMM15X-UVV: 15X reflektierenden Mikroskopobjektivs mit $f = 13,3$ mm, NA 0,3 und unter Verwendung der online verfügbaren Dateien zur Durchführung von Matlab- und Zemax-Simulationen realisiert. Zu diesem Zweck wurden im Wesentlichen die Auswirkungen der gekrümmten Spider-Vane-Apertur untersucht, die im kommerziellen Objektiv vorhanden ist.

Auf der Fourier-Transformation basierende Matlab-Simulationen (Abbildung 59) zeigen, dass eine stärkere Krümmung der Spider-Vanes zu einer verbesserten Punktspreizfunktion (PSF) führt, dass aber auch Aberrationen enthalten sind, was auf die Notwendigkeit eines Kompromisses zwischen optimaler PSF und der Kontrolle von Aberrationen in unserem Quantenmikroskop-Schema hinweist.

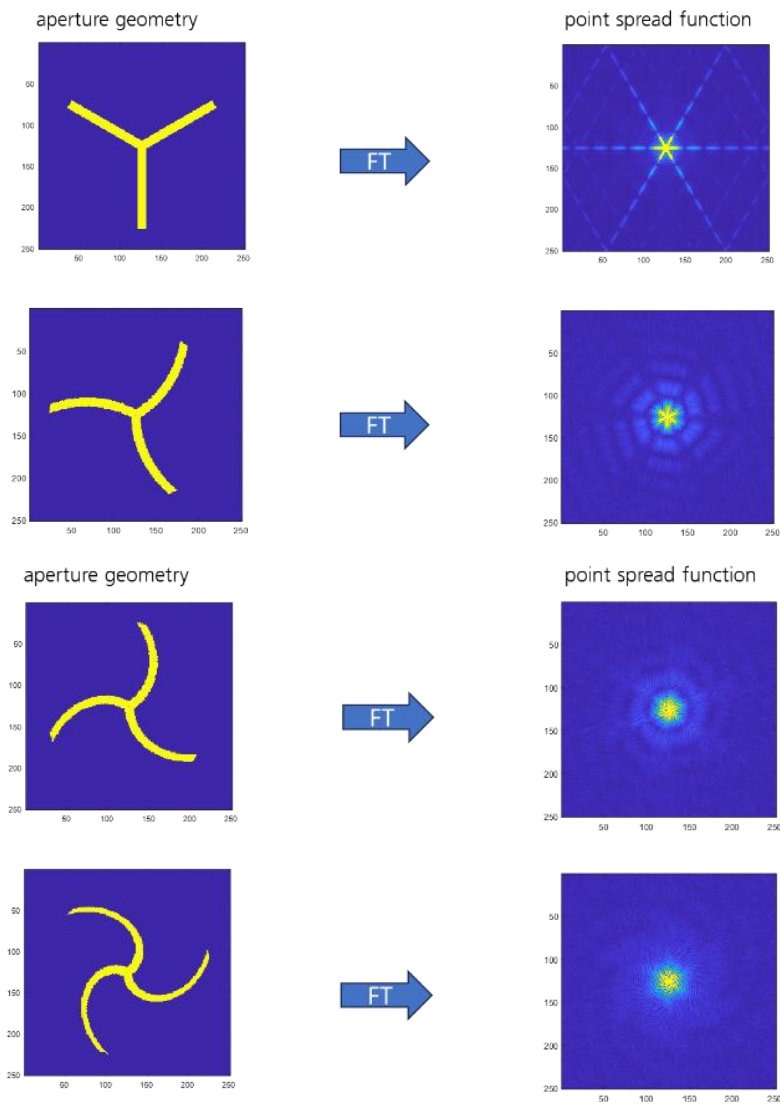


Abbildung 59: FT Matlab-Simulationen, die den Einfluss der Mikroskopobjektivgeometrie auf die System-PSF aufzeigen.

Der technische Grund für die Untersuchung objektivinduzierter räumlicher Aberrationen liegt in der daraus resultierenden verringerten Sichtbarkeit von Quanteninterferenzen in einem typischen Bildgebungs Aufbau mit nicht detektierten Photonen. Weitere Simulationen wurden mit den auf der Webseite verfügbaren Zemax-Dateien durchgeführt, wobei die genauen Parameter des kommerziell erhältlichen Objektivs LMM15X-UVV verwendet wurden, vgl. Abbildung 60.

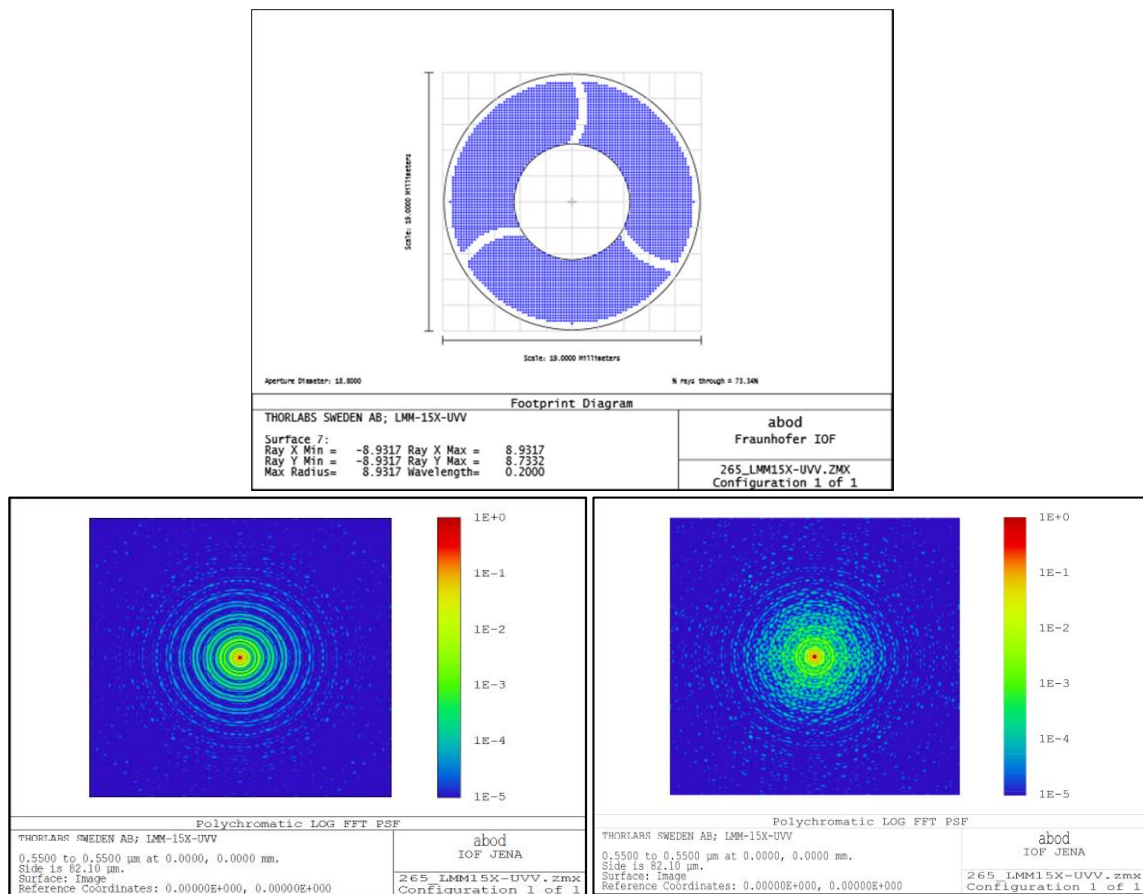


Abbildung 60: Zemax-Simulationen des Systems PSF. Oben: exakte Geometrie eines handelsüblichen Objektivs. Unten links: PSF ohne Spider-Apertur. Unten rechts: PSF bei Vorhandensein einer Spider-Apertur.

Die Zemax-Simulationen bestätigen die Annahmen aus den Matlab-Simulationen. Um Aberrationen weiter zu quantifizieren, wurde das Spotdiagramm mit verschiedenen Eingabefeldwinkeln untersucht.

Abbildung 61 zeigt, dass das Strehl-Verhältnis 0,99 beträgt, wenn das Eingangsfeld auf der Achse beugungsbegrenzt ist. Allerdings werden Aberrationen wichtig, sobald kleine Winkel $\geq 0,1^\circ$ eingeführt werden. Wenn der Eingangswinkel $0,2^\circ$ erreicht, sinkt das Strehl-Verhältnis auf 0,05, was die Grenzen des kommerziellen Objektivs verdeutlicht.

Dies wurde für die Quantenmikroskop-Interferometeranwendung untersucht, was auf die Notwendigkeit eines kundenspezifischen Designs für weitere Optimierungen hinweist.

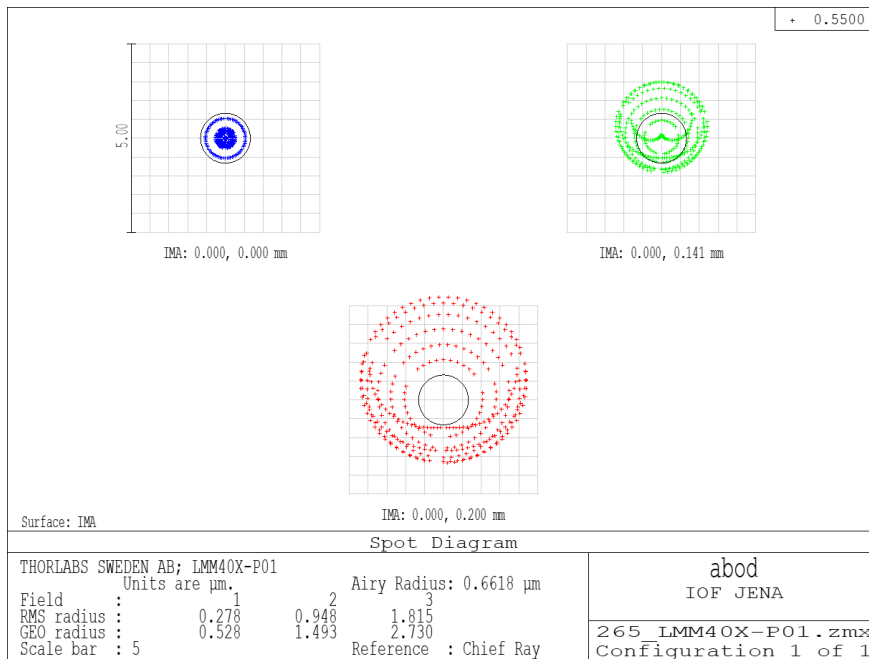


Abbildung 61: Zemax-Simulationen des Systems PSF. Oben: exakte Geometrie eines handelsüblichen Objektivs. Unten links: PSF ohne Spider-Apertur. Unten rechts: PSF bei Vorhandensein einer Spider-Apertur.

Im Anschluss an die Simulationen wurde die Breadboard-Version des nichtlinearen Interferometers für die MIR-Quantenbildgebung optimiert und charakterisiert.

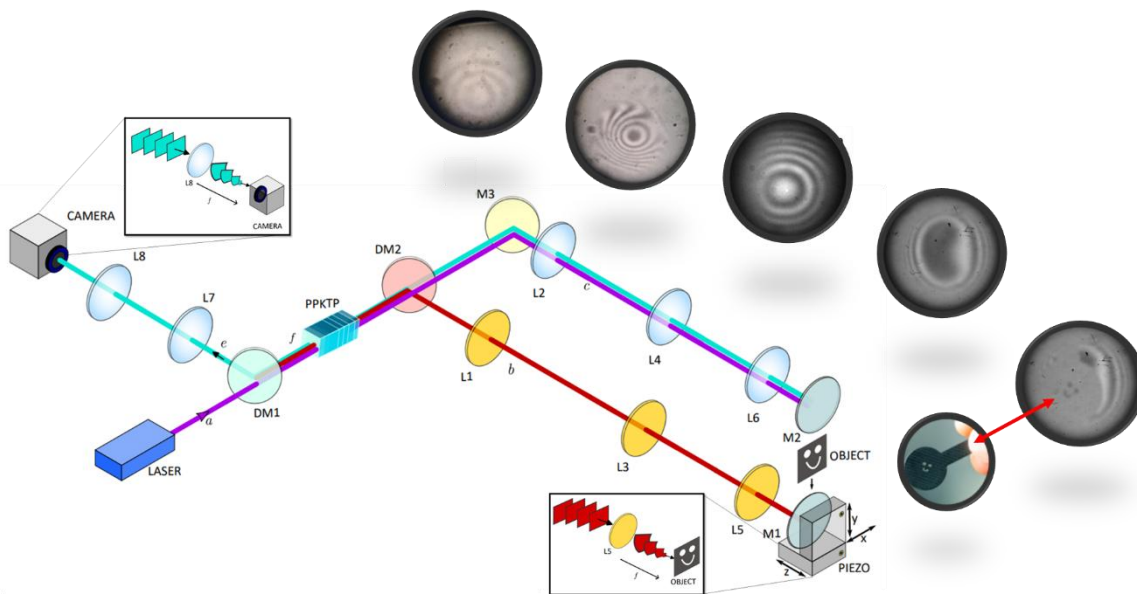


Abbildung 62: Scanning-MIR-Mikroskopie mit nicht detektierten Photonen – Breadboard-Aufbau.

Zunächst wurde die Sichtbarkeit der Streifen charakterisiert (Abbildung 62) und eine Streifensichtbarkeit von $\sim 1\%$ festgestellt. Die Überlappung der Pump-, Signal- und Idler-Strahlen wurde in der Mitte der nichtlinearen Kristallebene sorgfältig optimiert, da dies der kritischste Parameter ist. Außerdem wurde sichergestellt, dass diese Ebene, in der sich die Strahlen innerhalb des nichtlinearen Kristalls treffen, im gesamten Interferometer korrekt abgebildet wurden. Schließlich wurde ein Si-Fenster im MIR-Pfad des Idlers eingesetzt, um störende interferometrische Streifen zu eliminieren, die nicht durch den induzierten Kohärenzeffekt verursacht werden, sondern auf parasitäre Pump- und Mehrfachreflexionen zurückzuführen sind. Mit diesen Optimierungsmaßnahmen konnte die Sichtbarkeit auf bis zu $\sim 5\%$ verbessert werden. Trotz dieser scheinbar geringen Zahl reicht dies aus, um eine effiziente Mikroskopie durchzuführen, wie in AP 2.1.35_2 berichtet.

Die Verluste im System wurden durch die Fokussierung auf den MIR-Pfad charakterisiert, da durch MIR-Photonen Informationen über die während der Mikroskopieexperimente charakterisierten Probe transportiert werden. So konnten die wichtigsten optischen Komponenten identifiziert werden, die zum Verlustbudget beitragen: das Si-Fenster mit 15 % Verlusten, Linsen im Leerlaufpfad mit 5 % Verlusten, dichroitische Spiegel mit 5 % Verlusten und die Reflexionsverluste des nichtlinearen Kristalls mit 30 %. Insgesamt weist das System unter Berücksichtigung der Doppelpasskonfiguration Gesamtverluste von ~77 % auf.

Entwicklungsfeld 4: Speziallaser für rückstreubasierte Messtechnik

AP 3.4.27_2 Erforschung und Charakterisierung pulsförmig stabiler EDFA (Pulsdauer und -züge)

In diesem Arbeitspaket wird der klassische Verstärker analysiert. Hierbei handelt es sich um eine Erbium-dotierte Glasfaser, bei der die Pumpleistung und Seedquelle monolithisch angespleißt wird. Der Verstärkeraufbau ist in Abbildung 63 schematisch dargestellt und gleicht dem Aufbau wie in AP 1.1.3_2 simuliert. Als Seeder wird ein fasergekoppelter Diodenlaser verwendet, der über eine direkte Modulation des Diodenstroms eine Ausgangspulsform mit fester Wiederholrate generiert. Die Verstärkerfaser ist eine kommerziell erhältliche Er80-8/125 vom Lieferanten Thorlabs. Die Pulsform in AP 1.1.3_2 numerisch berechnet wird mit dem Seeder erzeugt und verstärkt. Die Charakterisierung erfolgt zusätzlich zum Leistungsmessgerät mit einer Photodiode und Oszilloskop, welche die zeitliche Pulsform nach der Verstärkung darstellt und vermisst.

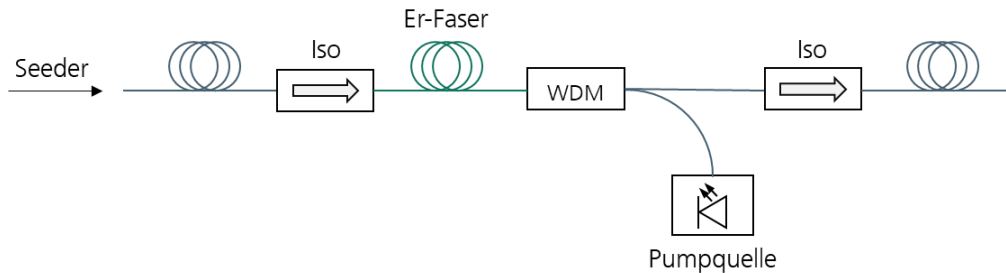


Abbildung 63: Einfacher Verstärkeraufbau; Iso – optischer Isolator, Er-Faser – Erbium-dotierte Faser, WDM – Wellenlängenmultiplexer

Mit der in AP 1.1.3_2 errechneten Eingangspulsform wird die Laserdiode angesteuert. Die real emittierte Pulsform im Vergleich zur Simulation ist in Abbildung 64a) dargestellt. Nach der Verstärkung auf 1,6 W Spitzenleistung zeigt sich die zu erwartende Veränderung der Pulsform bis zur nahezu rechteckigen Form. Abbildung 64b) zeigt den gemessenen Verlauf des 5- μ s Pulses. In der Theorie ist eine Amplitudenstabilität von <0,5% gezeigt worden, im Verstärker sind <5% bisher erreicht.

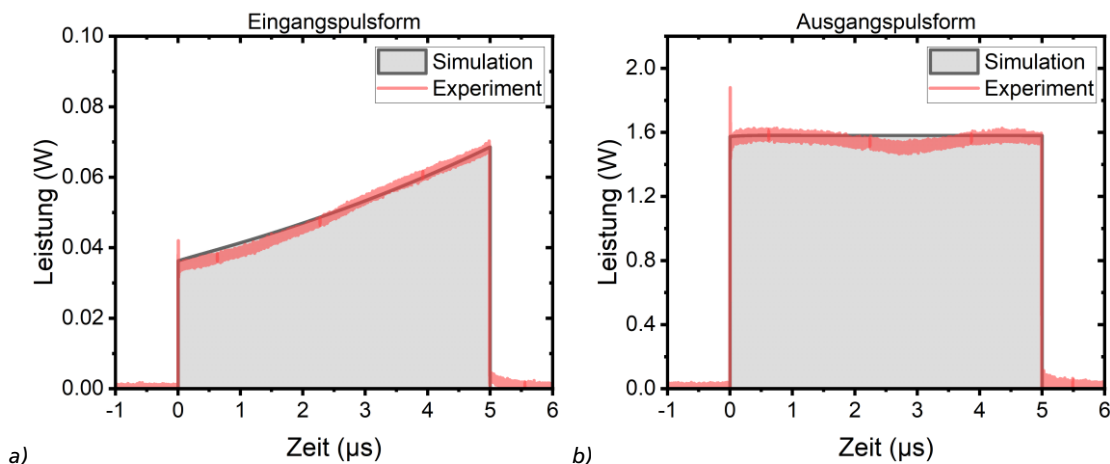


Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf der Pulsform am a) Eingang und am b) Ausgang des Verstärkers im Vergleich mit der Simulation

AP 3.4.28_2 Erforschung und Charakterisierung polarisationsgeschalteter EDFAs

Das Arbeitspaket umfasst eine Recherche über kommerziell verfügbare Erbium-Verstärkerfasern. Mit den anvisierten >1 W Spitzenleistung ist der EDFA ausschließlich über Double-Clad-Fasern realisierbar. Eine Marktrecherche ergab die in Tabelle 2 gezeigten Fasern. Nicht alle ausgewerteten Parameter können hier dargestellt werden. Die der wesentliche Parameter ergab sich aus der Modenfeldadaption aus der passiven PM-Faser PM1550-XP zur Verstärkerfasern. Herauskristallisiert hat sich die Faser „IXF-2CF-EY-PM-12-130-0.10“ von iXblue.

Tabelle 2: Recherchierte mögliche Fasern für den EDFA

Hersteller	Bezeichnung
Fibercore	DC 1500Y(6/125)HD
Fibercore	DC 1500Y(11/125)HD
Coherent	PM-EYDF-10/125-XP
Coherent	PM-EYDF-6/125-HE
Coherent	PM-EYDF-12/130-HE
Coherent	PM-EYDF-12/130-XP
Coherent	SM-EYDF-10P/125-XP
Coherent	SM-EYDF-6/125-HE
Coherent	SM-EYDF-6/125-XP
CorActive	DCF-EY-6/128-PM
CorActive	DCF-EY-10/128-PM
iXblue	IXF-2CF-EY-PM-6-130-LNF-L2
iXblue	IXF-2CF-EY-PM-12-130-0.10

Der gesamte optische Aufbau ist in Abbildung 65 dargestellt. Eine vorangegangene Charakterisierung des EOMs erfolgte mit einem Seeder und anschließender Analyse. Die Machbarkeit ist in Abbildung 66 gezeigt. Es wird das Ausgangssignal nach einem Polarisationsanalysators (in grün) gezeigt, bei dem der elektronische Vorstärker vor dem EOM mit einem Rechtecksignal (in gelb) angesteuert wird.

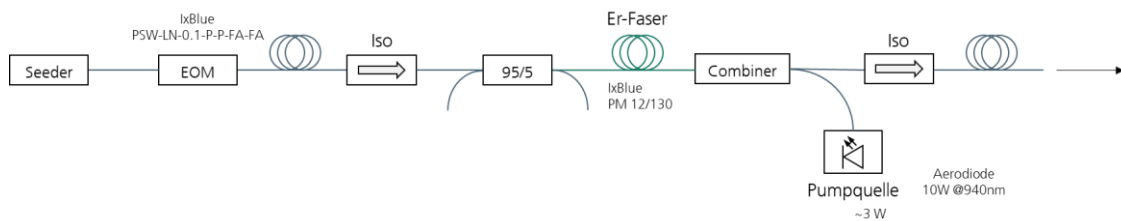


Abbildung 65: optischer Aufbau des polarisationsgeschalteten EDFA.

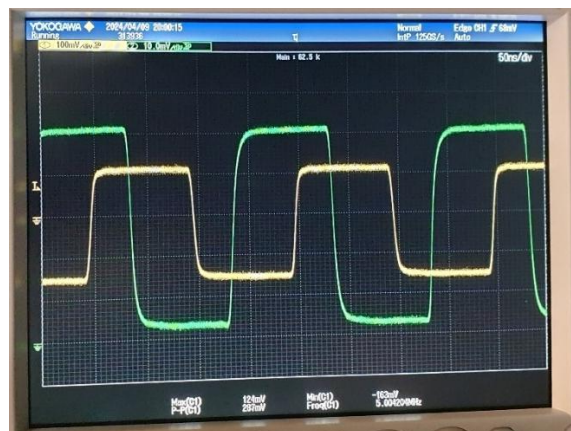


Abbildung 66: Foto vom Oszilloskop mit analysierten Polarisationsgeschaltetem Signal (grün) und elektronischem Signal des Pulsgenerators (gelb).

Der komplette Verstärker wurde hinsichtlich seiner Ausgangsleistung charakterisiert. Im Dauerstrichbetrieb sind 1 W Ausgangsleistung bei knapp 5 W Pumpleistung erreicht. Die Leistungskurve ist in Abbildung 67 aufgetragen. Dadurch ist gewährleistet, dass die 1 W Spitzenleistung im gepulsten Betrieb grundsätzlich problemlos möglich ist.

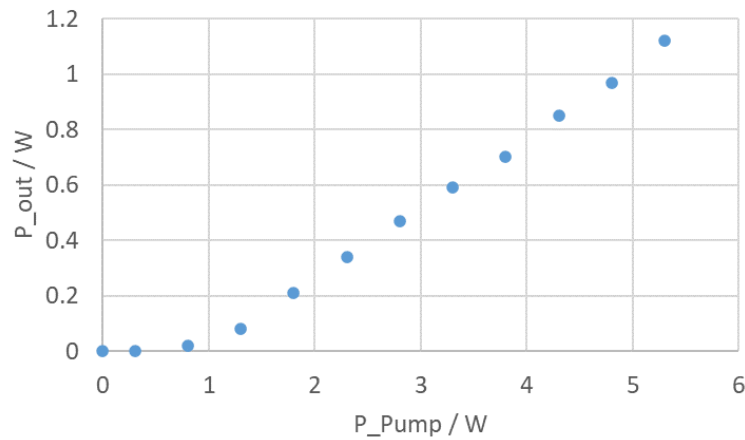


Abbildung 67: Ausgangsleistung in Abhängigkeit zur Pumpleistung im Dauerstrichbetrieb.

Die Auswertung in Abbildung 68 zeigt einen schwachen Pulscontrast von knapp 9 dB und einen Amplitudenabfall von 5 %.

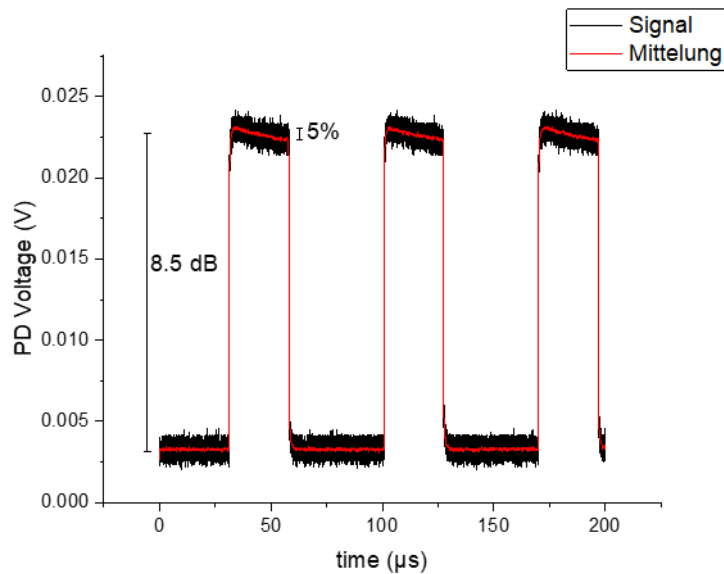


Abbildung 68: Analyse der relevanten Pulsparameter.

AP 3.4.29_2 Verbesserung Kontrastverhältnis

Der Pulscontrast wird mit Hilfe eines dem Verstärker nachfolgenden akustooptischen Modulators verbessert. Typischerweise ist die Polarisationsmodulation mit EOM für die schnelle Schaltung zuständig, während der langsamere AOM für die Kontrastverbesserung eingesetzt wird und man den zusätzlichen Untergrund im Vor- und Nachlauf vom Puls duldet. Das vollständige Setup ist Abbildung 69 dargestellt.

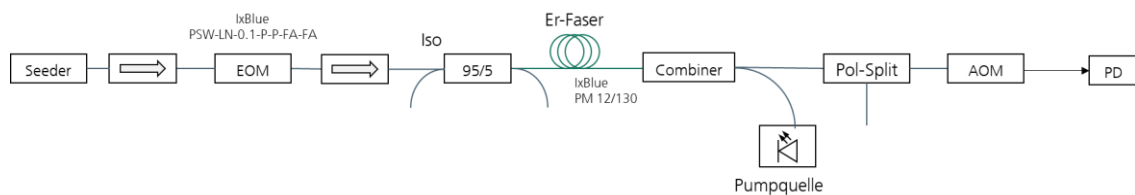


Abbildung 69: Modifizierter EDFA-Aufbau, ein monolithischer Polarisationssplitter und akustooptischer Modulator integriert und mit einer Photodiode analysiert.

Ein zweiter Pulsgenerator wird mit der aus AP 2.4.20_2 entwickelten Elektronik kombiniert und synchronisiert. Sowohl das elektrische Ansteuerungssignal, also auch das gemessene Photodiodensignal am Ausgang sind in Abbildung 70 dargestellt. Das Ablesen am Graph zeigt einen Pulscontrast von 27 dB. Dieser Wert ist vorsichtig zu interpretieren. Das verwendete Digital-Oszilloskop hat eine Amplituden-Diskretisierung von 8 bit ist daher auf ein Schaltkontrast von 24 dB begrenzt. Somit sind die technischen Mittel für einen Kontrast >30 dB zu messen stark eingeschränkt.

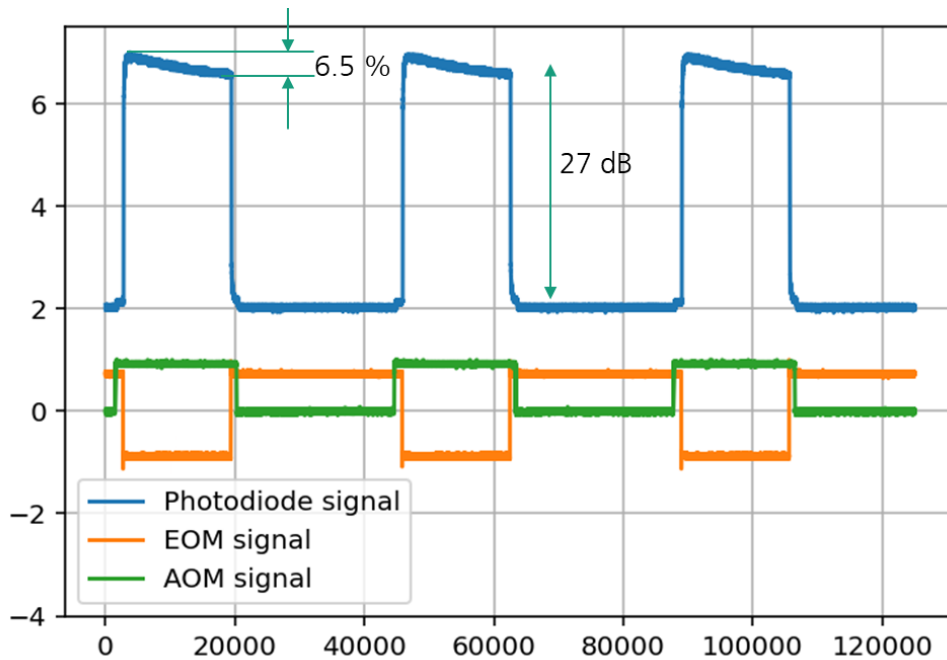


Abbildung 70: Pulszug nach dem AOM (Blau), mit synchronisiertem EOM- und AOM-Signal, x-Achse in ns, y-Achse ist die Photodiodenspannung in „arb. unit“.

Passend zum AOM wurde ein Treiber mitgeliefert, der eine digitale Schaltung (TTL) ermöglicht. Nach TTL-Standard ist ein Signalpegel $U < 0,8$ V Low-Pegel, Treiber ist aus, der AOM blockt. Ein Signalpegel $U > 2,0$ V ist High-Pegel, der Treiber steuert den AOM, der AOM transmittiert. Es ist daher eine typische Vorgehensweise, den AOM im Dauerstrichbetrieb zu verwenden und sowohl die Leistung bei Transmission als auch die Leistung bei „Ge-blockt“ zu messen und daraus den realen Schaltkontrast zu ermitteln.

Mit dem gleichen kalibrierten Messkopf wird in Transmission mit kalibrierten Neutralfilter (Thorlabs NE40A, 13 dB Abschwächung bei 1,5 μm Wellenlänge) 6,4 mW gemessen, mit AOM in Sperrung ohne ND-Filter 152 nW. Das ergibt einen Gesamtkontrast von 59 dB (46 dB Signal, 13 dB Filter).

Da der Schaltkontrast vom AOM zum bereits bestehenden Kontrast aufaddiert wird, ergibt sich ein wahrscheinlicher Schaltkontrast zu 68 dB. Ein zweiter AOM erhöht den Kontrast auf >100 dB. Dies ist MS3-relevant. Im bilateralen Gespräch mit dem Partner Luna stellt sich heraus, dass 50 dB für den Demonstrator ausreichend sind.

AP 3.4.30_2 Erforschung von Chirpaufprägung und Charakterisierung

Das Aufprägen eines Chirps über den Puls wird üblicherweise durch eine Modulation des Diodenstroms generiert. Zur grundsätzlichen Funktionsdarstellung wird der Modulationseingang des Diodentreibers benutzt, um den angelegten Diodenstrom zu modulieren. Die externe Modulationsspannung liegt im Bereich von wenigen mVpp (Millivolt Peak-to-Peak). Ein mVpp Modulationsspannung übersetzt sich in etwa zu 0,15 mA Diodenstrom. Mit dem Aufbau aus AP 2.2.18_2 wird das Ergebnis gemessen. In Abbildung 71 sind erste Ergebnisse gezeigt. Die

Eingangssignalbreite liegt bei 1 MHz. Mittels Modulationsspannungen von 2 mVpp und 10 mVpp wird die Linienbreite in 55 MHz bzw. 75 MHz moduliert. Der Verlauf innerhalb der Modulationspulsbreite lässt sich mit dem Aufbau nicht zeigen.

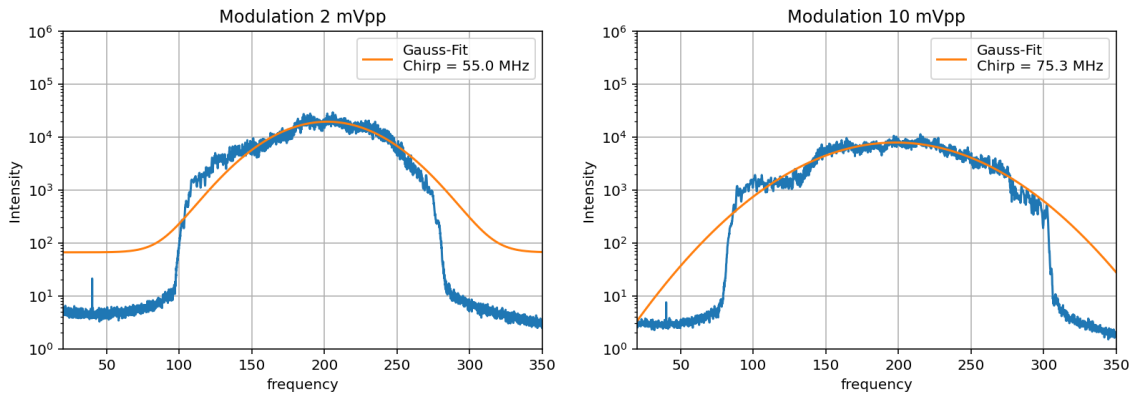


Abbildung 71: Erste Ergebnisse der Chirpaufprägung.

AP 3.4.31_2 Auswertung und Iteration EDFA Design

Die Ergebnisse aus AP 3.4.28_2 zeigen noch ein Amplitudenabfall von 5 %. Dies lässt sich technisch mit der Schaltmethode nicht erklären. Es sind keine Relaxationseffekte bekannt, wodurch der zeitliche Abfall des Signals erklärbar ist. Allerdings kann es auch an der Messmethode liegen. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden Untersuchungen an einigen Photodioden durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Photodioden mit signifikant weniger optischer Leistung angesteuert werden müssen, als das Datenblatt vermuten lässt. In Abbildung 72 ist das Mess-Signal an der Photodiode mit geringerer optischer Leistung zu sehen. Bei Verdoppelung der optischen Leistung ist ein Leistungsabfall zu beobachten. Dies muss ein Messfehler sein, da dies beim optischen Signal ausgeschlossen ist. Die Gegenprobe mit einem Neutraldichtefilter bestätigt es. Das bedeutet, dass die vermeintlich gemessene Amplitudenstabilität deutlich geringer ist, als anfänglich gemessen.

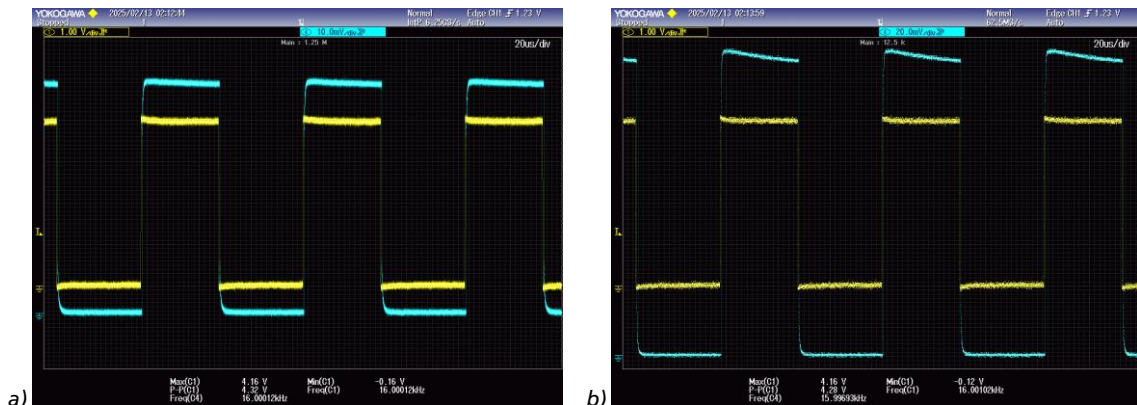


Abbildung 72: Photodioden-Signal (blau) für a) geringe optische Leistung b) doppelte optische Leistung; Gelb: elektrisches Ansteuerungssignal.

Weiterhin ist die Anstiegsflanke vom Pulszug mit einem Zeitverhalten versehen der ebenfalls nicht real ist. Die Photodiode hat eine Datenblatt-Anstiegszeit von <20 ns, die gezeigten Anstiegszeiten sind, die aus der Ansteuerungselektronik kommen, welche hier bei der Messung nicht vermieden werden können. Der Rechteckpuls ist daher auch in der Anstiegsflanke besser als es die Messtechnik zeigt (Abbildung 73).



Abbildung 73: Photodiodesignal vom EDFA in Blau, EOM-Ansteuerungssignal in pink, AOM-Signal in Gelb.

Die Kombination aus Polarisationschaltung mit AOM und Charakterisierung mittels Photodioden mit deutlich abgeschwächter optischer Leistung führt zu dem EDFA mit knapp 0,5 % Amplitudenabfall bei 20 μ s Pulsdauer. Das Signal ist allerdings stärker verrauscht und wurde gemittelt. Der Amplitudenabfall wurde mit einem Linearen Fit ermittelt. Der Pulscontrast ist dynamisch nicht messbar. Er lässt sich auf >60 dB abschätzen und kaskadiert auf >100 dB. Dies ist MS3-relevant.

AP 3.4.32_2 Erforschung verbesserter EDFA

Der EDFA zeigt über längere Zeit gemessen Amplitudenschwankungen, die untersucht werden. Der verwendete elektrooptische Modulator (EOM) ist stark temperaturempfindlich: Sowohl die Brechungsindizes des Kristalls als auch der elektrooptische Koeffizient sind temperaturabhängig, sodass die vom EOM erzeugte Phasenverzögerung und damit der Polarisationszustand bereits bei kleinen Temperaturänderungen driftet. Zur Reduktion dieser Effekte wurde eine Temperaturregelung integriert. Sie regelt, erreicht jedoch nur eine Stabilität im Bereich <0,1 K und ist damit für die erforderliche Polarisationskonstanz nicht ausreichend. Die verbleibenden Temperaturschwankungen bewirken über den thermo-optischen Koeffizienten ($dn/dT \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) sowie die temperaturabhängige Halbwellenspannung $V_{\pi}(T)$ eine zeitlich variierende Eigenverzögerung des EOM. In der Folge wird die Polarisation am Ausgang nicht stabil gehalten. Hinter einem nachgeschalteten Polarisator äußert sich dies als deutlich sichtbare Leistungsschwankungen und limitiert die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Aufbaus. Abbildung 74 zeigt das Fehlersignal der Temperaturregelung zusammen mit der optischen Leistung hinter dem Polarisator; die Korrelation (zeitlich leicht asynchron) beider Spuren verdeutlicht, dass bereits kleine Regelabweichungen unmittelbar zu Polarisations- und damit Leistungsschwankungen führen.

Als Alternative wäre eine direkte Regelung der EOM-Spannung denkbar: Über das Fehlersignal hinter dem Polarisator könnte die DC-Vorspannung bzw. die RF-Amplitude nachgeführt werden, um die temperaturbedingte V_{π} -Drift zu kompensieren und die gewünschte Polarisation konstant zu halten. Dieser Ansatz erfordert jedoch zusätzliche Hardware, Kalibration und Bandbreitenoptimierung und sind im verfügbaren zeitlichen Budget des Projekts nicht mehr umsetzbar.

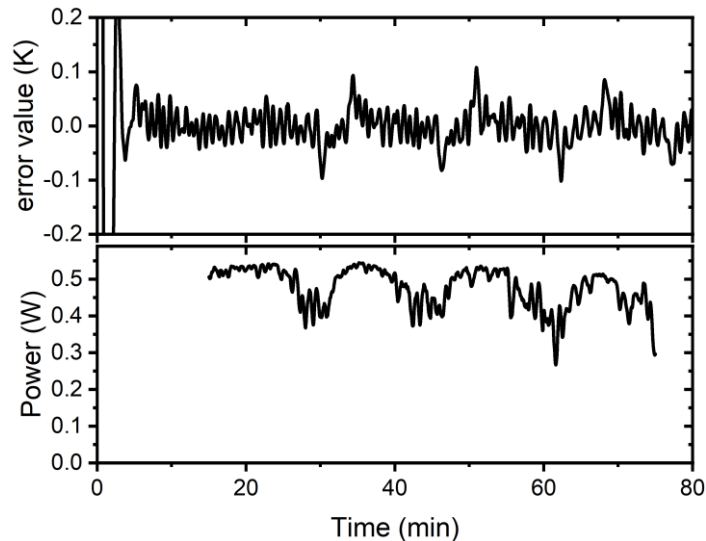


Abbildung 74: Fehlersignal (Temperaturunterschied zwischen IST- und SOLL-Größe) und resultierende Leistung nach dem Polarisationsanalysator.

AP 3.4.33_2 Erforschung der Grenzen der Verstärkerkonzepte für DOFS

Das Arbeitspaket zur Auslotung der Grenzen des entwickelten EDFA-Systems außerhalb der avisierten Systemparameter (u. a. Skalierung von Pulszugdauern sowie Spitzen- und Durchschnittsleistungen) konnte im Projektzeitraum nicht abgeschlossen werden, da die Systemstabilität nicht ausreichend war, um belastbare Messdaten zu gewinnen. Ursache hierfür war eine temperaturbedingte Polarisationsdrift im EOM, die trotz integrierter Temperaturregelung ($< 0,1$ K) zu sichtbaren Leistungsschwankungen hinter dem Polarisator führte. Alternative Regelansätze wie eine Kompensation der V_{π} -Drift wären zwar prinzipiell möglich gewesen, ließen sich aber im verbleibenden Zeitbudget nicht mehr implementieren. Parallel ergaben sich terminliche Verschiebungen in der gemeinsamen Bewertung mit dem Projektpartner, wodurch die Priorisierung der für DFOS relevanten Parameter nicht im geplanten Zeitfenster erfolgen konnte. Um die Projektmeilensteine zu sichern und verwertbare Ergebnisse zu liefern, wurden die Ressourcen konsequent in die Stabilisierung und Reproduzierbarkeit der Kernfunktionalität anderer Arbeitspakete umgelenkt. Eine belastbare Nutzenbewertung erweiterter Parameter für das Gesamtsystem ist erst nach Abschluss der Stabilisierung sinnvoll. Mögliche Arbeiten sollte daher in eine Folgephase nach dem Projekt überführt und dort priorisiert fortgeführt werden.

IB 4 – Software & Data Analysis

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Themenkomplex.

IB 5 – Omnifunktionale Systemintegration

Vorgegebene Ziele:

- Aufbau und Funktionstest Prototyp lightengine
- Erprobung Quantenquelle an offener Mikroskopieplattform
- Holistische Optimierung und Anwendungstest
- Reproduktionsuntersuchungen ESM und AR HC Faser

Entwicklungsfeld 1: Systementwicklung Demonstrator 1 – Navigierende, bildgebende, pathologische Sonde

AP 5.1.34_2 Aufbau und Funktionstest Prototyp lightengine

Dieses Arbeitspaket wurde hauptsächlich von unserem Verbundpartner QOJ durchgeführt, während wir dessen Team mit unserer Erfahrung in Design, Implementierung, Optimierung und Charakterisierung von Photonenpaarquellen unterstützt haben. Die Lichtquelle ist in Abb. 75 dargestellt: Die Pumpe ist ein CW, fasergegekoppelter 640 nm Dioden-gepumpter Festkörperlaser unseres Verbundpartners Lasos. Dieser Pumpstrahl erzeugt breitbandige spontane parametrische Abwärtskonversion (SPDC)-Photonen im nichtlinearen Kristall (NLC). Die Signalphotonen werden kollimiert und zur Detektion geleitet, während die Idlerphotonen in das Mikroskop geführt werden. In der Detektion wird eine Iris zur Postselektion und für die Faserkopplung verwendet. Entsprechend der spektralen Charakterisierung des NLC liegen die detektierten Photonen nahe der maximalen Effizienz der Si-basierten Lawinendioden-Photodetektoren (Si-APDs); sie sind bei 791 ± 5 nm zentriert (c), während die nicht detektierten Photonen bei 3350 ± 50 nm zentriert sind (b). Daher erfüllt die Lichtquelle die spektralen Anforderungen für eine effiziente Abbildung von Lipiden. Die hohe fasergekoppelte Helligkeit der Quelle ($>2,3\times 10^7$ Counts/s bei maximaler Pumpleistung) ermöglicht Integrationszeiten in der Größenordnung von einigen hundert Millisekunden, was für eine zuverlässige Bildgebung in der Raster-Scanning-Mikroskopie ausreichend ist.

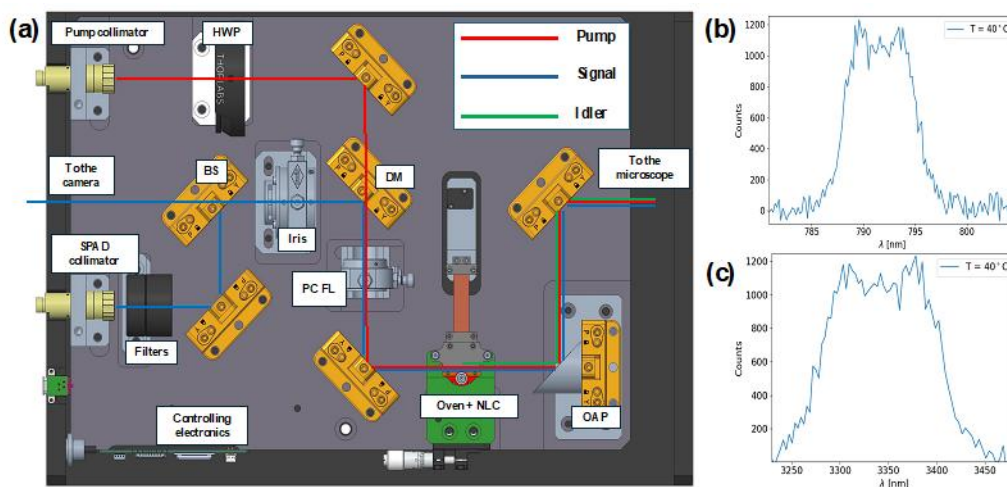


Abbildung 75: (a) Das mechanische Design des Quanten-Lichtmoduls. (b) Die gemessenen Signal-Emissionsspektren. (c) Die aus den Signal-Emissionsspektren und der Energieerhaltung abgeleiteten Idler-Emissionsspektren.

AP 5.1.35_2 Erprobung Quantenquellen an offener Mikroskopieplattform

Die Fähigkeiten des nichtlinearen Interferometers wurden auf dem Steckbrett in einer Rastermikroskopiekonfiguration weiter getestet. Der Aufbau ist in Abbildung 75 dargestellt: Das entwickelte nichtlineare Interferometer ist nicht auf räumliche Korrelationen des Photonenpaares angewiesen, um das Objekt auf dem Idler-Pfad abzubilden, weder auf Impulskorrelationen noch auf Positionskorrelationen. Im Idler-Pfad wird das Objekt mit dem Bild der Kristallebene beleuchtet, eine Methode, die typischerweise in Positionskorrelationsschemata verwendet wird. In den Signal- und Pumpstrahlwegen sind die Linsen, wie bei Impulskorrelationsverfahren üblich, in einer Brennweite vom Kristallzentrum positioniert. Die Kristalllänge und die Pumpstauweite wurden so gewählt, dass schwache räumliche Korrelationen gewährleistet sind. Der Schlüssel zur Eliminierung der Abhängigkeit von räumlichen Korrelationen ist das punktwise Detektionsschema, bei dem ein Einzelpixel-Detektor einen Grauwert für jeden rastergescanneten Punkt des Objekts aufzeichnet und so räumliche Korrelationen durch technische Mittel effektiv erzwingt. Durch die Eliminierung des Effekts räumlicher Korrelationen wird die Leistung des optischen Abbildungssystems nur durch seine klassischen Grenzen eingeschränkt, nämlich die Beugungsgrenze.

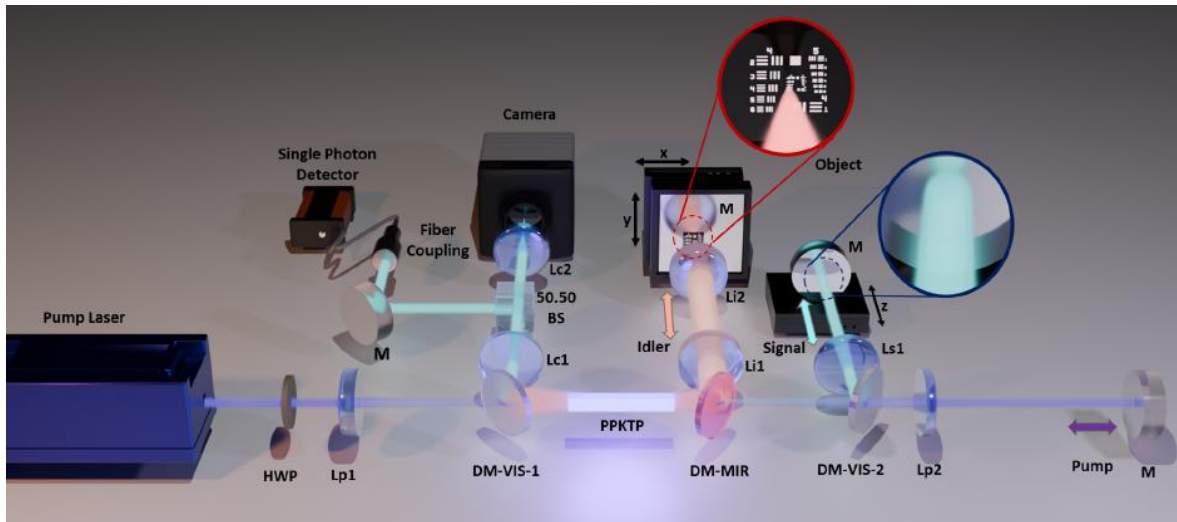


Abbildung 75: Versuchsaufbau für MIR-Rastermikroskopie über QIUL.

Zunächst wurde nun die Systemauflösung charakterisiert. Dazu wurde eine Messung mit einer Messkante durchgeführt, um die Edge Spread Function (ESF) des Systems zu schätzen. Abbildung 76 zeigt das Rohbild der Messkante, das durch Verschieben einer Rasierklinge entlang der horizontalen Achse der Fokusebene für den Idler-Strahl bei $2,4 \mu\text{m}$ erhalten wurde. Das Rohbild wird durch Messung der Signalphotonen bei 487 nm rekonstruiert. Die aufgezeichneten Daten wurden aus der weißen gestrichelten Linie entnommen. Eine Fehlerfunktion wurde an die Daten angepasst, um die Breite zu schätzen, für die die ESF von etwa 24 % auf 76 % des Maximalwerts abfällt, was einer Messung des Strahlradius bei $1/e$ entspricht. Die Messung mit der Messkante ergibt einen Wert von $16,70 \pm 3 \mu\text{m}$, der durch Mittelung aller Linien des Rohbilds oben in Abbildung 76 ermittelt wurde. Durch den Vergleich der Werte mit Weitfeldansätzen wurde festgestellt, dass der entwickelte Scan-Ansatz die besten Ergebnisse liefert. Der Einfluss räumlicher Korrelationen auf die Bildgebungsleistung wird effektiv eliminiert, da simulierte Werte für die Weitfeldmikroskopie unter Verwendung von Positions- oder Impulskorrelationen des Photonenpaares Werte von $174 \mu\text{m}$ bzw. $506 \mu\text{m}$ ergeben würden.

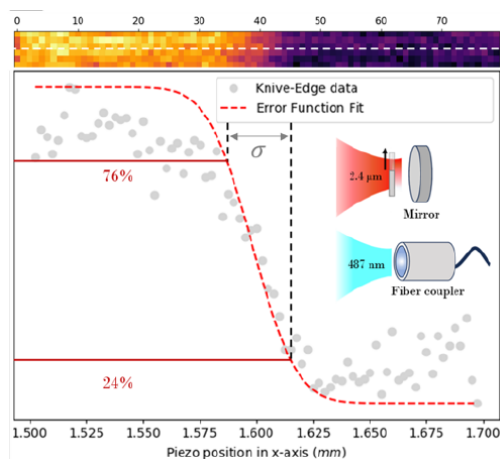


Abbildung 76: Experimentelle Charakterisierung der Auflösung eines Rastermikroskops mittels Messung mit einer scharfen Kante.

Des Weiteren wurde die Auflösung des entwickelten Rastermikroskops getestet, indem die Faltung der Objekttransmission (USAF-Auflösungsmuster) und die Punktstreufunction des Systems simuliert wurde. Diese Simulation wurde mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und zeigte eine hervorragende Übereinstimmung (Abbildung 77).

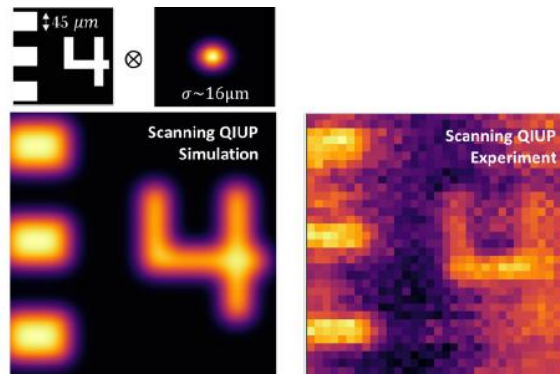


Abbildung 77: Simulierte Punktverteilungsfunktion, gefaltet mit theoretischem Zielübertragungsprofil (links), verglichen mit experimentellen Ergebnissen (rechts).

AP 5.1.36_2 Holistische Optimierung und Anwendungstest

Anhand der für biomedizinische Szenarien verwendeten Proben wurden die Fähigkeiten des rastermikroskopischen Systems getestet (Abbildung 78). Zu diesem Zweck wurden Pollenproben von *Oenothera speciosa*, die sich durch ihre dreieckige Form auszeichnen, und eine Gruppe von Fibroblastenzellen gemessen. In Abbildung 78 (d) und (e) sind die rekonstruierten Bilder der Pollenproben zu sehen, wobei ihre dreieckige Morphologie und der Nukleolus der Pollenstruktur erkennbar sind. Zusätzlich zeigt Abbildung 78 (f) das Bild des Fibroblasten-Zellclusters, der von einem weiß gestrichelten Rechteck umgeben ist, das den durch rot gestrichelte Kreise hervorgehobenen Bereichen entspricht.

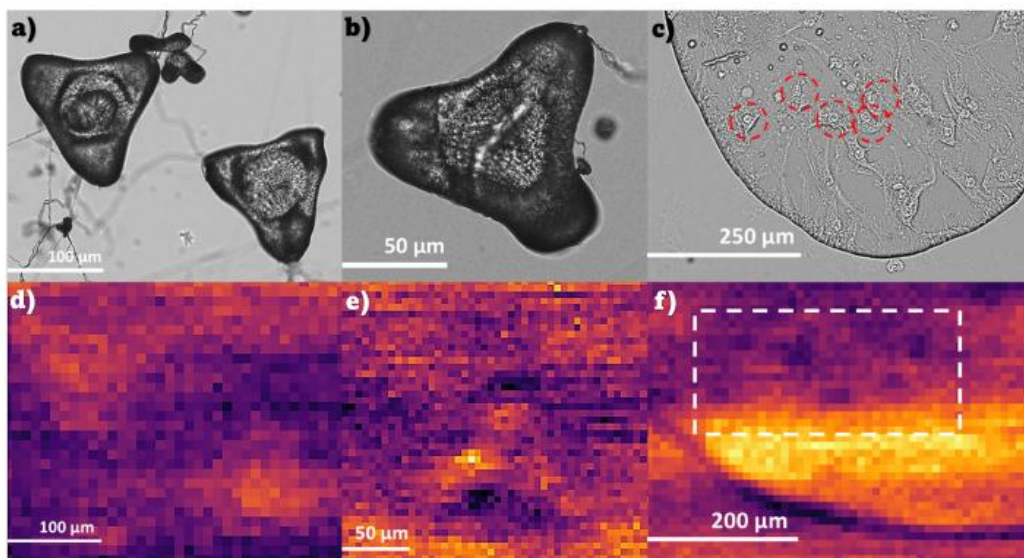


Abbildung 78: (a-c) Weißlichtmikroskopaufnahmen von Pollenproben von *Oenothera speciosa* und einer Gruppe von Fibroblastenzellen. (d-f) Entsprechende Bilder, die mit dem Scanverfahren aufgenommen wurden. In (d) und (e) sind die charakteristische dreieckige Form und die Kernstruktur erkennbar. In (f) entsprechen die dunklen Flecken innerhalb des weiß gestrichelten Rechtecks den Zellkernen, die auf der Weißlichtmikroskopaufnahme mit rot gestrichelten Kreisen markiert sind.

Nach den ersten Anwendungstests des entwickelten Setups, eine ganzheitliche Optimierung durchgeführt war, um die Bildausbeute zu verbessern. Wir verwendeten einen motorisierten Translations-schlitten für den Probenhalter, der die Aufnahme von Bildern in verschiedenen axialen Positionen ermöglichte und dadurch erlaubte, die korrekte Positionierung der Probe anhand des optimalen Ergebnisses zu bestimmen. Die Resultate nach der Optimierung sind in Abb. 79. dargestellt. Wir führten MIR-Quantenmikroskopie an einer Flügelprobe einer Fliege durch und finden eine gute Übereinstimmung mit dem entsprechenden klassischen Weißlichtbild.

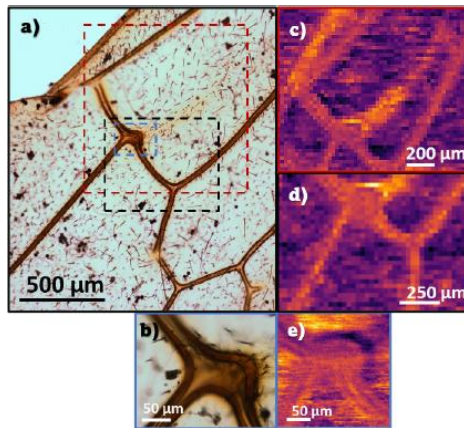


Abbildung 79: Bild einer Flügelprobe einer Fliege. (a) Weißlicht-Mikroskopbild der Aderstruktur mit farbigen gestrichelten Kästchen, die interessante Bereiche markieren. (b) Vergrößertes Bild des zentralen Aderkreuzungspunkts. (c-d) Rekonstruierte Bilder, die mit unserem Scan-Ansatz in verschiedenen Bereichen der Probe gewonnen wurden. (e) Rekonstruiertes Bild des in (b) markierten Bereichs.

AP 5.1.38_2 Reproduktionsuntersuchungen ESM und AR HC Faser

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die reproduzierende Herstellung von ESM- und AR HC-Fasern erfolgreich durchgeführt. Die Fasern aus AP 1.3.10_2 wurden auf zwei unterschiedlichen Wegen reproduziert: Zum einen wurde ein weiterer Cane aus derselben Preform zu einer Faser mit identischer Geometrie verzogen, zum anderen erfolgte der Aufbau eines neuen Stacks. Dieser Prozess begann bei der Herstellung der benötigten Glasstäbe und -rohre, deren Stapelung und dem anschließenden Verziehen zu Canes, aus denen schließlich die eigentlichen Fasern gezogen wurden. Die einzelnen Elemente wurden gefertigt, Canes hergestellt und Fasern erfolgreich produziert. Während der Herstellung kam ein Lichtmikroskop zum Einsatz, dessen Auflösung Veränderungen in der Geometrie unterhalb von 100 nm nicht erfassen konnte. Simulationen zeigten jedoch, dass bereits geringfügige strukturelle Änderungen die Dispersion und somit die Position der Signal- bzw. Idlerwellenlänge signifikant beeinflussen können. Beispielsweise führte eine Pitch-Änderung von nur 10 nm zu einer spektralen Verschiebung von 6 bzw. 18 nm.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die reproduzierende Herstellung zwar technisch möglich ist, jedoch kleinste Abweichungen im Herstellungsprozess einen deutlichen Einfluss auf die optischen Eigenschaften der Fasern haben. Die Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig eine präzise Kontrolle der Prozessparameter ist, um reproduzierbare und zuverlässige Faserstrukturen zu gewährleisten.

AR-HCF

Es wurden zwei Reproduktionsversuche in Bezug auf das in AP 1.3.11_2 gezeigte AR-HCF durchgeführt. Zunächst wurde die Faser aus dem Rohr gezogen, das in AP 1.2.7_2 hergestellt wurde, d. h. es handelte sich um dieselbe Faser wie in AP 1.3.11_2 (siehe Abbildung 80 (Mitte)). Anschließend wurde ein neuer Stapel hergestellt, und wir versuchten, dieselbe Faser wie in AP 1.3.11_2 zu reproduzieren (siehe Abbildung 80 (Links)).

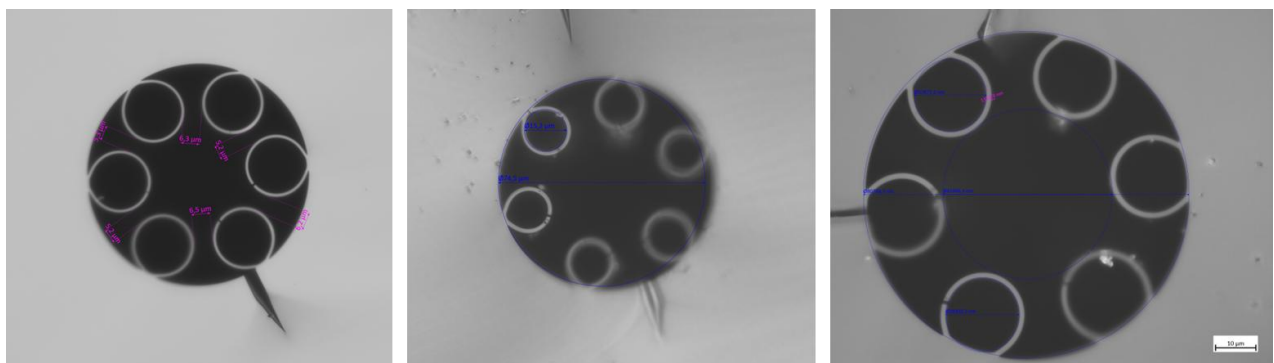


Abbildung 80: (Links) F Faser, vorgestellt in AP 1.3.11_2, (Mitte) eine weitere Faser aus demselben Stack, (Rechts) Faser aus dem neuen Stack

Es zeigte sich, dass die Reproduzierbarkeit der Faserparameter eine erhebliche Herausforderung darstellt – unabhängig davon, ob derselbe oder ein anderer Stapel verwendet wird. Das zentrale Problem liegt in der hohen Druckempfindlichkeit während des Faserziehens, die stark von der Ziehspannung und damit unmittelbar von der Ziehtemperatur abhängt.

Selbst bei identischen Temperatureinstellungen zeigte sich, dass die tatsächlich auftretende Spannung variierte, sobald ein neuer Ziehvorgang gestartet wurde. Als Hauptursache wird die Öffnungsapertur des Ofens vermutet. Diese lässt sich nur schwer jedes Mal exakt reproduzieren, beeinflusst jedoch maßgeblich das Temperaturprofil im Ofen und damit die resultierende Ziehspannung.

In der Folge entstehen trotz gleicher nominaler Ziehparameter Fasern mit unterschiedlichen Wandstärken sowie variierenden Abständen zwischen den Ringen.

Entwicklungsfeld 2: Systementwicklung Demonstrator 2 – Omnifunktionales, selbstlernendes Fasersensorsystem für die digitale Baustelle

AP 5.2.39_2 Beiträge zur Implementierung von Spezialfasern und Erforschung der Grenzen omnifunktionaler Messsysteme

IB 1 – Optische Fasertechnologie und IB 2 – Streuungsbasierte Messtechnik

Optische Fasern (Multikernfaser) bzw. Preformen wurden an FBGS übergeben und in den Demonstrator zum shape Sensing / Multi-modale navigierende Bildsonde integriert.

Fasern mit spezieller Dotierung zur Unterscheidung von Temperatur und Spannung wurden an Luna und Adtran übergeben, wo ein Nachweis der verbesserten Unterscheidung gemacht wurde. Im Demonstrator wurden diese Fasern des IOF nicht eingesetzt, aber äquivalente Versionen des Leibniz IPHT.

IB 3 – Quanten-und Lasertechnologie

Wir haben erfolgreich SPDC-Quellen im MIR sowie ein Quantenmikroskop basierend auf dem Prinzip des nicht-detektierten Lichts entworfen, entwickelt und charakterisiert.

IB 4 – Software & Data Analysis

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Themenkomplex.

IB 5 – Omnifunktionale Systemintegration.

Das Teilprojekt befasst sich nicht mit diesem Themenkomplex, jedoch wurden für die Demonstratoren D1 und D2 Lösungen auf Komponenten- und Systemlevel übergeben.

2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bitte beachten Sie hierzu den ausführlichen zahlenmäßigen Sachbericht des Fraunhofer IOF, der durch die Fraunhofer Zentralverwaltung zur Verfügung gestellt wird. Wissenschaftlich/technische sind folgende Anfangsinvestitionen im Projekt getätigt und wie folgt verwendet worden:

- Frequenzverdoppelter Titan-Saphir-Laser geringer Bandbreite: Dieses Lasersystem zeichnet sich durch eine außergewöhnlich hohe Schmalbandigkeit, ein hohes Leistungsniveau, Stabilität und eine Wellenlängenverstimbarkeit aus. Durch diese einzigartige Kombination konnten die wissenschaftlichen Untersuchungen im QUANTIFISENS-Projekt auf ein neues Niveau gehoben werden. Insbesondere wurde

die Grundlage geschaffen, neuartige Modifikationen der Quantenbildgebung mit nichtlinearen Interferometern experimentell zu adressieren. Diese Investition hat maßgeblich zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn beigetragen.

- Random Bit Sequencer und Coherent Receiver: Beide Geräte waren essentiell für die hochpräzise Signalgenerierung und die kohärente Auswertung von Lasersignalen. Sie ermöglichen eine extrem hohe Wiederholrate und Detektionsgenauigkeit, wodurch anspruchsvolle Verfahren wie Korrelations-OTDR und akustische Sensorik in Fasern auf einem herausragenden wissenschaftlichen Niveau getestet werden konnten. Insbesondere in Kombination mit den im Projekt entwickelten Komponenten (Fasern, Verstärker) ließ sich so die Leistungsfähigkeit der neuen Technologien im Labor belegen.
- Hochtemperatur-Rohröfen bis 1700 °C: Der speziell angeschaffte Ofen kann zur Temperung von Glaspreformen und Fasern eingesetzt werden. Durch diese technische Infrastruktur kann die Materialentwicklung entscheidend vorangetrieben werden und die Basis für weiterführende Anwendungen geschaffen werden.

Mit diesen Investitionen wurden nicht nur zentrale wissenschaftliche Fragestellungen adressiert, sondern auch die nachhaltige wissenschaftlich-technische Basis für den Projekterfolg und Folgeprojekte geschaffen.

3. *Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit*

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Aktivitäten im Bereich der Faser- und Quantentechnologien erforderten eine komplexe Infrastruktur sowie den Einsatz ausgewiesener Fachkräfte mit besonderer Expertise. Der hohe wissenschaftliche und technische Anspruch, der sich aus den Aufgabenstellungen ergab, machte eine umfassende und tiefgehende Bearbeitung der Forschungs- und Entwicklungsinhalte notwendig. Die Bewältigung der identifizierten Herausforderungen war mit erheblichen personellen und technischen Aufwänden verbunden, die über die reguläre Grundfinanzierung der Fraunhofer-Gesellschaft hinausgingen.

Um die anspruchsvollen Forschungsziele unter Berücksichtigung der damit verbundenen wissenschaftlich-technischen Risiken erfolgreich umzusetzen und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im internationalen Umfeld zu stärken, war eine staatliche Förderung unerlässlich. Nur durch diese Unterstützung war es möglich, die Entwicklung neuartiger, quanteninspirierter und omnifunktionaler Fasersensorsysteme voranzutreiben und die Verwertung innovativer Ansätze für deutsche Unternehmen zu sichern.

Im Bereich der quantenoptischen Bildgebung wurden spezifische Risiken deutlich, insbesondere hinsichtlich der Erreichung der gewünschten Kombination aus Spektralbereich und Photonenpaarrate sowie der angestrebten Auflösung des bildgebenden Systems. Die Projektdurchführung hat gezeigt, dass diese Herausforderungen adressiert und die wissenschaftlichen Ziele konsequent verfolgt wurden.

Gegenüber der ursprünglichen Planung wurde die Bearbeitungszeit des Teilvorhabens um fünf Monate verlängert. Ursache hierfür war die verspätete Verabschiedung des Bundeshaushalts 2022, die zu einer verzögerten Bewilligung der Fördermittel für die beteiligten Industriepartner führte und eine Laufzeitangleichung erforderlich machte. Die Laufzeitverlängerung diente damit der vollständigen Umsetzung der geplanten Arbeitsinhalte sowie der Erreichung der definierten Projektziele unter Berücksichtigung der veränderten Rahmenbedingungen.

4. *Verwertbarkeit des Ergebnisses und Fortschreibung des Verwertungsplans*

Für das Fraunhofer IOF Jena als Forschungsinstitut ergab sich mit dem Projekt die Möglichkeit, sein Produkt- und Forschungsportfolio zu erweitern. Die Projektergebnisse werden nicht direkt am Markt durch das IOF verwertet, wohl doch im Forschungsmarkt. Durch die Vorstellung auf internationalen Messen und Tagungen werden die erreichten fasersensorischen Lösungen das Bild des Fraunhofer IOF international als Partner für anwendungsbezogene Forschung gegenüber industriellen Partnern befördern. Durch die Teilnahme an internationalen Konferenzen werden die neuen Entwicklungen und erreichten Ergebnisse zudem der wissenschaftlichen Community bekannt gemacht.

Mit Gewinnung attraktiver Industriepartner und Forschungseinrichtungen wird zukünftig die wissenschaftliche Weiterführung und wirtschaftliche Anwendung der grundlegenden Forschungsergebnisse in nationalen und internationalen Projekten zur Komponenten- und Systemherstellung erwartet: Zum aktuellen Zeitpunkt führt das Fraunhofer IOF Jena zusammen mit deutschen Industriepartnern sowie dänischen Industrie und Forschungspartnern u.a. ein Forschungsprojekt für die erweiterte Anwendung der Fasersensorik in quantenbasierter Bildgebung durch (Eureka-Call „Applied Quantum Technologies“¹). Entsprechend diesem Beispiel wird das Fraunhofer IOF die gewonnenen Kenntnisse und vertieften Kompetenzen weiterhin zur Stärkung des Wissenschafts- und Wirtschaftsstandorts Deutschlands einsetzen. Die Erkenntnisse fließen zudem in die Ausbildung von Studenten und Graduierten innerhalb der Ausbildung an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena ein.

¹ <https://www.quantensysteme.info/projektatlas/projekte/q/qmic>

5. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Zeitraum des Projektes sind eine große Menge Erkenntnisse aus weltweiter Forschung bekannt geworden. Das Gebiet der Fasersensorik insbesondere auch quantenbasierte Messtechnik, verteilter akustischer Sensorik und 3D Lagesensorik in Fasern ist vital und weitläufig. Folgende kurz ausgewählte Übersichtsartikel der letzten Zeit unterstützen diese Aussage.

- Zuo, Xiaojie, Zhangguan Tang, Boyao Li, Xiaoyong Chen, and Jinghua Sun. 2025. "Quantum-Empowered Fiber Sensing Metrology" *Photonics* 12, no. 8: 763.
- T. Li *et al.*, "Recent Progress in Fiber-Optic Acoustic Sensor and Its Applications: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 16, pp. 25249-25260, 15 Aug.15, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3422186
- Angeliki Xenaki, Peter Gerstoft, Ethan Williams, Shima Abadi; Overview of distributed acoustic sensing: Theory and ocean applications. *J. Acoust. Soc. Am.* 1 July 2025; 158 (1): 801–825.
- Tian, Y., Dang, H., Liu, W., Cui, J., Li, Y. and Tan, J., 2023. Structure shape measurement method based on an optical fiber shape sensor. *Measurement Science and Technology*, 34(8), p.085102.

Dennoch haben diese Ergebnisse aktuell keine direkte Auswirkung auf die geplante Verwertung der industriellen Partner.

6. Veröffentlichungen und Präsentation der Ergebnisse

Das Fraunhofer IOF beteiligte sich an verschiedenen Workshop-Formaten der RUBIN-Initiative QUANTIFISENS z.B. auf den internationalen Messen SPIE Photonics West und LASER World of Photonics durch direkte Teilnahme sowie auch online. Die Ergebnisse wurden in eigenen Sessions präsentiert und mit der wissenschaftlichen Community diskutiert.

Folgende Vorträge, Publikationen und Tagungsbeiträge wurden im Rahmen des Projekts veröffentlicht:

- Patrick Hendra, Josué R. León-Torres, Valerio Flavio Gili, and Markus Gräfe, "Rubidium-doped KTiOPO₄ waveguides as a dual-type photon-pair source," *J. Opt. Soc. Am. B* **42**, 1976-1981 (2025).
- Josué R. León-Torres, Vasile-Laurențiu Dosan, Marija M. Ćurčić, Alek Lagarrigue, Frank Setzpfandt, Markus Gräfe, Valerio Flavio Gili "Mid-Infrared Quantum Scanning Microscopy via Visible Light Beyond Spatial Correlations." *Laser & Photonics Reviews* (2025): e02356.
- Josué R. León-Torres, Patrick Hendra, Yugant Mukeshbhai Hadiyal, Christopher Spiess, Fabian Steinlechner, Frank Setzpfandt, Markus Gräfe, Valerio Flavio Gili, "Noise resilient real-time phase imaging via undetected light", arXiv:2512.24993v1 [physics.optics] (2025).
- V. Dosan, A. Lagarrigue, J. R. L. Torres, A. S. Perna, D. Zalvidea, M. Gräfe, V. F. Gili, and O. de Vries, "A ready-to-use compact light engine for quantum microscopy," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe 2025) and European Quantum Electronics Conference (EQEC 2025), Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2025), paper cd_p_29.

Durchgeführte öffentliche Workshops im Rahmen des QUANTIFISENS-Projekts

- Workshop: LASER World of Photonics / World of Quantum, München, 2025
 - Im Rahmen der internationalen Messe wurde die QUANTIFISENS-Allianz vorgestellt.
 - Präsentation der Demonstratoren
 - Fachvorträge:
 - Eric Lindner (FBGS Technologies GmbH): Medizinische Bildgebung – Navigation pathologischer Faserproben.

- Bernhard Messerschmidt (GRINTECH GmbH): Infrastrukturmonitoring – Multifunktionales, selbstlernendes Fasersensorsystem für digitales Monitoring.
- Ali Allousch (Adtran): Vorstellung innovativer Lösungen im Bereich Fasersensorik.
- Workshop: W3+ Fair, Jena, 25./26. September 2024
 - Die QUANTIFISENS-Allianz war auf der W3+ Fair 2024 vertreten. Das QUANTIFISENS-Projekt präsentierte sich während der gesamten Messedauer mit einem eigenen Stand (Standnummer C15b). Es wurden aktuelle Entwicklungen und Demonstratoren des Projekts vorgestellt.
- Workshop: 1. öffentlicher QUANTIFISENS-Projektworkshop auf der W3+ Fair, Jena, 27. Oktober 2023
 - Der erste öffentliche Workshop des QUANTIFISENS-Projekts fand im Rahmen der W3+ Fair in Jena statt. Im Fokus standen die Präsentation der Projektziele und ein Austausch mit der Fachcommunity.
- Ausstellung/Teilnahme an der COMPAMED 2024

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: PARAMETER DER IN ABBILDUNG (2) DARGESTELLTEN FASER.	22
TABELLE 2: RECHERCHIERTE MÖGLICHE FASERN FÜR DEN EDFA	47

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: GEOMETRIE SOGENANNTER ESM-FASER (A) UND DISPERSIONSKURVE (B): D: DISPERSION, ZDW: ZERO DISPERSION WELLENLÄNGE, NEFF: EFFEKTIVE INDIZES DER GRUNDMODE.	5
ABBILDUNG 2: DISPERSIONSKURVE EINER ESM-FASER FÜR DURCH FWM LICHTERZEUGUNG BEI 500-600 NM (A). PHASE ANPASSUNG MIT EINEM 800 NM LASER.	5
ABBILDUNG 3: SIMULATION VON FWM-ERZEUGUNG MIT EINER ESM MIT $\Lambda = 2,1$ UND $d/\Lambda = 0,8$. DIE ANGENOMMENE PULSDAUER WAR 20 PS, ENERGIE VON 10 NJ UND 1 M FASER.	6
ABBILDUNG 4: LINKS: AUSLEGUNG EINER HOHLKERN FASER (D_{core} = KERN-DURCHMESSER, D_{cap} = KAPILLAR-DURCHMESSER, t = KAPILLAR-WANDSTÄRKE, δ KAPILLAR-KAPILLAR ABSTAND).	6
ABBILDUNG 5: DISPERSIONSKURVE EINER AR HCF MIT $t \sim 0.5 \mu\text{m}$	7
ABBILDUNG 6: AMPLITUDENVERLAUF EINES RECHTECKIGEN EINGANGSPULSES MIT AUSGANGSLEISTUNGEN ENTSPRECHEND 1 W SPITZENLEISTUNG.	8
ABBILDUNG 7: ZEITLICHE VERSTÄRKERSÄTTIGUNG, VERGLEICH ZWISCHEN A) SIMULATION UND B) EXPERIMENT ZUR GENERIERUNG DES PARAMETERS SÄTTIGUNGSFLUENZ.	9
ABBILDUNG 8: ZEITLICHE PULSFORM A) VOR UND B) NACH VERSTÄRKUNG.	9
ABBILDUNG 9: FIKTIVE TEMPERATUR ALS FUNKTION DER ROHROFENTEMPERATUR.	10
ABBILDUNG 10: KONZENTRATIONSPROFILE DER PREFORM TYP 1 (LINKS) UND PREFORM TYP 2 (RECHTS).	10
ABBILDUNG 11: BERECHNETE OPTISCHE (OBEN) UND AKUSTISCHE BRECHZAHLPROFILE (UNTEN) FÜR DIE PREFORM TYP 1 (LINKS) UND PREFORM TYP 2 (RECHTS)	11
ABBILDUNG 12: SIMULIERTE BRILLOUINSPEKTREN FÜR PREFORM TYP 1 (LINKS) UND PREFORM TYP 2 (RECHTS); BRILLOUINSIGNALE AUS AKUSTISCHEN KERNMODEN IN BLAU, BRILLOUINSIGNAL AUS AKUSTISCHEN CLADDINGMODEN IN GRÜN	11
ABBILDUNG 13: SIMULIERTES BRILLOUINSPEKTRUM 2. ITERATION VERGLEICHEN MIT 1. ITERATION.	12
ABBILDUNG 14: VERGLEICH DER SKALIERTEN MITTELPUNKTABSTÄNDE DER FITELLIPSEN DES GESTRECKTEN CLADDINGMATERIALS MIT DEN KERN-KERN-ABSTÄNDEN IN DER REALISIERTEN FASER.	14
ABBILDUNG 15: ADDITIVE AUFGEBAUTE UND GESTRECKTE MC-PREFORM VOR DEM BEFÜLLEN DER LÖCHER MIT KERNMATERIAL (LINKS) UND MIKROSKOPIERUNG DER RESULTIERENDEN FASER.	15
ABBILDUNG 16: FOTO DER PREFORM MIT AUFGESCHLIFFENEN LÖCHERN VOR DEM ABSCHLEIFEN (LINKS) UND GEMESSENE LONGITUDINALE BRECHZAHLPROFILE DER FÜR DIE HERSTELLUNG DER KERNSTÄBE VERWENDETEN PREFORM (RECHTS).	16
ABBILDUNG 17: MIKROSKOPIERUNG DER FINALEN FASER (LINKS) UND GEMESSENES BRECHZAHLPROFIL (RECHTS).	16
ABBILDUNG 18: SCHEMATISCHER LAYOUTPLAN DER ESM-FASER, WOBEI DER JEWEILIGE DURCHMESSER DER ELEMENTE FARBLICH CODIERT IST (LINKS). DIE ROTEN ELEMENTE ENTSPRECHEN DABEI DEN KAPILLAREN UND DAS ZENTRALE HELLBLAUE ELEMENT IST EIN QUARZGLASSTAB MIT GLEICHEM DURCHMESSER. MIKROSKOPIERUNG EINER ERZIELTEN ZWISCHENFORM NACH VOLLSTÄNDIGEM VERSCHMELZEN DER ÄUßEREN OBERFLÄCHEN DER EINZELNEN ELEMENTE (RECHTS).	17
ABBILDUNG 19: QUERSCHNITT DER VORFORM OHNE UND MIT (5 MBAR) ÜBERDRUCK IN DEN KAPILLAREN WÄHREND DES CANEZUGS.	18
ABBILDUNG 20: VERGLEICH DER 1. ITERATION (IPHT1687) MIT 2. ITERATION (IOF567), GRENZE ZWISCHEN AL UND GE DOTIERTEM BEREICH MIT BLAUER LINIE MARKIERT, DIE RADIALE KOORDINATE IST AUF DEN KERNRADIUS NORMIERT.	18
ABBILDUNG 21: MIKROSKOPIERUNGEN IN GLEICHER SKALIERUNG VON RESULTIERENDEN FASERN BEI UNTERSCHIEDLICHER DRUCKBEAUFSCHLAGUNG DER IN DER ZWISCHENFORM VORHANDENEN LÖCHERN.	19
ABBILDUNG 22: ELEKTRONENMIKROSKOPIERUNGEN DER ENDEN EINER FASER (FWM_800_4) MIT MARGESCHNEIDERTER DISPERSION.	20
ABBILDUNG 23: ELEKTRONENMIKROSKOPIERUNGEN DER ENDFLÄCHEN EINER DURCH EINE GEZIELTE ERHÖHUNG DES DRUCKS IN DEN LUFTLÖCHERN, UM 10 MBAR IM VERGLEICH ZUR FASER FWM_800_4, REALISIERTEN FASER.	20
ABBILDUNG 24: MIT DEN AUS DEN REM-AUFNAHMEN EXTRAHIERTEN STRUKTURPARAMETERN BERECHNETE DISPERSIONSVERLÄUFE.	20
ABBILDUNG 25: MIKROSKOPIERUNGEN DES FÜR DEN FASERZUG VERWENDETEN CANES (LINKS) UND DARAUS RESULTIERENDE FASERN BEI UNTERSCHIEDLICHEN DRÜCKEN INNERHALB DER BEIDEN BEREICHE.	21
ABBILDUNG 26: MIKROSKOPIERUNG DES VERWENDETEN CANES (LINKS) UND DER BEIM FASERZUG ERZEUGTEN FASER (RECHTS). DIE URSPRÜNGLICH GLEICH GROßEN KAPILLAREN SIND HIERBEI AUFGRUND EINER AUFGETRETENEN LECKAGE INNERHALB DES DRUCKANSCHLUSSES UNTERSCHIEDLICH WEIT VERGRÖßERT.	21

ABBILDUNG 27: QUERSCHNITT DER (LINKS) CANE (DURCHMESSER = 4 MM) UND (RECHTS) HOHLKERNFASER (DURCHMESSER 300 μ M) MIT OPTIMALER GEOMETRIE.	22
ABBILDUNG 28: QUERSCHNITT DER HCF MIT DÜNNER STRUKTUR	23
ABBILDUNG 29: (LINKS) GEMESSENES BRECHZAHLPROFIL EINER KOMMERZIELLEN STANDARD-SINGLEMODEFASER. (RECHTS, OBEN) OPTISCHES BRECHZAHLPROFIL FÜR SIMULATION; (RECHTS, UNTEN) AKUSTISCHES BRECHZAHLPROFIL FÜR DIE SIMULATION, JEWEILS BERECHNET AUS DEN KONZENTRATIONEN	24
ABBILDUNG 30: A) LINEARES GEMESSENES (BLAU) SOWIE SIMULIERTES (SCHWARZ, ORANGE, GRÜN) BRILLOUIN-SPEKTRUM; B) LOGARITHMISCHES GEMESSENES (BLAU) SOWIE SIMULIERTES (SCHWARZ, ORANGE, GRÜN) BRILLOUIN-SPEKTRUM; DIE ORANGE KURVE ZEIGT JEWEILS DEN BEITRAG DER KERNMODEN UND DIE GRÜNE KURVE STELLT DEN BEITRAG DER CLADDINGMODEN DAR.	24
ABBILDUNG 31: MESSERGEBNISSE VON LUNA ZUR BRILLOUINFASER 1, (ROT) BRILLOUINFASER 1, (BLAU) REFERENZFASER IM MESSSYSTEM.	25
ABBILDUNG 32: MESSERGEBNISSE VON LUNA ZUR UNTERSCHIEDLICHEN TEMPERATURRESPONS DER BEI DEN PEAKS.	25
ABBILDUNG 33: (LINKS) BRILLOUIN-SPEKTREN DER PREFORM (SIMULIERT AUS PREFORMPROFIL) UND DER FASER (GEMESSEN); (RECHTS) BRECHZAHLPROFIL DER PREFORM (SKALIERT AUF FASERDIMENSION) UND DER FASERN	26
ABBILDUNG 34: AUFBAU ZUR CHARAKTERISIERUNG DER SÄTTIGUNGSFLUENZ (ISO: ISOLATOR, FUT: FIBER UNDER TEST, WDM: WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXER.	27
ABBILDUNG 35: ENDFLÄCHENBILDER AM SPLEIßGERÄT FÜR A) EXAL IXF-2C-EY-PM-12-130-0.10L1 UND B) COHERENT PM1550-XP.	27
ABBILDUNG 36: EXPERIMENTELLER AUFBAU ZUM UNTERSUCHEN VON FWM IN ESM FASER.	28
ABBILDUNG 37: AUSGANGSSPEKTREN DER LMA PM 5 FASER MIT VERSCHIEDENE PUMPWELLENLÄNGE ZWISCHEN 1.030 NM UND 1.050 NM.	29
ABBILDUNG 38: AUSGANGSSPEKTREN DER HERGESTELLTEN ESM FASER BEI VERSCHIEDENEN PUMP WELLENLÄNGE ZWISCHEN 1.030 NM UND 1.050 NM.	29
ABBILDUNG 39: (A) TRANSMISSIONSSPEKTRUM EINER HOHLKERNFASER IM WELLENLÄNGENBEREICH VON 900-1200 NM FÜR ZWEI FASERLÄNGEN, D.H. 2 M UND 98 M, UND (B) AUS (A) BERECHNETE DÄMPFUNG.	30
ABBILDUNG 40: AUFBAU DER FASERBASIERTEN MESSSTRECKE MIT LASER (DEVICE UNDER TEST), AOM (AKUSTO OPTISCHER MODULATOR) UND ABSCHWÄCHER („ATT.“ – ATTENUATOR).	30
ABBILDUNG 41: GEMESSENE SIGNALBREITE DER DFB-LASERDIODE, INTENSITÄT IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG, DIE FREQUENZ IN MHZ.	31
ABBILDUNG 42: SPEKTRALPROFIL DES SIGNALSTRAHLS FÜR EINEN QUASI-PHASENANPASSUNGSPROZESS, DER EINEN 2 MM LANGEN PPLN-KRISTALL PUMPT. DIE BANDBREITE DES SIGNALSTRAHLS IST RELATIV SCHMAL ($\Delta\lambda = 0,24$ NM) IM VERGLEICH ZU SEINEM ZWILLINGSPHOTON (IDLER, $\Delta\lambda = 14,22$ NM).	32
ABBILDUNG 43: SPEKTRALPROFIL DES LEERLAUFSTRAHLS FÜR EINEN QUASI-PHASENANPASSUNGSPROZESS, DER EINEN 2 MM LANGEN PPLN-KRISTALL PUMPT. DIE GESCHÄTZTE BANDBREITE FÜR DEN LEERLAUFSTRAHL BETRÄGT $\Delta\lambda = 14,22$ NM, WAS WESENTLICH KLEINER IST ALS DIE ERFORDERLICHE BANDBREITE ($\Delta\lambda \sim 100$ NM).	32
ABBILDUNG 44: SIGNALSTRAHL ZENTRIERT BEI 775,5 NM MIT EINER BANDBREITE VON 4,36 NM. EIN 2 MM LANGER PPLN-KRISTALL WIRD VON EINEM 632-NM-LASER GEPUMPT.	33
ABBILDUNG 45: LEERLAUFSTRAHL ZENTRIERT UM 3380 NM MIT EINER BANDBREITE VON 99,09 NM. EIN 2 MM LANGER PPLN-KRISTALL WIRD VON EINEM 632-NM-LASER GEPUMPT. DIE GRÖßERE BANDBREITE WIRD DURCH PUMPEN DES KRISTALLS MIT EINER LÄNGEREN PUMPWELLENLÄNGE ERREICHT.	33
ABBILDUNG 46: ELEKTRONIKAUFBAU.	34
ABBILDUNG 47: RESULTATE DER SIMULATION VON FWM IN AR HC FASERN.	35
ABBILDUNG 48: SPEKTRALE PEAKS DES IDLER-PHOTONS BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN. DIE TEMPERATUR REICHT VON 20°C BIS 220°C; ABGEDECKT WIRD EIN SPEKTRALBEREICH VON 400 NM, DER VON 3000 NM BIS 3400 NM REICHT.	36
ABBILDUNG 49: SPEKTRALE PEAKS DES SIGNALPHOTONS BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN. DIE TEMPERATUR REICHT VON 20°C BIS 220°C; ABGEDECKT WIRD EIN SPEKTRALBEREICH VON 8 NM, DER VON 460 NM BIS 468 NM REICHT.	37
ABBILDUNG 50: TRANSMISSIONSPROFIL DES PPKTP-KRISTALLS, HERGESTELLT VON RAICOL CRYSTALS. DIE TRANSMISSION FÜR DIE INTERESSANTEN WELLENLÄNGEN LIEGT ÜBER 65 %.	37
ABBILDUNG 51: TRANSMISSIONSPROFIL FÜR AGGAS2 (OBEN) UND LiGAS2 (UNTEN) FÜR DEN VIS- UND NIR-TEIL DES SPEKTRUMS. DIE PROFILE ZEIGEN EINE HOHE TRANSMISSION FÜR EINE PUMP- (633 NM) UND EINE SIGNALWELLENLÄNGE (CA. 800 NM).	38

ABBILDUNG 52: ZIELWELLENLÄNGEN FÜR AGGAS2, TYP-I-PHASENANPASSUNGSWECHSELWIRKUNG. DAS DIAGRAMM ZEIGT EINEN PHASENANPASSUNGSWINKEL VON 60°, DER DURCH PUMPEN MIT 0,638 MM EINE SIGNALWELLENLÄNGE UM 0,685 MM UND EINE IDLER-WELLENLÄNGE BEI 9 MM ERZEUGT.	39
ABBILDUNG 53: ZIELWELLENLÄNGEN FÜR LIGAS2, TYP-I-PHASENANPASSUNGSWECHSELWIRKUNG. DAS DIAGRAMM ZEIGT EINEN PHASENANPASSUNGSWINKEL VON 50°, DER DURCH PUMPEN MIT 0,638 MM EINE SIGNALWELLENLÄNGE UM 0,7 MM UND EINE IDLER-WELLENLÄNGE BEI 5 MM ERZEUGT.	39
ABBILDUNG 54: WINKELABHÄNGIGE EMISSIONSSPEKTREN VON IDLER-PHOTONEN (LINKS) UND SIGNALPHOTONEN (RECHTS) FÜR EINEN TYP-0-SPDC-PROZESS IN EINEM BEI 640 NM GEPUMPTEN PPLN-KRISTALL.....	40
ABBILDUNG 55: WINKELABHÄNGIGE EMISSIONSSPEKTREN VON IDLER-PHOTONEN (LINKS) UND SIGNALPHOTONEN (RECHTS) FÜR EINEN TYP-0-SPDC-PROZESS IN EINEM BEI 640 NM GEPUMPTEN APPLN-KRISTALL.....	40
ABBILDUNG 56: GEMESSENES EMISSIONSSPEKTRUM DES SIGNALPHOTONS.	41
ABBILDUNG 57: GEMESSENE LINEARE ABHÄNGIGKEIT DER ZENTRALEN WELLENLÄNGE DES SIGNALPHOTONS VON DER KRISTALLTEMPERATUR.	41
ABBILDUNG 58: SKIZZE DES NICHTLINEAREN INTERFEROMETERS FÜR DIE MIKROSKOPIE UNDETEKTIERTER PHOTONEN IM MIR.	42
ABBILDUNG 59: FT MATLAB-SIMULATIONEN, DIE DEN EINFLUSS DER MIKROSKOPOBJEKTIVGEOMETRIE AUF DIE SYSTEM-PSF AUFZEIGEN.	43
ABBILDUNG 60: ZEMAX-SIMULATIONEN DES SYSTEMS PSF. OBEN: EXAKTE GEOMETRIE EINES HANDELSÜBLICHEN OBJEKTIVS. UNTEN LINKS: PSF OHNE SPIDER-APERTUR. UNTEN RECHTS: PSF BEI VORHANDENSEIN EINER SPIDER-APERTUR.	44
ABBILDUNG 61: ZEMAX-SIMULATIONEN DES SYSTEMS PSF. OBEN: EXAKTE GEOMETRIE EINES HANDELSÜBLICHEN OBJEKTIVS. UNTEN LINKS: PSF OHNE SPIDER-APERTUR. UNTEN RECHTS: PSF BEI VORHANDENSEIN EINER SPIDER-APERTUR.	45
ABBILDUNG 62: SCANNING-MIR-MIKROSKOPIE MIT NICHT DETEKTIERTEN PHOTONEN – BREADBOARD-AUFBAU.....	45
ABBILDUNG 63: EINFACHER VERSTÄRKERAUFBAU; ISO – OPTISCHER ISOLATOR, ER-FASER – ERBIUM-DOTIERTE FASER, WDM - WELLENLÄNGENMULTIPLEXER	46
ABBILDUNG 64: ZEITLICHER VERLAUF DER PULSFORM AM A) EINGANG UND AM B) AUSGANG DES VERSTÄRKERS IM VERGLEICH MIT DER SIMULATION	46
ABBILDUNG 65: OPTISCHER AUFBAU DES POLARISATIONSGESCHALTETEN EDFA.....	47
ABBILDUNG 66: FOTO VOM OSZILLOSKOP MIT ANALYSIERTEN POLARISATIONSGESCHALTETEM SIGNAL (GRÜN) UND ELEKTRONISCHEM SIGNAL DES PULSGENERATORS (GELB).	47
ABBILDUNG 67: AUSGANGSLEISTUNG IN ABHÄNGIGKEIT ZUR PUMPLEISTUNG IM DAUERSTRICHBETRIEB.	48
ABBILDUNG 68: ANALYSE DER RELEVANTEN PULSPARAMETER.	48
ABBILDUNG 69: MODIFIZIERTER EDFA-AUFBAU, EIN MONOLITHISCHER POLARISATIONSSPLITTER UND AKUSTOOPTISCHER MODULATOR INTEGRIERT UND MIT EINER PHOTODIODE ANALYSIERT.....	49
ABBILDUNG 70: PULSZUG NACH DEM AOM (BLAU), MIT SYNCHRONISIERTEM EOM- UND AOM-SIGNAL, X-ACHSE IN NS, Y-ACHSE IST DIE PHOTODIODENSCHWÄRZE IN „ARB. UNIT“	49
ABBILDUNG 71: ERSTE ERGEBNISSE DER CHIRPAUFPRÄGUNG.	50
ABBILDUNG 72: PHOTODIODEN-SIGNAL (BLAU) FÜR A) GERINGE OPTISCHE LEISTUNG B) DOPPELTE OPTISCHE LEISTUNG; GELB: ELEKTRISCHES ANSTEUERUNGSSIGNAL.	50
ABBILDUNG 73: PHOTODIODENSIGNAL VOM EDFA IN BLAU, EOM-ANSTEUERUNGSSIGNAL IN PINK, AOM-SIGNAL IN GELB.....	51
ABBILDUNG 74: FEHLERSIGNAL (TEMPERATURUNTERSCHIED ZWISCHEN IST- UND SOLL-GRÖßE) UND RESULTIERENDE LEISTUNG NACH DEM POLARISATIONSANALYSATOR.....	52
ABBILDUNG 75: VERSUCHSAUFBAU FÜR MIR-RASTERMIKROSKOPIE ÜBER QIUL.	54
ABBILDUNG 76: EXPERIMENTELLE CHARAKTERISIERUNG DER AUFLÖSUNG EINES RASTERMIKROSKOPS MITTELS MESSUNG MIT EINER SCHARFEN KANTE.....	54
ABBILDUNG 77: SIMULIERTE PUNKTVERTEILUNGSFUNKTION, GEFALDET MIT THEORETISCHEM ZIELÜBERTRAGUNGSPROFIL (LINKS), VERGLEICHEN MIT EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSEN (RECHTS).....	55
ABBILDUNG 78: (A-C) WEIßLICHTMIKROSKOPIEAUFNAHMEN VON POLLENPROBEN VON OENOTHERA SPECIOSA UND EINER GRUPPE VON FIBROBLASTENZELLEN. (D-F) ENTSPRECHENDE BILDER, DIE MIT DEM SCANVERFAHREN AUFGENOMMEN WURDEN. IN (D) UND (E) SIND DIE CHARAKTERISTISCHE DREIECKIGE FORM UND DIE KERNSTRUKTUR ERKENNBAR. IN (F) ENTSPRECHEN DIE DUNKLEN FLECKEN INNERHALB DES WEIß GESTRICHELTEN RECHTECKS DEN ZELLKERNEN, DIE AUF DER WEIßLICHTMIKROSKOPIEAUFNAHME MIT ROT GESTRICHELTEN KREISEN MARKIERT SIND.	55