



# Institute of Applied Physics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

## Schlussbericht

zum Teilvorhaben

### **Ultrakurzpulsstrukturierung von optischen Fasern für externe Resonatoren für Quantenpunkt-Halbleiterverstärker**

im Verbundprojekt

### **Modengekoppelte Halbleiterlaser für die kohärente Kontrolle von Festkörper-Quantensystemen (MHLASQU)**



Zuwendungsempfänger: Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Physikalisch-Astronomische Fakultät  
Institut für Angewandte Physik

Förderkennzeichen: 13N16028

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2021 bis 31.10.2025

Teilprojektleiter: Prof. Dr. Stefan Nolte  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Institut für Angewandte Physik  
Albert-Einstein-Str. 15, 07745 Jena  
Tel.: +49 3641 947820  
Email: [stefan.nolte@uni-jena.de](mailto:stefan.nolte@uni-jena.de)

## 1. Zielsetzung und geplante Arbeiten

### 1.1. Zielsetzung

Im Verbundprojekt MHLASQU sollten modengekoppelte Halbleiterlaser für Festkörper-Quantensysteme entwickelt werden. Dabei war ein Ansatz die Realisierung von hybriden Lasersystemen: ein Verstärker auf einem Halbleiterchip, gekoppelt an eine Faser mit integriertem wellenlängenselektivem Spiegel, dem Resonatorendspiegel. Die dadurch mögliche Verlängerung des Resonators des Lasersystems sollten Repetitionsraten von deutlich unter 1 GHz ermöglichen.

Ziel dieses Teilvorhabens war es, Verfahren zur Strukturierung von Fasern mittels Ultrakurzpulslasern für die Realisierung dieser externen Resonatoren zu entwickeln. Die Reflektoren sollten mittels Faser-Bragg-Gittern (FBG), bestehend aus einer periodischen Brechzahlmodifikation im Faserkern, umgesetzt werden. Für die Ankopplung der Faser an den Halbleiterchip war die Verwendung von getaperten Fasern geplant. Dafür sollte das dazu notwendige Verfahren, verlustarme sowie spektral und dispersiv angepasste FBG in der getaperten Faser zu erzeugen, entwickelt werden.

Weiterhin sollte für eine verlustarme Ankopplung der Faser an den Halbleiterchip die Nanostrukturierung der Faserendfläche mittels Ultrakurzpulslaser untersucht werden. Damit sollten Fresnelreflexionen am Glas-Luft-Übergang reduziert, und die Effizienz des Systems erhöht werden.

### 1.2. Ausgangslage und geplante Arbeiten für die Faser-Bragg-Gitter

Die Erzeugung der FBG sollte auf der etablierten Phasenmaskentechnik unter der Verwendung von Ultrakurzpulslasern basieren. Dabei wird durch die Phasenmaske ein homogenes Zweistrahlinterferenzmuster erzeugt, welches durch nichtlineare Absorption als eine periodische Brechzahlmodifikation in der Faser eingeschrieben wird. Zu Beginn des Projekts war geplant, eine getaperte Faser zu verwenden, die zur Stabilisierung mit einer Glaskapillare, mit bis zu mm großen Außendurchmesser, umgeben ist. Demzufolge sollten die FBG in das fertige Faser-Mount-Compound eingeschrieben werden. Dabei könnten Inhomogenitäten im Material und an den Grenzflächen von Kapillare zu getapeter Faser einen kritischen negativen Einfluss auf erreichbare Stärke und Qualität der FBG haben. Unabhängig davon müssen die FBG spektral an die Eigenschaften des modengekoppelten Lasersystem angepasst sein, um eine Verlängerung der Pulsdauer zu vermeiden. Dazu waren folgende Arbeitspakete vorgesehen:

AP4 - FSU-1: Erzeugung von dispersiven Faser-Bragg-Gittern in getaperte Fasern

FSU-1.1: Untersuchung des Einschreibevorgangs in getaperte Fasern

FSU-1.2: Integration von speziellen Faserdesigns in getaperte Fasern

### 1.3. Ausgangslage und geplante Arbeiten für die Endflächenstrukturierung

Bei der Beleuchtung von Oberflächen mit Ultrakurzpulslasern können für bestimmte Parameterfenster Nanostrukturen entstehen, sogenannte LIPSS (laser-induced periodic surface structures). Diese Strukturen können Antireflexwirkung haben, wenn sie kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sind. Zu Beginn des Projektes wurde u.a. auf flachen Glassubstraten oder Chalcogenid-Fasern die Reduzierung der Fresnel-Reflexion durch LIPSS schon erfolgreich gezeigt. Um den Prozess auf im Projekt verwendeten Quarzglasfasern anzuwenden, wurden in diesem Teilvorhaben folgende Arbeitspakete geplant:

AP4 - FSU-2: Faserendflächenstrukturierung für Fresnel-Reflexionsunterdrückung

FSU-2.1: Untersuchung der Prozessparameter zur Erzeugung von Oberflächenstrukturen auf Kieselglas

FSU-2.2: Erzeugung von Oberflächenstrukturen auf Faserendflächen

## 2. Arbeiten und Ergebnisse des Teilvorhabens

### 2.1 Erzeugung von dispersiven Faser-Bragg-Gittern in getaperte Fasern

#### *FSU-1.1 Untersuchung des Einschreibevorgangs in getaperte Fasern*

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollte das Einschreiben von FBG in das vom Projektpartner Fraunhofer IOF gefertigte Faser-Mount-Compound untersucht werden.

#### *Voruntersuchung Einschreiben von FBG durch Kapillaren*

Im ersten Schritt wurde auf bereits vorhandene Kapillaren zurückgegriffen, um generell den Einfluss der Grenzflächen und des großen Außendurchmessers von 1,2 mm auf das Einschreiben von FBG zu evaluieren. Die Geometrie der Kapillare mit Faser ist in Abb. 1a gezeigt. Da die Kapillare innen einen deutlich größeren Durchmesser als die Faser hat, wurde der Schreibaufbau angepasst, um die Faser separat zu halten und auszurichten (siehe Abb. 1b). Dabei wird die Kapillare über eine Ansaugung im Aufbau fixiert. Die Faser wird jeweils an den überstehenden Seiten auf 3D-Verstelltischen mittels Faserhaltern befestigt. Dies ermöglicht alle Freiheitsgrade, um die Faser parallel und mittig innerhalb der Kapillare auszurichten.

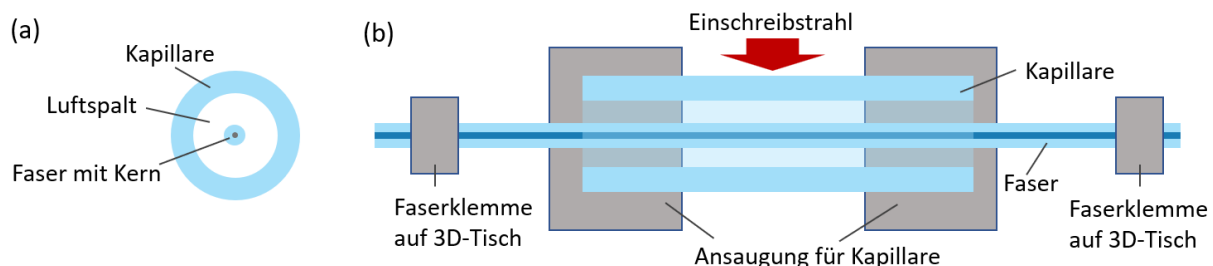


Abb. 1. (a) Anordnung von Kapillare (Außen-/Innendurchmesser: 1200/800  $\mu\text{m}$ ) und Faser (Außen-, bzw. Mantel-/Kerndurchmesser: 125/9  $\mu\text{m}$ ). Skizzierung der Halterung von Kapillare und Faser im Schreibaufbau.

Als Einschreibelasersystem wurde ein Ultrakurzpulslaser (Spitfire Ace, Spectra Physics) mit 800 nm Wellenlänge, 100 fs Pulsdauer, 1 kHz Pulsrepetitionsrate mit bis zu 5 mJ Pulsenergie und 10 mm Strahldurchmesser ( $1/e^2$ ) verwendet. Für das Einschreiben der FBG durch die Kapillare wurden zwei verschiedene Optiken evaluiert: eine 25 mm Zylinderlinse, sowie eine azyllindrische Linse mit 12 mm Brennweite. Letztere ermöglicht aufgrund ihrer höheren numerischen Apertur prinzipiell das Einschreiben durch die transparente Kunststoffummantelung der Faser. Mit beiden Optiken konnten FBG in eine Standard-Singlemodefaser (SMF-28, 9  $\mu\text{m}$  Kern, 125  $\mu\text{m}$  Außendurchmesser) ohne Ummantelung mit 13% bzw. 17% Reflektivität bei 1546 nm erzeugt werden. Die Reflexionsspektren sind in Abb. 2 gezeigt. Im Vergleich zum Einschreiben ohne Kapillare wurden deutlich höhere Pulsenergien benötigt: 700  $\mu\text{J}$  anstatt 400  $\mu\text{J}$  für die 25 mm Zylinderlinse, sowie 200  $\mu\text{J}$  anstatt 175  $\mu\text{J}$  für den Azyylinder. Dies weist auf eine Vergrößerung des Fokus hin, vermutlich durch Zunahme der Aberrationen durch die weiteren Grenzflächen der Kapillare.

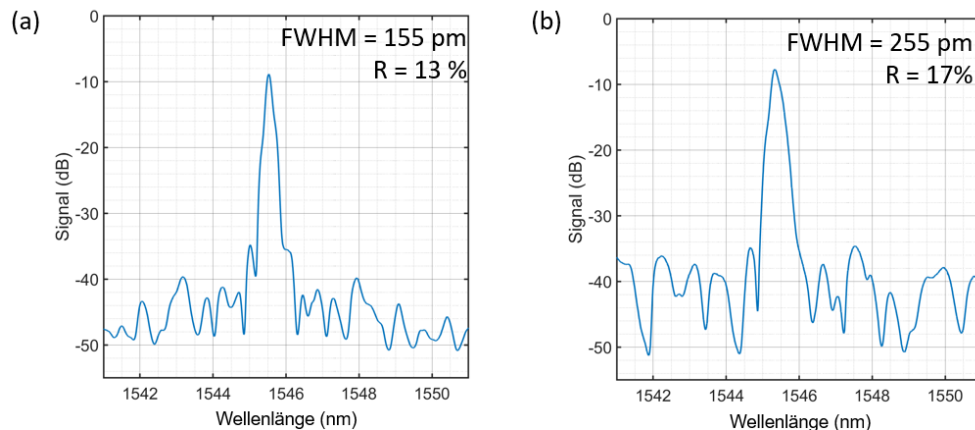


Abb. 2. Reflexionsspektren der durch die Kapillare eingeschriebenen FBG mit (a) Zylinderlinse (25 mm Brennweite) und (b) Azyylinder (12 mm Brennweite).

### *Entscheidung Ankopplungsdesign und Anforderungen an den FBG-Schreibprozess*

Trotz erfolgreicher Vortests für das Einschreiben durch die Kapillare, wurde vom Projektpartner das Konzept zur Ankopplung der Faser an den Verstärkerchip angepasst. Die Verwendung einer Faser, an deren Endfläche eine Mikrolinse angebracht ist („lensed fiber“) zeigte in den Simulationen deutlich höhere Koppelleffizienzen. Der Aufbau ist in Abb. 3 gezeigt. Daher sollten die FBG nun direkt in die Faser eingeschrieben werden. Um die lineare Polarisierung des modengekoppelten Lasers zu erhalten und um Propagation in der Grundmode der Faser bei der Zielwellenlänge 920 nm sicherzustellen, wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern die Verwendung der polarisationserhaltenden (polarisation maintaining – „PM“) Faser PM-780 HP („Projektfaser“) ausgewählt.

Die PM-Faser hat zwei spannungsinduzierende Elemente („stress rods“) auf beiden Seiten des Faserkerns. Diese müssen vor dem Einschreibevorgang senkrecht zur Ausbreitung des Einschreibelasers ausgerichtet werden, um eine störungsfreie Fokussierung in den Faserkern zu erreichen. Für die Zielwellenlänge von 920 nm muss

bedacht werden, dass nach der Bragg-Bedingung ( $\lambda = 2n\Lambda$ , mit Wellenlänge  $\lambda$ , Brechungsindex  $n \approx 1.45$  und Gitterperiode  $\Lambda$ ) eine Gitterperiode von etwa 315 nm benötigt würde. Dies würde eine Periode des Beugungsgitters der Phasenmaske von 630 nm erfordern, die mit der Wellenlänge von 800 nm des verwendeten Einschreibelasers jedoch physikalisch nicht nutzbar ist. Deshalb wurden FBG mit der doppelten Periode von 630 nm (Phasenmaske: 1260 nm) ausgewählt, die in 2. Ordnung Braggresonanz ( $\lambda = 2n\Lambda/2$ ) verwendet werden.

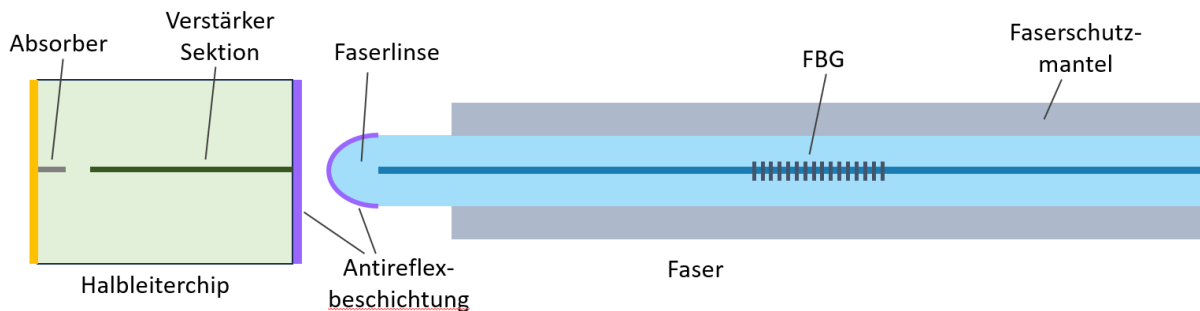


Abb. 3. Schema des Verstärkerchips mit angekoppelter Faser, wobei die Modenfeldanpassung über eine Faserlinse geschieht.

#### Bestimmung FBG-Schreibparameterfenster und Einschreiben durch den Schutzmantel

Im nächsten Schritt wurde das Schreibparameterfenster bestimmt und untersucht, ob das Einschreiben durch die transparente Kunststoffummantelung für FBG in zweiter Reflexionsordnung und insbesondere auch in die PM-Faser möglich ist. Dies würde den Arbeitsschritt der Entfernung und Wiederaufbringung der Ummantelung, sowie die Gefahr der Verringerung der mechanischen Integrität der Faser vermeiden. Die FBG wurden für die ersten Untersuchungen mit einer vorhandenen Phasenmaske realisiert, die eine Resonanz bei 972 nm erzeugt. Während des Einschreibevorgangs wurde der Faserkern mit Geschwindigkeiten im Bereich von 1 mm/min abgefahren, um eine gleichmäßige Abdeckung des Kernquerschnitts mit der Brechzahlmodifikation zu erreichen. Um das Coating nicht zu beschädigen, wurde der Azyylinder mit 12 mm Fokusslänge eingesetzt.

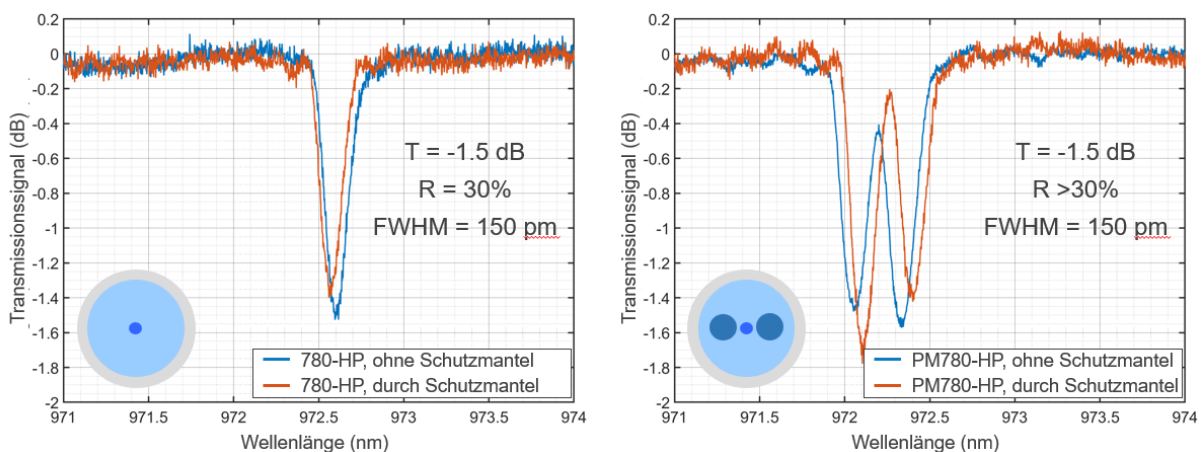


Abb. 4. Transmissionsspektren von FBG, die ohne und durch den Schutzmantel hindurch eingeschrieben wurden in (a) Singlemodefaser 780-HP und (b) polarisationserhaltender Faser PM780-HP.

Zuerst wurde die zur Projektfaser passende nicht-polarisationserhaltende, normale Singlemodefaser (780-HP) genutzt, um zu untersuchen ob FBG in zweiter Reflexionsordnung durch den Schutzmantel eingeschrieben werden können. In Abb. 4a sind die Transmissionsspektren der eingeschriebenen FBG ohne und durch die Schutzummantelung gezeigt. Da der Schutzmantel einen Teil des Lichtes absorbiert, muss die Pulsenergie des Schreiblasers erhöht werden: ohne den Schutzmantel wurden 250  $\mu\text{J}$ , mit Schutzmantel 300  $\mu\text{J}$  Pulsenergie verwendet. Nach Verifizierung des generellen Parameterfensters wurden die Experimente für die Projektfaser PM780-HP wiederholt. Durch die Stressfelder im Faserkern und damit leicht veränderte Materialeigenschaften, musste die Schreibpulsenergie angepasst werden: 300  $\mu\text{J}$  ohne, und 350  $\mu\text{J}$  durch den Schutzmantel. In den Transmissionsspektren (siehe Abb. 4b) zeigen sich für die PM-Faser zwei Resonanzen, da die beiden Polarisationsachsen jeweils unterschiedliche Brechungsindizes und damit unterschiedliche Resonanzwellenlängen besitzen.

Es konnten sowohl für die nicht-PM als auch die PM-Faser erfolgreich teilreflektierende FBG mit Resonanz in zweiter Ordnung ohne und mit Schutzmantel realisiert werden.

### *FSU-1.2 Integration von speziellen Faserdesigns in getaperte Fasern*

Innerhalb dieses Arbeitspakets sollten die spektralen und dispersiven Eigenschaften der FBG an die Anforderungen des Laserverstärkerchips angepasst werden. Dazu wurden zunächst Simulationen durchgeführt, um die Zielparameter zu bestimmen. Final sollte das Lasersystem mit externem Resonator eine Pulsdauer von weniger als 15 ps mit einer Repetitionsrate von 1 GHz (bis zu kleiner als 200 MHz) aufweisen. Dafür wurde für die FBG eine spektrale Halbwertsbandbreite (Full Width at Half Maximum – FWHM) von 1 bis 2 nm angestrebt.

### *Simulationen für die Bestimmung des FBG-Designs*

Standardmäßig haben teilreflektierende FBG in dem Wellenlängenbereich tendenziell deutlich schmalere Bandbreiten von weniger als 200 pm (siehe Abb. 4). Um die Resonanz zu verbreitern, kann entweder die Gitterlänge verkürzt, oder ein gechirptes FBG mit variierender Gitterperiode genutzt werden. In Abb. 5 sind drei verschiedene Optionen für eine Gitterstärke von 50% und eine Bandbreite von 2 nm simuliert: ein kurzes FBG von 160  $\mu\text{m}$  Länge, ein stark und ein schwach gechirptes FBG. In Tab. 1 sind die FBG-Parameter aufgelistet. Das kurze FBG benötigt aufgrund der Gitterlänge die stärkste Brechzahlmodulation, im Vergleich zu den gechirpten Gittern. Dafür haben letztere einen Einfluss auf die Dispersion, und damit auf die Performance des Systems: Da sich bei einem gechirpten FBG die Periode linear über die Gitterlänge ändert, werden unterschiedliche spektrale Komponenten an unterschiedlichen Positionen im FBG reflektiert. Dadurch entsteht eine zeitliche Verzögerung (Delay) zwischen den spektralen Komponenten, die zu einer Pulsverbreiterung führt. Spezifiziert wird dies durch die

sogenannte Gruppenlaufzeitdispersion (group delay dispersion – GDD). Je niedriger die Chirprate ist, umso länger ist das CFBG um die gleiche Bandbreite zu erreichen, und desto höher ist die vom CFBG resultierende GDD. Keine Pulsverzögerung wird durch ein konstant periodisches FBG erreicht (siehe Tab. 1).

Tab. 1. Parameter der FBG für verschiedene Chirpratzen (50% Reflexion und 2 nm Bandbreite).

Option	Gitterlänge mm	Chirprate FBG nm/mm	GDD ps <sup>2</sup>	Brechzahlmodulation
1	0,16	0	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$
2	10	0,33	4,7	$4,4 \cdot 10^{-4}$
3	28	0,033	47	$1,4 \cdot 10^{-4}$

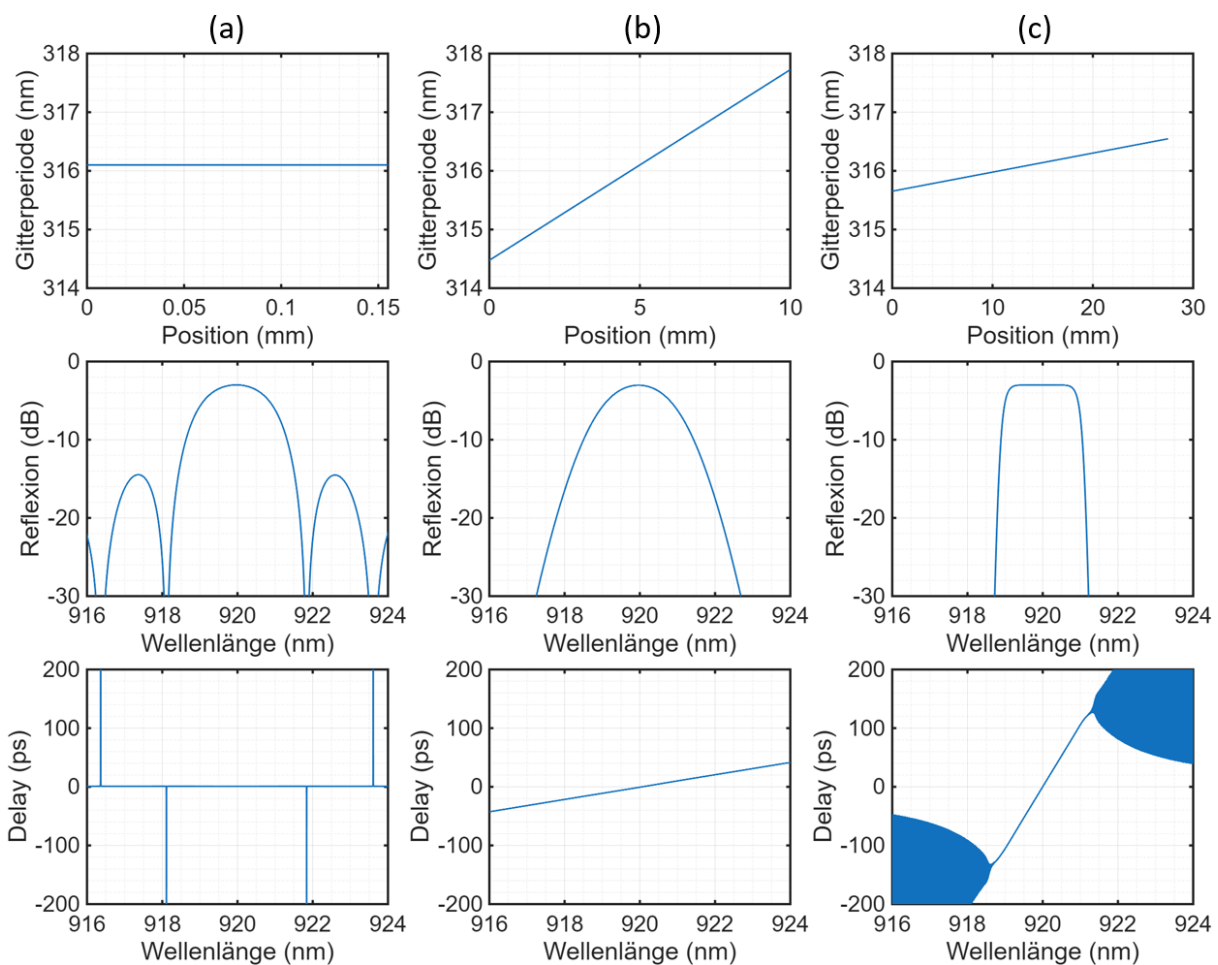


Abb. 5. Verlauf der Gitterperiode für drei verschiedene Beispiele: (a) kurzes, konstant-periodisches FBG, (b) stark gechirptes FBG und (c) langes, schwach gechirptes FBG (siehe Parameter in Tab. 1). Dazu jeweils die berechnete Reflexion und Verzögerung (Delay) in Abhängigkeit der Wellenlänge.

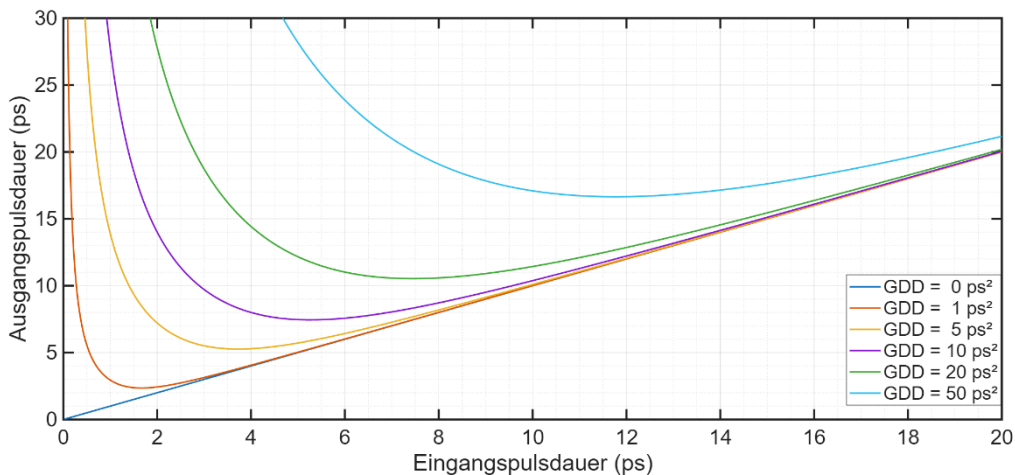


Abb. 6. Berechnete Pulsverbreiterung für transformlimitierte Pulse für verschiedene GDD.

Abb. 6 zeigt eine berechnete Abschätzung des Einflusses verschiedener GDD-Werte, in dem die finale Pulsbreite in Abhängigkeit der Eingangspulsbreite aufgetragen ist. Eine GDD von unter  $10 \text{ ps}^2$  zeigt für Pulsdauern von mehr als 8 ps nur einen geringen Einfluss. Für kürzere Pulsdauern, haben jedoch auch schon geringe GDD einen größeren Einfluss (z.B. von 2 ps auf 7 ps für eine GDD von  $5 \text{ ps}^2$ ). Deshalb wurde entschieden, keine geschirpten sondern kurze, konstant periodische FBG zu realisieren.

### Realisierung kurzer FBG

Bei der Phasenmaskentechnik wird normalerweise die Gitterlänge durch die Dimension des Einschreibelaserstrahls und den Abstand von Faser zu Phasenmaske bestimmt. In den Experimenten hat der Laserstrahl einen Durchmesser von etwa  $10 \text{ mm}$  ( $1/e^2$ ), und der Abstand von Faser zur Phasenmaske beträgt etwa  $500 \text{ }\mu\text{m}$ . Die damit erzeugten FBG haben eine Länge im Bereich von  $5 \text{ mm}$ . Um die Gitterlänge zu verkürzen, kann auf der Phasenmaske ein Spalt integriert werden (siehe Abb. 7a). Dazu wurden aus einer Messingfolie ( $25 \text{ }\mu\text{m}$  Dicke) Spalte in verschiedenen Breiten von  $1.4 \text{ mm}$  bis  $1.8 \text{ mm}$  ausgeschnitten.

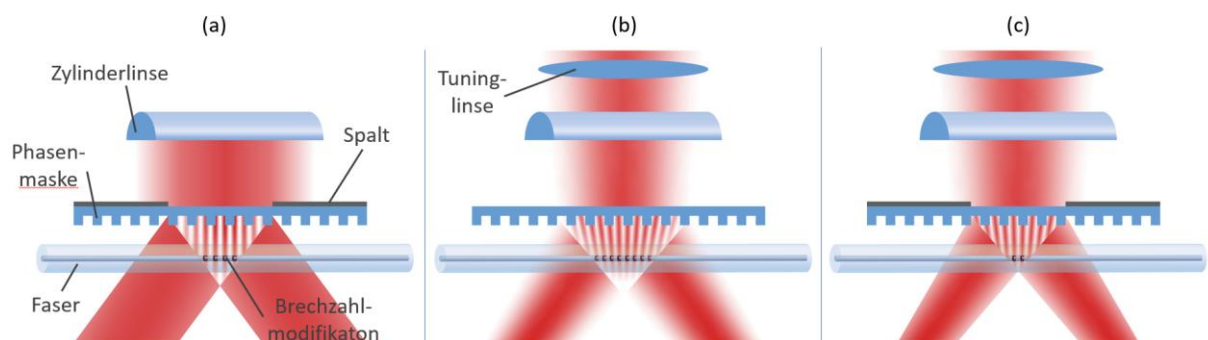


Abb. 7. Schemata für die Phasenmaskentechnik mit Anpassungen: (a) integrierter Spalt zur Gitterlängenbegrenzung. (b) Zusätzliche Tuninglinse zur Verkleinerung der Gitterperiode. (c) Kombination aus (a) und (b).

Die Voruntersuchungen wurden wieder an der nicht-PM Faser 780-HP durchgeführt. Außerdem wurde der Schutzmantel der Faser im Schreibfenster entfernt, da kurze Gitter

eine deutlich größere Gitterstärke benötigen, und damit das Risiko einer Schädigung des Schutzmantels steigt. Daher konnte in diesem Fall auch mit der Standard-25mm-Zylinderlinse gearbeitet werden. Abb. 8a zeigt die gemessenen Reflexionsspektren und Tab. 2 eine Übersicht der Schreibparameter für die verschiedenen Spaltbreiten, sowie der resultierenden Bandbreite des FBGs bei einer Reflexion von 50%. Außerdem ist die über eine Simulation (Transfer-Matrix-Methode) abgeschätzte Gitterlänge und Brechzahlmodulation angegeben. Mit Spaltbreiten von 1,6 mm und 1,5 mm können die angestrebten Bandbreiten (FWHM) von 1 bis 2 nm erreicht werden. Auf eine dispersive Vermessung der Gitter wurde verzichtet, da aufgrund der konstanten Gitterperiode eine  $GDD = 0$  zu erwarten ist.

Tab. 2. Einschreibeparameter sowie gemessene und simulierte Ergebnisse für verschiedene Spaltbreiten.

#	Spaltbreite	Pulsenergie	Scan- geschwindigkeit	FWHM	Länge (sim.)	$\Delta n$
	mm	$\mu\text{J}$	mm/min	nm	$\mu\text{m}$	
1	Kein Spalt	200	15	0,1	5000	$0,1 \cdot 10^{-3}$
2	1,8	400	1...5	0,6	400	$0,6 \cdot 10^{-3}$
3	1,6	400	0,2...5	0,9	320	$0,8 \cdot 10^{-3}$
4	1,5	700	5	1,9	170	$1,0 \cdot 10^{-3}$
5	1,4	700	5	2,4	120	$1,5 \cdot 10^{-3}$

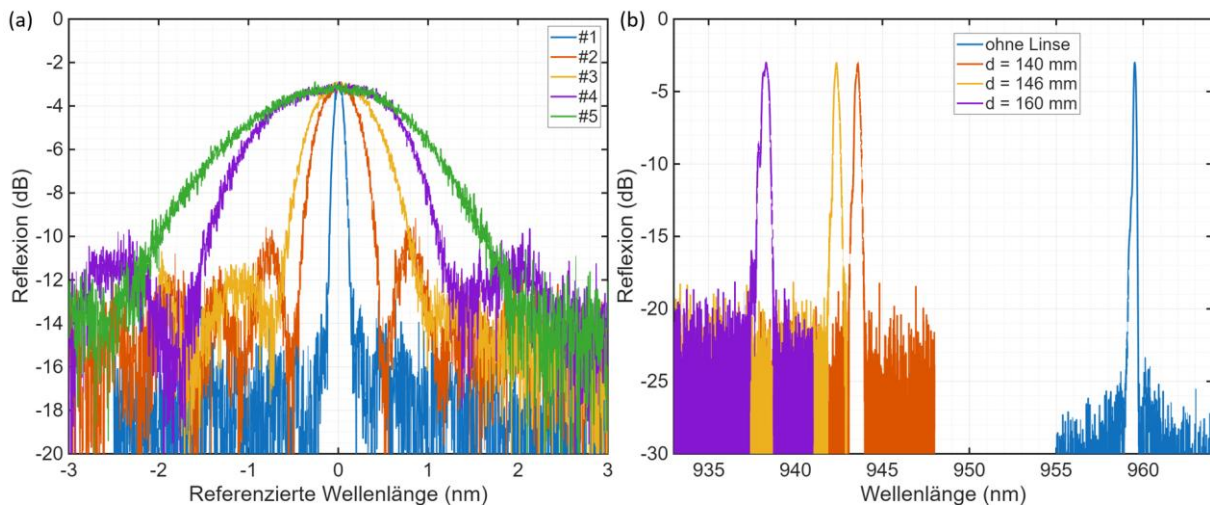


Abb. 8. Reflexionsspektren für (a) verschiedene Spaltbreiten (siehe Tab. 2) und (b) verschiedene Abstände  $d$  der Tuning-Linse mit 200 mm Brennweite.

### Anpassung der Resonanzwellenlänge

Die erste Charge der Verstärkerchips hatte eine vom Projektziel abweichende Resonanzwellenlänge 941 nm. Da dafür keine passende Phasenmaske vorhanden war, wurde auf das Verschieben der Resonanzwellenlänge mittels Tuning-Linse zurückgegriffen: Dabei wird eine langbrennweitige Linse vor der Zylinderlinse platziert, die das Interferenzmuster hinter der Phasenmaske verkleinern kann (siehe Abb. 7b). Damit kann die Periode, die dem Faserkern aufgeprägt wird, angepasst werden. Die

resultierende Verschiebung der Resonanzwellenlänge hängt sowohl von der Brennweite als auch vom Abstand der Tuning-Linse von der Phasenmaske ab. In Abb. 8b sind beispielhaft dafür drei Reflexionsspektren dargestellt, deren FBG mit jeweils unterschiedlichen Abständen einer Tuning-Linse mit 200 mm Brennweite eingeschrieben wurden.

#### *Realisierung der FBG in belinsten Fasern*

Für die Übergabe an den Projektpartner wurden die FBG in die belinsten Faserproben eingeschrieben. Um die Gitterstärke einzustellen, wurde während des Schreibprozesses die Reflexion und Transmission vermessen. Die Reflexionsstärke ergibt sich dabei aus der Tiefe des Dips bei der Resonanzwellenlänge. Als Lichtquelle wurde eine Superkontinuumsquelle (SuperK, NKT Photonics) in die Faserproben eingekoppelt. Am Ende der belinsten Faser wurde das Signal mit Hilfe eines Objektivs und Kollimators zurück in eine Faser eingekoppelt, und mit einem optischen Spektrumanalysator (Yokogawa) vermessen.

Die finalen Parameter der FBG wie Resonanzwellenlänge, Bandbreite, Reflexionsstärke und auch die Position des FBG vom Faserende wurden jeweils mit den Projektpartnern abgesprochen. Im Verlauf wurden über 20 FBG in belinsten Fasern dem Projektpartner zur Verfügung gestellt. Darunter wurde die Reflexion von 30% bis 70% und die Wellenlänge im Bereich von 917 nm bis 922 nm variiert, bzw. auf 940 nm eingestellt. In Abb. 9 und Tab. 3 sind beispielhaft eine Auswahl der FBG dargestellt und aufgelistet. FBG #1-4 wurden mit gleichen Parametern erzeugt und zeigen die sehr gute Reproduzierbarkeit des Einschreibeprozesses. FBG #5,6 sowie #7,8 wurden jeweils mit einer anderen Phasenmaskenperiode eingeschrieben. Kleinere Verschiebung der Resonanzwellenlänge konnten mit Anpassung der Zugspannung während des Einschreibeprozesses erreicht werden (vgl. FBG #5,6).

Die FBG wurden zum einen mit einem Abstand von 10 cm vom Ende der Faserlinse eingeschrieben. Damit konnten erfolgreich Repetitionsraten von 1 GHz erreicht werden. Zusätzlich wurden auch Abstände von 53 cm realisiert, für eine erfolgreiche Umsetzung eines Lasersystems mit 200 MHz Repetitionsrate.

Tab. 3. Eigenschaften von ausgewählten FBG, die an Projektpartner übergeben wurden.

#	Wellenlänge	Bandbreite	Reflexion
	nm	nm	%
1	919,2	1,1	70
2	919,2	1,1	69
3	919,3	1,1	71
4	919,2	1,1	70
5	916,8	1,1	67
6	917,2	1,1	70
7	922,1	1,0	68
8	922,2	1,1	70

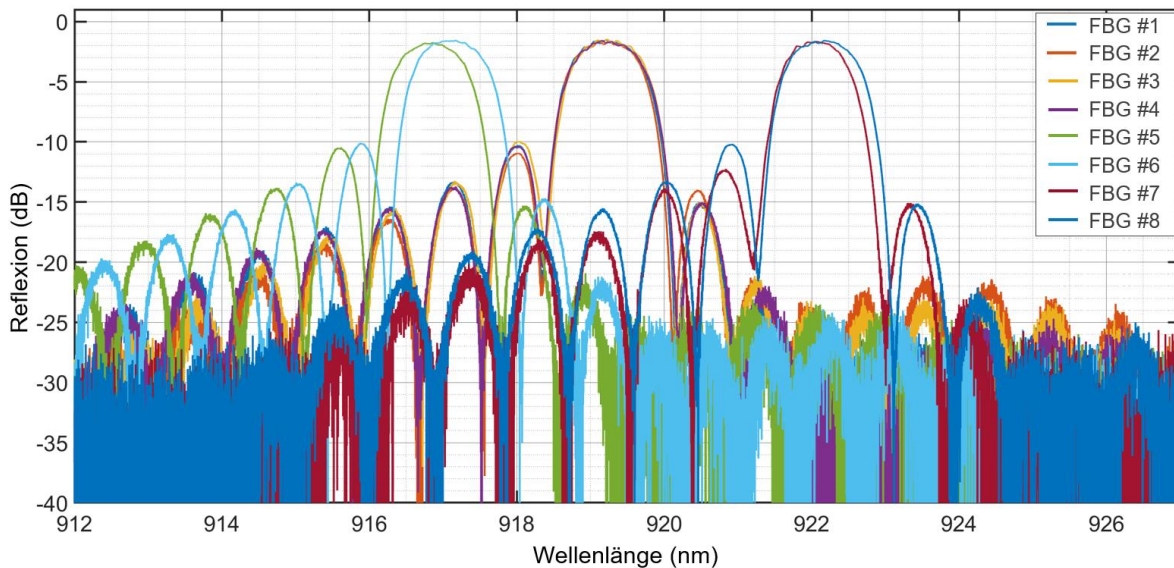


Abb. 9. Reflexionsspektren für ausgewählte FBG, die an den Projektpartner übergeben wurden.

## 2.2 Faserendflächenstrukturierung für Fresnel-Reflexionsunterdrückung

### *FSU-2.1 Untersuchung der Prozessparameter zur Erzeugung von Oberflächenstrukturen auf Kieselglas*

Im ersten Schritt sollte in diesem Arbeitspaket die Realisierung von LIPSS an großflächigen planaren Proben untersucht werden. Das verwendete Ultrakurzpulslasersystem (Amplitude) hat eine Mittenwellenlänge von 1030 nm und eine Pulsdauer von 150 fs. Mit Hilfe eines Pulspickers wurde im Einzelpuls-Modus gearbeitet.

Der Laserstrahl wurde mit einer langbrennweitigen Linse auf die Kieselglasproben fokussiert. Dabei wurden drei unterschiedliche Brennweiten (50 mm, 100 mm, 150 mm) untersucht, um die optimalen Parameterbereiche zu bestimmen. Es wurden jeweils Fluenzen von 3 bis  $6,75 \text{ J/cm}^2$  und eine Pulsanzahl von 1 bis 240 getestet. Für Fluenzen unter  $4,75 \text{ J/cm}^2$  zeigt sich keine sichtbare Modifikation. In allen Fällen zeigte sich bei einer Pulsanzahl von über 20 bereits eine deutliche Zerstörung. Optimal erscheinen Fluenzen im Bereich von 5 bis  $6 \text{ J/cm}^2$  bei einer Pulsanzahl von unter 10. In Abb. 10a-d sind die Aufnahmen der Strukturen, erzeugt mit einer Fluenz von  $5,75 \text{ J/cm}^2$  und unterschiedlicher Pulsanzahl gezeigt. Mit zunehmender Pulsanzahl bildet sich die Struktur weiter aus: nach 5 Pulsen sind deutlich die sogenannten hochfrequenten LIPSS zu sehen. Diese haben eine Periode im Bereich von 300 nm. Das stimmt mit der Erwartung aus der Literatur überein, bei der die Frequenz kleiner als die halbe Wellenlänge des Laserstrahls sein sollte ( $300 \text{ nm} < 1030 \text{ nm}/2$ ). Mit weiteren Pulsen beginnt die Ausbildung der dazu senkrecht stehenden niedrigfrequenten LIPSS, deren Periode bei etwa 800 nm liegt (Literatur: zwischen 670 nm und 1000 nm). Die gleiche Evolution sieht man in Abb. 10e-h, bei denen die Strukturen ausgewählt wurden, die mit 5 Pulsen aber unterschiedlichen Fluenzen erzeugt wurden.

Für eine erfolgreiche Unterdrückung der Fresnel- (Endflächen-) Reflektion an der Glas-zu-Luft Grenzfläche sollte die Periode der Struktur kleiner als die einfallende Wellenlänge, geteilt durch den doppelten Brechungsindex sein. Bei einer Zielsignalwellenlänge von 920 nm sollte die Struktur daher eine Periode von kleiner als 307 nm haben. Dies wäre mit den hochfrequenten LIPSS erfüllt.

Damit wurde in diesem Arbeitspaket erfolgreich die Bestimmung der Parameterfenster für die Erzeugung von LIPSS zur Fresnel-Reflex-Unterdrückung auf planaren Kieselglasproben durchgeführt.

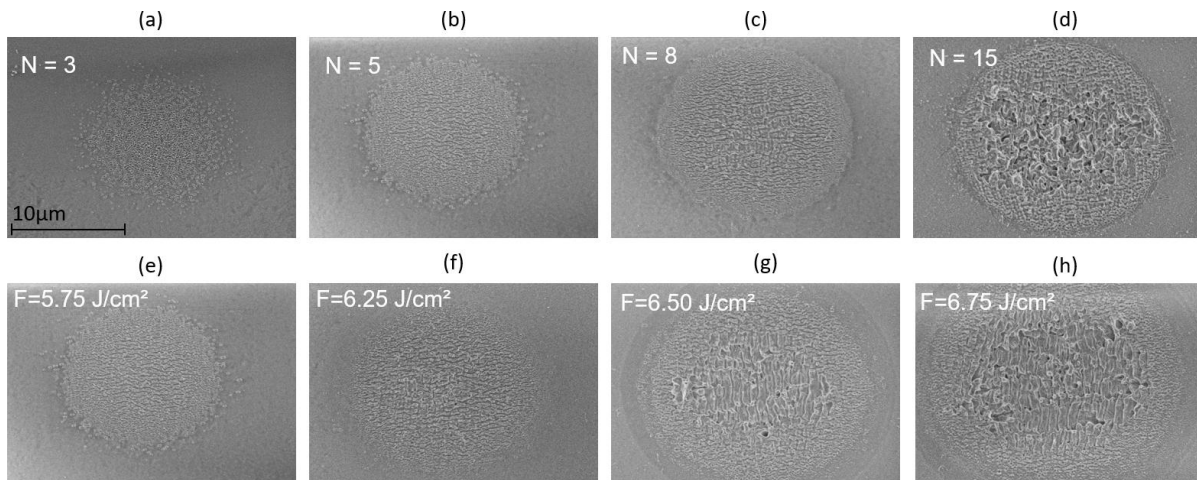


Abb. 10. REM-Aufnahmen der erzeugten Strukturen mit 100 mm-Linse. (a)-(d) Fluenz: 5,75 J/cm<sup>2</sup>, variierende Pulsanzahl. (e)-(f) Pulsanzahl: 5, variierende Fluenz.

### *FSU-2.2 Erzeugung von Oberflächenstrukturen auf Faserendflächen*

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollten die Erkenntnisse aus AP FSU-2.1 auf Faserendflächen übertragen werden. Es wurden Singlemodefasern und PM-Fasern mit einem Außendurchmesser von 125 μm und einem Kerndurchmesser von 4 bis 6 μm verwendet. Die Faser wurde für den Strukturierungsprozess jeweils mittels eines manuellen Cleavers gebrochen, um eine planare Endfläche zu erhalten, die möglichst senkrecht zur Faserachse ist.

#### *Experimenteller Aufbau*

Für die Strukturierung der Faserendflächen ist eine größere Herausforderung die reproduzierbare Justage auf die Mitte des Faserquerschnitts, bzw. den Faserkern. Dazu wurde für die Justage des Laserfokus auf die Endfläche eine hochpräzise Linearachse (Aerotech) verwendet. In Abb. 11 ist der Aufbau skizziert. Eine Beobachtung der Faser durch die Fokussierlinse hindurch für die Justage ist aufgrund der langen Brennweite zu ungenau. Deshalb wurde neben der Strahlführung in einem definierten Abstand ein höherauflösendes Mikroskop (A) aufgebaut, mit dem die Faserposition eingestellt wurde.

Für die Charakterisierung der Strukturen wurde in die Faser Licht einer Breitbandquelle eingekoppelt. Über einen Faserzirkulator konnte das an der Faserendfläche reflektierte

Signal in einem Spektrometer (D) direkt vor und nach der Strukturierung vermessen werden. Ebenso wurde die transmittierte Leistung (C) und das Fernfeld des aus der Faser gekoppelten Modenfelds (B) vermessen.

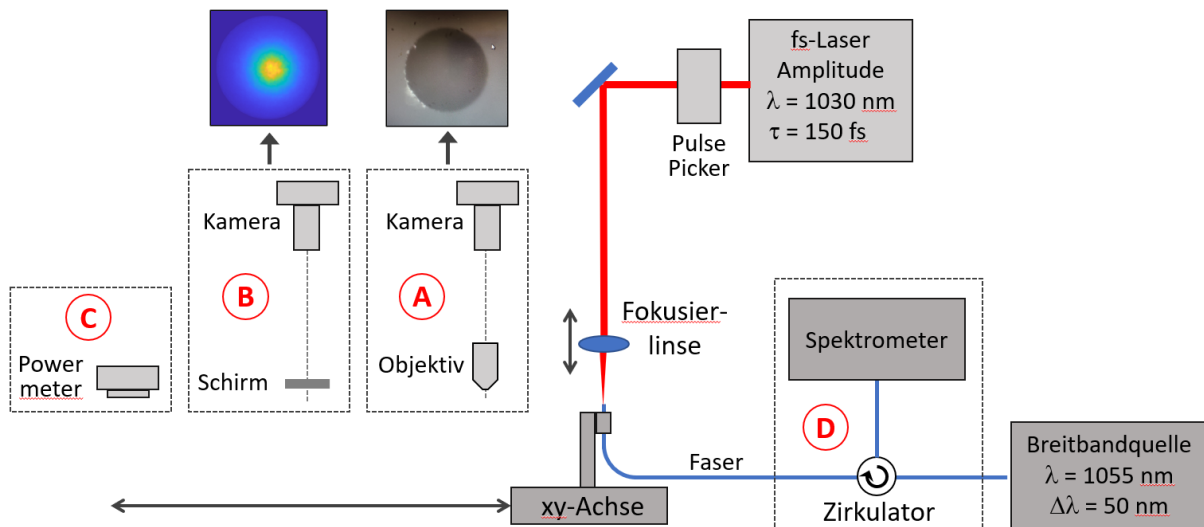


Abb. 11. Skizzierung des Aufbaus für die Strukturierung der Faserendflächen, mit (A) Mikroskop zur Positionierung der Faser, (B) Fernfeldbeobachtung, (C) Messung der Durchgangsleistung und (D) Messung des reflektierten Signals.

### Erzeugung von LIPSS mit 100 mm Linse

Im nächsten Schritt wurden die auf den planaren Proben durchgeführten Parametertests auf die Faserendflächen übertragen. Zur Fokussierung wurde die 100 mm Linse genutzt, da diese zum einen Modifikationen von etwa  $10\ \mu\text{m}$  erzeugt (größer als der Faserkern), und im Vergleich zur 150 mm-Linse eine größere Parametervariation ohne Ablation des Kieselglases bot. Als Testfaser wurde eine Singlemodefaser mit  $5,8\ \mu\text{m}$  Kerndurchmesser (1060XP) genutzt. Es wurde zum einen eine Pulsanzahl von 10 gewählt, und verschiedene Fluenzen genutzt, und zum anderen die Fluenz von  $4,5\ \text{J}/\text{cm}^2$  eingestellt und unterschiedliche Anzahl von Pulsen verwendet (siehe Abb. 12). Bei der verwendeten Wellenlänge sollte die Stärke des Fresnelreflexes bei etwa 3,4% liegen (gestrichelte Linie). Durch die Strukturierung konnte bei einer Fluenz  $>4,0\ \text{J}/\text{cm}^2$  eine deutliche Reduktion der Reflexion erreicht werden. Die Transmissionsdaten zeigen die relative Transmission nach der Strukturierung im Vergleich zu vorher. Hier zeigt sich, dass es bei 10 Pulsen ab einer Fluenz von  $5\ \text{J}/\text{cm}^2$  zu einer deutlichen Reduktion der Transmission kommt, da im Bereich der Struktur bereits Material abgetragen, beziehungsweise die Faserendfläche zerstört wird. Bei einer Fluenz von  $4,5\ \text{J}/\text{cm}^2$  sinkt die Transmission erst bei einer Pulsanzahl von 15. Die besten Werte konnten bei 5 Pulsen gemessen werden: hier sank die Reflexion auf unter 0,3%, bei gleichbleibender Transmission (100%). In Abb. 12b sind außerdem zwei ausgewählte Fernfeldbilder der Modenfelder gezeigt. Bei 100% Transmission entspricht auch das Fernfeldbild dem des vor der Strukturierung aufgenommenen. Das Modenfeld des in der Faser geführten Lichts bleibt erhalten.

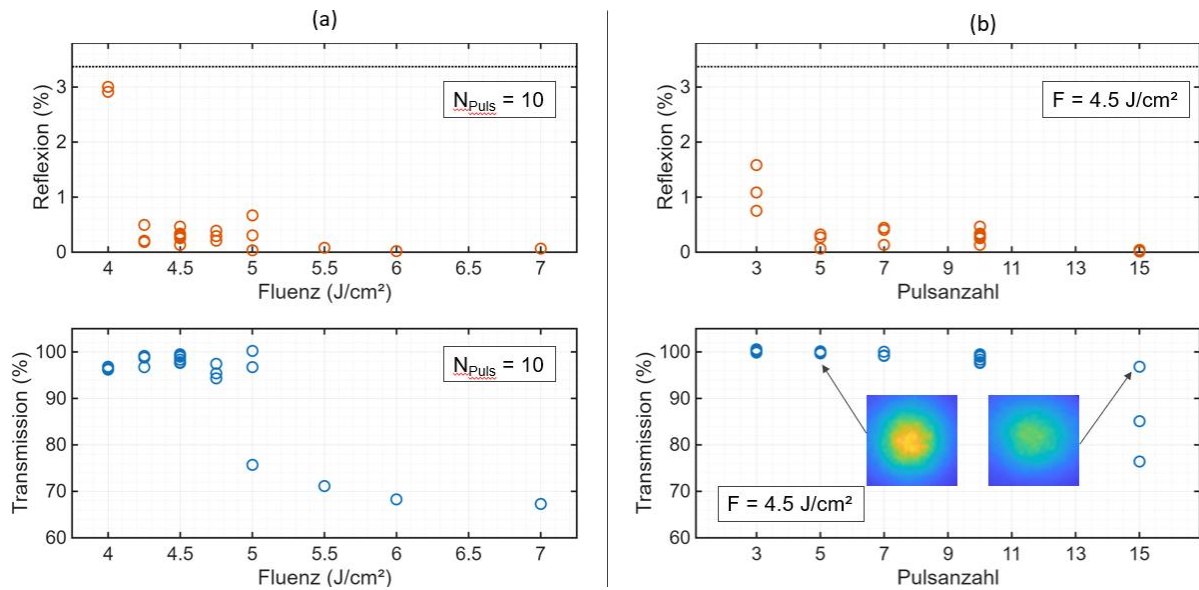


Abb. 12. Messergebnisse der Reflexion und Transmission für (a) 10 Pulse und unterschiedliche Fluenz sowie (b)  $4,5 \text{ J/cm}^2$  Fluenz und unterschiedliche Pulsanzahl.

Abb. 13 zeigt Mikroskop- und REM-Aufnahmen ausgewählter Proben ( $4,5 \text{ J/cm}^2$ , 3/5/7/10 Pulse). Neben der Kernmodifikation wurden zur Orientierung immer weitere 4 Punkte auf der Faser strukturiert. Es ist zu sehen, dass bevor sich die typische hochfrequente parallel zur Polarisation orientierte LIPSS-Struktur ausbildet, im Kernbereich konzentrische Ringe (ebenfalls mit einer Periode von  $300 \text{ nm}$ ) entstehen. Es wird vermutet, dass sich diese durch die Spannungen im Material durch den Faserzugprozess ausbilden. Bei steigender Pulsanzahl überlagern sich diese Ringe mit den erwarteten LIPSS. Weiterhin ist zu sehen, dass der Faserkern meist nicht optimal getroffen wurde. Dies erklärt auch die teils größere Streuung der Messwerte (z.B.  $5 \text{ J/cm}^2$ ,  $N=10$ ).

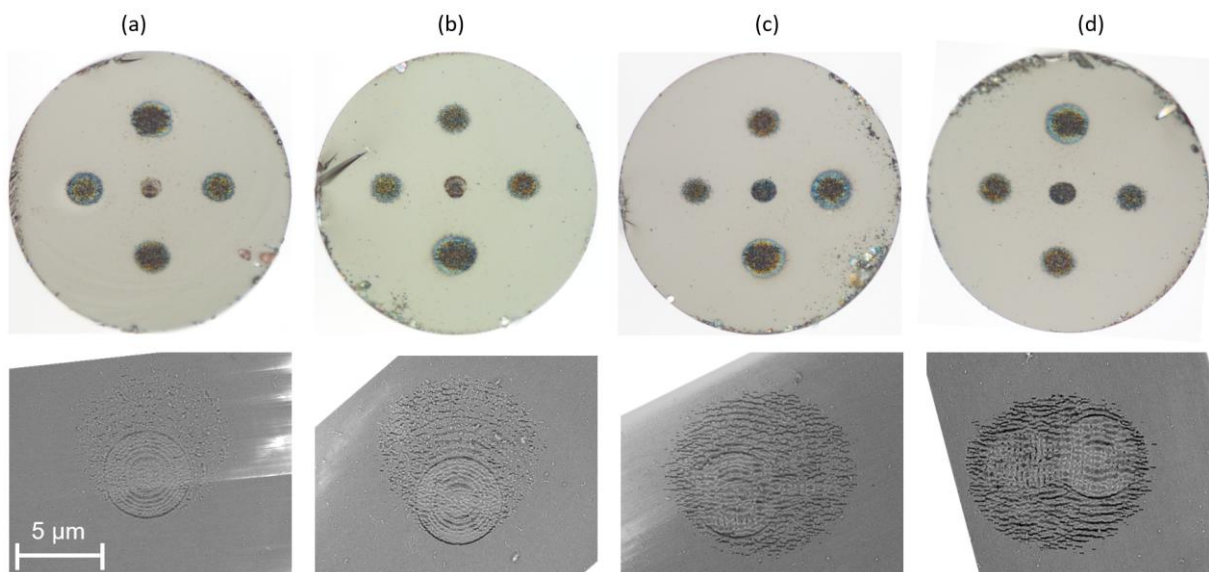


Abb. 13. Mikroskop- und REM-Aufnahmen ausgewählter Proben für  $F = 4,5 \text{ J/cm}^2$ : (a) 3 Pulse, (b) 5 Pulse, (c) 7 Pulse und (d) 10 Pulse.

Auffällig ist die für die Erzeugung der LIPSS notwendige geringere Fluenz von etwa  $4,5 \text{ J/cm}^2$  für die Faserendfläche im Vergleich zu  $5\text{-}6 \text{ J/cm}^2$  für Kieselglas. Dies liegt vermutlich an einer geringeren Modifikationsschwelle des Germanium-dotierten Faserkerns. Vergleichsweise wurden Parameter tests an analog zum Faserkern Germanium-dotierten Kieselglasproben durchgeführt. Hier lag die optimale Fluenz ebenfalls niedriger, im Bereich von  $3\text{-}4 \text{ J/cm}^2$ , die niedrigere Modifikationsschwelle bestätigend.

### Erzeugung von LIPSS mit 200 mm Linse

Um eine optimale Abdeckung der Modifikation mit dem Faserkern zu erreichen, und um den Einfluss kleinerer Positionsungenauigkeiten zu verringern, wurde außerdem die Erzeugung von LIPSS mit einer 200 mm Brennweite Linse auf der 780HP-Faser untersucht. Wieder wurden Energie und Pulsanzahl variiert, die Ergebnisse sind in Abb. 14 zu sehen. Auch hier konnte die Fresnelreflexion deutlich reduziert werden. Für relative Pulsenergien mit mehr als 70% nimmt das transmittierte Signal ab. Dagegen konnten mit geringeren Pulsenergien & -anzahl Transmissionswerte von über 100% erreicht werden. Dies deutet auf eine besonders verlustarme Struktur, da der Anteil, der sonst an der Grenzfläche reflektiert wird, an der Struktur nicht gestreut, sondern durchgelassen wird. Im Idealfall steigt also die Transmission um den Anteil des sonst reflektierten Lichts. Generell zeigten die mit der 200 mm Linse erzeugten LIPSS einen deutlich größeren Durchmesser (siehe Abb. 15a), und einen weniger starken Einfluss auf Positionsungenauigkeiten.

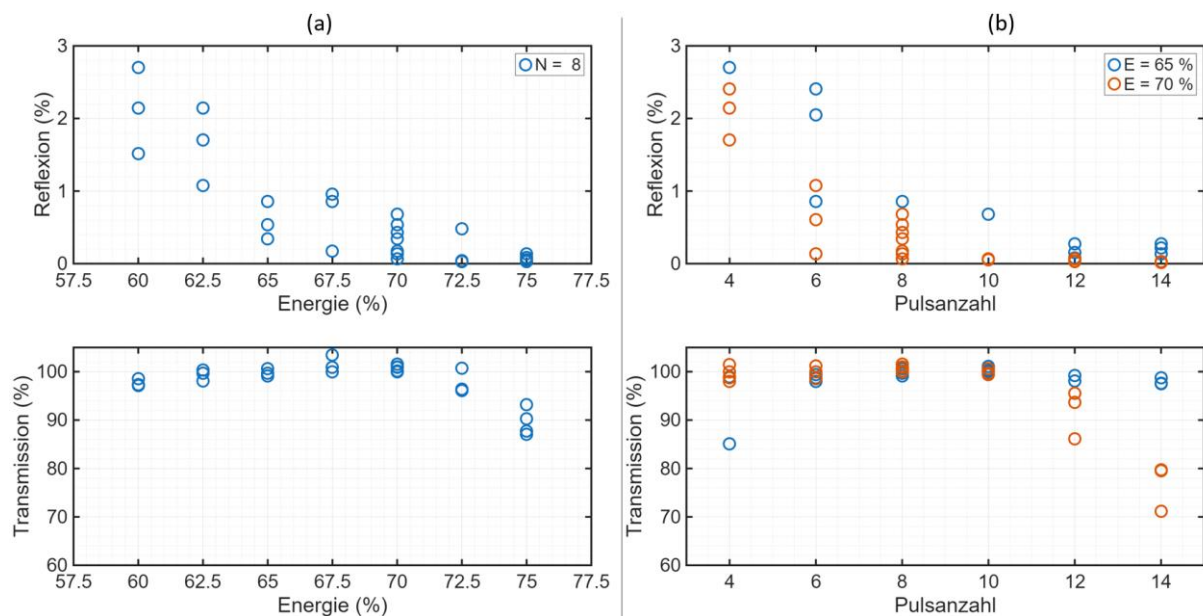


Abb. 14. Messergebnisse der Reflexion und Transmission für (a) 8 Pulse und unterschiedliche relative Pulsenergie sowie (b) 65% und 70% Pulsenergie und unterschiedliche Pulsanzahl.

Im letzten Schritt wurden die ermittelten Parameter genutzt, um auf der polarisationserhaltenden Projekt faser PM780-HP LIPSS zu erzeugen (siehe Abb. 15b). Es wurde der Parametersatz 70% Pulsenergie und 10 Pulse ausgewählt. Damit konnte eine

Transmission von 102% und eine Fresnelreflexion von unter 0,2% erreicht werden. Außerdem wurde der finale Spektralbereich inklusive der Projektwellenlänge von 920 nm charakterisiert (siehe Abb. 15c). Es zeigt sich eine Reduktion der Fresnelreflexion über einen größeren spektralen Bereich, mit mehr als rund 90% Unterdrückung (-10 dB Verlust) von 720 nm bis 1050 nm.

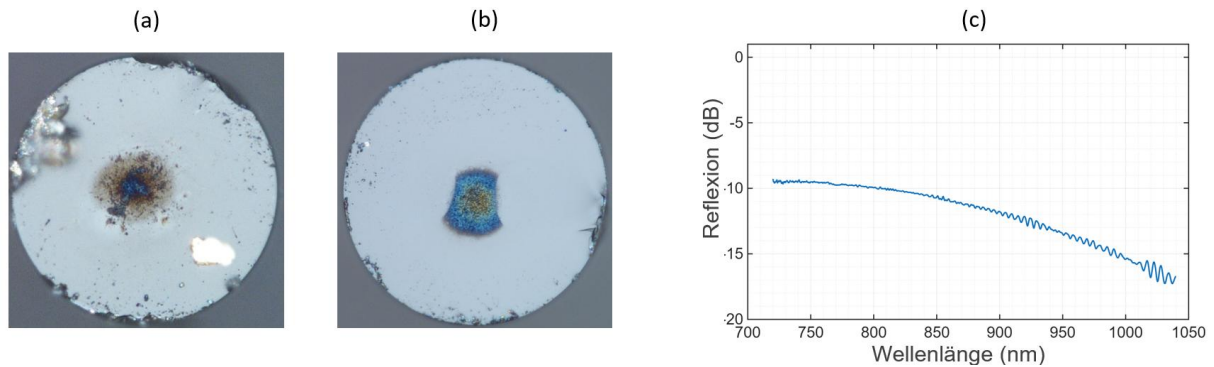


Abb. 15. Mikroskopbild von LIPSS auf (a) 780HP mit 65% Energie und 8 Pulsen und (b) PM-780HP mit 70% Pulsenergie und 10 Pulsen. (c) Messung der Reduktion der Fresnelreflexion einer PM-780HP Probe über einen breiten Wellenlängenbereich.

### 3. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Teilvorhabens wurden erfolgreich Verfahren zu Strukturierung von optischen Fasern mittels Ultrakurzpulslasern entwickelt. Die Arbeiten fokussierten sich dabei auf zwei Schwerpunkte: die Erzeugung von Faser-Bragg-Gittern (FBG) als externe Resonatorspiegel sowie die Strukturierung von Faserendflächen zur Reflexionsunterdrückung.

In Voruntersuchungen wurde der Einschreibeprozess der FBG für verschiedene Szenarien weiterentwickelt und untersucht: Platzierung der zu beschreibenden Faser in einer Kapillare mit Millimeter-großem Außendurchmesser und Erzeugung der Brechzahlmodifikation durch die transparente Kunststoffummantelung der Faser hindurch, mit der Verwendung von polarisationserhaltenden Fasern und Nutzung der Bragg-Resonanz in zweiter Ordnung. Beides konnte erfolgreich umgesetzt werden. Weiterhin wurde das Design der FBG bezüglich der Länge, Periode und Stärke an die Anforderungen des Verstärkerchips und des finalen gepulsten Lasersystems angepasst. Um einen Einfluss auf die Pulsdauer zu vermeiden, wurden kurze, konstant-periodische FBG eingesetzt. Dies wurde experimentell durch einen Spalt auf der Phasenmaske umgesetzt. Etwaige Abweichungen der Zielwellenlänge bei den Verstärkerchips konnten flexibel durch eine Tuning-Linse im optischen Aufbau kompensiert werden. Im Projektverlauf wurden über 20 maßgeschneiderte FBG in spezielle Fasern mit angepassten Linsen für die Ankopplung an die Verstärkerchips an die Partner übergeben. Damit konnten Lasersysteme mit Repetitionsraten von 1 GHz und 200 MHz erfolgreich demonstriert werden.

Zur Reduzierung von (Fresnel-) Reflexionen an der Faserendfläche wurden laserinduzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS) als Antireflexschicht untersucht. In Voruntersuchungen wurden die Prozessparameter an planaren Glasproben bestimmt. Dabei wurden sowohl reine, als auch Germanium-dotierte Kieselglasproben untersucht. Mit einem Ultrakurzpulslasersystem mit 1030 nm Wellenlänge konnten LIPSS mit einer Periode von ca. 300 nm erzeugt werden – ideal für eine Reflexunterdrückung bei der Zielwellenlänge von 920 nm. Anschließend wurde der Prozess für die Erzeugung von LIPSS auf den Faserendflächen weiterentwickelt, um eine präzise und reproduzierbare Strukturierung zu ermöglichen. Auf der polarisationserhaltenden Singlemodefaser konnte die Fresnel-Reflexion um über 90% reduziert werden, bei leicht gesteigerter Transmission und gleichbleibender Strahlqualität.

## 4. Verwendung der Zuwendung

### 4.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises in diesem Teilvorhaben bilden die Personalmittel. Diese waren für die erfolgreiche Durchführung der Forschungsarbeiten unerlässlich. Der Einsatz von hochqualifiziertem wissenschaftlichen Personal war zwingend erforderlich, um die anspruchsvollen Verfahren zur Ultrakurzpulsstrukturierung von optischen Fasern zu entwickeln und zu evaluieren.

### 4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Sämtliche durchgeführten Arbeiten waren zwingend notwendig und angemessen, um die formulierten Meilensteine und Projektziele zu erreichen. Die aufgewendeten Ressourcen und Untersuchungen entsprachen den komplexen experimentellen Anforderungen der Ultrakurzpulsstrukturierung. Zudem legen die erzielten Ergebnisse eine fundierte Grundlage für die zukünftige Weiterentwicklungen und konkrete weitere Projektideen.

### 4.3. Bekannt gewordener Fortschritt

Bezogen auf dieses Teilvorhabens ist während der Laufzeit kein weiterer Fortschritt auf dem Gebiet an anderen Stellen bekannt geworden.

## 5. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse hat großes Potenzial. Im wissenschaftlichen Bereich wurde zu der entwickelten Endflächenstrukturierung bereits ein Beitrag auf einer internationalen Fachkonferenz präsentiert. Außerdem ist eine zugehörige Publikation in Planung. Für die Ergebnisse des

externen Resonators ist neben einem erfolgten Tagungsbeitrag eine gemeinsame Veröffentlichung mit den Projektpartnern geplant.

Wirtschaftlich ist ein hoher Nutzen zu erwarten: die gepulsten Halbleiterlasersysteme basierend auf den externen Resonatoren stoßen aufgrund ihrer Kompaktheit im Vergleich zu herkömmlichen System für die Anregung von Quantenpunkten zur Einzelphotonengeneration für die Quantenoptik auf sehr großes Interesse. Für die Erzeugung der FBG mittels Ultrakurzpulslasersystemen ist eine Ausgründung geplant, um eine kommerzielle Nutzung zur Verfügung zu stellen.

Die erfolgreiche Demonstration der Fresnelreflexunterdrückung durch Faserendflächenstrukturierung stößt ebenfalls auf Interesse industrieller Partner und bildet eine Grundlage für weitere Forschungsvorhaben.

## 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Getätigte Veröffentlichungen:

[1] R. G. Krämer, M. P. Siems, D. Richter, and S. Nolte, “Fresnel Reflection Reduction of Standard Single Mode Fiber End Surfaces via FS Laser Induced Surface Structuring,” in *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, Germany: IEEE, Jun. 2023, pp. 1–1. doi: [10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10231361](https://doi.org/10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10231361).

[2] M. Reibe, M. Babin, F. Wald, R. Krämer, A. Bartelmei, and E. Beckert, “Design and implementation of mode-locked external fiber-based resonator for quantum dot semiconductor laser for solid-state quantum systems,” in *Optomechanical Engineering 2025*, K. B. Doyle and B. D. Chalifoux, Eds., San Diego, United States: SPIE, Sep. 2025, p. 15. doi: [10.1117/12.3062849](https://doi.org/10.1117/12.3062849).

Veröffentlichung in Vorbereitung:

- Uni Jena: Strukturierung von Faserendflächen zur Fresnelreflexunterdrückung
- Gemeinsam mit Projektpartnern: Gepulster Halbleiterlaser mit externem Resonator für Quantenpunktanregung