

Schlussbericht für das Verbundprojekt

ZE: FiberBridge Photonics GmbH

FKZ: 13N15876

Vorhabenbezeichnung: Innovative Komponenten für Spezialfasern in industriellen Ultrakurzpulslasern (InnoSprint) – Teilvorhaben: Entwicklung von industrietauglichen und leistungsfesten Faserkomponenten für UKP-Lasersysteme

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 bis 31.07.2024

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurde mit folgenden Partnern zusammengearbeitet:

1. Laser Zentrum Hannover e. V.
2. Trumpf GmbH + Co. KG
3. TOPTICA Photonics AG

Planung und Ablauf des Vorhabens:

Die FiberBridge Photonics GmbH war an den Arbeitspaketen AP 1, 3, 6, 8 und 10 beteiligt. Das Verbundprojekt konnte über die Projektlaufzeit erfolgreich umgesetzt werden.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die FiberBridge Photonics GmbH verfügt über langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Charakterisierung von faserbasierten optischen Komponenten und Lasersystemen und den entsprechenden Fertigungsprozessen. Die FiberBridge Photonics GmbH entwickelt sich zu einem führenden europäischen Unternehmen in diesem Technologiebereich.

Ziel des Vorhabens:

Ultrakurzpuls(UKP)-Laser haben vielfältige Einsatzgebiete und werden insbesondere für die Biomedizintechnik, die Materialbearbeitung und die medizinische und industrielle Bildgebung genutzt. UKP-Faserlaser sind sowohl für die internationale als auch für die nationale Wirtschaft zu einer treibenden Technologie geworden. Die positive Entwicklung des UKP-Faserlasermarktes ist in der Realisierung von hohen Ausgangsleistungen bei hohen elektrooptischen Effizienzen, einer kompakten und robusten Bauweise und exzellenter Strahlqualität begründet.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden Kernproblematiken der faserbasierten UKP-Strahlerzeugung und des Strahltransports adressiert. Die extremen Spitzenintensitäten von UKP-Lasern stellen enorme Anforderungen an die individuellen Faserkomponenten. Insbesondere für die faseroptische Strahlführung von hochenergetischer UKP-Laserstrahlung gibt es zurzeit keine technische Lösung, die robust, verlässlich und stabil umzusetzen ist. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von hochintegrierten faseroptischen Komponenten auf Basis von Großkernfasern zur UKP-Strahlerzeugung und entsprechender laserbasierter Fertigungstechnik. Aufbauend auf der laserbasierten Fertigungstechnik werden neue Konfektionierungskonzepte von mikrostrukturierten Fasern entwickelt, welche zur faseroptischen Strahlführung von UKP-Strahlung erprobt und eingesetzt werden.

Ausführlicher Sachbericht

Im Folgenden werden ausführliche Ergebnisse aus den Arbeitspaketen (AP) 3, 6, 8 und 10 vorgestellt.

Arbeitspaket 1:

Basierend auf den Zielen des Forschungsprojektes haben die Partner FBP, LZH, TOPTICA und Trumpf nach Projektbeginn die Spezifikationen und Zielparameter abgestimmt. Die assoziierten Partner Trumpf und TOPTICA haben dabei ihre Kenntnisse bzw. Anforderungen in Bezug auf industrielle Anwendungen von UKP-Faserlasern und deren Strahlführung eingebracht. Die Partner FBP und LZH haben ihr Know-how in Bezug auf die prinzipielle und technische Umsetzung von Faserkomponenten eingebracht.

Arbeitspaket 3:

In AP3 wurden Schweißprozesse für hochintegrierte Faserkomponenten entwickelt. Der Fokus lag hier auf der Entwicklung von hochintegrierten Pumplichtkopplern für LMA-Glasfasern mit der direkten Anbindung von Faserendkappen auf möglichst kleinem Bauraum.

In Abb. 1 ist der Prozess vereinfacht dargestellt. In Schritt 1 werden mit einem präzise überwachten laserbasierten Schweißprozess die Pumpfasern an die Signalfaser angebunden. Im nächsten Schritt wird die Endkappe, die die Auskopplung von sehr hohen Laserleistungen bzw. Pulsenergien über die Faserendfläche ermöglicht, monolithisch angebunden.

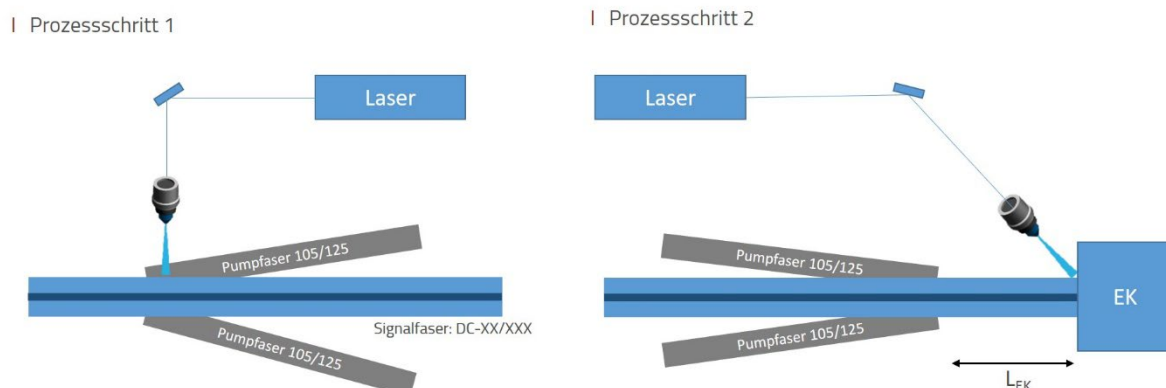
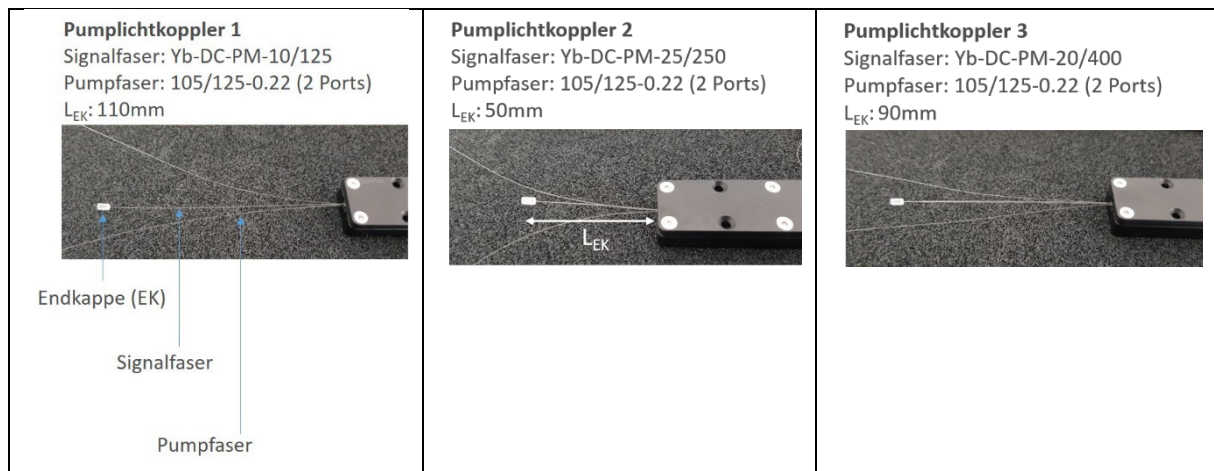


Abb. 1: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses

Basierend auf dem in Abb. 1 dargestellten Fertigungsprozess wurden Pumplichtkoppler mit 2 Pumpfasern und Signalfasern mit einem Manteldurchmesser von 125 μm , 250 μm und 400 μm gefertigt. Die verwendeten Pumplichtfasern hatten einen Kerndurchmesser von 105 μm und eine numerische Apertur von 0,22.

Beispielhaft sind einige gefertigte Pumplichtkoppler in der Abb. 2 präsentiert.

Abb. 2: Gefertigte Pumplichtkoppler mit verschiedenen Signalfasern



Die Charakterisierung der Pumplichtkoppler erfolgte grundlegend nach der schematischen Darstellung in Abb. 3. Es wurde eine vollumfängliche Charakterisierung der Pumplichtkoppler durchgeführt. Diese beinhaltete die Bestimmung der Signalverluste, der Pumplichtkoppeleffizienz, der Strahlqualität, der Polarisierung des Signallichts und der Leistungsfestigkeit hinsichtlich der Pumplichtstrahlung.

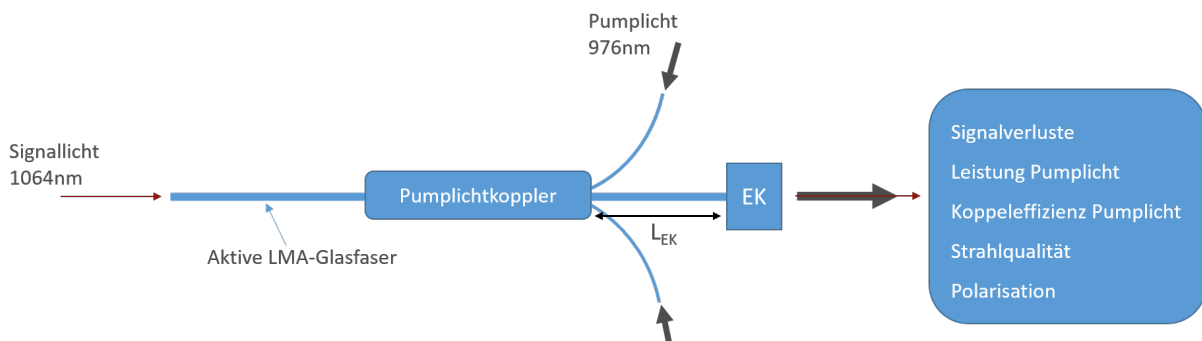


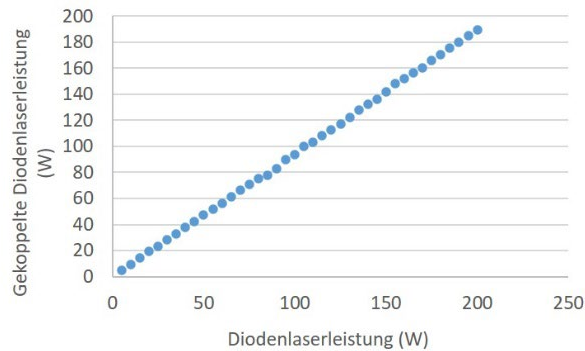
Abb. 3: Schematischer Aufbau zur Charakterisierung der Pumplichtkoppler

Für alle Pumplichtkoppler konnte eine Pumplichtkoppeleffizienz von größer als 85 % umgesetzt werden. Außerdem wurden an die Signalfasern Endkappen angebunden. Die Degradation der Strahlqualität und Polarisierung war dabei jeweils unter 10 %. Dabei wurde sichergestellt, dass die Faserstrecke L_{EK} fertigungstechnisch kleiner als 15 cm gehalten werden konnte. Die Transmissionsverluste des Signals lagen für alle untersuchten Faserkoppler unterhalb von 0,1 dB.

Die Abb. 4 und Abb. 5 zeigen ausgewählte Ergebnisse für den Pumplichtkoppler 2 (siehe Abb. 2) mit einer Signaldurchführungsfaser vom Typ Yb-DC-PM-25/250. Die Abb. 4 (links) zeigt, dass der Pumplichtkoppler mit einer Pumplichtleistung von ca. 200 W belastet werden konnte. Hier ist hervorzuheben, dass die Einkopplung des Pumplichts direkt in die aktive Glasfaser erfolgte. Die Abb. 4 (rechts) zeigt, dass eine Pumplichtkoppeleffizienz von ca. 94 % realisiert werden konnte und die Effizienz auch

bei höheren Pumpleistungen aufrechterhalten werden konnte. Dies deutet auch auf ein thermisch stabiles Pumplichtkopplerkonzept hin.

Pumplichtkoppler 2 - Pumplichtleistung



Pumplichtkoppler 2 - Pumplichtkoppel-effizienz

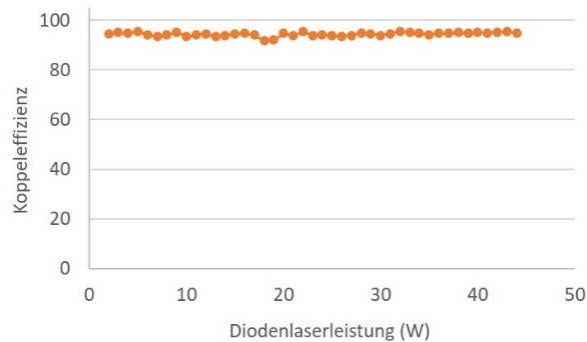
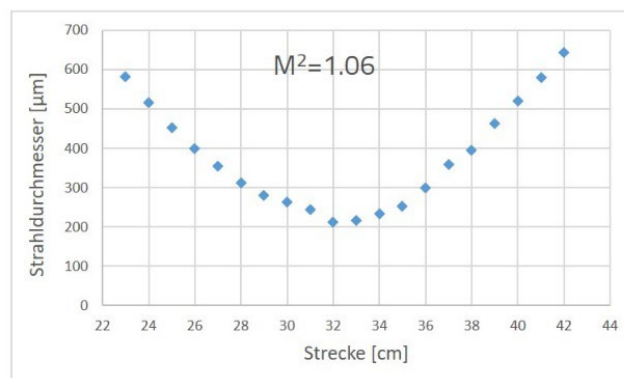


Abb. 4: Gekoppelte Pumplichtleistung und Pumplichtkoppel-effizienz für Pumplichtkoppler 2

Die entsprechende erzielte Strahlqualität für die Signallichtstrahlung vor und nach dem Fertigungsprozess des Pumplichtkopplers ist in der Abb. 5 ersichtlich. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass hinsichtlich der Strahlqualität kaum Veränderungen auftreten und die Veränderungen in der Strahlqualität signifikant unter 10 % liegen. Wie bereits erwähnt, betragen die optischen Transmissionsverluste für das Signal < 0,1 dB.

Pumplichtkoppler 2 vor der Fertigung



Pumplichtkoppler 2 nach der Fertigung

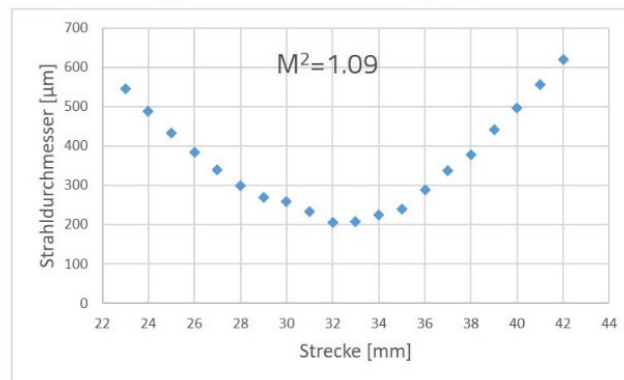
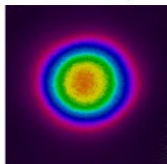


Abb. 5: Strahlqualität der Signallichtstrahlung vor und nach dem Fertigungsprozess für Pumplichtkoppler 2

Ergänzend wurde zu den bereits dargestellten Ergebnissen noch eine weitere aktive LMA-Glasfaser mit einem noch höheren Grad bzgl. der Aufbaukomplexität untersucht. Die Fasern der Firma INO vom Typ YB-MCOF-35/250 (siehe Abb. 7) haben einen extrem großen Modenfelddurchmesser und sind aufgrund ihrer komplexeren Aufbauweise fertigungstechnisch noch deutlich herausfordernder einzustufen. Trotz der erhöhten fertigungstechnischen Komplexität konnten für die Signallichttransmission der Pumplichtkoppler Transmissionsverluste von $< 0,3$ dB gezeigt werden. Diese Ergebnisse werden noch ergänzend zur Erzielung des Meilensteins 2 aufgeführt. Entsprechende Fasermodule mit den integrierten Pumplichtkopplern und Endkappen wurden an Toptica und Trumpf übergeben.

Yb-MCOF-35/250-07-2.5-PM



Strahlprofil nach Pumplichtkoppler

Yb-MCOF-35/250-05-2.0-PM

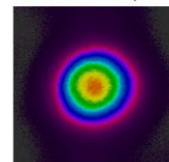


Abb. 7: Komplexe aktive Glasfaser, die zur Fertigung von Pumplichtkopplern im Projekt untersucht wurde

Weiterhin wurde in diesem Arbeitspaket ein monolithischer bidirektionaler gepumpter Faserverstärker realisiert. Das heißt, ohne eine Spleißverbindung entlang der Signalfaserstrecke (Endkappe ausgenommen). Hierfür wurde die notwendige Prozesstechnik weiterführend entwickelt. Daraus resultierend konnten im Rahmen des Projektes die passiven Glasfasern der Pumpdioden direkt an beide Seiten (Ein- und Ausgang) der aktiven Glasfaser angebunden werden. Der entsprechende schematische Prozessaufbau ist in der Abb. 8 dargestellt.

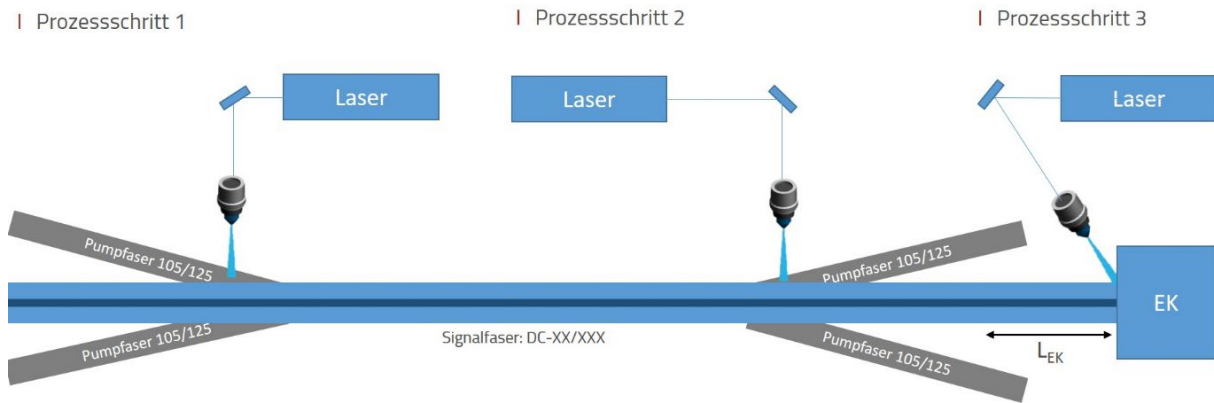


Abb. 8: Prozesstechnische Umsetzung einer erhöhten Integration der Faserkomponenten für bidirektionales Pumpen an komplexen LMA-Glasfasern

Die typischerweise notwendigen Spleißverbindungen zwischen der passiven LMA-Glasfaser der Pumplichtkoppler und aktiven LMA-Glasfaser entfallen bei dieser Konfiguration (siehe Abb. 9). Hierdurch konnte ein monolithischer Faserverstärker aufgebaut werden. Der Faserverstärker wurde bei einer Signalwellenlänge von 1064 nm betrieben. Die Pumpwellenlänge betrug 976 nm.

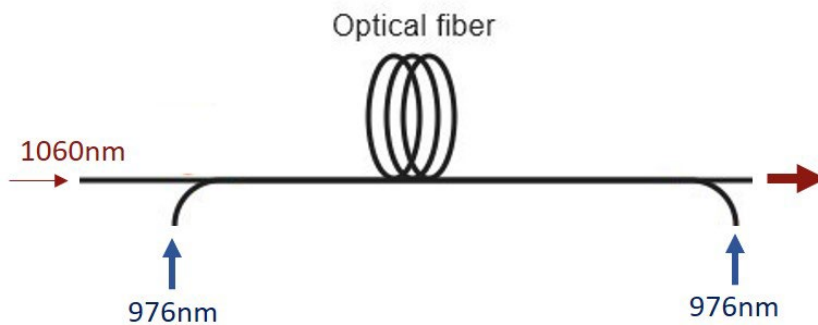


Abb. 9: Der schematische Aufbau eines beidseitig gepumpten monolithischen Faserverstärkers

Arbeitspaket 6:

In AP6 wurde das Anbinden von Endkappen an passive und aktive Photonische Kristallfasern (PCF) analysiert. Beispielhaft ist in Abb. 8 eine PCF mit dem entsprechenden Strahlprofil im Nah- und Fernfeld dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit einer PCF-Glasfaser sehr gute gaußförmige Strahlprofile erzeugt werden können.

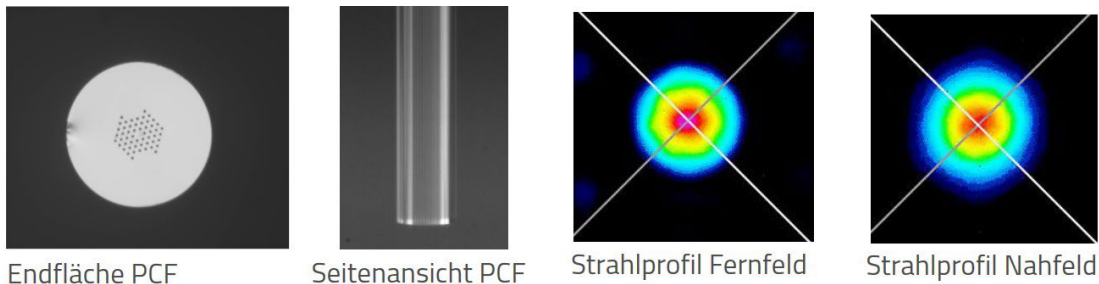


Abb. 8: Photonische Kristallfasern mit entsprechenden Strahlprofilen

Aus der Abb. 8 ist auch die typische Kapillarstruktur einer PCF zur Einstellung des Brechungsindex zwischen Kern und Mantel ersichtlich. Diese Luftstrukturen neigen jedoch bei der thermischen Bearbeitung dieser Glasfasern dazu, zu kollabieren. Die Abb. 9 zeigt erste Fügeversuche, wo genau dieses Szenario beim Fertigungsprozess eingetreten ist. Aus der Abb. 9 ist deutlich zu erkennen, dass die Kapillarstruktur der PCF beim Fügeprozess geschädigt wurde. Dies führt wiederum zu einer Schädigung der Wellenleiterstruktur. Die Strahlprofile im Nah- und Fernfeld zeigen, dass das Strahlprofil eine deutliche Verformung erfährt und folglich auch mit einer Reduzierung der Strahlqualität einhergeht.

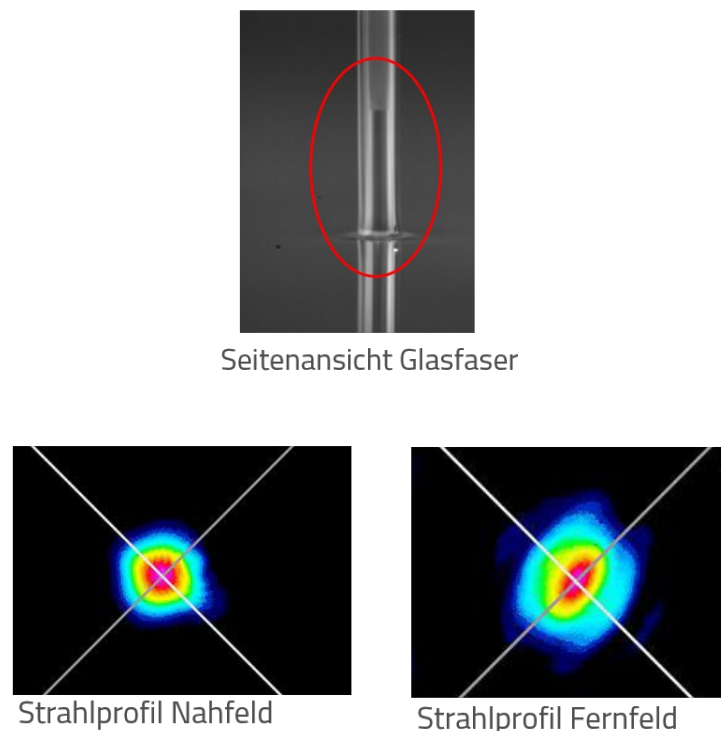


Abb. 9: Photonische Kristallfaser nach Fügeprozess an ein optisches Fenster (Endkappe)

In AP6 wurde folglich der Aufbau des Fertigungsprozesses angepasst und zahlreiche Versuchsreihen zur Erarbeitung geeigneter Prozessparameter wurden durchgeführt. In Abb. 10 ist die Optimierung des Prozesses in Bezug auf die Prozessstemperatur dargestellt. Hierfür wurden die Transmissionsverluste an der Fügestelle in Abhängigkeit von der relativen Prozessstemperatur des Fügeprozesses analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozessstemperatur in einem Bereich von etwa $\pm 30\text{ °C}$ konstant gehalten werden muss. Durch eine entsprechende Temperaturüberwachung im Millisekundenbereich konnte diese realisiert werden.

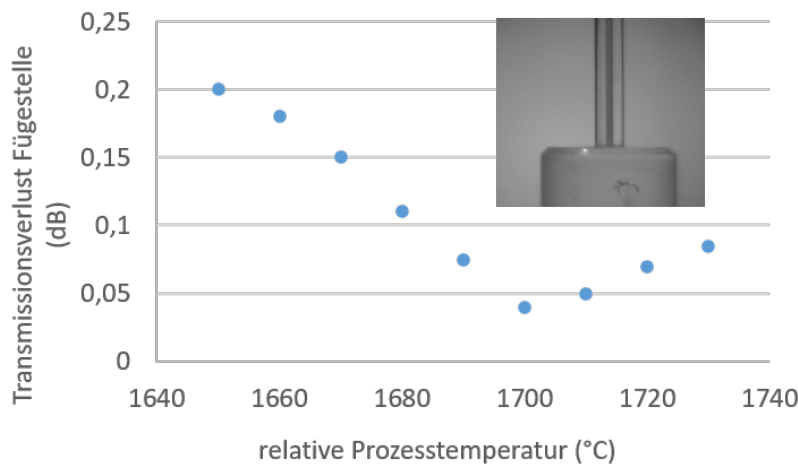


Abb. 10: Optische Transmissionsverluste an der Fügestelle in Abhängigkeit von der relativen Prozessstemperatur. Das im Graph dargestellte Bild zeigt eine gefügte Endkappe.

Des Weiteren wurde die Prozesszeit hinsichtlich der entstehenden Transmissionsverluste an der Fügestelle experimentell untersucht (Abb. 11). Hier hat sich ein optimaler Arbeitspunkt bei ca. 4700 ms ergeben. Neben den hier dargestellten Prozessparametern müssen noch viele weitere Parameter für einen erfolgreichen Prozessablauf optimiert werden.

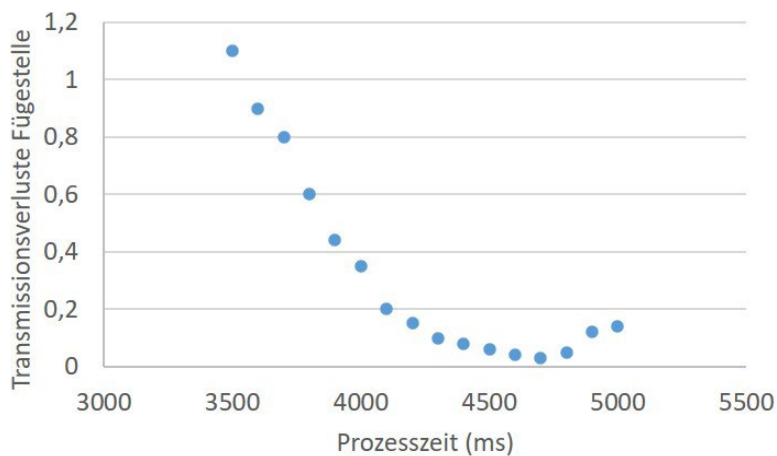


Abb. 11: Optische Transmissionsverluste an der Fügestelle in Abhängigkeit von der Prozesszeit

Unter Verwendung der herausgearbeiteten Parameter für den Fertigungsprozess können schadungsfreie Fügeverbindungen zu Endkappen realisiert werden. Die

Abb. 12 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. An der Glasfaser ist gut zu erkennen, dass die Kapillarstruktur erhalten werden konnte. Die dazugehörigen Strahlprofile zeigen im Nah- und Fernfeld im Vergleich zur un bearbeiteten PCF keine signifikanten Veränderungen. Bei der Vermessung der Transmission des Signals durch die Fugestelle und die Endkappe wurde ein Wert von $< 0,03$ dB ermittelt (Ziel $< 0,1$ dB). Hieraus lässt sich rückschließen, dass das AR-Coating der Endkappe ebenfalls keine relevanten Beschädigungen durch den Fertigungsprozess erfahren hat.

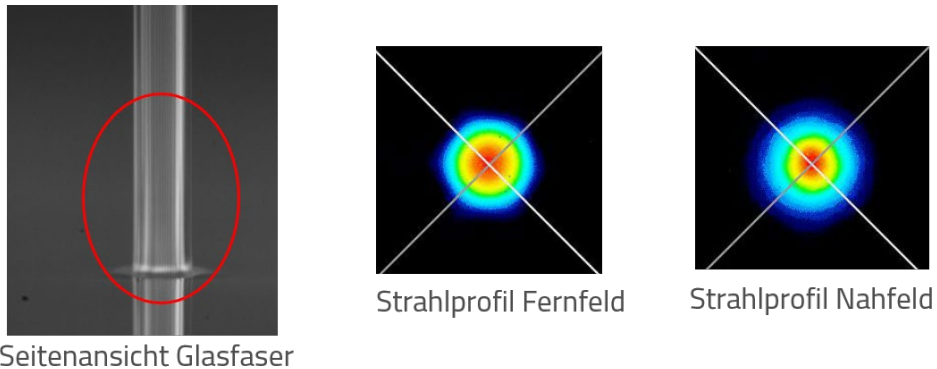


Abb. 12: Photonische Kristallfaser nach Fügeprozess an ein optisches Fenster (Endkappe)

Arbeitspaket 8:

Das Ziel in AP8 ist die Anbindung von Optiken an Hohlkernfasern. Hohlkernfasern sind aufgrund ihres Aufbaus die derzeit komplexesten am Markt verfügbaren Fasertypen – hinsichtlich der fertigungstechnischen Handhabung noch deutlich herausfordernder als PCF-Glasfasern einzustufen.

Insbesondere in AP8 erfolgte eine sehr enge Abstimmung mit dem assoziierten Partner Trumpf, um eine sehr praxisnahe Produktlösung zu erarbeiten. Grundlegend wurde ein Prozess erarbeitet, um eine modifizierte Endkappe an eine Hohlkernfaser anzubinden. Die entsprechende Prozesstechnik für den Fügeprozess wurde bei der FiberBridge Photonics GmbH entwickelt. In der Tabelle 1 sind beispielhaft einige Ergebnisse aus der Prozessentwicklung dargestellt.

Versuch Nr.	Vor Fügen Optische Leistung mW	Nach Fügen Optische Leistung mW	Transmissionsverlust dB
#30	7,67	6,5	0,72
#31	10,1	9,8	0,13
#32	10,2	9,16	0,47
#33	10	9,9	0,04
#34	5,8	4,6	1,01

Tabelle 1: Beispielhafte Ergebnisse aus der Prozessentwicklung bzgl. des Transmissionsverhaltens vor und nach dem Fügeprozess

Zur Beurteilung der Qualität des Fügeprozesses wurden unter anderem die Transmission der optischen Leistung und die Strahlqualität bestimmt. Der Aufbau zur Messung der Strahlqualität ist in der Abbildung 13 dargestellt. Die Bestimmung der Strahlqualität wurde bei einer Wellenlänge von 1064 nm durchgeführt. Die fasergekoppelte Signallichtquelle war mit einer Singlemodefaser ausgestattet. Mithilfe eines Modenfeldadapters wurde die transversale Fundamentalmode auf LMA-Glasfaser überführt. Die Faser-zu-Faser-Kopplung von der LMA-Glasfaser zur Hohlkernfaser wurde als „Butt-Kopplung“ ausgeführt.

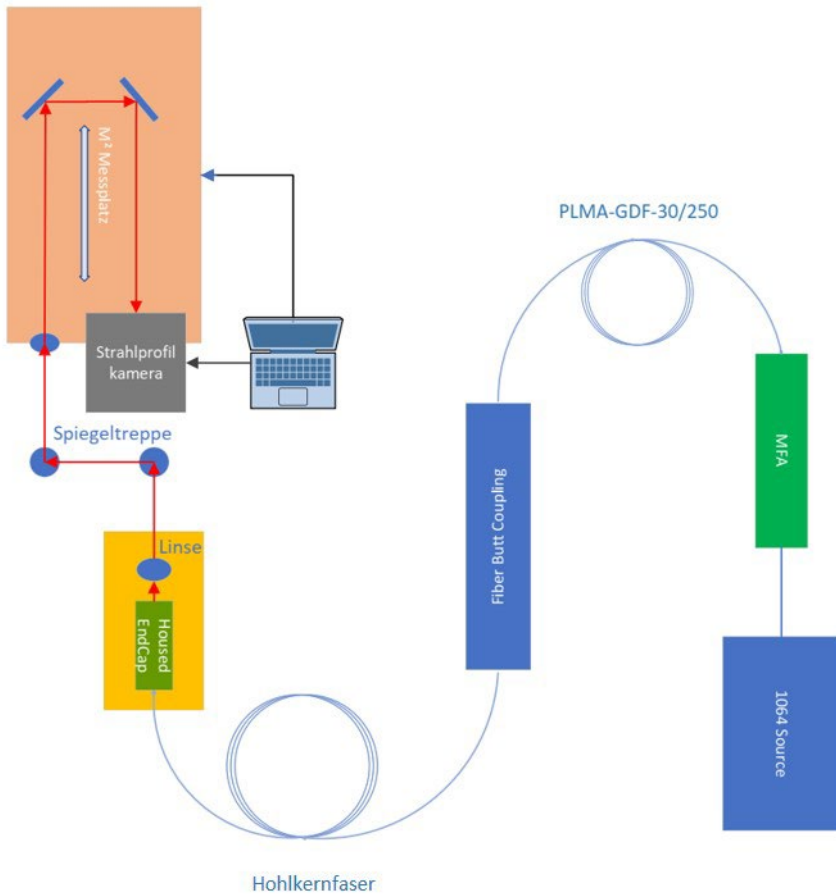


Abb. 13: Messplatz zur Bestimmung der Strahlqualität

Die Abbildung 14 zeigt das Referenzstrahlprofil (ohne Endkappe), das mit dem Messplatz 13 ermittelt wurde. Dabei betrug der M^2 -Wert in x-Richtung 1,13 und der M^2 -Wert in y-Richtung 1,14. Demnach emittiert die Hohlkernfaser unter den Versuchsbedingungen eine nahezu beugungsbegrenzten Laserstrahl.

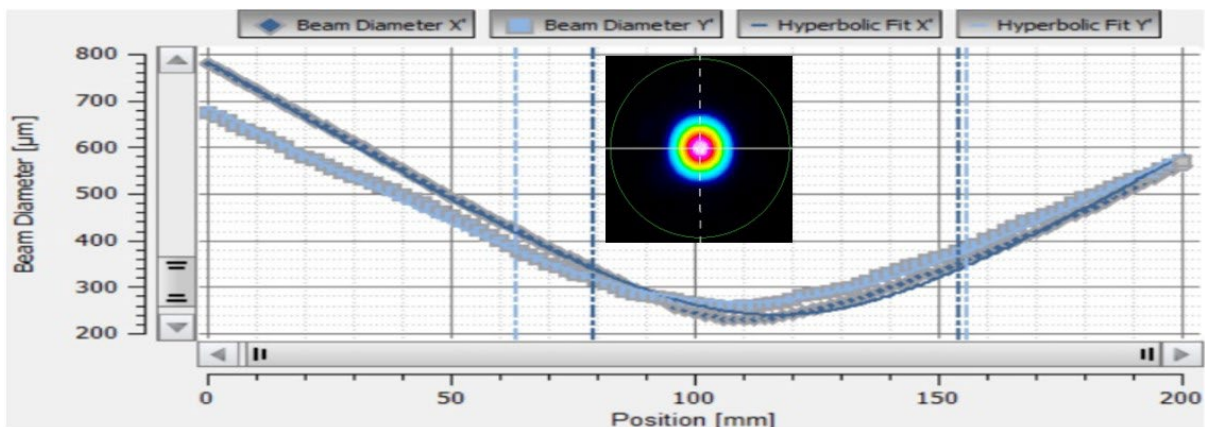


Abb. 14: Bestimmung der Strahlqualität der Hohlkernfaser (Referenzmessung)

Aus der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass im Rahmen der experimentellen Arbeiten zahlreiche Versuche hinsichtlich der Prozessentwicklung durchgeführt wurden. Hierfür musste die Prozessanlage iterativ umgebaut werden, um sich an die gewünschten Zielparameter heranzuarbeiten. Die Abbildung 15 zeigt ein Ergebnis, das trotz der

hohen Komplexität der Hohlkernfaser einen Fügeverbindung mit sehr guten optischen Eigenschaften abbildet. Dabei betrug der M^2 -Wert in x-Richtung 1,13 und der M^2 -Wert in y-Richtung 1,15. Daraus resultiert, dass die Hohlkernfaser mit Endkappe – also nach dem Fügeprozess – ebenfalls einen nahezu beugungsbegrenzten Laserstrahl emittiert.

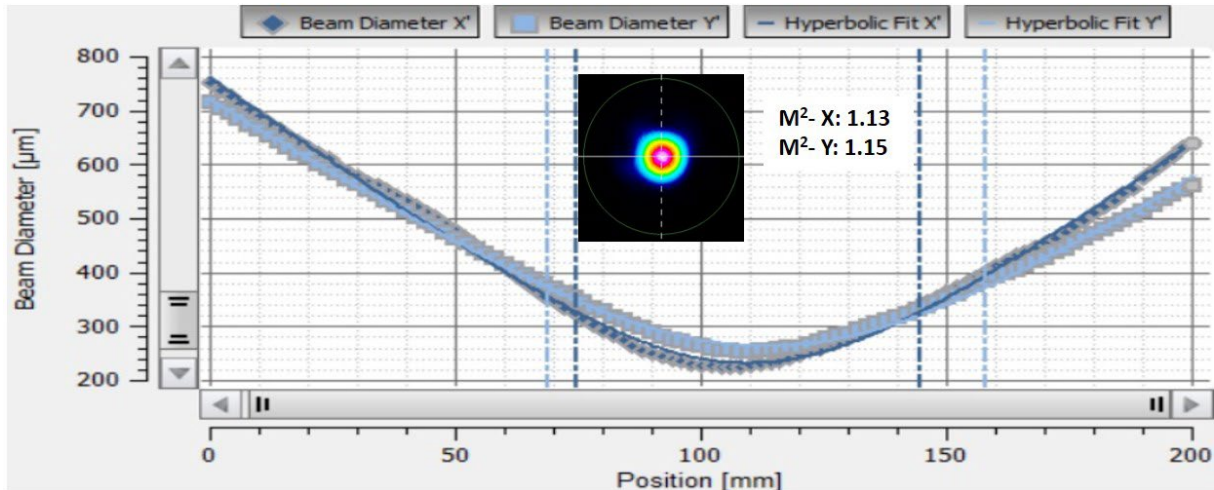


Abb. 15: Bestimmung der Strahlqualität der Hohlkernfaser mit Endkappe nach dem Fügeprozess

Neben den optischen Eigenschaften wurden auch die mechanischen Eigenschaften nach dem Fügeprozess analysiert. Die Abbildung 16 zeigt 6 Zugversuche für Endkappen mit nahezu vollständig optimierten Prozessparametern.

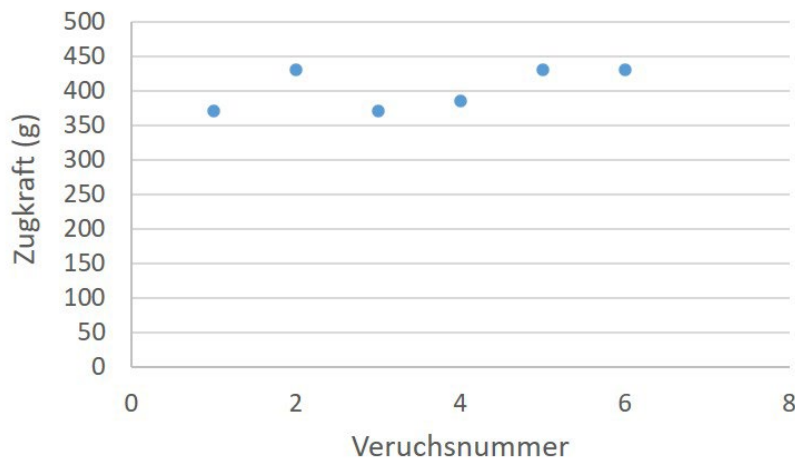


Abb. 16: Mechanische Zugfestigkeit der Fügeverbindung Hohlkernfaser – Endkappe

AP 10: Hochpräzise und echtzeitfähige Strahlqualitäts- und Polarisationsmessung für den industriellen Einsatz

Das LZH verfügt bereits über Erfahrungen, um sowohl die Strahlqualität (z. B. M^2 oder Analyse über einen Ringresonator) als auch die Polarisation mit verschiedenen Verfahren zu vermessen. Um das Ziel der hochpräzisen und echtzeitfähigen Strahlqualitäts- und Polarisationsmessung erreichen zu können, hat das LZH verschiedene Messverfahren hinsichtlich des industriellen Einsatzes untersucht. Nach Rücksprache mit FiberBridge Photonics wurde ein geeignetes Messverfahren ausgewählt und bei FiberBridge Photonics installiert.

FiberBridge Photonics hat mit dem S2-Messgerät umfangreiche Tests in der Produktion durchgeführt. Hierbei konnte insbesondere bei den Spezialglasfasern überprüft werden, ob sich während des Fertigungsprozesses die Zusammensetzung der transversalen Moden verändert. Dieses Messwerkzeug ermöglichte sehr „feine“ Analysen hinsichtlich der Veränderungen der Strahlqualität, deutlich besser als mit der konventionellen M^2 -Messmethode. Hierdurch konnten im Prozessablauf, insbesondere bei Fertigungsschritten mit thermischen oder mechanischen Beanspruchungen in den Glasfasern, sehr zielgenaue Untersuchungen durchgeführt und entsprechende Prozessschritte weiterentwickelt werden. Die Abb. 17 zeigt den vom LZH bereitgestellten S2-Messplatz an einer Prozessanlage von FiberBridge Photonics im Rahmen der Entwicklungsaktivitäten.

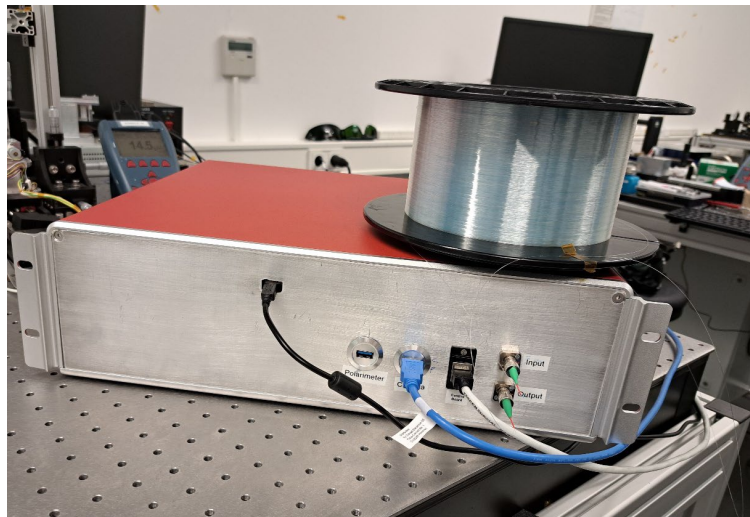


Abb. 17: Einsatz des S2 Messplatz zur Bestimmung der Strahlqualität im Rahmen von Experimenten.

Voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft

FBP kann nach Projektende die gewonnenen Erkenntnisse zur Produktion neuer faseroptischer Komponenten für Lasersysteme nutzen. So wurden schon während der Projektlaufzeit gewonnene Erkenntnisse in Bezug auf die Fertigung von Pumplichtkopplern in die Produktion unserer monolithischen Faserverstärkersysteme für Kunden im Bereich der UKP-Lasersysteme eingebunden. Diese Neuentwicklungen ermöglichen uns, die Kompaktheit der Lasersysteme weiter zu erhöhen – dies ist aufgrund der Fasernichtlinearitäten bei UKP-Lasersystemen besonders wichtig – und somit einen weiteren Wettbewerbsvorteil mit den erzielten Projektergebnissen umzusetzen. Außerdem konnten in Teilbereichen der Prozessabläufe die Reproduzierbarkeit und Qualität der Fertigungsschritte weiterentwickelt werden.

Die prognostizierte Nachfrage in Bezug auf Hochleistungsfaserkomponenten kann mit ersten vielversprechenden Kunden nach Projektende bestätigt werden.

Im Bereich der monolithischen Anbindung von Endkappen an hochintegrierte Baugruppen konnten umfangreiche Erkenntnisse, insbesondere im Bereich der Prozesstechnik, im Rahmen dieses Projektes erarbeitet werden. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag hier in der Bearbeitung von Hohlkernfasern. Diese Ergebnisse können wir voraussichtlich in diesem stark wachsenden Marktbereich kurz- bis mittelfristig gut im Rahmen der immer wiederkehrenden Kundenanfragen nutzen.

Generell konnten im Rahmen des Projektes im Bereich der Prozesstechnik zur Fertigung von hochintegrierten und monolithischen faserbasierten Modulen umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden. Diese Ergebnisse werden im Unternehmen auch in Querinnovationen eingesetzt, wie z. B. im Bereich der Quantentechnologien, der Medizintechnik sowie der Luft- und Raumfahrt.

Des Weiteren ist die positive unternehmerische Entwicklung der FiberBridge Photonics GmbH zu nennen. Der starke Fokus auf risikobehaftete Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Spitzentechnologie, unterstützt durch das Fördervorhaben InnoSprint, zeigt bereits heute die stetig wachsende Nachfrage der High-Tech-Produkte am Weltmarkt und forciert mittel- bis langfristig eine nachhaltige Unternehmensentwicklung.

Das Fördervorhaben trägt somit aufgrund seiner erfolgreichen Umsetzung mit der entsprechenden Innovationshöhe zur Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland bei.