

Skalierung der Kommunikationsinfrastruktur in vernetzten Rechenzentren mittels faseroptischem Raummultiplex

Akronym: KONFORM

Ausführlicher Bericht

Teilvorhaben: 3D-gedruckte vollintegrierbare Modenmultiplexer für faseroptisches Raummultiplexing

Förderkennzeichen: 16KIS1429K

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021 - 31.12.2024

Dieses Verbundvorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
1 AP1: Systemkonzepte und Algorithmen	7
1.1 UAP1.1: Systemkonzepte für hochintegrierte Transceiver	7
1.2 UAP1.2: Algorithmen für Transceiver mit Raummultiplexing	8
1.3 UAP1.3: Silicon Photonics Chip Design	8
2 AP2: MCF Multiplexer	11
2.1 UAP2.1: Bauteilträger und Assemblierungskonzepte für Faser und optische Chips	11
3 AP3: Multimodefaser-Multiplexer	13
3.1 UAP3.1: Konzeption eines Mehrfaser-Multimodesteckverbinders	13
3.2 UAP3.2: Multiplexer Design und Simulation	14
3.3 UAP3.3: Optimierung des Multiplexer Designs mit Hilfe numerischer Simulationen	16
3.4 UAP3.4: 3D-Druck und experimentelle Charakterisierung	20
5 AP5: Demonstratoren	27
5.1 UAP5.1: Erstellung eines Konzepts für den Demonstrator	27
5.2 UAP5.2: Realisierung des Demonstrators mit hochkapazitiver Datenübertragung	28
7 Verwertung der Vorhabenergebnisse	33
7.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	33
7.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	33
7.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	33
7.4 Akademische Nachwuchsforschung	34
7.5 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften	35
7.6 Konferenzbeiträge	35
Abkürzungen	37
Literatur	39

Einleitung

In dem vorliegenden Bericht werden die Arbeiten des Instituts für Photonik und Quantenelektronik des Karlsruher Instituts für Technologie im Rahmen des Verbundvorhabens „Skalierung der Kommunikationsinfrastruktur in vernetzten Rechenzentren mittels faseroptischem Raummultiplex“ (KONFORM) dargestellt. Das IPQ bearbeitete dabei das Teilvorhaben „3D-gedruckte, vollintegrierbare Modenmultiplexer für faseroptisches Raummultiplexing“, dessen Inhalte im Folgenden ausführlich beschrieben und den in der Vorhabenbeschreibung definierten Zielen gegenübergestellt werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit erfolgt die Gliederung entlang der in der Vorhabenbeschreibung festgelegten Arbeitspakete (AP) und Unterarbeitspakete (UAP).

An dem Verbundvorhaben KONFORM waren die folgenden Partner beteiligt:

Name	Kürzel	Kontakt
Karlsruher Institut für Technologie Institut für Photonik und Quantenelektronik Engesserstr. 5 76131 Karlsruhe	KIT	Prof. Dr.-Ing. Sebastian Randel
Vanguard Automation GmbH Gablonzer Str. 10 76185 Karlsruhe	VA	Dr. Philipp-Immanuel Dietrich
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG Hauptstr. 1 83413 Fridolfing	ROS	Dr.-Ing. Alexandra Henniger-Ludwig

1 AP1: Systemkonzepte und Algorithmen

1.1 UAP1.1: Systemkonzepte für hochintegrierte Transceiver

Im Rahmen dieses UAPs wurden Systemkonzepte für hochintegrierte Transceiver für Datenzentren untersucht, die den steigenden Bedarf an Bandbreite und Integrationsdichte bewältigen können. Ein wichtiger Ansatz hierfür ist die Verwendung von Co-Packaged Optics (CPO), bei der die optischen Verbindungen direkt an das gemeinsame Package der photonischen Komponenten und elektronischen Chips angebunden werden. Die Verwendung von CPO minimiert elektrische Verluste, ermöglicht eine energieeffiziente Datenübertragung und reduziert die Latenz. Zudem kann aufgrund der kürzeren elektrischen Verbindungen die digitale Signalverarbeitungskette vereinfacht werden. Folglich besticht CPO durch die Kombination von hoher Übertragungsgeschwindigkeit, niedrigem Energiebedarf und geringer Latenz, was insbesondere auch für moderne KI-Supercomputernetze von Bedeutung ist.

Eine zentrale Herausforderung bei der Entwicklung von CPO-Systemen ist die Integration von optischen Verbindungen mit hoher Dichte. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, wurden verschiedene Architekturen für optische Transceiver untersucht, die sowohl Wellenlängenmultiplex (WDM) als auch Raummultiplex (SDM) verwenden. Die Bandbreite kommerziell verfügbarer Makrostrukturmultiplexer wie Fan-in/Fan-outs (FIFOs) für Multikernfasern (MCFs), Photonic Lanterns (PLs) oder Lösungen auf Basis der Multi-Plane Light Conversion (MPLC) ist ausreichend, um das komplette C-Band abzudecken. Da die in KONFORM erforschten Mikrostruktur-Multiplexer auf den gleichen Ansätzen basieren, wurde keine Multiplexer-inhärente Wellenlängenabhängigkeit erwartet. Demzufolge wurde die Kombination von WDM und SDM auf konzeptioneller Ebene als unkritisch eingestuft. Eine nähere Betrachtung der Bandbreite der Mikrostruktur-Modenmultiplexer, welche diese Einschätzung bestätigt, ist in Abschnitt 3.3 zu finden.

Eine weitere entscheidende Komponente für hochintegrierte Transceiver sind die Fasern für die optische Datenübertragung. Hier wurden MCF und Fewmodefaser (FMF) untersucht und miteinander verglichen. Bislang wird für die kurzen Verbindungsstrecken innerhalb von Datenzentren aufgrund der geringeren Systemkomplexität und -kosten zumeist auf die optische Informationsübertragung mithilfe von Intensitätsmodulation und Direktempfang (IM/DD) gesetzt. Dabei ist jegliches Übersprechen zwischen den parallelen Übertragungskanälen so weit wie möglich zu vermeiden, da die andernfalls erforderliche Entzerrung Amplituden- und Phaseninformationen in jedem Kanal voraussetzen würde. Folglich ermöglichen konventionelle MCFs aufgrund der starken Isolation der parallelen räumlichen Kanälen eine höhere Integrationsdichte in IM/DD-Systemen. Allerdings muss der Abstand zwischen den Kernen der MCF hinreichend groß sein, da sonst eine Kopplung der Modenfelder und folglich Übersprechen beobachtet werden kann. Infolge des enorm steigenden Bandbreitenbedarfs bei der Kommunikation innerhalb von Datenzentren wird erwartet, dass zukünftig auch in Datenzentren kohärente Übertragungssysteme Anwendung finden. In solchen Systemen sind auf Empfängerseite sowohl die Amplitude- als auch die Phase des informationstragen-

den Signals bekannt und das Übersprechen der parallelen räumlichen Kanäle kann folglich mithilfe geeigneter Entzerrerstrukturen mitigiert werden. Dann können etwa gekoppelte MCF eingesetzt werden, welche einen geringen Kernabstand aufweisen und bis zu 19 Kerne in dem üblichen Fasermanteldurchmesser von 125 µm vereinen [1]. Alternativ können FMFs bzw. Multimodefasern (MMFs) eine nochmals höhere Dichte an räumlichen Kanälen bieten - sofern sie in gezielt optimierten Faserarrays mit geringem Pitch integriert werden. Mit der zunehmenden Verbreitung kohärenter Übertragungssysteme in immer kürzeren Übertragungstrecken, werden künftig auch MMFs aufgrund ihrer enormen Kanaldichte für die optische Anbindung hochintegrierter Transceiver attraktiv.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Kombination von WDM und SDM ein vielversprechender Ansatz für optische Verbindungen mit hoher Dichte ist. Die Entwicklung von Fasern mit höherer Integrationsdichte ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer weiteren Steigerung der Datenübertragungsraten.

Dementsprechend wurde der Meilenstein 1.2 „Dokumentation zum Vergleich von unterschiedlichen Systemarchitekturen erstellt“ erreicht.

1.2 UAP1.2: Algorithmen für Transceiver mit Raummultiplexing

Gemäß der Vorhabenbeschreibung umfasste dieses UAP die Untersuchung von digitalen Signalverarbeitungsalgorithmen für Transceiver mit Raummultiplexing. Im Laufe der Arbeiten an KONFORM stellte sich jedoch eine Synergie mit dem parallel laufenden Projekt „Skalierbare TerminalARchitekturen und -subsysteme für FAseroptisches RaummultipLexing“ (STARFALL) heraus, an dem das KIT ebenfalls beteiligt war. Insbesondere die Arbeitsgruppe von Laurent Schmalen untersuchte im Rahmen von STARFALL Aspekte des Raummultiplex, die thematisch eng mit den vorgesehenen Arbeiten verbunden waren. Um Redundanz zu vermeiden und die verfügbaren Ressourcen effizient zu nutzen, wurde im Oktober 2022 ein Antrag auf Mittelumwidmung gestellt, der im März 2023 genehmigt wurde. Als Konsequenz wurden in Abstimmung mit dem Projektträger der Meilenstein 1.3 in „Messaufbau zur Modenfeldcharakterisierung auf Basis der digitalen Holographie finalisiert“ umbenannt und drei Personenmonate aus UAP1.2 in Sachmittel für die Realisierung dieses Messaufbaus umgewidmet. Die digitale Holographie ist ein interferometrisches Verfahren, das die Amplituden- und Phasenverteilung einer Wellenfront präzise erfasst und somit die Charakterisierung von SDM-Multiplexern hinsichtlich Übersprechen und modenabhängiger Dämpfung ermöglicht. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens und des Aufbaus findet sich in Abschnitt 3.4.

1.3 UAP1.3: Silicon Photonics Chip Design

Dieser Teil des AP1 war dem Entwurf eines Testchips auf einer Siliziumphotonikplattform gewidmet. Zu Beginn des Projekts wurden die spezifischen Anforderungen an den Silicon-Photonics-Testchip gemeinsam mit den Projektpartnern definiert und abgestimmt. Gemäß der Vorhabenbeschreibung war ursprünglich vorgesehen, den Chip als Teil eines Multi-Project Wafer Runs (MPW-Runs) im iSiPP50G-Prozess bei imec zu fertigen. Frühzeitig im Projektverlauf wurde jedoch eine alternative Foundry als präferierter Fertigungspartner

ausgewählt. Ausschlaggebend für diesen Wechsel waren sowohl wirtschaftliche als auch technologische Überlegungen: Einerseits ermöglichten die geringeren Herstellungskosten die Fabrikation zusätzlicher Chips, was zusätzliche Optimierungsiterationen für die Multiplexerdesigns innerhalb der Projektlaufzeit zulässt; andererseits bot der Fertigungsprozess eine höhere technologische Flexibilität, insbesondere hinsichtlich der Realisierbarkeit von Wellenleiterstrukturen, die bis an die Chipkante reichen. Die reduzierten Kosten hätten die Herstellung von über 50 Testchips erlaubt, sodass auch statistisch belastbare Aussagen zur Performanz des Gesamtsystems - bestehend aus Testchip, Multiplexer und Photonic Wirebonds (PWBs) zur Anbindung konventioneller Faserarrays - getroffen werden konnten.

Auf Basis der abgestimmten Anforderungen wurde ein entsprechendes Chipdesign erarbeitet, das primär aus geradlinigen, planaren Wellenleitern besteht und in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt ist. Die Umsetzung erfolgte mithilfe der Open-Source-Software GDSHelpers [2]. Auf proprietäre Komponenten aus dem Process Design Kit (PDK) der Foundry konnte vollständig verzichtet werden, da ausschließlich Wellenleiter und Edge-Coupler (Taperstrukturen) zum Einsatz kamen. Die zentralen Strukturen des Designs lassen sich wie folgt gliedern:

- **Durchgangswellenleiter** zur Evaluierung der Steckverbinderfunktionalität für Multikernfasern im Rahmen von AP4. In Abbildung 1.1 ist links ein großer Block solcher Wellenleiter zu erkennen, der die Anbindung eines Faserarrays mit 250 μm Pitch ermöglicht. Die Auslegung der Wellenleiter berücksichtigt das Teilvorhaben von ROS und erlaubt die Kopplung von Singlemode-, Vierkern- sowie Siebenkernfaserarrays. Weitere Durchgangswellenleiter auf der rechten Seite des Designs sind für die Verwendung mit einem Singlemodefaserarray mit 82 μm Pitch ausgelegt. So können auch herkömmliche Singlemodestrukturen mit hoher Packdichte untersucht und mit den zuvor genannten Raummultiplexansätzen hinsichtlich Integrationsdichte und Kosteneffizienz verglichen werden.
- **Loopbacks** zur Charakterisierung der Performance benachbarter Faser(kern)-Chip-Interfaces. Die in Abbildung 1.1 rechts sichtbaren Arrays ermöglichen die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Schnittstellen. Zusätzlich dienen die unterschiedlich langen Loopbacks im oberen mittleren Bereich der Schätzung der Ausbreitungsverluste auf dem Chip. Für das Singlemodefaserarray mit 82 μm Pitch wurden vier weitere dedizierte Loopbacks integriert.
- Zwei **Fanouts** mit jeweils bis zu sieben Kanälen bilden die chipseitige Anbindung der Mikrostrukturmultiplexer. Bei geeigneter Auslegung der Multiplexer können diese Fanouts sowohl mit MMFs bzw. FMFs als auch mit MCFs verwendet werden.

Im Verlauf des Jahres 2022 kam es bei der Partnerfoundry zu mehrfachen Verzögerungen des geplanten Multi-Project Wafer Runs (MPW-Runs), bis der Kontakt Anfang 2023 vollständig abbrach. Als Reaktion darauf wurde die Advanced Micro Foundry (AMF) in Singapur als neuer Fertigungspartner identifiziert. Aufgrund abweichender Designregeln und Prozessparameter erforderte der Wechsel eine vollständige Neuanpassung des Chipdesigns. Da die verfügbare Fläche etwa dreimal so groß war wie im ursprünglichen Design, konnten drei separate Designblöcke effizient auf dem Chip platziert werden. Diese sind in Abbildung 1.2 dargestellt, durch tiefe Ätzstrukturen räumlich getrennt und konnten nach der Fertigung mithilfe einer Wafersäge in eigenständige Teilchips vereinzelt werden. Das Vorgehen ermöglichte die Integration zusätzlicher Teststrukturen, insbesondere für Faserarrays mit 127 μm

AP1: Systemkonzepte und Algorithmen

Pitch. Auch das AMF-Design basierte ausschließlich auf Wellenleitern und Edge-Couplern und wurde erneut mit GDSHelpers umgesetzt.

Der finale Auftrag des überarbeiteten Designs wurde im Mai 2023 erteilt. Die Auslieferung der gefertigten Chips durch AMF im Oktober 2023 entsprach dem im Sachbericht 2022 prognostizierten Zeitplan. Erste Untersuchungen gegen Ende des Jahres 2023 bestätigten die Funktionalität der Chips.

Damit wurden die Arbeiten im Rahmen des UAP1.3 erfolgreich abgeschlossen und der Meilenstein 1.1 „Design & Fertigung Testchip abgeschlossen“ erreicht.

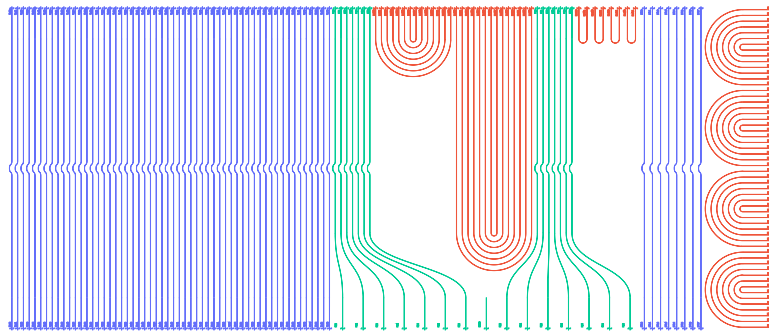


Abbildung 1.1: Kolorierte und vereinfachte Darstellung des initialen Chip-Layouts: Unterschieden wird in Durchgangswellenleiter, Loopbacks und Fanouts.

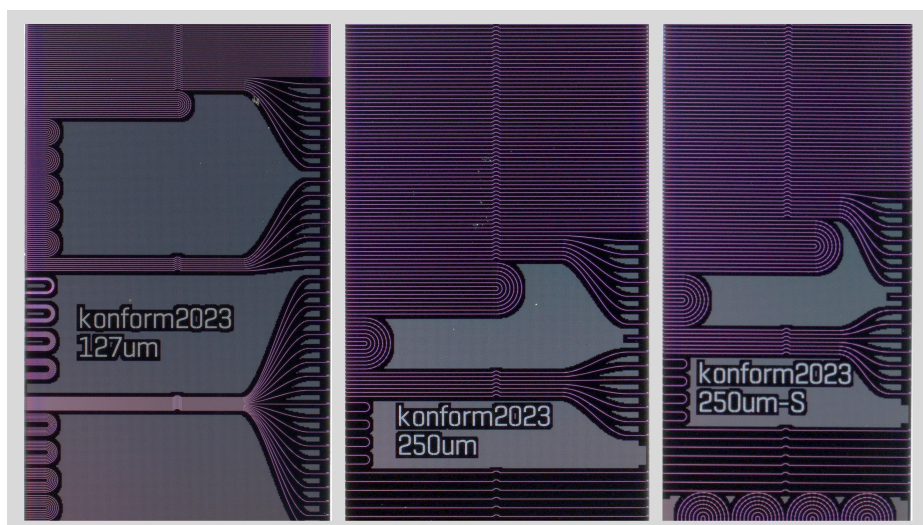


Abbildung 1.2: Mikroskopaufnahmen der drei Blöcke des Chipdesigns:

„konform2023-127um“ ist für die Anbindung an Faserarrays mit 127 μm Pitch ausgelegt und stellt Strukturen für die Untersuchung des Übersprechens zwischen benachbarten Wellenleitern bereit.

„konform2023-250um“ entspricht funktionell dem initialen Design.

„konform2023-250um-S“ unterscheidet sich von „konform2023-250um“ lediglich durch eine breitere Ätzung, welche die Anbindung an Faserarrays mit PWBs vereinfachen soll.

2 AP2: MCF Multiplexer

2.1 UAP2.1: Bauteilträger und Assemblierungskonzepte für Faser und optische Chips

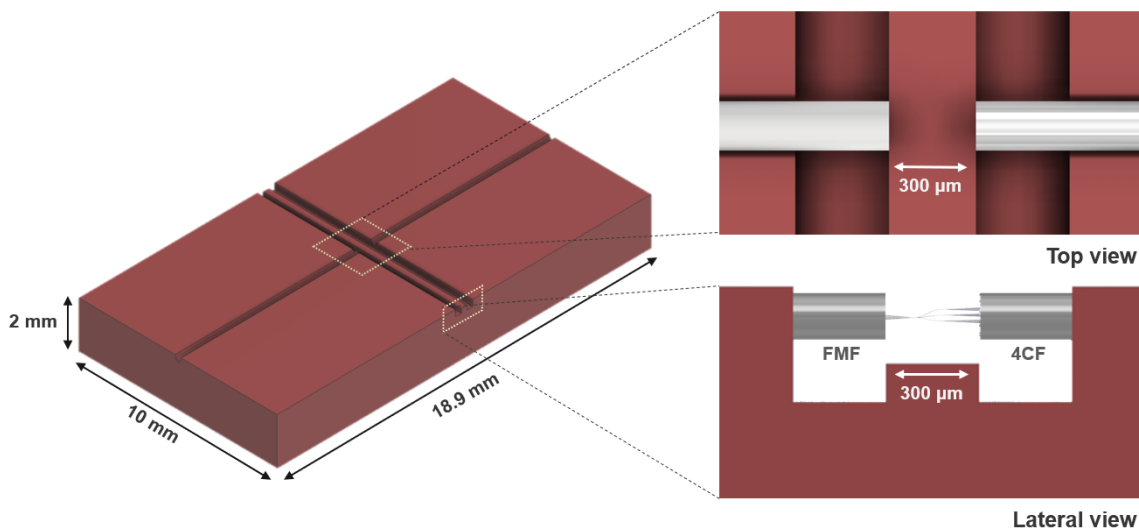


Abbildung 2.1: Das Design eines Bauteilträgers, welcher für die Multiplexerfertigung zwischen Multikern- (4CF) und Few-Mode-Fasern (FMF) verwendet werden kann.

Am KIT wurden neuartige Bauteilträger zur Fertigung der Multiplexer zwischen MCFs und FMFs entworfen und in der institutseigenen Werkstatt hergestellt. Für die Herstellung dieser Multiplexer kommt im Rahmen von KONFORM stets das SONATA 1000 System von VA zum Einsatz. Das zugehörige Lithographiesystem bietet ein Schreibfeld von $380\ \mu\text{m} \times 320\ \mu\text{m}$, weshalb ein maximaler Faserabstand von etwa $300\ \mu\text{m}$ erforderlich ist, um ausreichend Bildinformationen für die Detektion der Faserkerne bereitzustellen. Diese Anforderung wurde in den Bauteilträgerdesigns berücksichtigt. Abbildung 2.1 zeigt eines der zugehörigen mechanischen Designs.

Die Assemblierung der Fasern erfolgte in einem manuellen Verfahren: Zunächst wurden beide Fasern von Hand in die dafür vorgesehenen Kerben des Trägers eingelegt. Anschließend wurde unter dem Mikroskop der Abstand der Faserenden justiert. Als Referenz diente dabei die etwa $300\ \mu\text{m}$ breite Erhebung, die in der Seitenansicht des Bauteilträgers in Abbildung 2.1 sichtbar ist.

Für die Herstellung der Bauteilträger wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Zum einen der Einsatz metallischer Träger, gefertigt mit den hochpräzisen Computerized Numerical Control Fräsen (CNC-Fräsen) der Werkstatt des IPQ; zum anderen die Nutzung von Stereolithografie. Letztere erfordert zwar eine gezielte Vorkompensation des während der

AP2: MCF Multiplexer

Nachverarbeitung auftretenden Schrumpfs, bietet jedoch den Vorteil einer reflexionsfreien Struktur. Dies ist insbesondere für die optische Erkennung der Faserkerne von Bedeutung, da Reflexionen die Detektion deutlich erschweren können.

Die im Zuge von Entwurf und Fertigung gewonnenen Erkenntnisse wurden auch bei der Konzeption von Bauteilträgern für Faser-zu-Chip-Assemblierungskonzepte berücksichtigt, wie sie für die MCF-Multiplexer benötigt werden. Die Gestaltung dieser Träger erfolgte zu Beginn des Jahres 2024 in enger Abstimmung mit den Projektpartnern und wurde gezielt auf die Geometrie der photonischen Testchips aus Abschnitt 1.3 zugeschnitten.

3 AP3: Multimodefaser-Multiplexer

3.1 UAP3.1: Konzeption eines Mehrfaser-Multimodesteckverbinders

Mithilfe numerischer Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Herstellung von Mehrfaser-Multimodesteckverbindern gegenüber klassischen Mehrfaser-Singlemodesteckverbindern keine signifikant höheren Anforderungen stellt. Vielmehr deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Anforderungen an die Faserausrichtung bei FMFs im Vergleich zu Singlemodefasern (SMFs) – unter Inkaufnahme eines erhöhten Übersprechens – sogar geringer ausfallen können. Abbildung 3.1 zeigt die Simulationsergebnisse für einen lateralen Ausrichtungsfehler zweier Fasern. Aufgrund der Rotationssymmetrie der FMFs sind keine zusätzlichen Anforderungen an die Winkelorientierung notwendig. Somit lassen sich bei der Fertigung von Mehrfaser-MMF- bzw. Mehrfaser-FMF-Steckverbindern weitgehend die gleichen Verfahren anwenden wie bei konventionellen Steckverbindertypen.

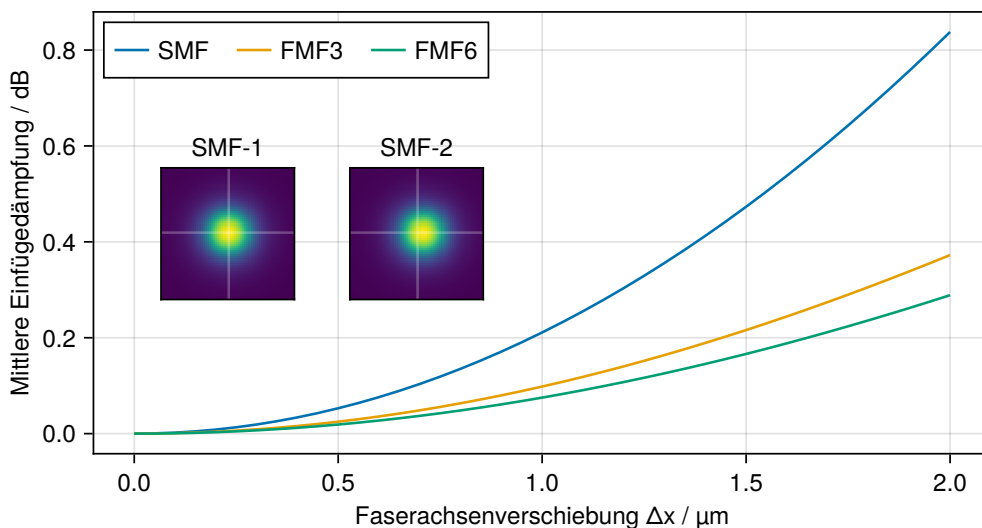


Abbildung 3.1: Numerische Untersuchung des Einflusses eines lateralen Ausrichtungsfehlers der Faserachsen auf die Einfügedämpfung einer SMF sowie zweier FMFs, die jeweils 3 bzw. 6 Moden führen. Die Heatmap-Plots zeigen exemplarisch die Realteile des nicht-vershobenen und des um 1 μm in horizontaler Richtung verschobenen Modenfelds einer SMF.

Da sich die Arbeiten am Holographie-Setup zur Charakterisierung und Optimierung des Multiplexerdesigns als deutlich aufwändiger herausstellten als ursprünglich im Antrag zur Mittelumwidmung veranschlagt, wurde auf Grundlage der oben beschriebenen Ergebnisse

zum Multimodesteckverbinder eine Anpassung der Mittelverwendung beantragt. Konkret wurde in Abstimmung mit dem Projektträger ein Personenmonat vom UAP3.1 in das UAP3.3 verschoben.

Der Meilenstein 3.1 „Konzept für einen Mehrfaser-Multimodesteckverbinder entworfen“ wurde damit erreicht.

3.2 UAP3.2: Multiplexer Design und Simulation

Im Rahmen des Vorhabens KONFORM wurden Architekturen für 3D-gedruckte Mikrostrukturmodenmultiplexer konzipiert, die mehrere räumliche Kanäle in die Moden von MMFs bzw. FMFs einkoppeln. Als vielversprechende Ansätze haben sich hierbei die MPLC und die PL herauskristallisiert.

Die MPLC basiert auf der Erkenntnis, dass jede räumliche unitäre Transformation zwischen zwei Modenbasen durch eine Abfolge von Phasenmasken realisierbar ist, die durch optische Fouriertransformationen getrennt sind. Prinzipiell erlaubt dieser Ansatz die Transformation beliebig großer Modenbasen und ist somit theoretisch unbegrenzt skalierbar. In der Praxis schränken jedoch die begrenzte Anzahl an Masken sowie deren geometrische Ausmaße und Auflösung die erreichbaren Transformationen ein. Auftretende Verluste sind dabei auf die verwendeten optischen Komponenten zurückzuführen, nicht auf die Transformation selbst. Zudem lässt sich durch Umkehrung der Strahlrichtung die inverse Transformation realisieren, sodass Multiplexer und Demultiplexer identisch aufgebaut sind [3].

Zur Bewertung der Eignung für eine Umsetzung auf Mikrostrukturebene wurden zunächst Algorithmen analysiert, die für eine vorgegebene Transformation die erforderlichen Phasenprofile berechnen. Dabei erwies sich der in [4] vorgestellte Algorithmus als besonders geeignet. Allerdings begrenzt die Druckauflösung der Zwei-Photonen-Lithographie (engl. „Two-photon lithography“) (TPL) die Umsetzung auf wenige 100 nm, wodurch fein strukturierte Phasenprofile nicht beliebig genau realisierbar sind. Zusätzlich limitiert die mechanische Stabilität die maximal zulässigen Phasensprünge zwischen benachbarten Pixeln. Daher wurden algorithmische Erweiterungen des Verfahrens aus [4] erarbeitet, um diese fertigungsbedingten Randbedingungen zu berücksichtigen. Trotz dieser Anpassungen wiesen die resultierenden Phasenmasken weiterhin große Gradienten auf, was eine hinreichende mechanische Stabilität bei exklusiver Verwendung von TPL nicht gewährleistete.

Infolgedessen wurde der alternative Ansatz der PL näher untersucht und als vorrangige Lösung weiterverfolgt. Diese Multiplexer basieren auf der graduellen Zusammenführung mehrerer SMFs, die schließlich in eine gemeinsame FMF überführt werden [5]. Zunächst wurde geprüft, inwiefern sich eine vergleichbare Lösung auf Mikrostrukturebene übertragen lässt. Hierbei würden mehrere PWBs mit kreisförmigem Querschnitt, die jeweils nur die Fundamentalmoden unterstützen, sukzessive zu einem größeren, mehrmodigen PWB zusammengeführt werden.

In einem ersten Schritt wurde die Geometrie der Zielstruktur detailliert analysiert. Ursprünglich war vorgesehen, dass der Mikrostrukturmodenmultiplexer direkt an die parallel geführten Wellenleiter des in Abschnitt 1.3 beschriebenen Testchips anschließt. Die lineare Anordnung der on-chip Wellenleiter bedingt jedoch, dass die Anzahl der Moden bzw. Kanäle direkt die transversale Ausdehnung des Multiplexers bestimmt. Während ein Drei-Moden-Multiplexer etwa 60 µm breit ist, überschreitet eine Variante für sechs Moden bereits 100 µm. Für eine

adiabatische Konversion ist jedoch ein großes Längen-Breiten-Verhältnis erforderlich, was bei wachsender Kanalzahl schnell zu Strukturen führt, die das größer als das Schreibfeld der SONATA 1000 von $380\ \mu\text{m} \times 320\ \mu\text{m}$ sind. Aufgrund dieser mangelnden Skalierbarkeit wurde das Multiplexerkonzept auf eine Kopplung zwischen MCF und FMF umgestellt. Durch die zweidimensionale Anordnung der MCF-Kerne verringert sich der maximale Abstand der Kanäle signifikant, was eine kompaktere Gestaltung des Multiplexers ermöglicht. Für die von VA eingesetzte Siebenkernfaser ergibt sich beispielsweise ein maximaler Kernabstand von etwa $70\ \mu\text{m}$, der ein hinreichendes Längen-Breiten-Verhältnis von ca. 5:1 zulässt. In Kombination mit dem von VA vorgesehenen Multikern-Chip-Interface bildet das Interface zwischen MCF und FMF die initial vorgesehene Fanout-Struktur.

Ein erster Entwurf eines adiabatischen Mikrostrukturmultiplexers ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Dieser Multiplexer konvertiert die Moden LP_{01} , LP_{11a} und LP_{11b} einer schwach führenden dreimodigen FMF in drei der vier einmodigen Kerne einer Vierkernfaser (4CF) mit $50\ \mu\text{m}$ Kernabstand. Das vollständige Multiplexer-Subsystem, das sich aus FMF, Multiplexer und MCF zusammensetzt, ist in Abbildung 3.3 abgebildet.

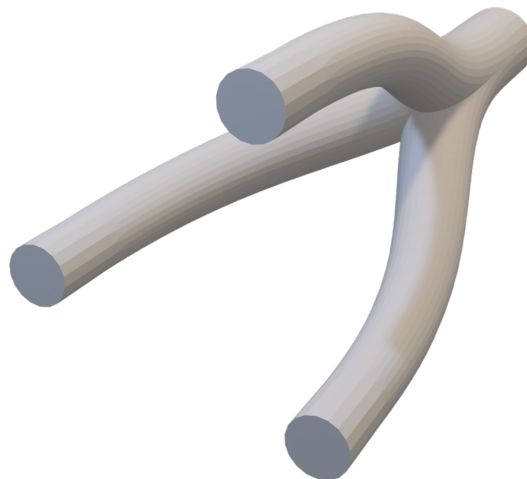


Abbildung 3.2: Initialer Entwurf eines adiabatischen Mikrostrukturmultiplexers, der zwischen einer Stufenindexfaser mit drei Moden und einer 4CF konvertiert.

Für die numerische Simulation des Multiplexers kam Ansys Lumerical zum Einsatz, das eine Vielzahl an Werkzeugen zur Modellierung photonischer Strukturen bereitstellt. Da adiabatische Multiplexer eine deutlich größere Länge als Breite oder Höhe aufweisen, ist eine direkte Simulation mit der Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD) aufgrund des hohen Rechenaufwands nur bedingt praktikabel - insbesondere wenn Parameteroptimierungen durchgeführt werden. Stattdessen wurde das graduelle Zulaufen in Ausbreitungsrichtung ausgenutzt, um die numerisch effizientere Eigenmode-Expansion (EME) anzuwenden [6].

Hierbei wird die Struktur entlang der optischen Achse in Abschnitte konstanter Geometrie unterteilt. Für jeden Abschnitt werden die entsprechenden Eigenmoden berechnet, um anschließend mithilfe von Streumatrizen die Feldausbreitung entlang der Gesamtstruktur

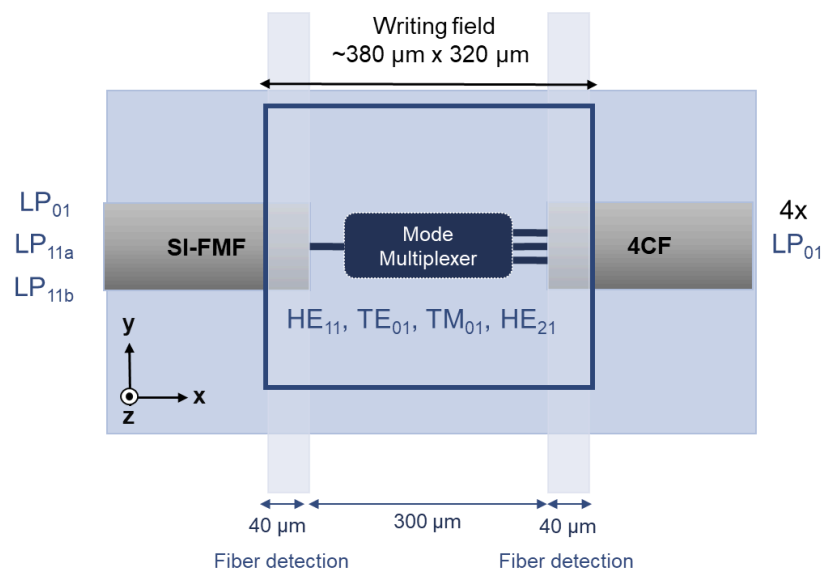


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des angedachten Subsystems, in das die Multiplexerstruktur eingebettet ist. Aufgrund der Brechzahl­differenz können die Moden des Modenmultiplexers nicht mehr durch die linear polarisierten Moden (LP-Moden) mit je zwei Polarisationszuständen beschrieben werden. Stattdessen müssen die exakten Lösungen HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} und HE_{21} herangezogen, wobei die beiden HE-Moden in je zwei Polarisationszuständen existieren können.

zu simulieren. Auf Basis dieses Verfahrens konnte der erste Entwurf eines Mikrostrukturmultiplexers für drei Moden aus Abbildung 3.2 modelliert und analysiert werden. Ohne Optimierungen lagen die simulierten Verluste bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$ je nach Mode und Polarisation zwischen 1 dB und 3,4 dB. Dieses Ergebnis zeigt das große Potenzial dieses Ansatzes, insbesondere da bis dato keine strukturellen Optimierungen zur Reduktion der Einfügedämpfung durchgeführt wurden.

Der Meilenstein 3.2 „3D-gedruckter Modenmultiplexer konzipiert“ wurde somit erreicht.

3.3 UAP3.3: Optimierung des Multiplexer Designs mit Hilfe numerischer Simulationen

In diesem UAP wurden die in UAP3.2 konzipierten Multiplexer-Architekturen mithilfe numerischer Simulationen gezielt optimiert, um geeignete Ansätze für erste Demonstratoren bereitzustellen.

Für eine adiabatische Modenkonzersion zu ermöglichen, muss die Anzahl der geführten Moden an den Ein- und Ausgängen des Multiplexers - also an der Schnittstelle zwischen SMFs bzw. FMF und dem Multiplexer - übereinstimmen. Zudem ist eine hohe Übereinstimmung der Modenprofile erforderlich, um zusätzliche Einfügedämpfungen zu vermeiden. Zu diesem Zweck können im Allgemeinen das Brechzahlprofil sowie die Abmessungen

des Wellenleiters angepasst werden. Hier ist die Brechzahl des Multiplexermaterials allerdings durch die eingesetzte TPL-Anlage (Vanguard SONATA 1000) vorgegeben ist. Für die umgebende Brechzahl stehen ebenfalls lediglich zwei Optionen zur Verfügung:

1. Ein Cladding-Material („cladded“), das von VA bereitgestellt wird,
2. oder Luft („air-cladded“), was jedoch zulasten der mechanischen Stabilität geht.

Demzufolge verbleibt nur der Durchmesser der zylindrischen PWBs als freier Parameter für die Anpassung der Modenprofile. Zudem ist die Brechzahldifferenz in dem Multiplexer aufgrund der Materialoptionen deutlich größer als in den anzubindenden Fasern. Daher führt der Multiplexer bei gleichem Durchmesser nicht nur deutlich mehr Moden als die Fasern, die transversale Feldverteilung unterscheidet sich zudem signifikant [7]. Zur verlustarmen Modenkonversion an den Übergängen sind daher sogenannte Taperstrukturen erforderlich. Dabei handelt es sich um langgezogene Verjüngungen, die Modenumwandlungen mit minimaler Dämpfung ermöglichen und unerwünschte Modenkopplung unterdrücken sollen. Abbildung 3.6 zeigt die resultierende Gesamtstruktur eines Modenmultiplexers inklusive Taper.

Bei der Fabrikation eines vordefinierten 3D-Modells inklusive Taper müssten bereits im Entwurfsprozess die exakte Positionierung der beiden Fasern berücksichtigt werden. Dazu müsste zunächst eine Vielzahl von Parametern erfasst werden, welche die Ausrichtung der FMF und MCF erfassen, so z.B. der Abstand der Endflächen, die Rotation um die Achse der MCF oder der Winkel zwischen den Richtungsvektoren, die die Faserachsen beschreiben. Werden diese Parameter nicht hinreichend berücksichtigt, könnten etwa die Taper nicht senkrecht auf den Faserendflächen stehen oder einen Versatz gegenüber den Faserkernen aufweisen und damit zusätzliche Verluste verursachen. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, wurde der Multiplexer nicht als durchgängige Struktur entworfen, sondern durch das gezielte Zusammenführen PWBs mit Tapern für die Modenfelanpassung aufgebaut. So konnte auf die etablierte Software des lithografischen Systems für die Fertigung PWBs zurückgegriffen werden. Diese erkennt automatisch die Positionen der Faserkerne und berechnet eine verlustarme Trajektorie, was die Anforderungen an die Ausrichtung reduziert und eine manuelle Vorabkompensation im 3D-Modell überflüssig macht. Der Druck erfolgt zudem in mehreren Segmenten, was Schrumpfungs- und Festigkeitseffekte besser kompensiert und die mechanische Stabilität verbessert. Dieser Fabrikationsansatz ermöglicht analog zu einem vordefinierten 3D-Modell die verlustarme Konversion zwischen mehreren einmodigen und einem mehrmodigen Wellenleiter, erfordert jedoch keine manuelle Designanpassung bei jeder Neubestückung des Bauteilträgers.

Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit der Taper und Multiplexer wurde die Transfermatrix \mathbf{H} analysiert. Auf Basis der N Singulärwerte $\sigma_i, i \in \{1, \dots, N\}$ ergeben sich die Einfügedämpfung (IL) und die modenabhängige Dämpfung (MDL) wie folgt:

$$IL = -20 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_i \sigma_i \right) \quad (3.1)$$

$$MDL = -20 \log_{10} \left(\frac{\min_i \sigma_i}{\max_i \sigma_i} \right) \quad (3.2)$$

Da die simulierten Strukturen über zahlreiche Freiheitsgrade verfügen, wurde zur Reduktion des Rechenaufwands ein modularer Optimierungsansatz gewählt. Dabei wurde die Gesamtstruktur in unabhängig optimierbare Abschnitte unterteilt: die Taper zur Modenfeldanpassung und den Multiplexer (Verzweigungsabschnitt - „branching section“). Diese Trennung erlaubt eine gezielte Optimierung einzelner Komponenten, wodurch die Rechenzeit bei den Simulationen enorm reduziert wird.

Im Laufe des Vorhabens erhielt der FDTD-Solver von Ansys Lumerical (Version 2023 R1) GPU-Unterstützung. Dadurch können die rechenintensiven Simulationen erheblich beschleunigt werden, sodass die FDTD der zuvor verwendeten EME (siehe Abschnitt 3.2) vorzuziehen ist (letztenannte führt alle Berechnungen weiterhin auf der CPU aus).

Traditionell weisen Taper zwischen einer SMF und einem PWB ein lineares Verjüngungsprofil mit Längen ab 100 µm auf. Bei derartigen Taperlängen würden der Großteil des Schreibfelds, das für die Multiplexerstruktur samt Tapern zur Verfügung steht, für die Strukturen zur Modenfeldkonversion genutzt werden. Um auch längere und damit verlustreduzierte Multiplexer herstellen zu können oder alternativ den Fabrikationsaufwand zu reduzieren, wurden daher Taper mit nichtlinearem Profil der Ordnung n untersucht [8]. Der Radius eines solchen Tapers ergibt sich entlang der axialen Position z zu

$$r(z) = r_f + (r_i - r_f) \left(1 - \left(\frac{z}{L}\right)^n\right)$$

mit r_i und r_f als Anfangs- bzw. Endradius. Für $n = 1$ ergibt sich das lineare Profil. Simulationen zeigten, dass mit $n = 0,7$ bereits bei einer Taperlänge von 50 µm eine Einfügedämpfung von weniger als 0,2 dB bei einer Wellenlänge von 1,55 µm erreicht werden kann. Für die Ankopplung an Few-Mode-Fasern erwiesen sich hingegen lineare Taper als günstiger, da die nichtlinearen Profile zu erhöhter unerwünschter Modenkopplung führen. Ein linearer, 100 µm langer Taper für die Konversion zwischen dem mehrmodigen Multiplexerende und einer dreimodigen FMF ermöglichte eine Einfügedämpfung von 0,55 dB sowie eine modenabhängige Dämpfung von lediglich 0,08 dB. Da der gegenwärtige Herstellungsprozess für PWBs keine nichtlinearen Verjüngungsprofile unterstützt, bleibt dieser Optimierungsansatz vorerst auf zukünftige Arbeiten beschränkt.

Neben den Taperstrukturen wurde auch das Multiplexer-Design unter Berücksichtigung des PWB-basierten Ansatzes gegenüber Abschnitt 3.2 weiter optimiert. Zur Minimierung der auftretenden Verluste wurde der Krümmungsradius der konstituierenden PWBs so klein wie möglich gewählt. Darüber hinaus wurden die Wellenleiterdurchmesser an den ein- und multimodigen Enden der Struktur an die jeweiligen Taperdesigns angepasst. Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit die Anordnung der einmodigen Eingänge die Dämpfung beeinflusst. Es zeigte sich, dass eine symmetrische Platzierung gemäß den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks optimale Ergebnisse liefert. Eine asymmetrische Konfiguration, bei der die Eingänge an den drei aktiven Kernen der Vierkernfaser ausgerichtet sind, führt zwar zu leicht erhöhten Verlusten, ist jedoch mit dem bevorzugten Fertigungsansatz über zusammengeführte PWBs kompatibel. Dieser Ansatz vereinfacht den Herstellungsprozess signifikant, sodass die resultierende zusätzliche Dämpfung als vernachlässigbar angesehen werden kann. Für einen 50 µm langen Multiplexer ohne Cladding wurden bei einer Wellenlänge von 1,55 µm in der FDTD-Simulation Einfügedämpfungen von $IL = 1$ dB sowie modenabhängige Verluste von $MDL = 1,33$ dB erzielt. Auch wenn längere Multiplexer tendenziell geringere Verluste aufweisen, stellt diese kompakte Variante einen optimalen

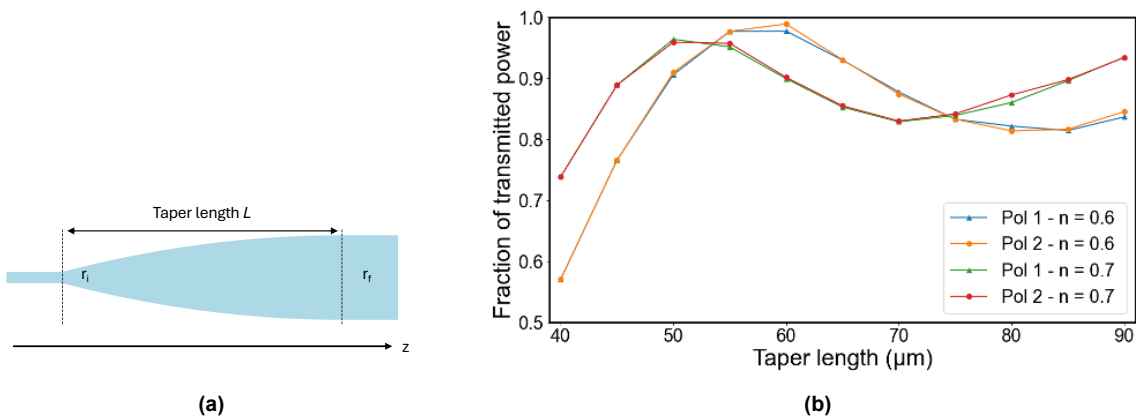


Abbildung 3.4: (a) Schematische Darstellung eines Tapers der Länge L mit nichtlinearem Verjüngungsprofil. Der initiale Radius in $z = 0$ bzw. $z = L$ wird mit r_i bzw. r_f bezeichnet. (b) Transmittierte Leistung in den beiden Polarisierungen der Fundamentalmode für nichtlineare Taper der Ordnung n als Funktion der Taperlänge L bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$.

Kompromiss zwischen Fertigungsdauer, Materialeinsatz, mechanischer Stabilität und optischer Performanz dar und zeigt klar das große Potenzial der Mikrostrukturmodenmultiplexer auf. Abbildung 3.5 zeigt die Modenkopplungsmatrix (inklusive Polarisierungen) des Multiplexers. Sie veranschaulicht die starke Kopplung zwischen den einzelnen Moden sowie deren Polarisierungen. Da die erforschten Modenmultiplexer jedoch für den Einsatz in kohärenten Übertragungssystemen konzipiert sind, lässt sich diese Kopplung durch geeignete digitale Signalverarbeitungsalgorithmen am Empfänger kompensieren.

Zur Analyse der spektralen Eigenschaften des Multiplexers wurden FDTD-Simulationen einer Variante ohne Taperstrukturen durchgeführt. Da PWBs in Bezug auf die Transmission keine signifikante Wellenlängenabhängigkeit aufweisen [9], wurde für die Taper eine vergleichbare spektrale Bandbreite angenommen. Abbildung 3.7 zeigt die simulierten Einfügedämpfungen sowie die modenabhängige Dämpfung des Multiplexers in Abhängigkeit von der Wellenlänge, jeweils für Varianten mit und ohne Cladding. Die Ergebnisse belegen,

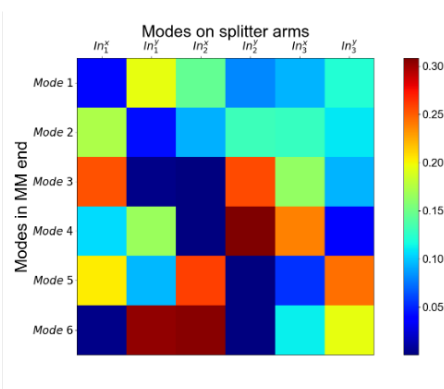


Abbildung 3.5: Heatmap-Darstellung der Kopplung zwischen den Moden und entsprechenden Polarisierungen eines $50 \mu\text{m}$ langen Multiplexer ohne Cladding bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$.

dass das Transmissionsverhalten der Struktur nur eine sehr geringe spektrale Abhängigkeit aufweist. Damit ist die Komponente grundsätzlich für den Einsatz in WDM-Systemen geeignet.

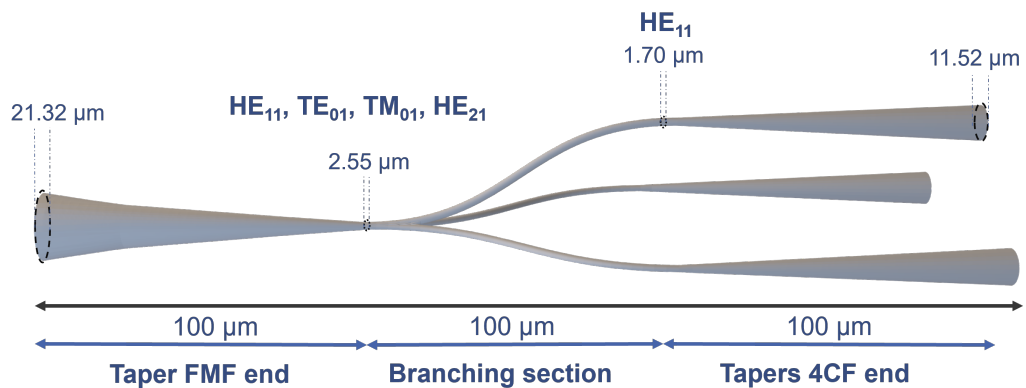


Abbildung 3.6: Computergeneriertes Modell eines Modenmultiplexers auf Mikrostrukturebene, welcher aus zusammenlaufenden PWBs zusammengesetzt ist. Die Taperstrukturen, welche für ein verlustarmes Interface zwischen MCF (hier 4CF) bzw. FMF und dem Multiplexer erforderlich sind, dominieren die longitudinalen Abmessungen und sind für die Modenfelder einer dreimodigen FMF bzw. eines Kerns der 4CF optimiert. Die gesamte Struktur ist 300 μm lang. Der Abstand zwischen den Kernmittelpunkten beträgt 40 μm .

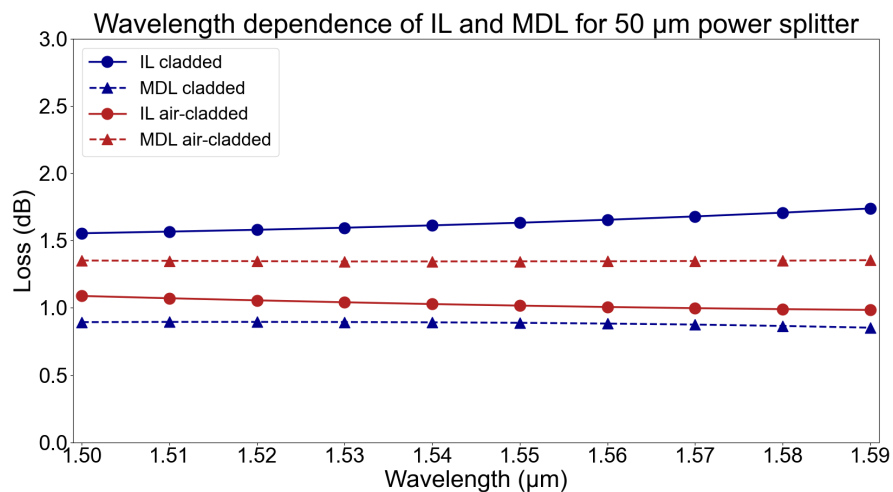


Abbildung 3.7: Wellenlängenabhängigkeit der Einfügedämpfung (IL) und der modenabhängigen Dämpfung (MDL) eines 50 μm langen Modenmultiplexers als Funktion der Wellenlänge.

3.4 UAP3.4: 3D-Druck und experimentelle Charakterisierung

Gemäß dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen PWB-basierten Ansatz erfolgte die Herstellung des Multiplexers in drei Schritten. Für jeden Arm des Multiplexers wurde dabei eine separate Wellenleiterstruktur gefertigt. Abbildung 3.8 zeigt die einzelnen Multiplexerarme

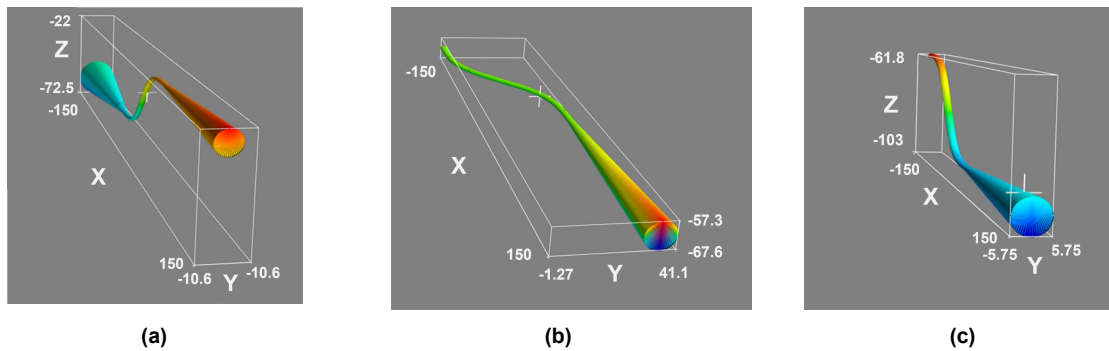


Abbildung 3.8: Die einzelnen Arme des Multiplexers samt Taperstrukturen, die jeweils als einzelne PWBs gefertigt werden. Die Falschfarbendarstellung der 3D-Strukturen hebt die vertikale Position hervor.

zusammen mit den zugehörigen Taperstrukturen. Dieser Ansatz nutzt die fortschrittliche PWB-Technologie, die eine Vorabkompensation für Schrumpfungseffekte nach der Entwicklung ermöglicht und segmentierte Druckprozesse verwendet, um die mechanische Stabilität der finalen Struktur zu erhöhen. Zunächst werden die Fasern mithilfe der in Abschnitt 2.1 beschriebenen, speziell ausgelegten Bauteilträger positioniert. Unter einem Mikroskop werden die Fasern manuell in die Führungsrillen eingebracht, um den angestrebten Abstand der Endflächen von $300\ \mu\text{m}$ sicherzustellen. Die Fixierung erfolgt mit einem klaren, UV-härtenden Klebstoff mit geringer Schrumpfung (Dymax OP-4-20632). Vor dem Platzieren auf der Arbeitsebene wird das vorbereitete Faseresetup für 10 min in Isopropanol getaucht und anschließend mit Stickstoff getrocknet, um Rückstände oder Ölfilme zu entfernen, die während des Ausrichtvorgangs aufgebracht worden sein könnten und die Haftung der Struktur an den Faserendflächen beeinträchtigen würden. Die Probe, bestehend aus FMF und 4CF, welche beide auf einem gemeinsamen Träger fixiert sind, wird daraufhin auf der Arbeitsebene der SONATA 1000 positioniert. Mithilfe der Übersichtskamera und der präzisen Positionierachsen wird die Probe so ausgerichtet, dass der relevante Bereich im Fokus liegt. Nach erfolgreicher Positionierung wird der flüssige, negative Fotolack VanCore B manuell aufgetragen und die Probe automatisch an das Lithographieobjektiv herangeführt. Der Druckvorgang erfolgt in-situ, d. h. die photonischen Strukturen werden direkt mit den Endflächen der FMF und 4CF verbunden. Hierzu ist die exakte Detektion der Faserkerne erforderlich. Neben den Faserendflächen müssen insbesondere die Lage des Kerns der FMF sowie die Positionen der drei genutzten Kerne der 4CF präzise bestimmt werden. Wie in Abbildung 3.9 gezeigt, definieren diese Koordinaten die Kontaktpunkte zwischen dem Multiplexer und den optischen Fasern. Jede Fehlausrichtung erhöht die Einfügedämpfung und reduziert die Leistungsfähigkeit des Multiplexers. Die genaue Kernerkenntnis stellt daher einen essenziellen Bestandteil des Fertigungsprozesses dar.

Für die lithographische Strukturierung mittels TPL auf planen Substraten, wie etwa Faserendflächen, muss zunächst die Grenzfläche zwischen Substrat und Fotolack identifiziert werden. Diese Fläche definiert die Start- bzw. Endebene für die Belichtung. Üblicherweise wird dazu die Fluoreszenz des Fotolacks bei Laseranregung unterhalb der Polymerisationsschwelle genutzt: Ist im Kamerabild ein fluoreszierender Punkt sichtbar, befindet sich die Fokusebene oberhalb des Substrats. Ist hingegen kein fluoreszierender Punkt zu erkennen, liegt die Fokusebene innerhalb des Substrats, also unterhalb der Grenzfläche.

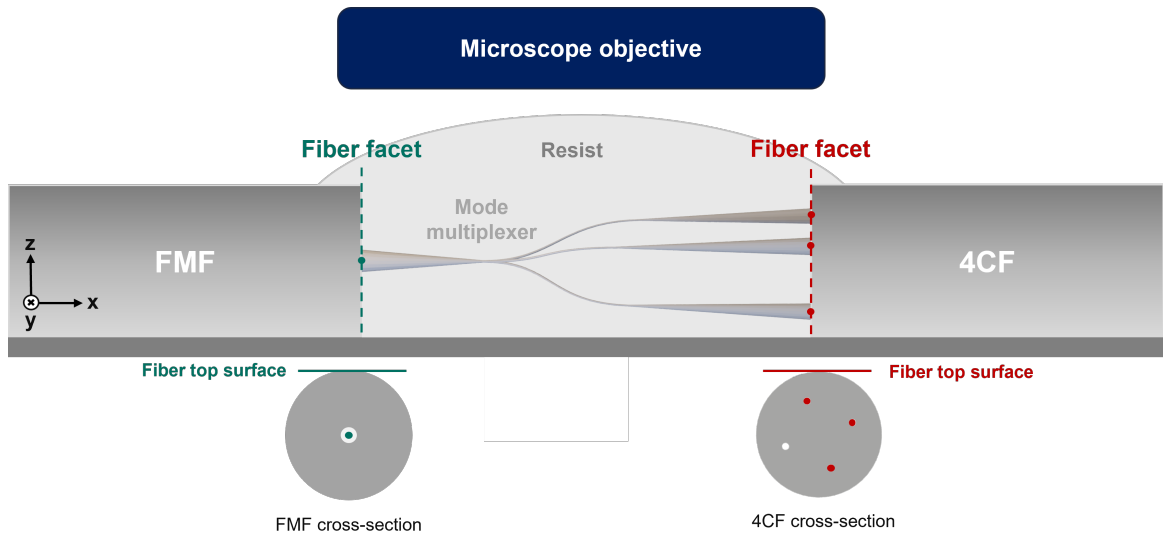


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der Faseranordnung in der SONATA nachdem der Fotolack („resist“) aufgetragen wurde.

Um die genaue Lage der Grenzfläche zu bestimmen, wird die Arbeitsebene entlang der z-Achse verschoben, bis das Auftreten bzw. Verschwinden der Fluoreszenz beobachtet werden kann. Ergänzend kann durch Integration der Fluoreszenzintensität entlang der z-Achse eine präzisere Positionsermittlung erfolgen. Im vorliegenden Aufbau befinden sich die Faserendflächen jedoch nicht in der xy-, sondern näherungsweise in der yz-Ebene. Das beschriebene Verfahren lässt sich dennoch verwenden, um die obere Deckfläche der Fasern zu bestimmen. Für die Bestimmung der eigentlichen Endfläche wurde ein alternatives Verfahren herangezogen: Mithilfe des Lithografie-Lasers (Leistung unterhalb der Polymerisationsschwelle) werden zwei horizontale, parallele Ebenen durchfahren, die jeweils zur Hälfte innerhalb und außerhalb der Faser verlaufen. In den außerhalb der Faser liegenden Bereichen ist Fluoreszenz sichtbar, innerhalb hingegen nicht. Die Schnittlinien dieser Ebenen mit der Faserendfläche spannen eine Ebene auf, welche die Grenzfläche zwischen Fotolack und Faser markiert; die durch beide Linien definierte Ebene entspricht also näherungsweise der tatsächlichen Faserendfläche. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Faserkernmittelpunkte.

Für SMFs stellt VA ein standardisiertes Verfahren zur Faserkernlokalisierung bereit, das sich auch auf die FMF anwenden lässt. Aufgrund der rotationssymmetrischen Geometrie mit axialem Kern wird der relevante Bereich entlang der z-Achse mit geringer Laserleistung gescannt. Im aufgenommenen Bildstapel erscheint der Kern als heller Streifen. Mittels Machine Vision wird ein Richtungsvektor entlang der Kernachse ermittelt. Der Schnittpunkt dieses Vektors mit der zuvor bestimmten Ebene der Faserendfläche ergibt die Koordinate des Kernmittelpunkts. Dieser Punkt (siehe grüner Marker in Abbildung 3.9) dient als Startpunkt für den FMF-Taper. Für die 4CF ist das Verfahren hingegen nicht geeignet: Zwar erscheint im Bildstapel ebenfalls ein heller Streifen entlang der Faserachse, dieser entspricht jedoch nicht den tatsächlichen Kernpositionen. Die Standardwerkzeuge zur Bildauswertung liefern daher keine korrekten Ergebnisse. Da sowohl der Detektionsprozess als auch der 3D-Druckvorgang über dasselbe Lithographieobjektiv erfolgen, kann der Brechzahlkontrast zwischen dem

Mantel und den Faserkernen ausgenutzt werden, um die Kernpositionen optisch zu erfassen. Nach Platzierung der Probe in der SONATA werden mit dem Mikroskopobjektiv Bilder in verschiedenen Fokusebenen aufgenommen. Aufgrund der rotationssymmetrischen Anordnung der Kerne genügt es, die Position des oberen Kerns relativ zur Faseroberfläche oder zum Faserzentrum zu bestimmen. Unter Kenntnis des Kernabstands lassen sich daraus die Koordinaten der übrigen drei Kerne berechnen, wie in Abbildung 3.10 dargestellt.

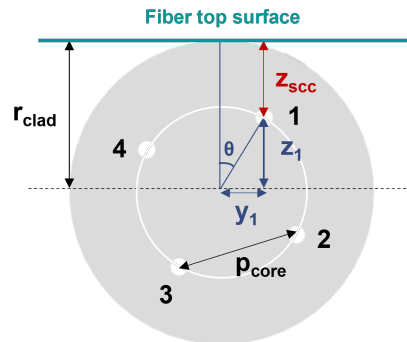


Abbildung 3.10: Geometrisches Modell für die Kerndetektion in der 4CF.

Bei den im Projektverlauf beschafften 4CFs von Sumitomo Electric trat eine zusätzliche Herausforderung bei der Lokalisierung der Faserkernpositionen auf. Um das Übersprechen zwischen den Kernen mit einem Abstand von $40\ \mu\text{m}$ zu minimieren, sind diese von einem Brechzahlgraben („Trench“) umgeben. Abbildung 3.11a zeigt eine Aufnahme der Faserendfläche; die dunkleren, kreisförmigen Bereiche um die Kerne stellen die Brechzahlgräben dar. Diese Gräben führten jedoch dazu, dass die Positionen der Faserkernmittelpunkte mithilfe der Machine-Vision-Algorithmen der Vanguard-Software nicht zuverlässig erfasst werden konnten. Um den Einsatz dieser Fasern dennoch zu ermöglichen, wurde ein alternatives Vorgehen umgesetzt: Auf die Faserendfläche wird ein $10\ \mu\text{m}$ hoher, kubischer Marker aufgedruckt, dessen Ecken in Richtung der gesuchten Kerne weisen, siehe Abbildung 3.11b. Nach der Entwicklung dieses Markers wird die markierte Faser auf dem vorgesehenen Bauteilträger positioniert. Da die Abstände zwischen den Markerecken und den Faserkernen bekannt sind, lassen sich daraus die exakten Koordinaten der Kerne zuverlässig ableiten.

Auf Basis dieser Vorarbeiten wurde erfolgreich ein Mikrostrukturmodenmultiplexer gefertigt. In einem ersten Schritt wurde dieser zwischen zwei kubischen Blöcken gedruckt, um die prinzipielle Stabilität der Struktur zu prüfen. Eine Aufnahme dieser Teststruktur unter einem Rasterelektronenmikroskop ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Darüber hinaus zeigt Abbildung 3.13 die gefertigte Zielstruktur: einen zwischen einer FMF und einer 4CF gedruckten Mikrostrukturmodenmultiplexer.

Der Meilenstein 3.3 „Optimierter 3D-gedruckter Modenmultiplexer charakterisiert“ wurde somit erreicht.

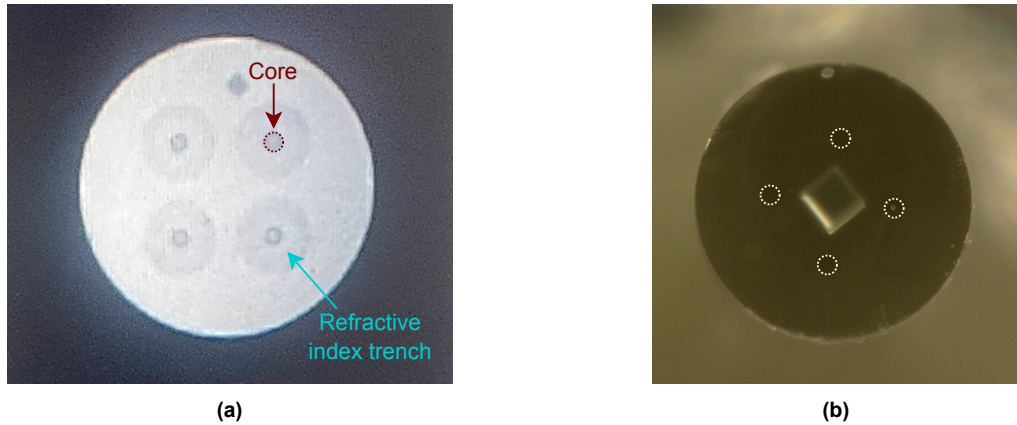


Abbildung 3.11: Endfläche der verwendeten 4CF. In (a) sind die Trenches im Brechzahlprofil zu erkennen. (b) zeigt die Markerstruktur, welche für die Faserkerndetektion verwendet wurde.

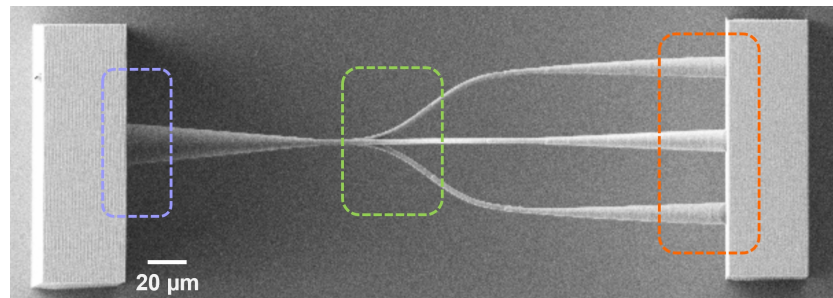


Abbildung 3.12: Aufnahme eines Mikrostrukturmodenmultiplexers (vgl. auch Abbildung 3.6), welcher mithilfe der TPL zwischen zwei Polymerblöcken auf einem gemeinsamen Substrat gefertigt wurde.

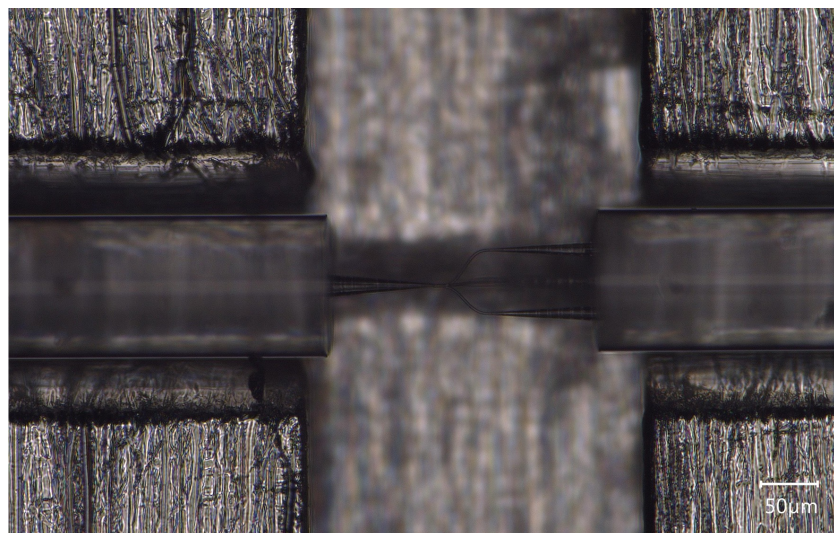


Abbildung 3.13: Mikroskopaufnahme eines Mikrostrukturmodenmultiplexers samt Tapern, welcher mithilfe der TPL gedruckt wurde und die Modenkonzersion zwischen einer FMF (links) und einer 4CF (rechts) durchführt.

Zur detaillierten Untersuchung der im Projekt betrachteten Modenmultiplexer wurde parallel ein Messplatz auf Basis der digitalen Holographie aufgebaut (vgl. Abbildung 3.14). Dieses Verfahren ermöglicht es, mit geeigneten Kameras sowohl die Amplitude als auch die Phase der Wellenfront eines Device Under Test (DUT) zu bestimmen. Dabei interferiert die vom DUT ausgehende Objektwelle mit einer unter einem definierten Winkel einfallenden Referenzwelle. Das resultierende Interferenzmuster wird von einer Kamera für kurzwelliges Infrarotlicht (SWIR-Kamera) erfasst, da hier Wellenlängen aus dem C-Band angenommen werden. Um eine präzise Auswertung zu ermöglichen, muss die Referenzwelle eine möglichst ebene Phasenfront aufweisen und den Sensor homogen ausleuchten. Aufgrund des unterschiedlichen Einfallswinkels zwischen Objekt- und Referenzwelle entsteht eine Schwebung, aus der mittels digitaler Signalverarbeitung die Amplituden- und Phasenverteilung der Objektwelle rekonstruiert werden kann. Die Schwebung tritt jedoch ausschließlich zwischen

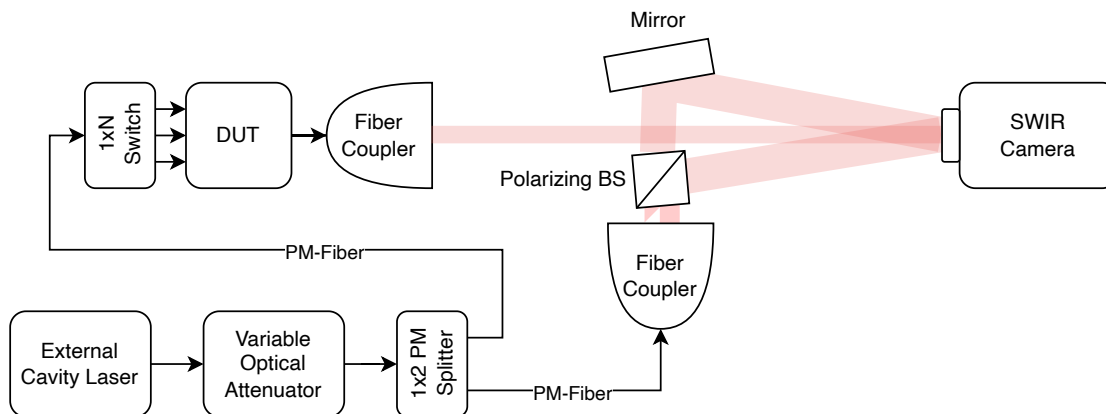


Abbildung 3.14: Prinzipaufbau eines Messaufbaus auf Basis der digitalen Off-Axis Holographie.

kopolarisierten Anteilen beider Wellen auf. Diese Eigenschaft kann gezielt genutzt werden: Mithilfe eines polarisierenden Strahlteilers lassen sich getrennte Schwebungssignale für die zwei orthogonalen Polarisationsrichtungen erzeugen [10]. Dadurch ist es möglich, das Übersprechen sowie die polarisations- und modenabhängige Dämpfung der Modenmultiplexer experimentell zu erfassen. Aufgrund des einzigartigen Potenzials dieser Methode wurde die digitale Holographie im Jahr 2022 im Rahmen einer Mittelumwidmung in das Teilvorhaben des KIT aufgenommen. Daraufhin wurden mehrere Komponenten beschafft, darunter Hochgeschwindigkeits-SWIR-Kameras, hochwertige Faserkollimatoren zur Erzeugung der Objekt- und Referenzwellenfront, ein polarisierender Strahlteiler, diverse Spiegel und Linsen sowie passende optomechanische Plattformen. Nach umfassender Charakterisierung aller Systemkomponenten und dem Aufbau der digitalen Auswertungskette konnten erste Hologramme aufgenommen und die Amplituden- sowie Phasenverteilungen der Wellenfronten erfolgreich rekonstruiert werden. So konnte beispielhaft für eine SMF die erwartungsgemäß ebene Wellenfront in Abbildung 3.15 nachgewiesen werden.

Der Meilenstein 1.3 „Messaufbau zur Modenfeldcharakterisierung auf Basis der digitalen Holographie finalisiert“ wurde erreicht.

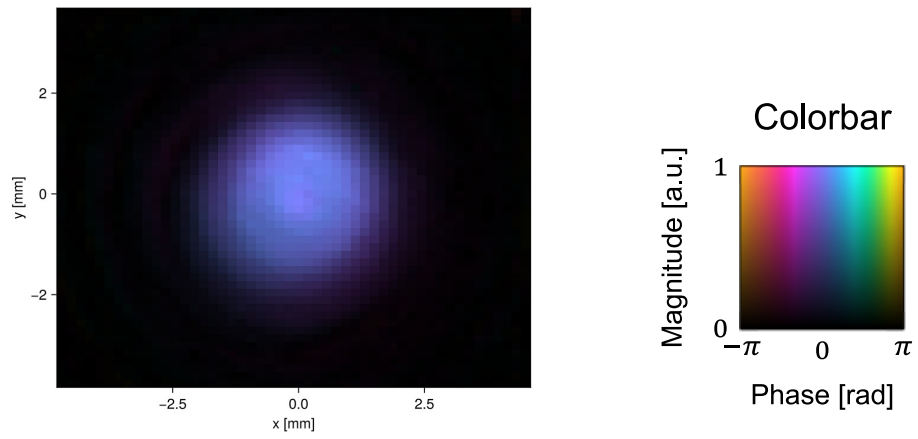


Abbildung 3.15: Darstellung von mittels digitaler Holographie rekonstruierter Amplitude und Phase einer Wellenfront, die durch Auskopplung aus einer SMF erhalten wurde.

5 AP5: Demonstratoren

5.1 UAP5.1: Erstellung eines Konzepts für den Demonstrator

Im Rahmen dieses Unterarbeitspakets wurden die Demonstratoren für die Multikern- und Multimodemultiplexer konzipiert und hinsichtlich ihrer praktischen Realisierung spezifiziert.

Für einen robusten Demonstrator der Modenmultiplexer wurde vorgesehen, an beiden Enden des in Abbildung 2.1 gezeigten Bauteilträgers jeweils etwa 1 m FMF bzw. MCF bereitzustellen. Auf der Multikernseite kommt eine 4CF zum Einsatz, die bereits werkseitig mit einem Fan-out ausgestattet ist und über FC/APC-Konnektoren vier Singlemodeausgänge bereitstellt. Die FMF auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteilträgers sollte ebenfalls mit einem FC/APC-Konnektor versehen werden. Dadurch lässt sich das mehrmodige Ende einer geeigneten PL, das ebenfalls über einen FC/APC-Konnektor verfügt, direkt anschließen. Ausdrücklich wurde auf das Aufkleben des Few-Mode-Endes der PL auf dem Bauteilträger verzichtet, da deren Masse und Abmessungen die Handhabung innerhalb der Anlage deutlich erschweren und ein erhöhtes Risiko für mechanische Beschädigungen darstellen würden. Um die konfektionierten Faserenden während der Fertigung sicher und kompakt unterzubringen, wurden zudem platzsparende, 3D-druckbare Faserspulen entworfen, die eine geeignete Aufbewahrung innerhalb der begrenzten Baugröße der SONATA 1000 ermöglichen.

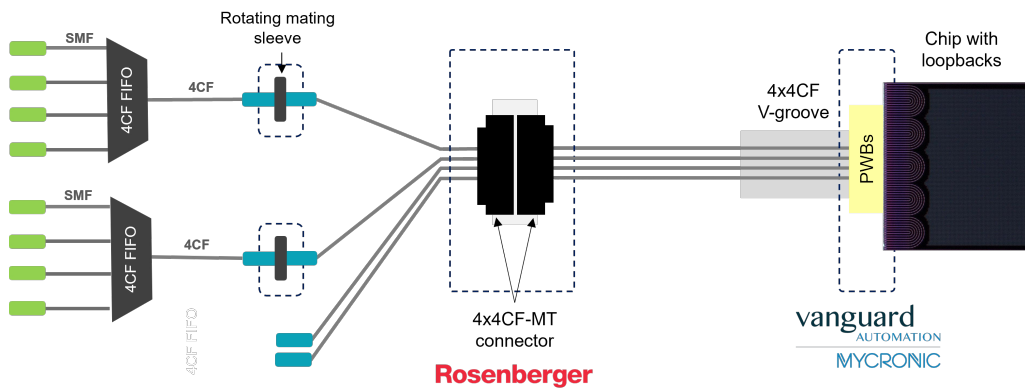


Abbildung 5.1: Testaufbau für die Arrays von Multikernfasern samt entsprechender Multiplexer.

Gemeinsam mit den Projektpartnern ROS und VA wurde darüber hinaus der Demonstrator für ein Array aus MCFs samt zugehöriger Multiplexer entworfen. Der Entwurf ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Dabei ermöglicht ein Fan-In die Einkopplung von Licht über eine SMF in einen der Kerne einer 4CF. Diese Faser wird mit einer weiteren 4CF verbunden, die Teil eines von ROS gefertigten Arrays aus vier 4CFs ist. Da die verfügbaren FIFOs mit FC/PC-Konnektoren ausgestattet waren, deren rotatorische Ausrichtungsgenauigkeit

für eine verlustarme Kopplung zwischen zwei 4CFs nicht ausreichte, konstruierte VA eine spezielle Vorrichtung zur Rotationsfeinjustierung („Rotating Mating Sleeve“). Mithilfe dieser Lösung konnte eine präzise Ausrichtung und verlustarme Kopplung zwischen Fan-In und Faserarray sichergestellt werden. Das Faserarray wird anschließend über einen MT-Stecker mit einem zweiten Array aus vier 4CFs verbunden. Das andere Ende des zweiten Arrays ist dabei in ein V-Groove eingebracht, von dem aus die Anbindung an den Testchip aus Abschnitt 1.3 erfolgt. Diese Anbindung erfolgt über PWBs und wurde durch VA umgesetzt. Das in eine SMF eingekoppelte Licht gelangt somit über das Fan-in durch den MT-Stecker hindurch auf den Testchip. Mithilfe eines Loopbacks auf dem Chip erreicht das Licht eine parallele 4CF, bevor es erneut den MT-Stecker durchquert und letztlich über ein Fan-out in einer SMF erfasst werden kann.

Der Meilenstein 5.1 „Demonstratoren für gedruckte optische Verbindungstechnologien aufgebaut“ wurde damit erreicht.

5.2 UAP5.2: Realisierung des Demonstrators mit hochkapazitiver Datenübertragung

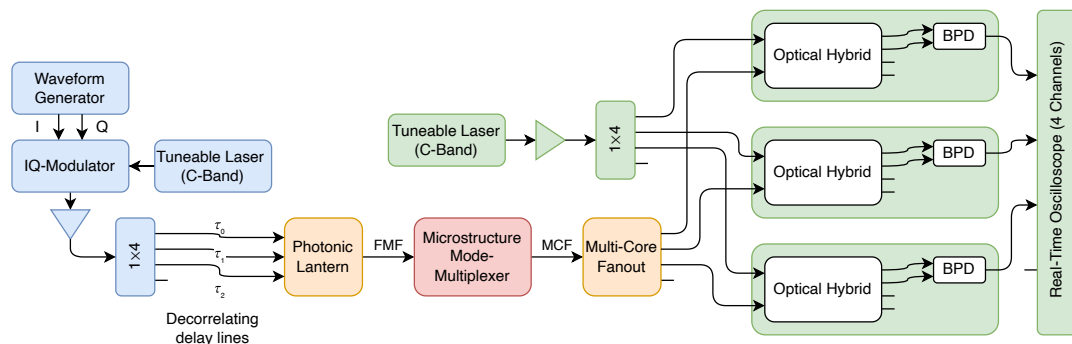


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des geplanten Experiments für die kohärente Datenübertragung samt Modenmultiplexing unter Verwendung des erforschten Mikrostrukturmodenmultiplexers.

Für die Demonstration der Funktionalität der Mikrostrukturmodenmultiplexer wurde eine Datenübertragung mit kohärentem Heterodynempfang vorgesehen. Da die entworfenen Modenmultiplexer keine Modenselektivität aufweisen und es sowohl in MMFs als auch FMFs zu Übersprechen zwischen den räumlichen Moden kommt, ist eine digitale MIMO-Entzerrung erforderlich, um das Potenzial des Raummultiplexings nutzbar zu machen. Darauf aufbauend wurde der initiale Aufbau für das geplante Übertragungssystem konzipiert, der in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt ist. Ein IQ-Informationssignal wird hierzu mithilfe eines Arbiträrgenerators, z. B. Keysight M8194A, erzeugt und anschließend über einen IQ-Modulator auf das Laserlicht eines abstimmbaren Lasers moduliert. Nach Verstärkung durch einen erbium-dotierten Faserverstärker (z. B. Connet 50C25) erfolgt die Aufteilung des modulierten Signals mittels eines 1×4-Splitters samt anschließenden Verzögerungspfaden zur Erzeugung decorrelierter Kanäle. Drei der vier resultierenden Signale werden in eine PL (Phoenix Photonics 3PL-SI-15-1-2-2) mit drei Moden eingespeist, deren multimodiges

Ende mit der FMF des Mikrostrukturmodenmultiplexers verbunden ist. Das Multikernfaserende des Multiplexers ist mit einem FIFO (Sumitomo Fanout-Terminated Uncoupled 4-Core Fiber) verspleißt, um den Übergang auf einzelne Singlemodeausgänge zu ermöglichen. Diese werden gemeinsam mit einem Lokaloszillator in optische Hybride eingespeist, deren Ausgänge über balancierte Photodetektoren dem Echtzeitoszilloskop Keysight UXR1004A mit vier Kanälen zugeführt werden. Der Heterodynansatz ermöglicht dabei die zeitsynchrone Aufnahme der drei Kanäle; mit Intradynempfängern wäre eine größere Zahl von Oszilloskopkanälen erforderlich. Da alle benötigten Komponenten bereits am KIT zur Verfügung standen, konnte auf die Anschaffung zusätzlicher Geräte verzichtet werden. Ein Übertragungsexperiment konnte aufgrund der unzureichenden optischen Eigenschaften der Mikrostrukturmodenmultiplexer im Rahmen von KONFORM nicht realisiert werden. Die erarbeiteten Konzepte und Vorbereitungen flossen jedoch in die Systemexperimente ein, die im Vorhaben STARFALL umgesetzt wurden. Dabei gelang am KIT erfolgreich die Demonstration hochratiger Datenübertragungen auf Basis von SDM, bei denen neuartige optimierte digitale Signalverarbeitungsalgorithmen eingesetzt wurden. So konnte etwa trotz Modendispersion eine Taktrückgewinnung erfolgen und mithilfe eines MIMO-Entzerrers das Übersprechen zwischen den Kanälen einer gekoppelten 4CF kompensiert werden.

Die im Rahmen von KONFORM verwendeten MCF und Multikernmultiplexer zeichnen sich durch ein geringes Übersprechen aus, wodurch eine Übertragung auf Basis von IM/DD möglich wird. Für diese Multiplexer wurde daher ein kompaktes IM/DD-Systemexperiment konzipiert, wie in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt. Das DUT stellt dabei einen Kanal des Multikernfaserarrays dar, der an den Silicon-Photonics-Testchip aus Abschnitt 1.3 angebunden ist. Angesichts der hohen Kostensensitivität von Transceivermodulen in Rechenzentren

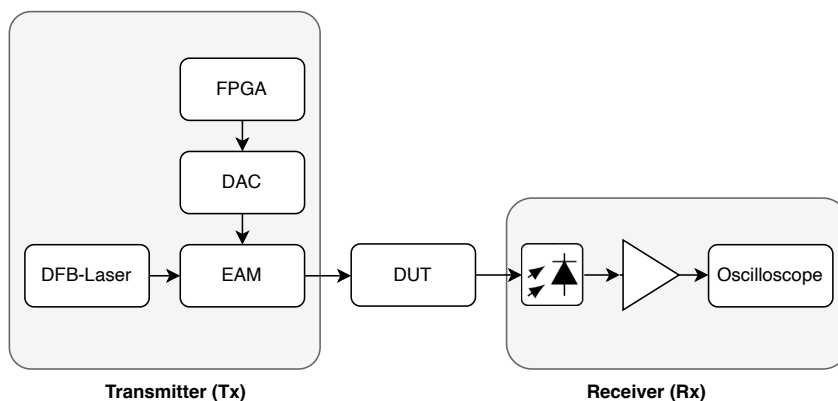


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des geplanten Transmissionsexperiments für die MCF-Arrays.

wurde für die Sendeseite ein Distributed Feedback Laser (DFB-Laser) im C-Band eingeplant. Die Modulation des Lasersignals erfolgt über einen Elektroabsorptionsmodulator (EAM), der von einem Digital-Analog-Umsetzer (DAC) angesteuert wird. Dieser wiederum wird von einem Field Programmable Gate Array (FPGA) gespeist. Die angestrebte Datenrate beträgt mindestens 26,5 Gbit/s, sodass analog zu 400G-DR4-Ethernet-Verbindungen eine effektive Nettodatenrate von 100 Gbit/s pro 4CF erreicht werden kann - bei vergleichsweise geringen Anforderungen an die eingesetzten photonischen und elektronischen Komponenten.

Nach Durchlaufen des DUT wird das modulierte Licht mit einem geeigneten Photoempfänger in ein elektrisches Signal umgewandelt, ggf. verstärkt und anschließend mit einem Echtzeitoszilloskop mit ca. 30 GHz Bandbreite erfasst.

Für diesen Aufbau wurde eine Kombination aus dem Optilab LT-40-E-M (Sender mit integriertem DFB-Laser und EAM, Bandbreite 40 GHz), dem Optilab PR-40G-M (Photoempfänger mit Verstärker, geeignet bis 40 Gbit/s) sowie dem Keysight DSOZ334A Infiniium Oszilloskop (Bandbreite: 33 GHz, Abtastrate: 80 GSa/s) als geeignet identifiziert. Alle Komponenten standen zum Zeitpunkt der Systemdemonstration am KIT zur Verfügung.

Nichtlineare Effekte innerhalb der Mikrostrukturmultiplexer, die mit TPL hergestellt wurden, können bei den in der Kommunikationstechnik üblichen optischen Leistungen vernachlässigt werden. Entsprechend ist auch kein nennenswertes Übersprechen zwischen benachbarten Wellenlängenkanälen im Fall von WDM zu erwarten. Die Übertragungseigenschaften werden somit primär durch die Bandbreite des optischen Kanals bestimmt. Die Eignung der Mikrostrukturmultiplexer für WDM konnte daher durch eine einfache Messung der Einfügedämpfung mit einem abstimmbaren Laser im C-Band überprüft werden. Abbildung 5.4

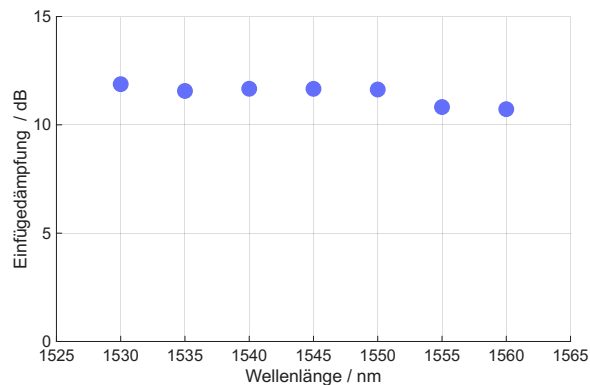


Abbildung 5.4: Einfügedämpfung des Testaufbaus für die Arrays von MCFs samt entsprechender Multiplexer als Funktion der Wellenlänge.

zeigt die gemessenen Verluste über das gesamte C-Band hinweg. Die Dämpfung liegt konstant im Bereich von 11 dB bis 12 dB, womit die prinzipielle Eignung der Demonstratoren für kombinierte SDM- und WDM-Systeme nachgewiesen wurde.

Im nächsten Schritt wurde das Systemexperiment gemäß Abbildung 5.3 durchgeführt. Abbildung 5.5 zeigt ein Foto des experimentellen Aufbaus. Um eine optimale Linearität des Sendesignals sicherzustellen, wurde die Ausgangsleistung des LT-40-E-M auf 2 dBm begrenzt. Unter Berücksichtigung der Einfügedämpfung des Demonstrators aus Abbildung 5.1 von ca. 12 dB sowie zusätzlicher Verluste an den Faserverbindungen (insgesamt ca. 2 dB) ergab sich eine Empfangsleistung von ca. -12 dBm. Dieser Wert liegt knapp unterhalb des spezifizierten Minimalwerts des PR-40G-M (-10 dBm). Auf den Einsatz eines Faserverstärkers wurde bewusst verzichtet, um einen möglichst kostengünstiges Übertragungssystem nachzustellen. Dennoch konnte erfolgreich ein PAM2-Signal mit 30 Gbit/s übertragen werden, womit sich eine Datenrate von 120 Gbit/s pro Faser bzw. 480 Gbit/s pro MT-Steckverbinder ergibt. Abbildung 5.6 zeigt das Histogramm der rekonstruierten Signalamplituden. Die Bitfehlerhäufigkeit (BER) vor Entzerrung liegt bei ca. 1 % bezogen auf $1 \cdot 10^7$ Symbole - zu hoch für eine fehlerfreie Dekodierung mit Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC)

UAP5.2: Realisierung des Demonstrators mit hochkapazitiver Datenübertragung

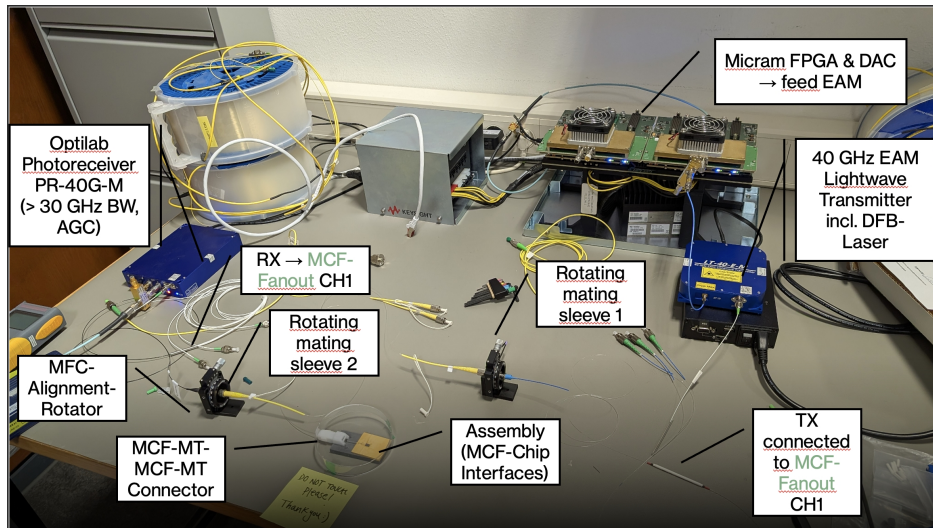


Abbildung 5.5: Experimenteller Aufbau für das Transmissionsexperiment mit MCF-Arrays.

geringer Komplexität. Durch Anwendung eines Sato-Entzerrers konnte die BER jedoch auf $2 \cdot 10^{-5}$ reduziert werden, womit bereits simple FECs eine fehlerfreie Übertragung ermöglichen. Angesichts des frühen Forschungsstadiums ist davon auszugehen, dass sich die Dämpfungsverluste in künftigen Iterationen weiter reduzieren lassen, womit BER-Werte unterhalb $1 \cdot 10^{-6}$ auch ohne Entzerrung erreichbar werden.

Der Meilenstein 5.2 „Systemdemonstrator mit Raum- und Wellenlängenmultiplexing aufgebaut“ wurde somit erreicht.

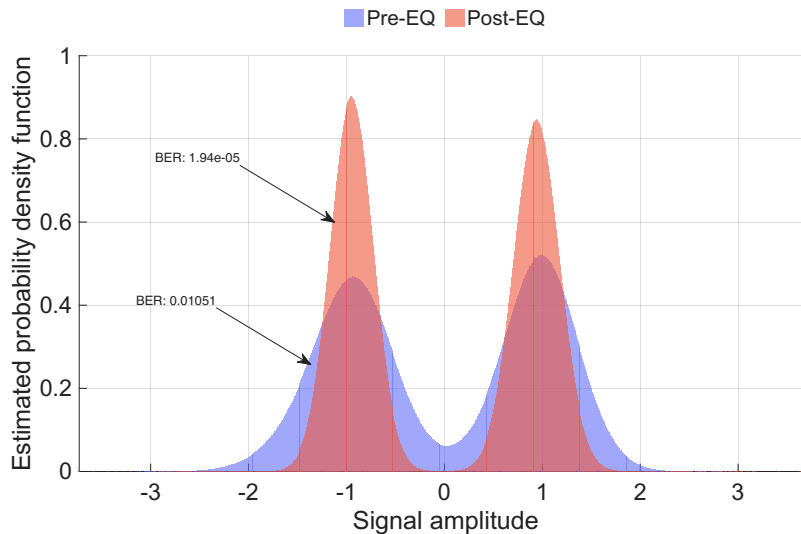


Abbildung 5.6: Histogramm der zurückgewonnenen Signalamplituden vor (Pre-EQ) und nach Anwendung des Sato-Entzerrers (Post-EQ). Der Entzerrer führt zu einem deutlich schmaleren Histogramm, was sich in der reduzierten BER widerspiegelt.

7 Verwertung der Vorhabenergebnisse

7.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie in den vorigen Kapiteln aufgeschlüsselt, wurden die Arbeiten und die finanziellen Mittel am KIT entsprechend der Arbeitspakete und an den im Verlauf des Projektes erhaltenen Ergebnisse ausgerichtet.

7.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aus den Arbeiten an KONFORM sind zahlreiche Impulse für weiterführende Forschungsaktivitäten hervorgegangen. Diese flossen und fließen weiterhin in Anträge für neuartige Fördervorhaben ein. So bauen etwa die Vorhaben HYPERCORE und OPTIMUX auf den im Rahmen von KONFORM gewonnenen Erkenntnissen auf und setzen die beschaffte Forschungsinfrastruktur effizient zur Erreichung der Vorhabenziele ein. Darüber hinaus wurden vielfältige Impulse für technologische Weiterentwicklungen auf Seiten der beteiligten Industriepartner gesetzt. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Forschung konnten innovative Ansätze identifiziert werden, die das bestehende Produktportfolio perspektivisch erweitern und die Marktposition der Unternehmen stärken. Weiterhin haben sich im Rahmen des Vorhabens mehrere Forschungsansätze mit hohem Innovationspotenzial herausgebildet, die als Grundlage für zukünftige Ausgründungen und Start-ups dienen können. Nicht zuletzt leistete KONFORM einen wichtigen Beitrag zur wissenschaftlichen Nachwuchsförderung. Zahlreiche Studierende und Promovierende waren aktiv in die Forschungsarbeit eingebunden und konnten wertvolle Erfahrungen an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung sammeln. Diese praxisnahe Qualifizierung stärkt die Kompetenzen der nächsten Generation von Fachkräften und fördert ihre nachhaltige Integration in Wissenschaft und Wirtschaft.

7.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Jahr 2024 wurde der Artikel „Free-Standing Microscale Photonic Lantern Spatial Mode (De-)Multiplexer Fabricated Using 3D Nanoprinting“ von Dana *et al.* in der Zeitschrift „Light: Science & Applications“ veröffentlicht, in dem die Arbeiten an einem sechsmodigen, von Luft umgebenen Mikrostrukturmodenmultiplexer beschrieben werden, welcher vertikal auf die Endfläche eine Siebenkernfaser gedruckt wurde [11]. Das zugehörige Design wurde mittels genetischer Algorithmen in einem „Inverse Design“-Verfahren erzeugt und weist eine Gesamtlänge von etwa 375 μm auf. Diese Längenangabe umfasst sowohl den Multiplexer an sich als auch die zugehörigen Taperstrukturen. Analog zu den Arbeiten in KONFORM

erfolgte die Herstellung mit einem kommerziell erhältlichen Zweiphotonenlithographiesystem (NanoScribe Photonic Professional GT). Aufgrund der Länge der Komponente wurde eine zusätzliche Struktur gedruckt, um die mechanische Stabilität des Multiplexers zu gewährleisten. Die Charakterisierung des Multiplexers erfolgte sowohl über die digitale Holographie als auch anhand direkter Leistungsmessungen. Um zudem Transmissionsexperimente mit einem optischen Vektornetzwerkanalysator (OVNA) durchführen zu können, wurde das Few-Mode-Faserende einer sechsmodigen Photonic Lantern via Stoßkopplung an den Mikrostrukturmultiplexer angebunden. Die Komponente weist eine Einfügedämpfung von 2,6 dB, eine polarisationsabhängige Dämpfung von weniger als 0,2 dB und einen modenabhängigen Verlust von 4,43 dB auf. Auch wenn die Ergebnisse in [11] äußerst beeindruckend sind, wurde keine direkte Faser-zu-Faser- oder Faser-zu-Chip-Verbindung realisiert, wie sie im Rahmen von KONFORM erforscht wurde. Demzufolge sind keine Ergebnisse Dritter bekanntgeworden, die eine Änderung des Arbeitsplans oder der Ziele des Vorhabens erforderlich gemacht hätten.

7.4 Akademische Nachwuchsforschung

Studentische Arbeiten und Praktika Nachfolgend sind die studentischen Arbeiten und Abschlussarbeiten aufgeführt, welche mit den Arbeiten in KONFORM in Zusammenhang stehen.

- Luise Armbruster, wissenschaftliche Hilfskraft, die bei der Simulation der ersten Modenmultiplexer unterstützt hat.
- Minh-Vu Le, wissenschaftliche Hilfskraft, die an dem Messaufbau für die digitale Holographie mitgewirkt hat.
- Lennart Schmitz, wissenschaftliche Hilfskraft, die an dem Messaufbau für die digitale Holographie mitgewirkt hat.
- Karen Julieth Pérez Bohórquez, „Design and Fabrication of Microscale Mode Multiplexers using Direct Laser Writing“, Masterarbeit am KIT/IPQ, 2023.

Dissertationen Nachfolgend sind die laufenden Dissertationen gelistet, welche mit den Arbeiten in KONFORM in Zusammenhang stehen.

- Karen Julieth Pérez Bohórquez
- Jonas Krimmer

7.5 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften

Im Rahmen des Fördervorhabens haben sich auf Seiten des KIT keine Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften ergeben.

7.6 Konferenzbeiträge

Im Rahmen des Fördervorhabens sind am KIT folgende Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen entstanden:

1. Krimmer, J. *et al.* *Space-Division Multiplexing for the Fiber-Optic Networking Infrastructure of Datacenters* 24. VDE ITG-Fachtagung Photonische Netze, Leipzig, Germany. Präsentation. 10. Mai 2023.
2. Pérez Bohórquez, K. J. & Randel, S. *Numerical Modeling of Micro-Scale Mode Multiplexers Compatible with Direct Laser Writing* Workshop der ITG-Fachgruppe KT3.1 Modellierung Photonischer Komponenten und Systeme, Dortmund, Germany. Präsentation. 25. Feb. 2025.

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
UAP	Unterarbeitspaket
KONFORM	„Skalierung der Kommunikationsinfrastruktur in vernetzten Rechenzentren mittels faseroptischem Raummultiplex“
STARFALL	„Skalierbare TerminalARchitekturen und -subsysteme für FAseroptisches Raummultiplexing“
CPO	Co-Packaged Optics
IM/DD	Intensitätsmodulation und Direktempfang
SDM	Raummultiplex
WDM	Wellenlängenmultiplex
SMF	Singlemodefaser
FMF	Fewmodefaser
MMF	Multimodedefaser
MCF	Multikernfaser
4CF	Vierkernfaser
FIFO	Fan-in/Fan-out
PWB	Photonic Wirebond
PL	Photonic Lantern
MPLC	Multi-Plane Light Conversion
MPW-Run	Multi-Project Wafer Run
PDK	Process Design Kit
AMF	Advanced Micro Foundry
CNC-Fräsen	Computerized Numerical Control Fräsen
TPL	Zwei-Photonen-Lithographie (engl. „Two-photon lithography“)
FDTD	Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich

EME	Eigenmode-Expansion
DUT	Device Under Test
SWIR-Kamera	Kamera für kurzwelliges Infrarotlicht
DFB-Laser	Distributed Feedback Laser
EAM	Elektroabsorptionsmodulator
FPGA	Field Programmable Gate Array
DAC	Digital-Analog-Umsetzer
BER	Bitfehlerhäufigkeit
FEC	Vorwärtsfehlerkorrektur

Literatur

1. Van den Hout, M. *et al.* Reaching the Pinnacle of High-Capacity Optical Transmission Using a Standard Cladding Diameter Coupled-Core Multi-Core Fiber. *Nature Communications* **16**, 3833 (2025).
2. Gehring, H., Blaicher, M., Hartmann, W. & Pernice, W. H. P. Python based open source design framework for integrated nanophotonic and superconducting circuitry with 2D-3D-hybrid integration. *OSA Continuum* **2**, 3091 (2019).
3. Labroille, G. *et al.* Characterization and Applications of Spatial Mode Multiplexers Based on Multi-Plane Light Conversion. *Optical Fiber Technology* **35**, 93–99 (2017).
4. Fontaine, N. K., Ryf, R., Chen, H., Neilson, D. & Carpenter, J. *Design of High Order Mode-Multiplexers Using Multiplane Light Conversion* in *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC) 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)* (IEEE, Gothenburg, Sweden, 2017).
5. Leon-Saval, S. G., Argyros, A. & Bland-Hawthorn, J. Photonic lanterns. *Nanophotonics* **2**, 429–440 (2013).
6. Gallagher, D. F. G. & Felici, T. P. *Eigenmode Expansion Methods for Simulation of Optical Propagation in Photonics: Pros and Cons* in *Proc. SPIE 4987, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies VII* (San Jose, CA, 2003), 69–82.
7. Saleh, B. E. A. & Teich, M. C. *Fundamentals of Photonics* 3. Aufl. (Wiley Blackwell, Chichester, 2019).
8. Vanmol, K. *et al.* Mode-Field Matching Down-Tapers on Single-Mode Optical Fibers for Edge Coupling Towards Generic Photonic Integrated Circuit Platforms. *Journal of Lightwave Technology* **38**, 4834–4842 (2020).
9. Billah, M. R. *et al.* Hybrid Integration of Silicon Photonics Circuits and InP Lasers by Photonic Wire Bonding. *Optica* **5**, 876 (2018).
10. Van der Heide, S. P. *Space-Division Multiplexed Optical Transmission Enabled by Advanced Digital Signal Processing* Diss. (Eindhoven University of Technology, 2022).
11. Dana, Y. *et al.* Free-Standing Microscale Photonic Lantern Spatial Mode (De-)Multiplexer Fabricated Using 3D Nanoprinting. *Light: Science & Applications* **13**, 126 (2024).

Skalierung der Kommunikationsinfrastruktur in vernetzten Rechenzentren mittels faseroptischem Raummultiplex

Akronym: KONFORM

Kurzbericht

Teilvorhaben: 3D-gedruckte vollintegrierbare Modenmultiplexer für faseroptisches Raummultiplexing

Förderkennzeichen: 16KIS1429K

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021 - 31.12.2024

Dieses Verbundvorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert

Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Das zentrale Ziel des Fördervorhabens „Skalierung der Kommunikationsinfrastruktur in vernetzten Rechenzentren mittels faseroptischem Raummultiplex“ (KONFORM) bestand in der Untersuchung verschiedener Mikrostrukturmultiplexer für den Raummultiplex (SDM), die sich in bestehende Netzwerkinfrastrukturen integrieren lassen. Solche Multiplexer stellen eine Schlüsselkomponente für den Einsatz von SDM-Fasern in optischen Kommunikationssystemen dar. Das Vorhaben adressierte insbesondere den steigenden Bedarf an räumlicher Kapazitätsdichte in Rechenzentren, der durch die sogenannte „shoreline bandwidth density“ beschrieben wird. Diese Metrik ist von zentraler Bedeutung, da die optischen Schnittstellen von Halbleiterchips typischerweise entlang der Chipränder, der „shoreline“, positioniert sind. Die Anzahl der Verbindungen pro Chip ist dadurch physikalisch limitiert, was die Gesamtleistung entsprechender Systeme einschränkt¹.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei technische Ansätze verfolgt: Während die Projektpartner VA und ROS sich auf Multiplexer für den Übergang von Multikernfasern (MCF) zu photonisch integrierten Schaltungen sowie deren Einsatz in MCF-Arrays konzentrierten, untersuchte das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Teilvorhaben „3D-gedruckte vollintegrierbare Modenmultiplexer für faseroptisches Raummultiplexing“ den Einsatz von Multiplexern für sogenannte Fewmodefasern (FMF). Dabei handelt es sich um spezielle Glasfasern mit vergrößertem Kerndurchmesser gegenüber kommerziell verbreiteten Singlemodefasern (SMF), die dadurch mehrere räumliche Kanäle zur Verfügung stellen. Entsprechend müssen die Modenmultiplexer eine effiziente Kopplung zwischen parallelen Wellenleitern und den Moden der FMF ermöglichen.

Der Fokus der Arbeiten am KIT lag dementsprechend auf SDM in Form von Modenmultiplexing (MDM), das sich durch eine besonders hohe Kanaldichte pro Faser auszeichnet. Zwar tritt bei MDM aufgrund der starken Kopplung benachbarter Fasermode zu Übersprechen, digitale Signalverarbeitungsalgorithmen können diesen Effekt in kohärenten Übertragungssystemen jedoch kompensieren. Die primäre Herausforderung dieser Technologie liegt daher in der mangelnden Verfügbarkeit kompakter Multiplexer: Kommerzielle Modenmultiplexer, etwa von Cailabs² oder Phoenix Photonics³, weisen typischerweise Bauteilmaße im Zentimeterbereich auf und sind damit ungeeignet für den Einsatz in den kompakten SFP-Transceivermodulen, wie sie in Datenzentren eingesetzt werden. Der im Vorhaben verfolgte Ansatz, Mikrostrukturmultiplexer mit Hilfe der Zwei-Photonen-Lithographie (engl. „Two-photon lithography“) (TPL) in miniaturisierten Geometrien zu realisieren, orientiert sich am aktuellen Stand der Technik im Bereich des 3D-Drucks photonischer Strukturen. Hier konnte das KIT auf umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Fertigung sogenannter Photonic Wirebonds (PWB) zurückgreifen, wobei es über international anerkanntes Know-how verfügt.

¹Stojanovic, V. *Understanding In-Package Optical I/O Versus Co-Packaged Optics* https://www.photonics.com/Articles/Understanding_In-Package_Optical_I_O_Versus/a69701 (2024).

²PROTEUS | *Inventing the Optical Networks of the Future* Cailabs. <https://www.cailabs.com/fiber-networks/optical-networks-of-the-future/proteus/> (2025).

³*Spatial Division Multiplexing SDM - Products* Phoenix Photonics. http://www.phoenixphotonics.com/website/products/spatial_division_multiplexing_SDM_products.htm (2025).

Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens am KIT wurden Systemkonzepte für hochintegrierte Transceiver auf Basis von SDM-Fasern untersucht. Dabei wurde die Kombination von Wellenlängenmultiplexing (WDM) und SDM untersucht, um die Bandbreite, Energieeffizienz und Integrationsdichte zukünftiger Transceiver für Datenzentren zu verbessern. Ein zentraler Bestandteil solcher Transceiver sind die Multiplexer, welche die Anbindung der SDM-Fasern an photonische Chips realisieren. Für die Evaluation dieser Strukturen wurden Siliziumphotonik-Testchips konzipiert, eine externe Foundry mit der Fertigung beauftragt und die gefertigten Chips schließlich erfolgreich getestet. Darüber hinaus entstanden neuartige Bauteilträger zur präzisen Ausrichtung und Montage von Faser- und Chipkomponenten. Darauf aufbauend wurden verschiedene Architekturen für Modenmultiplexer in numerischen Simulationen untersucht und hinsichtlich ihrer Übertragungseigenschaften optimiert. Miniaturisierte Varianten von Photonic Lanterns erwiesen sich dabei als besonders robuste Lösung für eine Umsetzung im Mikrostrukturmaßstab. Parallel dazu wurde ein Fabrikationsprozess auf Basis der TPL erarbeitet, der anschließend die Fabrikation dieser Modenmultiplexer ermöglichte. Ergänzend wurde ein Aufbau auf Basis der digitalen Holographie zur präzisen Vermessung der SDM-Multiplexer realisiert, das die Ermittlung von Übersprechen sowie der polarisations- und modenabhängigen Dämpfung ermöglicht. Zum Abschluss des Vorhabens konnte die Funktionalität der im Verbund erforschten Subsysteme in einem Systemexperiment erfolgreich nachgewiesen werden.

Wesentliche Ergebnisse und Verwertung

Ein zentrales Ergebnis des Vorhabens ist der Nachweis, dass sich WDM-kompatible Mikrostrukturmodenmultiplexer mit Abmessungen im Submillimeterbereich realisieren lassen. In Simulationen wurden Einfügedämpfungen von etwa 1 dB erzielt. Aufgrund des frühen Forschungsstands zeigten die gefertigten Strukturen jedoch noch nicht die angestrebte Performanz; insbesondere bestehen Verbesserungspotenziale im Hinblick auf mechanische Stabilität und optische Verluste. In enger Zusammenarbeit mit den Partnern konnte zudem bei den Systemexperimenten eine optische Datenübertragung mit kosteneffizienten diskreten Komponenten bei einer Bruttodatenrate von 480 Gbit/s über einen neuartigen Steckverbinder mit vier Vierkernfasern demonstriert werden. Dieses Ergebnis unterstreicht das Potenzial von SDM in zukünftigen Transceivermodulen.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bilden daher eine fundierte Grundlage für weiterführende Arbeiten, etwa im Rahmen von Folgeprojekten, Promotionsvorhaben oder studentischen Abschlussarbeiten. Die im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen mit der TPL fließen unmittelbar in die Anschlussprojekte PONTROSA und OPTIMUX ein, in denen die Mikrostrukturierung optischer Verbindungstechnologien ein Schlüsselement darstellt. Darüber hinaus leistete das Vorhaben einen Beitrag zur Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses: Zwei Promotionsarbeiten sowie mehrere praxisnahe Abschlussarbeiten und Praktika wurden durch das Fördervorhaben wesentlich unterstützt. Darüber hinaus wurden erste Ergebnisse im Rahmen wissenschaftlicher Konferenzen präsentiert, wodurch die Stellung des KIT in der wissenschaftlichen Fachwelt bekräftigt und ausgebaut werden konnte.