

Verbundprojekt:

Hochintegrierter Quantenfrequenzkonverter höchster Fidelität auf Basis innovativer Laser-, Faser- und Produktionstechnologie (HiFi)

Teilvorhaben:

Design und Umsetzung kompakter Quantenfrequenzkonverter höchster Fidelität & Frequenzstabile 2.X μm Halbleiter-Scheibenlaser hoher Leistung

Schlussbericht

FKZ: **13N15925**

Projektlaufzeit: 01.09.2021 – 31.08.2025

Aachen, den 28. Februar 2026

Berichtersteller:

Ludwig Leonard Hollstein
Bernd Jungbluth
Florian Elsen

Mit Beiträgen von:

Martin Traub
Martin Adams
Hans Huber

Inhalt

1	Kurzdarstellung	2
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Voraussetzungen und wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
2	Eingehende Darstellung	4
2.1	Frequenzkonverter	4
2.1.1	Definition der externen & internen Anforderungen	4
2.1.2	Simulation & Optimierung zweistufiger QFC	5
2.1.3	Aufbau eines Labordemonstrators des HIFI-QFC-Setups	7
2.1.4	Entwicklung einer Justagemethode für die effiziente Einkopplung	8
2.1.5	Benchmarking mit 1-stufiger QFC	9
2.2	Optik-Design	10
2.2.1	Optimierung des Optikdesigns für das QFC-Modul	10
2.2.2	Toleranzanalyse und Justagestrategie	11
2.2.3	Off-Axis-Parabolspiegel	11
2.3	Mechanisches Design	12
2.3.1	Kompakte, integrierte Umsetzung des Wellenleiter-Packagings	12
2.3.2	Aufbau und Montage des optimierten QFC-Setups	13
2.4	Technologiedemonstrator	14
2.4.1	Faserkopplung des Fraunhofer IAF OPSL	14
2.4.2	Dokumentation und Übergabe von Aufbau- und Justagestrategien	15
2.4.3	Justagerezepte für den Aufbau	17
2.4.4	Aufbau Technologiedemonstrator	18
3	Ergänzende Inhalte	20
3.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	20
3.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	21
3.3	Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit des Ergebnisses	21
3.4	Fortschritte Dritter während der Durchführung des Vorhabens	22
3.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	22
4	Literaturverzeichnis	22
5	Anhang	24

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Teilvorhabens war die Entwicklung der technologischen Grundlagen für einen kompakten, effizienten und rauscharmen Quantenfrequenzkonverter (QFC), der die Anforderungen zukünftiger glasfaserbasierter Quantennetze erfüllt, im Konkreten zur verlustarmen und rauscharmen Konversion von Einzelphotonen aus NV-Zentrum-Qubits in das Telekomband (C-Band). Hierzu sollte der Übergang von heutigen Laboraufbauten niedriger technologischer Reife hin zu einer integrierbaren, robusten und anwendungsorientierten Umsetzung realisiert werden.

Bestehende QFC-Konzepte adressieren bereits die Frequenzkonversion einzelner Photonen, sind jedoch häufig durch Rauscherzeugung infolge parametrischer Prozesse und parasitärer Effekte limitiert, was die erreichbare Fidelität des optischen Informationsaustauschs einschränkt. Dies gilt insbesondere für Ausführungsformen auf Basis periodisch gepolter Kristalle und bei Verwendung eines Wellenleiters, insbesondere wenn die Konversion die Wellenlänge des Photons um den Faktor 2 oder mehr vergrößert. Alternativ dazu entwickelte das Fraunhofer ILT im Rahmen des Teilvorhabens neue Konzepte für eine rauschreduzierte, zweistufige Frequenzkonversion auf Basis periodisch gepolter nichtlinearer Wellenleiterstrukturen. Um eine kompakte und gut zu integrierende Umsetzung zu befördern, werden Konfigurationen untersucht, bei denen die beiden Konversionsstufen als zwei Sektionen mit verschiedener Polungsperiode auf dem gleichen Lithiumniobat-Chip innerhalb eines linearen Wellenleiters ausgeführt werden. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden die technischen Anforderungen an den optischen Aufbau, die Systemstabilität sowie die Schnittstellen zum benötigten 2- μm -Pumplaser abgeleitet.

Darüber hinaus adressierte das ILT wesentliche Fragestellungen zur Umsetzung eines kompakten und skalierbaren Systemaufbaus. Dies umfasste die Entwicklung geeigneter Strategien für die optische Kopplung mit minimalen Verlusten, die Bewertung von Fertigungstoleranzen kommerziell verfügbarer zweistufiger Wellenleiterkristalle sowie die Ableitung von Anforderungen an Packaging-Lösungen, die trotz thermischer Gradienten einen stabilen und betriebssicheren Konverter ermöglichen. Das ILT leistete damit grundlegende Beiträge für ein Gesamtsystem, das hohe Konversionseffizienz, geringes Rauschen und mechanische Robustheit miteinander verbindet.

Durch diese Arbeiten wurden die Voraussetzungen geschaffen, die im Projekt angestrebte kompakte und hochintegrierte QFC-Bauform umzusetzen und die Basis für eine spätere produktnahe Entwicklung im Verbund zu legen.

1.2 Voraussetzungen und wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde

Verschiedene Arbeitsgruppen haben die Machbarkeit von QFC wissenschaftlich nachgewiesen und Demonstratoren im Labormaßstab entwickelt. Dabei konnte die Erhaltung von Kohärenz, Statistik sowie die Ununterscheidbarkeit einzelner Photonen und Verschränkung bestätigt werden. Im Bereich der akademischen Forschung ist die Gruppe von Prof. Becher international führend: Im Rahmen eines DFG-Projekts wurde gezeigt, dass die Emission zweier Halbleiterquantenpunkte durch QFC in eine ununterscheidbare Wellenlänge im Telekom C-Band konvertiert werden kann, wobei 2-Photonen-Interferenz auch nach Glasfaserübertragung nachgewiesen wurde. Zudem wurde polarisationsunabhängige QFC genutzt, um die Verschränkung atomarer Systeme mit Telekom-Photonen über bis zu 20 km Glasfaser zu demonstrieren^{1, 2}. Aktuelle Arbeiten an der Universität des Saarlandes entwickeln hocheffiziente QFC-Systeme (> 50%) zur Anbindung von Ca-Ionenfallen-Qubits (854 nm) an das Telekom-C-Band. Diese Entwicklungen sind auch für weitere Qubit-Plattformen, etwa Halbleiter-Spin-Qubits, von hoher Relevanz und weisen eine direkte Anschlussfähigkeit an regionale Kooperationen, z. B. mit der Arbeitsgruppe Bluhm (RWTH Aachen, Exzellenzcluster ML4Q), auf.

Während der Projektlaufzeit von HIFI wurde darüber hinaus durch R.Hanson³ in Delft die „nutzbare“ Verschränkungsübertragung („heralded entanglement distribution“) zwischen zwei NV-Zentren über Telekommunikationsfasern mit beidseitigem Einsatz von QFC demonstriert. Voraussetzung für die erfolgreiche Demonstration war der Einsatz eines besonders effizienten und rauscharmen QFC des Fraunhofer ILT in Aachen, der in Bezug auf das Signal-zu-Rauschverhältnis den vorherigen Stand der Forschung um zwei Größenordnung verbessern konnte.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten des Teilvorhabens am Fraunhofer ILT lassen sich grob in vier, teils parallellaufende Teilstränge aufteilen, in welchen die einzelnen Arbeitspakete des ILT eingeordnet sind. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in diesem Bericht entlang dieser Struktur, um die Zusammenhänge der Arbeiten und deren Beitrag zur Zielerreichung nachvollziehbar darzustellen.

Ausgangspunkt der Arbeiten war die Auslegung und Optimierung des **Konzepts und Designs des QFC** für die zweistufige Frequenzkonversion von Einzelphotonen bei 637 nm in das Telekommunikationsband. Darauf aufbauend wurden die relevanten Prozessparameter definiert, geeignete nichtlineare Komponenten ausgewählt und Anforderungen an Pumpquellen, Filterung und Rauschunterdrückung abgeleitet. Die Ergebnisse dieser Entwicklung lieferten die fachliche Grundlage für die weiteren Entwicklungsarbeiten.

Angeschlossen hieran erfolgte die Entwicklung des **Optikdesigns** mit Fokus auf einer effizienten und stabilen Einkopplung der beiden Strahlen in den Wellenleiter, sowie die Auslegung eines kompakten und robusten **mechanischen Designs** zur Integration der optischen Komponenten. Beide Stränge wurden paral-

lel und in enger Abstimmung miteinander bearbeitet, um optische Anforderungen und mechanische Randbedingungen konsistent zusammenzuführen. Darauf aufbauend wurden Konzepte für Aufbau, Kopplung, Justage und Stabilisierung des Systems entwickelt und in einen reproduzierbaren Integrationsprozess überführt. Dies umfasste die Definition geeigneter Montage- und Justagetechniken, die Auslegung stabiler Schnittstellen zwischen den Subsystemen sowie letztendlich die Realisierung und den Aufbau des Demonstrators selbst. Eine Gesamtübersicht der vom ILT bearbeiteten Arbeitspakete sowie ihre Zuordnung zu den jeweiligen dargestellten Hauptsträngen ist im Anhang zu finden.

Ergänzend wurden weitere Arbeitspakete zur Untersuchung alternativer technischer Ansätze bearbeitet. Diese dienten der systematischen Evaluierung von Realisierungsoptionen und der Absicherung von Designentscheidungen; weniger geeignete Varianten wurden nach der Bewertungsphase nicht weiterverfolgt, sind jedoch zur Dokumentation im Bericht aufgeführt.

Die Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den Entwicklungsaktivitäten bei den Partnern. So fließen die abgeleiteten Anforderungen in die Entwicklung von Laser, Frequenzkamm, Faser- und Filtertechnik sowie der Montageplattform ein, während umgekehrt die Projektergebnisse aller anderen Partner als Knowhow, Komponenten und Technologien bei der Entwicklung kompakter Demonstratoren am ILT eingesetzt werden.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Frequenzkonverter

2.1.1 Definition der externen & internen Anforderungen

Im Rahmen von AP 1 (Systemkonzept) wurden in AP 1.1 zunächst die externen Anforderungen an den Frequenzkonverter aus definierten Anwendungsszenarien (u. a. Quanteninternet- und Quantenrepeater-Use-Cases) abgeleitet. Hieraus ergaben sich insbesondere die Zielwellenlängen (637 nm → 1587 nm), Anforderungen an Quanteneffizienz (> 30 %), Rauschrate (< 100 Photonen/Sekunde), spektrale Eigenschaften sowie Randbedingungen hinsichtlich Integrationsfähigkeit und Schnittstellen zu faseroptischen Netzwerken und zum 2- μ m-Pumplaser.

Auf dieser Grundlage wurden in AP 1.2 die internen Systemanforderungen definiert. Dies umfasste die Ableitung von Spezifikationen für nichtlineare Wellenleiter, Pumplaser-Schnittstellen, Filterkonzepte, optomechanische Stabilität sowie Anforderungen an Aufbau- und Justageprozesse. Ziel war die Festlegung einer konsistenten Systemarchitektur unter Berücksichtigung von Performance, Integrationsfähigkeit und Skalierbarkeit.

Für die Realisierung der zweistufigen Frequenzkonversion wurde die zweistufige Umsetzung in einem einzelnen Kristall mit zwei unterschiedlichen periodisch gepolten Strukturen zur Umsetzung beider Konversionsschritte untersucht. Dieses Konzept ermöglicht eine kompaktere Systemarchitektur, reduzierte optische Schnittstellen und bietet ein potenziell kostengünstigeres Potenzial für eine integrierte, stabile Umsetzung.

Damit wurden im Rahmen von AP 1.1 und AP 1.2 die funktionalen, technologischen und systemischen Grundlagen für die weitere Optimierung und Demonstration des QFC im Projekt festgelegt.

2.1.2 Simulation & Optimierung zweistufiger QFC

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde innerhalb von AP 4 (*Frequenzkonverter*) die zweistufige Frequenzkonversion realisiert. Im Rahmen von AP 4.1 (*Demonstration, Konzeptvergleich und Benchmarking 2-stufige QFC*) wurden Simulationsrechnungen zur zweistufigen Konversion im Wellenleiter des QFC durchgeführt. Im Experiment ist evident, dass sich wesentliche Eigenschaften der Konversion von Einzelphotonen, aus der Konversion klassischer Laserfelder mit sehr geringer Intensität ableiten lassen. Entsprechend hat sich in Vorgängerprojekten auch die Auslegung von QFC durch eine entsprechende wellenoptische Modellierung bewährt. Hierzu wird das am Fraunhofer ILT entwickelte Softwarepaket OPT verwendet. Mit diesem können klassische wellenoptische Phänomene wie z.B. die Ausbreitung, Verstärkung und Frequenzkonversion von elektromagnetischen Feldern numerisch berechnet werden. Hierbei können relevante Randbedingungen und Einflussfaktoren wie u.a. lineare Absorption sowie die räumliche Form der Felder berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist auch die Berechnung von Gruppenlaufzeiteffekten möglich, wobei hier aufgrund der geringen spektralen Bandbreite alle beteiligten Felder als monochromatisch angenommen werden.

Die beiden Stufen der Frequenzkonversion werden im Rahmen dieses Projektes durch die Differenzfrequenzerzeugung (DFG) realisiert. Hierbei wird in der ersten Stufe die eingehende Laserstrahlung in einem nichtlinearen Kristall mit einem starken Pumplaser überlagert und in ein Laserfeld höherer Wellenlänge konvertiert. Das konvertierte Laserfeld tritt in die zweite Konversionsstufe als Eingangsfeld ein und wird in einer erneuten DFG mit demselben Pumplaser in ein Laserfeld der Zielwellenlänge konvertiert.

Zum Erreichen der maximalen Konversionseffizienz des Gesamtprozesses werden alle die Phasen Anpassung beeinflussenden Parameter optimiert. Dies betrifft die Temperatur, räumliche Ausdehnung der Eingangsstrahlen, die wellenleiterbedingte Brechungsindexverschiebung sowie die jeweilige Temperatur der beiden

Segmente unter der Randbedingung eines Einzelwellenleiters mit homogener Temperaturverteilung in beiden Segmenten. Darüber hinaus wird durch die Si-

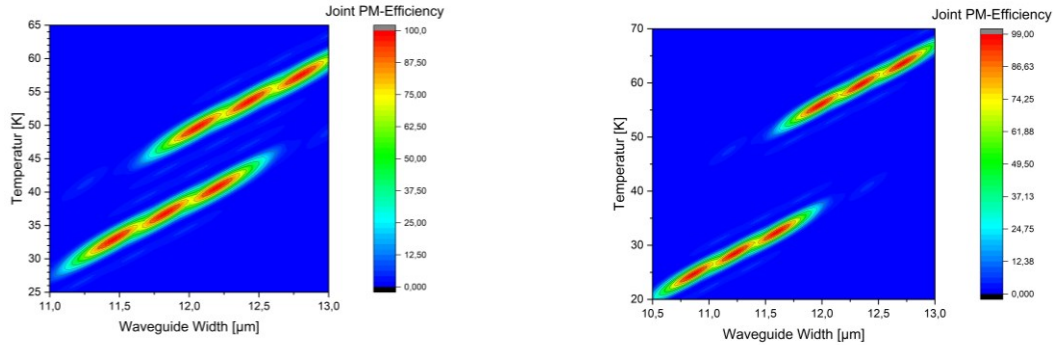


Abbildung 1: Auszug aus den Ergebnissen der numerischen Simulation zur Auslegung der nichtlinearen Wellenleiter-Kristalle.

mulation das Längenverhältnis der beiden Segmente bei einer festen Gesamtlänge dahingehend optimiert, dass beide Konversionsstufen ihre maximale interne Effizienz bei der gleichen Pumpleistung erreichen. Abgeleitet aus diesen Untersuchungen wurde ein entsprechender Chip mit Wellenleiter-Kristallen für die sequenzielle nichtlineare Frequenzkonversion beschafft. Als Kristallmaterial wurde Lithium-Niobat (LiNbO_3) gewählt, da es eine hohe nichtlineare Suszeptibilität und geringe Absorption bei den beteiligten Wellenlängen aufweist. Die Wellenleiter im Kristall haben eine Apertur von $11 \times 12 \mu\text{m}$. Die Gesamtlänge des Kristalls beträgt $40 (\pm 0,4) \text{ mm}$, aufgeteilt in zwei Sequenzen für die unterschiedlichen Konversionsstufen. Das Längenverhältnis der beiden Sektionen sowie die transversale Ausdehnung entspricht den numerisch gefundenen Optima für die maximale Gesamtkonversionseffizienz. In beiden Stufen wird die jeweilige Phasen Anpassung bestimmt durch die periodische Polung und den Wellenleiterdurchmesser. Die beiden Konversionsstufen haben dabei eine unterschiedliche Periodenlänge. Da typischerweise Abweichungen zwischen den idealisierten Annahmen im numerischen Modell und tatsächlich gefertigten Materialien bestehen (insbesondere kleine Abweichungen im Wellenleiterdurchmesser haben einen starken Einfluss), wurden sechs verschiedene Kombinationen der Periodenlängen im ersten und zweiten Bereich gefertigt. Außerdem wurden je zwei Wellenleiter mit unterschiedlichen Durchmessern pro Kombination gefertigt. Pro Kombination von Polungsperioden gibt es somit je 2 Varianten, um limitierenden Effekten durch die Fertigungstoleranzen entgegenzuwirken. Der Wellenleiterquerschnitt wurde durch die numerische Simulation berücksichtigt und dient als Grundlage zur Ermittlung der Grundmode, um optimale Performance zu erreichen. Es handelt sich um einen Multimode-Wellenleiter, was bedeutet, dass auch mehrere höhere Moden geführt werden.

2.1.3 Aufbau eines Labordemonstrators des HIFI-QFC-Setups

Ausgehend von den numerischen Simulationen wurde in AP 4.1 der experimentelle Aufbau des Labordemonstrators gemäß dem entwickelten Konversionschema implementiert (siehe Abbildung 2). Als Pumpquelle diente der 2- μm -Pumplaser L210 des Fraunhofer IAF, der bis zu 1,5 W im Dauerstrichbetrieb bei einer Wellenlänge von 2128 nm liefert. Als Signallaser zur Emulation von Einzelphotonen der ZPL-Photonen eines NV-Zentrums dient in den Experimenten ein Diodenlaser der Wellenlänge 637 nm (Toptica DL Pro), der für die Untersuchungen im Dauerstrichbetrieb betrieben wird. Das Signallicht wird durch Abschwächer auf einen Bereich im unteren mW-Bereich begrenzt. Durch entsprechende Strahlformung werden die beiden Eingangsstrahlen kollimiert, räumlich übereinandergelegt und über eine asphärische Linse modenangepasst in den Wellenleiter eingekoppelt. Hinter dem Wellenleiter werden die Strahlen erneut kollimiert und durch dielektrische Spiegel nach verschiedenen Wellenlängen räumlich voneinander getrennt. Mithilfe zweier Kameras können so beide Eingangsstrah-

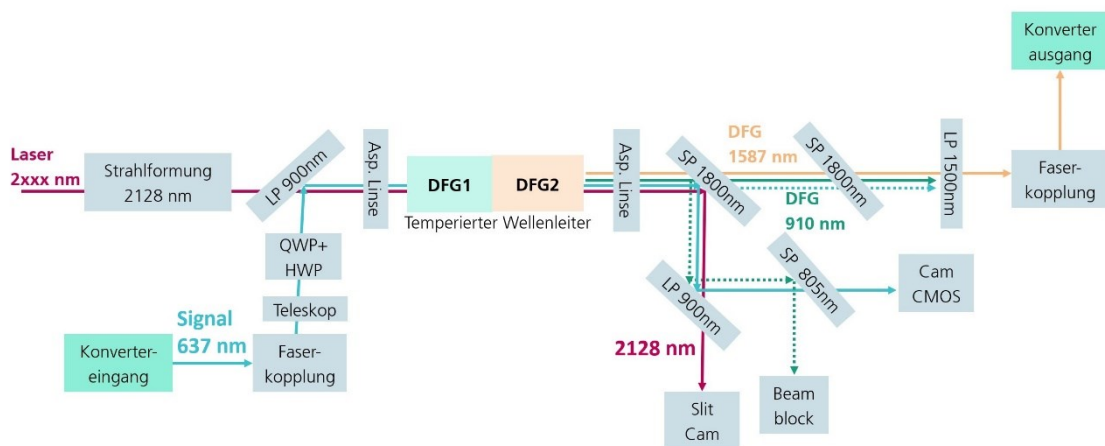


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Labordemonstrators.

len hinter dem Wellenleiter betrachtet werden, wodurch die Einkopplung in den Wellenleiter für beide Strahlungsfelder unabhängig voneinander optimiert werden kann. Das erzeugte Licht bei einer Wellenlänge von 1587 nm wird spektral von den anderen Strahlanteilen getrennt, in eine Single-Mode-Faser eingekoppelt und dort mit einem fasergekoppelten Schmalbandfilter erneut spektral gefiltert, welcher den Ausgang des Labordemonstrators darstellt. Aus der gemessenen Eingangsleistung bei einer Wellenlänge von 637 nm sowie der erzeugten Leistung bei 1587 nm lässt sich die (externe) Konversionseffizienz des Gesamtsystems bestimmen. Durch Messung und Korrektur der Transmissionsverluste folgt daraus die interne Konversionseffizienz des Prozesses. Alle in diesem Bericht angegebenen Werte der Konversionseffizienz wurden außerdem um das Wellenlängenverhältnis $\lambda_{\text{out}}/\lambda_{\text{in}}$ korrigiert und beschrieben somit die Wahrscheinlichkeit für ein Photon, beim Durchgang durch das System konvertiert zu werden. Durch Messung der residualen Leistung bei 637 nm Wellenlänge hinter dem Wellenleiter ($\lambda_{\text{out}}^{637}/\lambda_{\text{in}}^{637}$) lässt sich des Weiteren die Konversionseffizienz in der ersten Stufe bestimmen ($\lambda_{\text{out}}^{637}/\lambda_{\text{in}}^{637}$). Gemeinsam mit der Gesamteffizienz des zweistufigen Prozesses lässt sich somit eine Abschätzung über die Effizienz der zweiten Stufe

treffen. Durch eine Variation der eingestellten Wellenleitertemperatur lässt sich zudem eine Temperaturkennlinie aufnehmen und hieraus eine Abschätzung über die jeweiligen Temperatur-Optima für die Phasenanpassung der beiden Konversionsstufen ableiten.

Neben der Effizienz wird außerdem die auf das spektrale Passband des Filters normierte Rate der erzeugten Rauschphotonen des Demonstrators bestimmt. Hierfür wird der Konverterausgang an eine Photonendetektionseinheit, bestehend aus einem TimeTagger sowie einem Einzelphoton-Avalanche-Dioden (SPAD) Detektor (ID Quantique ID230) angeschlossen und die gemessene Photonrate über einen Zeitraum von 30 Sekunden gemittelt aufgenommen. Die gemessenen Photonraten werden zusätzlich um die Effizienz, Totzeit und Dunkelzählrate des Detektors sowie die zusätzlichen Verluste entlang der Faserstrecke korrigiert, um die tatsächliche Photonrate am Konverterausgang zu ermitteln. Bei der Messung der Rauschphotonenraten wird lediglich der Pumplaserstrahl in den QFC eingekoppelt.

Der so charakterisierte Laboraufbau zeigt eine interne Konversionseffizienz von 57% bei einer spektralen Rauschrate von 2,2 Photonen/Sekunde/Pikometer. Bei

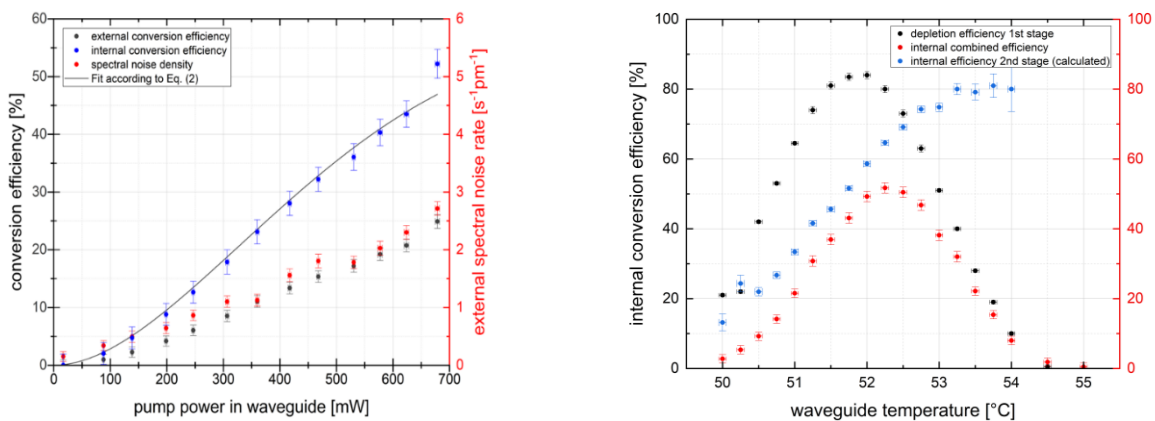


Abbildung 3: Performance des QFC-Labordemonstrators. Kennlinie (links) und Temperaturkennlinie (rechts).

einem spektralen Filter mit 40 pm Bandbreite (FWHM), entsprechend den Anforderungen an das Projektergebnis des Partners AOS, liegt das Rauschniveau unter 100 Photonen/Sekunde und erfüllt damit die Anforderungen des ersten Teilziels. Eine Messung der Temperaturabhängigkeit zeigt zudem eine Differenz in den Optima der beiden Konversionsstufen. Die Ergebnisse zur internen und externen Effizienz und der spektralen Rauschrate, ebenso wie die Temperaturkennlinie, sind in Abbildung 3 zu sehen.

2.1.4 Entwicklung einer Justagemethode für die effiziente Einkopplung

Um bei der späteren Integration des Demonstrators an der Montagemaschine Justagearbeiten teilautomatisiert durchführen zu können wurde am Labordemonstrator bereits eine Justagemethode entwickelt, die bei größeren Dejustagen

ein nützliches Steuersignal liefern und das Konversionsoptimum mit ausreichender Präzision erreichen.

Hintergrund ist hierbei die Vielzahl an gleichzeitig aktiv regelbaren Parametern, welche eine Justage auf ein globales Maximum der Konversionseffizienz komplex macht. Im Rahmen einer in das Projekt eingebetteten studentischen Abschlussarbeit wurde der Einfluss einzelner Justageparameter und Strahleigenschaften auf die interne Konversionseffizienz sowohl numerisch als auch experimentell

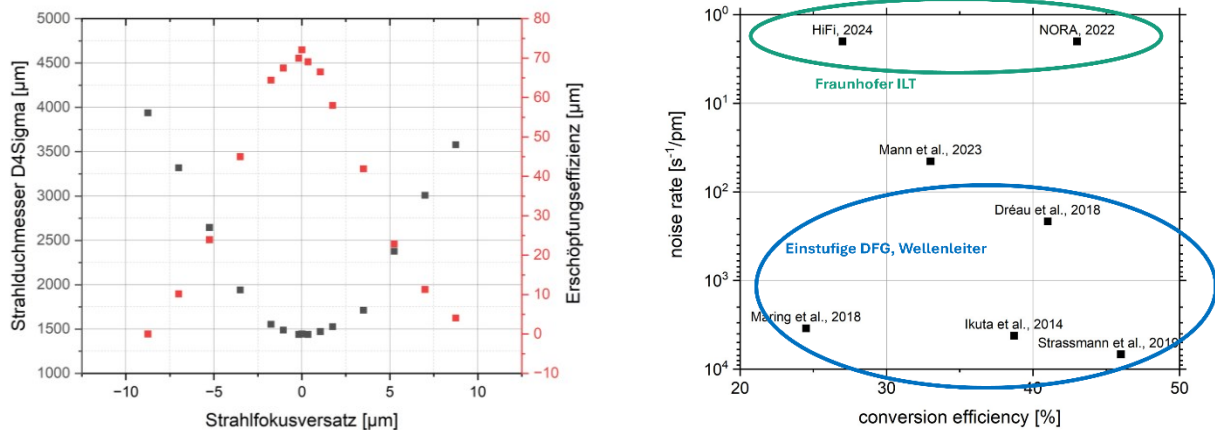


Abbildung 4: Links: Abhängigkeit der Konversionseffizienz sowie des Strahldurchmessers von einzelnen Justageparametern, als Grundlage für die entwickelte Justagestrategie. Rechts: Performance des HIFI-QFC Labordemonstrators (externe Konversionseffizienz sowie Rauschraten) im Vergleich zu anderen QFC-Lösungen für die Konversion von 637 nm ins Telekomband.

untersucht. Hierbei wurde die über das D4Sigma-Verfahren ermittelte Strahlbreite der resultierenden Strahlanteile im Fernfeld hinter dem Wellenleiter als ein global zu optimierender Parameter identifiziert. In erster Näherung geht die Reduktion dieser Strahlbreite mit einer verbesserten Einkopplung der Eingangsstrahlen in die Grundmode des Wellenleiters einher (siehe Abbildung 4, links). Dies wurde als Teil der Justagestrategie in die Vorbereitung zum Aufbau des Technologiedemonstrators und die darauffolgenden Entwicklungen integriert.

2.1.5 Benchmarking mit 1-stufiger QFC

Als Benchmarking und Vergleich mit anderen einstufigen QFC-Methoden wurden insbesondere die Parameter der internen Quanteneffizienz sowie der spektralen Rauschrate in Betracht gezogen. Das erste Teilziel des Verbundes, welches durch den Meilenstein M4 erfolgreich erfüllt wurde, lieferte hierbei eine quantitative Orientierung. Dabei zeigt sich, dass im Rahmen von HIFI eine im Vergleich zur publizierten Literatur um mindestens eine Größenordnung geringere Rauschrate erreicht wurde. Hinsichtlich der internen Effizienz werden die bislang publizierten Spitzenwerte nicht vollständig erreicht, bezogen auf das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) liegt HIFI allerdings gegenüber allen bislang berichteten einstufigen, wellenleiterbasierten QFC-Lösungen nahezu eine Größenordnung vor dem bisherigen Stand der Technik. Im direkten Vergleich dieses Schlüsselparameters ist festzuhalten, dass lediglich die NORA-QFC-Implementierung des Fraunhofer ILT, basierend auf einer einstufigen Konversion in einem nichtlinearen Kristall innerhalb einer Überhöhungskavität, ein nochmals um einige zehn Prozent verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis aufweist. Dieser Vorteil geht jedoch mit einem

deutlich erhöhten systemtechnischen Aufwand einher. Im Projekt HIFI wurde dieser Trade-Off bewusst in Kauf genommen und ein Ansatz mit einer potenziell besseren Integrierbarkeit gewählt. Es ist zu berücksichtigen, dass die interne Effizienz perspektivisch durch eine Erhöhung der verfügbaren Pumpleistung bei 2128 nm gesteigert werden kann, während das Rauschen mit zunehmender Pumpleistung ebenfalls anwächst und sich das SNR dadurch nicht zwangsläufig verbessert. Eine weitere Verbesserung des SNR wäre – abhängig vom dominierenden Rauschmechanismus – voraussichtlich primär über konstruktive Maßnahmen wie zusätzliche spektrale Filterstufen zwischen Konversionsstufen oder eine weiter optimierte Kristallqualität. Solche weiterführenden Optimierungen waren jedoch nicht Gegenstand des Projekts HIFI.

2.2 Optik-Design

2.2.1 Optimierung des Optikdesigns für das QFC-Modul

Ziel des Optikdesigns im Rahmen von AP 4.2 (*Untersuchungen zur kompakten, integrierten Umsetzung eines QFC Setups*) für das QFC-Modul ist die dauerstabile Umsetzung einer optimalen Kopplungseffizienz zwischen den Faserfacetten und der Ein- / Austrittsfacette des nichtlinearen Wellenleiters, unter Berücksichtigung aller für die Justage notwendigen Freiheitsgrade sowie der Zugänglichkeit für die Gewinnung der notwendigen Messparameter für den Justage-Algorithmus innerhalb eines kompakten Aufbaus. Das ausgelegte Optikdesign ist in Abbildung 5 dargestellt. Die beiden Wellenlängen 637 nm und 2128 nm werden von den entsprechenden Faserausgängen auf den Eingang des nichtlinearen Wellenleiters abgebildet. Am Ausgang des Wellenleiters wird die Wellenlänge 1587 nm auf die Facette der oberen Faser abgebildet sowie die verbleibende Leistung bei 2128 nm auf die Strahlfalle gelenkt. Die beiden dichroitischen Spiegel dienen der Überlagerung der beiden Wellenlängen am Eingang bzw. der Separation der beiden Wellenlängen am Ausgang des Wellenleiters.

Das System besteht aus den Asphären Lightpath 355230 (4x) und Lightpath 356300 (1x). Die Analyse des Systems zeigt im Spotdiagramm eine beugungsbegrenzte Abbildung für alle drei Wellenlängen. Die berechneten nominellen Kopplungseffizienzen liegen bei: 98,7% (637 nm), 99,4% (2128 nm) und 97,4% (1587 nm).

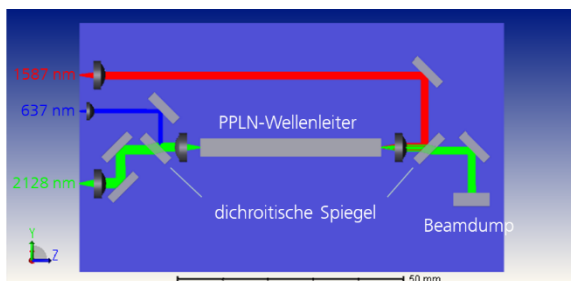


Abbildung 5: Optikdesign des QFC-Moduls.

2.2.2 Toleranzanalyse und Justagestrategie

Ziel der Toleranzanalyse und Justagestrategie ist die Bewertung des Einflusses der Fertigungstoleranzen der Fasern (Modenfelddurchmesser) sowie der Montagetoleranzen (Klebeschrumpf) auf die Performance des Systems sowie die Festlegung der Montagereihenfolge und Justagemethode (aktiv / passiv) der Komponenten. Die Justagestrategie ist im Folgenden beispielhaft für den Strahlengang bei 2128 nm dargestellt, mit den Linsenbezeichnungen aus Abbildung 6:

1. Kleben von 8 und 13 (schon für 637 nm Strahlengang) & Klebeschrumpf in x-Richtung von 13

$$\Delta x_{13} \approx -0.58 \mu\text{m}$$

Abfall der Kopplungseffizienz von 99.4% auf 98%

2. Kompensation mit Linse 4

$$\Delta x_4 = -\Delta x_{13}$$

Erhöhung der Kopplungseffizienz auf 99.3% (Positionsfehler in Bildebene korrigierbar, Winkelfehler nicht)

3. Kleben von 4 & Klebeschrumpf in x-Richtung von 4 (ohne Vorhalten)

$$\Delta x_4 = 0.58 \mu\text{m} + d_{\text{Kleber}} \cdot 1\% = 1.33 \mu\text{m}$$

Abfall der Kopplungseffizienz auf 93.7%

Eine ähnliche Betrachtung liefert für die anderen Wellenlängen erreichbare Kopplungseffizienzen von 96,1% (637 nm) bzw. 97,3% (1587 nm) zusammen mit einer entsprechenden Justagestrategie und -reihenfolge der Komponenten.

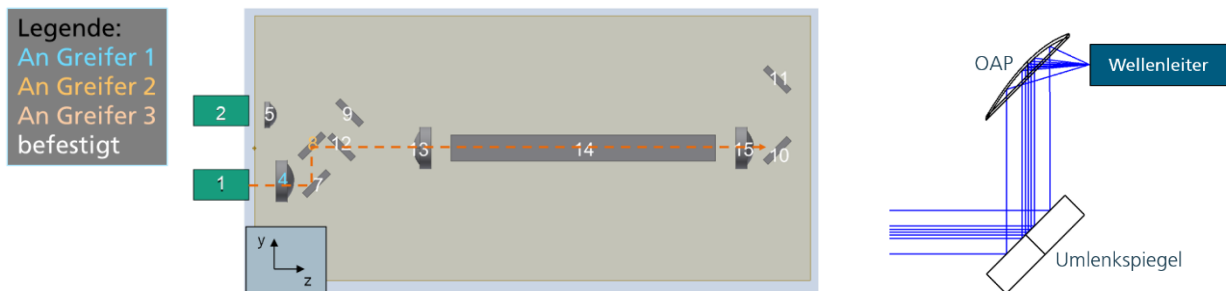


Abbildung 6: Links: Justagestrategie des QFC. Rechts: Refraktive Koppeloptik.

2.2.3 Off-Axis-Parabolspiegel

Als Teil von AP 4.2 wurde eine reflektierende Fokussierung, bestehend aus einem Off-Axis-Paraboloid (OAP), als Alternative zu einer refraktiven Single-Mode-Kopplung mittels Asphäre untersucht. Verglichen mit dieser bietet der OAP den Vorteil, dispersionsfrei und bei optimaler Justage und Fertigung aberrationsfrei zu sein. Aufgrund des kleinen Feldes ist der OAP allerdings relativ justageempfindlich. Daher wurde im Rahmen einer Toleranzanalyse die Sensitivität von OAP und Asphäre bei gleicher Wellenlänge, Brennweite und Öffnung verglichen. Hierzu wurden die maximal zulässigen Verkippungen und Verschiebungen der

beiden Komponenten bestimmt, bei denen die theoretisch erreichbare Koppel-effizienz auf 95% abfällt (inverse Sensitivitätsanalyse). Während die Verschiebung des OAP einen ähnlichen Einfluss auf die Koppel-effizienz wie die Verschiebung der Asphäre hat, reagiert der OAP deutlich empfindlicher auf Verkippungen. Die maximal zulässige Verkippung beträgt $0,016^\circ$ für die Asphäre und $0,004^\circ$ für den OAP. Das fokussierende OAP-System ist in Abbildung 6 rechts dargestellt.

2.3 Mechanisches Design

2.3.1 Kompakte, integrierte Umsetzung des Wellenleiter-Packagings

Im Rahmen von AP 4.2 wurde am Fraunhofer ILT eine Lösung für das Packaging des Wellenleiterchips entwickelt. In der entwickelten Lösung wird der Wellenleiterchip auf eine Titan-Wärmesenke geklebt, die über ein darunter integriertes Peltierelement aktiv temperiert wird. Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Optimierung der thermischen Anbindung zwischen Chip und Wärmesenke, um eine homogene und langzeitstabile Temperaturverteilung im Wellenleiter sicherzustellen. Gleichzeitig bildet das Wellenleiter-Package eine Wärmequelle im Gesamtpackage des Konverters. Ein weiteres Peltierelement sorgt dafür, dass die Temperatur der Konvertergrundplatte stabil bleibt, sodass durch das Heizen des Wellenleiters die anderen Optiken auf der Konverterplatte nicht dejustiert werden.

Die Klebstrategie wurde iterativ weiterentwickelt – von punktueller Randverklebung über vergrößerte Klebepunkte bis hin zu einer vollflächigen Verklebung. Jede Variante wurde im Labordemonstrator integriert und hinsichtlich der temperaturabhängigen Konversionseffizienzen beider Stufen charakterisiert; ergänzend wurde die Temperaturverteilung mittels Wärmebildanalyse (siehe Abbildung 7 rechts) erfasst. Es zeigte sich eine deutliche Korrelation zwischen thermischer Homogenität und Phasen Anpassung. So konnte durch diese Weiterentwicklung die Differenz der optimalen Phasen Anpassungstemperaturen beider Stufen von ca. 4 K auf nahezu identische Werte reduziert werden.

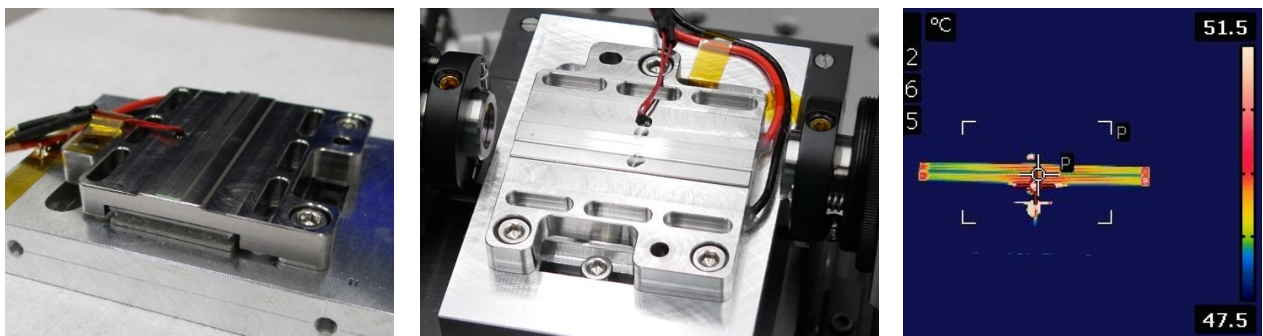


Abbildung 7: Links & Mitte: Wellenleiter-Packages mit Wellenleiterchip und Wärmesenke. Rechts: Wärmebildkamera-Aufnahme des temperierten Wellenleiter-Packages.

Die Ergebnisse belegen, dass die Wahl geeigneter Klebparameter einen direkten Einfluss auf die effektive Phasenanpassung und damit auf die Systemperformance besitzt. Gleichzeitig eröffnet die optimierte thermische Anbindung die Möglichkeit, fertigungstechnisch bedingte Inhomogenitäten teilweise zu kompensieren.

Ergänzend wurde außerdem das Konzept einer Wärmesenke mit Temperatursegmentierung untersucht, die eine getrennte Temperaturregelung der beiden Konversionsstufen vorsieht. Hierzu wurde die Wärmesenke in zwei thermisch weitgehend entkoppelte Zonen unterteilt, die jeweils in einem definierten Bereich unabhängig temperiert werden können, um unterschiedliche Betriebstemperaturen der beiden Konversionssegmente zu ermöglichen. Eine entsprechende Design-Iteration aus einem Vorgängerprojekt wurde ausgelegt und additiv gefertigt. Zudem wurde die Montage eines Probekristalls aus dem gleichen Substratmaterial auf der segmentierten Wärmesenke erprobt (siehe Abbildung 8). Die Voruntersuchungen der Temperierbarkeit zeigten, dass sowohl eine separate Temperierung der beiden Zonen als auch eine mechanisch sichere Montage des Probekristalls ohne Beschädigung grundsätzlich realisierbar sind. Vor dem Hintergrund des kritischen Pfads beim Aufbau des Demonstrators und der zufriedenstellenden Performance der einteiligen Wärmesenke wurde dieser Ansatz im Projektverlauf nicht weiterverfolgt.

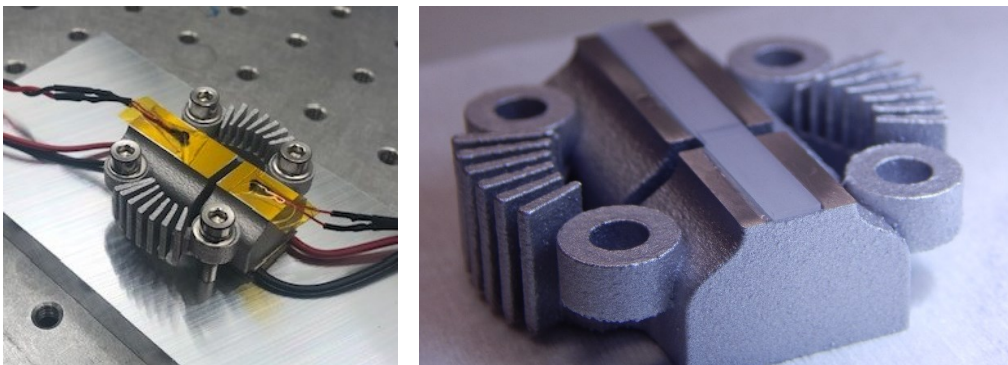


Abbildung 8: Modell der Wärmesenke mit Temperatursegmentierung.

2.3.2 Aufbau und Montage des optimierten QFC-Setups

Im Rahmen des Arbeitspakets 7.1 wurde ein Gesamtkonzept für den Aufbau des finalen QFC-Moduls entwickelt und hinsichtlich der definierten Anforderungen bewertet. Dabei wurden die in AP 4.2 erarbeiteten Erkenntnisse zu Justage-, Montage- und Stabilitätsanforderungen systematisch berücksichtigt.

Es wurde ein modulares Design realisiert, bei dem auf einer Grundplatte (40 mm × 150 mm × 200 mm) einzelne mechanische Trägerstrukturen positioniert, über Passstifte referenziert und verschraubt werden (siehe Abbildung 9). Dieses Konzept ermöglicht eine hohe Variabilität sowie den Austausch einzelner Komponenten. Die Montage der Optiken erfolgt (in Abstimmung mit den Projektpartnern) mittels Klebung. Die Fertigungstoleranzen der Grundplatte ($\pm 10 \mu\text{m}$) und der Optiken ($\pm 15 \mu\text{m}$) ergeben eine Gesamttoleranz von $\pm 25 \mu\text{m}$, die durch den definierten Klebespalt kompensiert wird. Ziel der Konstruktion war die Sicherstellung einer mechanischen Stabilität innerhalb der aus der optischen Toleranzanalyse abgeleiteten Grenzwerte, sodass die Qualität der Einkopplung nicht beeinträchtigt wird.

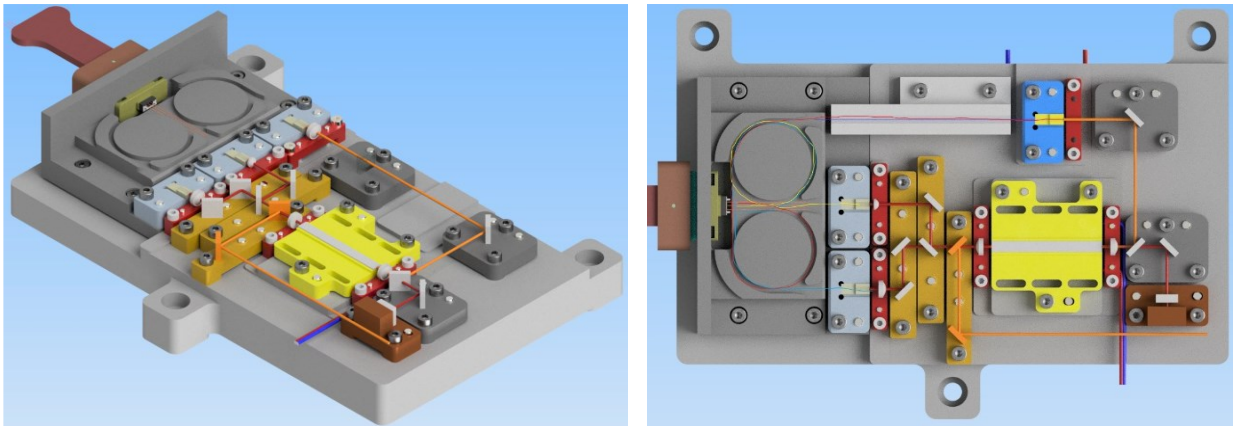


Abbildung 9: CAD-Modell des mechanischen Designs des Frequenzkonverters, inklusive den Strahlengängen der beteiligten Laserstrahlen. Links perspektivisch, rechts Draufsicht.

Zur Verifikation wurden thermische und statisch-mechanische Simulationen (Ansys) durchgeführt. Die Thermalanalyse berücksichtigte eine Wellenleiter-Betriebstemperatur von bis zu 80°C bei 22°C Umgebungstemperatur der Peltier-Elemente. Es ergab sich eine maximale Temperaturerhöhung an den optischen Komponenten von $0,3^\circ\text{C}$. Die Leistungsaufnahme der Peltier-Elemente beträgt $2,15 \text{ W}$ am Wellenleiter sowie $4,15 \text{ W}$ an der Grundplatte.

Die statisch-mechanische Analyse untersuchte translatorische und rotatorische Verkippungen infolge thermisch induzierter Ausdehnungen. In allen betrachteten Fällen lagen die berechneten Abweichungen unterhalb der zulässigen Werte der optischen Sensitivitätsanalyse. Die Ergebnisse belegen, dass thermisch bedingte Verspannungen durch das gewählte Optikdesign kompensiert werden können, ohne dass hierdurch signifikante Verluste in der Einkopplung entstehen.

2.4 Technologiedemonstrator

2.4.1 Faserkopplung des Fraunhofer IAF OPSL

Zur Anbindung des vom Projektpartner Fraunhofer IAF entwickelten OPSL an das integrierte QFC-Modul war die Einkopplung des Freistrahls in eine Singlemode-Faser erforderlich, da das Modul faserbasierte Schnittstellen für alle drei beteiligten Wellenlängen vorsieht. Die Auslegung der Einkoppeloptik erfolgte zunächst auf Basis

numerischer Simulationen der Strahlparameter und wurde anschließend experimentell umgesetzt und optimiert sowie eine entsprechend konfektionierte Singlemode-Faser mit Endkappe beschafft. Im Rahmen der experimentellen Charakterisierung zeigte sich jedoch, dass die realen Faserparameter von den Herstellerangaben abweichen, insbesondere hinsichtlich Modenfelddurchmesser und numerischer Apertur, was sich bei einer Untersuchung von Fasern des Projektpartners Rosenberger reproduzierte (siehe Kapitel 2.4.2). Entsprechend erforderte dies eine Anpassung sowohl des Optikdesigns im QFC-Modul (insbesondere der Kollimationsoptik) als auch der Auslegung der Freistrahleinkopplung in die Faser.

Im Optik-Design wurde dies erfolgreich gelöst durch die Anpassung der Kollimationslinse, angepasst auf den neuen Abstrahlwinkel, auf Seiten der Einkopplung des Freistrahls in den OPSL durch eine neue Auslegung des Freistrahls. Nichtsdestotrotz ließ sich aufgrund dieses Umstandes mit Standardkomponenten nur eine eingeschränkte Koppeffizienz der Pumpleistung in die Faser von 26% realisieren. Unter idealisierten Annahmen zur Fasergeometrie und Modenanpassung war im Vorfeld auf Basis von Simulationen eine maximale Koppeffizienz von knapp 60%, also über einem Faktor zwei höher, prognostiziert worden, was die verfügbare effektive Pumpleistung am QFC-Modul also signifikant reduziert. Zusammen mit optischen Verlusten aufgrund der Faserverbindungen entlang der Faserstrecke ergibt sich eine verfügbare Pumpleistung im Wellenleiter von 310 mW.

2.4.2 Dokumentation und Übergabe von Aufbau- und Justagestrategien

Ein zentraler Arbeitspunkt innerhalb des vierten Teilziels des Verbunds bestand in AP 7 (*Montage, Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)*) sowie AP 8 (*Frequenzkonverter-Modul*) im schrittweisen Aufbau eines vollintegrierten Technologiedemonstrators, der alle optischen, mechanischen und thermischen Komponenten des QFC in kompakter Form vereint. Grundlage hierfür waren die in AP 4.2 entwickelte Justagestrategie sowie die aus dem Optikdesign abgeleiteten Toleranz- und Sensitivitätsanalysen (siehe Kapitel 2.2), aus denen konkrete Anforderungen an Aufbau, Funktionalität und Schnittstellen der Montagemaschine abgeleitet und mit den Projektpartnern abgestimmt wurden.

Für die Montage der Optiken wurde in AP 7.1 die Klebung als Fügeverfahren festgelegt. Der Klebprozess wurde in systematischen Versuchsreihen hinsichtlich Klebermenge, Dispensierdauer, Druck, Nadelposition und UV-Aushärtung optimiert. Die Ergebnisse mündeten in standardisierten, optikspezifisch angepassten Kleberoutinen, die automatisiert ausgeführt werden können und eine hohe Reproduzierbarkeit der Montage gewährleisten. Im Rahmen von AP 7.1 wurde zudem die Option einer Direktlötung untersucht und anhand der Direktlötung von Fasern erfolgreich demonstriert. Diese Methode stellt also eine veritable Alternative zur Klebung dar, wurde allerdings aus pragmatischen Gründen für den Technologiedemonstrator nicht ausgewählt.

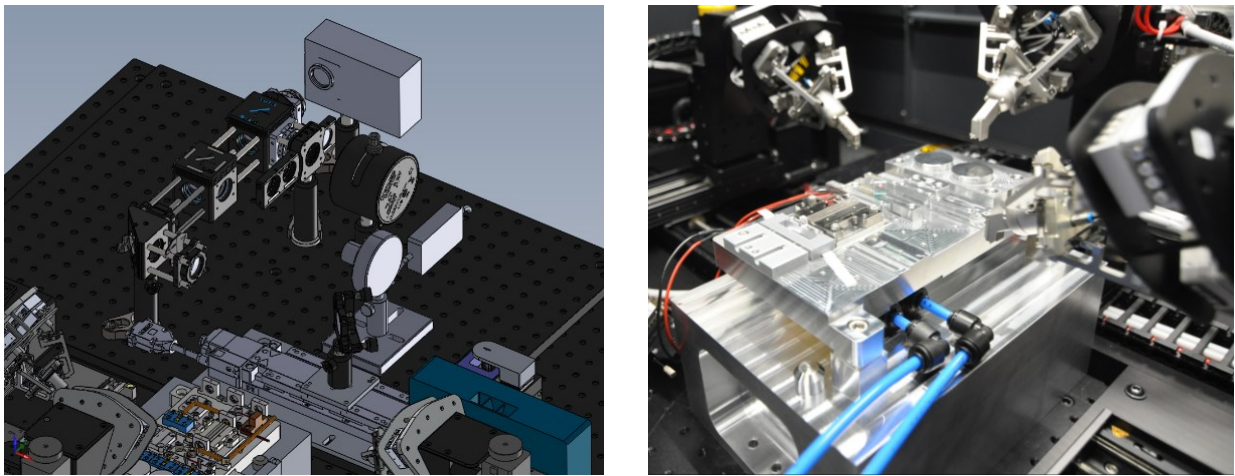


Abbildung 10: links: Messstrecke innerhalb der Montagemaschine, rechts: QFC-Modul, positioniert auf einem Podest mit integrierter Wasserkühlung sowie die drei Manipulatoren.

Die Justagestrategie erforderte drei unabhängig und simultan steuerbare Greifer, in denen die verschiedenen Optiken eingesetzt und durch Vakuum angesaugt, um dann durch Pick&Align-Verfahren an ihre Position gebracht und justiert zu werden. Die Greifer wurden so ausgelegt, dass jeweils unterschiedliche Optiken nacheinander an einem Greifer gehalten werden können, sodass diese zwischen den verschiedenen Arbeitsschritten selten umgerüstet werden müssen. In Kombination mit Makro- und Mikromanipulatoren ermöglichen sie präzise Bewegungen in jeweils drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgraden. Das QFC-Modul wurde entsprechend dem definierten Design (siehe Kapitel 2.3.2) auf einem Aluminium-Podest in die Maschine integriert, sodass alle Montagepositionen durch die Greifer erreichbar sind. Die Temperaturkontrolle des Wellenleiter-Packages sowie eine zusätzliche Wasserkühlung des Podests wurden implementiert, um ein Aufheizen des Podests bei Temperierung des Wellenleiter-Packages zu verhindern. Zusätzlich wurde eine oberseitig befestigte Auswahl an Werkzeugen in die Maschine integriert, bestehend aus einer Oberseitenkamera, einer Dispensiereinheit sowie einer UV-Lampe zum Aushärten des Klebers.

Zusätzlich zu den fest verbauten Hardware-Komponenten wurde in Zusammenarbeit mit AixemTec eine Freistrahlmessstrecke hinter dem Modul realisiert, die eine räumliche Trennung der Strahlen und deren kamerabasierte Analyse analog zum Labordemonstrator ermöglicht (siehe Abbildung 10). Eine entsprechende Software-

Schnittstelle erlaubt die direkte Einbindung der Messwerte in die Maschinensteuerung und deren Nutzung innerhalb der Justage-Rezepte. Dadurch wurde die Grundlage für eine (teil-)automatisierte, messwertbasierte Optimierung der Einkopplung geschaffen (siehe Kapitel 2.4.3).

Zur Realisierung der Konnektivität des QFC-Moduls wurde die Faserkopplung der beteiligten Strahlen in speziell entwickelten Fasermodulen umgesetzt. In AP 5 (*Faserkopplung und -konnektoren*) wurden diese im Rahmen von AP 5.2 durch den Projektpartner Rosenberger als lösbare Faserkonnektoren entwickelt. Das Fraunhofer ILT unterstützte Rosenberger in engem Austausch bei der Definition der technischen Anforderungen sowie durch die Auslegung des QFC-Designs, sodass alle Fasern so geführt werden, dass sie durch denselben Stecker verbunden werden können. Vor der finalen Auslieferung wurden die entwickelten Fasermodule am Fraunhofer ILT hinsichtlich ihrer Performance (Koppelverluste, Abstrahlverhalten sowie korrekte Orientierung der Spannungsstäbe in den polarisationserhaltenden Fasern) charakterisiert, insbesondere vor dem Hintergrund der zuvor gemessenen abweichenden Faserparameter der Fasern für 2128 nm. Hierbei wurden die in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Abweichungen von den theoretischen Werten reproduziert, was zeigte, dass es sich nicht um statistische Produktionstoleranzen, sondern systematische Unterschiede von den Herstellerangaben handelte, was die in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Design-Anpassungen nötig machte. Abgesehen hiervon erfüllten sämtliche geprüften Konnektoren die vorgegebenen Spezifikationen ohne qualitative Abweichungen. Nach erfolgreicher Verifikation wurden die Module an Rosenberger zurückgeführt und im Rahmen des Projektabschlusstreffens an das Fraunhofer ILT übergeben.

Zudem wurde im Rahmen von AP 6 (*Spektrale Filterung*) vom Projektpartner AOS ein schmalbandiger Spektralfilter zur Reduktion von Rauschphotonen im Ausgangsband entwickelt, wobei das Fraunhofer ILT bei der Definition der Anforderungen an das Gesamtfiltersystem unterstützte. Dieser Filter wurde im Zuge des Projektabschlusstreffens im September 2025 ans ILT ausgeliefert, konnte aufgrund des späten Zeitraums allerdings nicht mehr im Rahmen des Projekts vom Fraunhofer ILT eingesetzt werden.

2.4.3 Justagerezepte für den Aufbau

Die Funktionalität der AixemTec Montagemaschine lässt sich in verschiedene Benutzerkontrollenebenen darstellen. Die einfachste Ebene erlaubt die manuelle Bedienung der einzelnen Makro- und Mikromanipulatoren sowie der Werkzeuge durch den Benutzer, sowie die Kontrolle über vorgefertigte Funktionsbausteine und Rezepte in der graphischen Benutzeroberfläche. Die nächsthöhere Benutzerebene erlaubt die Erstellung von sogenannten Rezepten, in denen aus einzelnen Funktionsbausteinen Prozessroutinen und Sequenzen zusammengestellt implementiert werden können. In der höchsten Benutzerebene besteht zudem die Möglichkeit, über die zugrunde liegenden Python-Funktionen komplett neue Funktionalitäten einzubinden oder Rezepte ressourceneffizienter umzusetzen. Im Rahmen des Projekts wurde primär die Funktionalität der Rezepte innerhalb der Benutzeroberfläche genutzt. Dabei entstanden zwei zentrale Rezeptkategorien: Justagerezepte zur iterativen Optimierung der Einkopplung der Laserfelder in den Wellenleiter gemäß der in Kapitel 2.1.4 beschrieben Justagemethode sowie Rezepte für einen automatisierten Klebprozess

der Optiken. Die Justagerezepte basieren auf einem iterativen Optimierungsverfahren. Dabei werden die verschiedenen Freiheitsgrade einer Optik systematisch nacheinander variiert, während der in Kapitel 2.1.4 definierte Zielparameter des Strahldurchmessers überwacht und zusammen mit den Bewegungsparametern geloggt wird. Die Variation erfolgt so lange, wie sich der Zielparameter verbessert; bei einer Verschlechterung wird der letzte Schritt zurückgenommen, sodass das lokale Optimum erreicht ist. Durch eine systematische Anwendung dieses Prinzips auf alle Freiheitsgrade lässt sich somit das globale Optimum der Einkopplung finden. Die Justage einer Optik in drei Freiheitsgraden kann so mit einer Positionsgenauigkeit von $0,1 \mu\text{m}$ innerhalb einzelner Minuten realisiert werden (siehe beispielhaft Abbildung 11 für die Justage von Kollimationslinse 5 in drei Dimensionen), was gegenüber manuellen Laborjustagen ($> 1 \text{ h}$ bei vergleichbarer Genauigkeit) einer Beschleunigung um mehr als eine Größenordnung entspricht. Die Optimierung ist zudem auch nach gezielter Dejustage reproduzierbar (vgl. Abbildung 11). Insgesamt führt das Verfahren also zu einer signifikanten Verbesserung von Prozessstabilität, Effizienz und Wiederholgenauigkeit und schafft gleichzeitig eine breitere Datenbasis zur Bewertung.

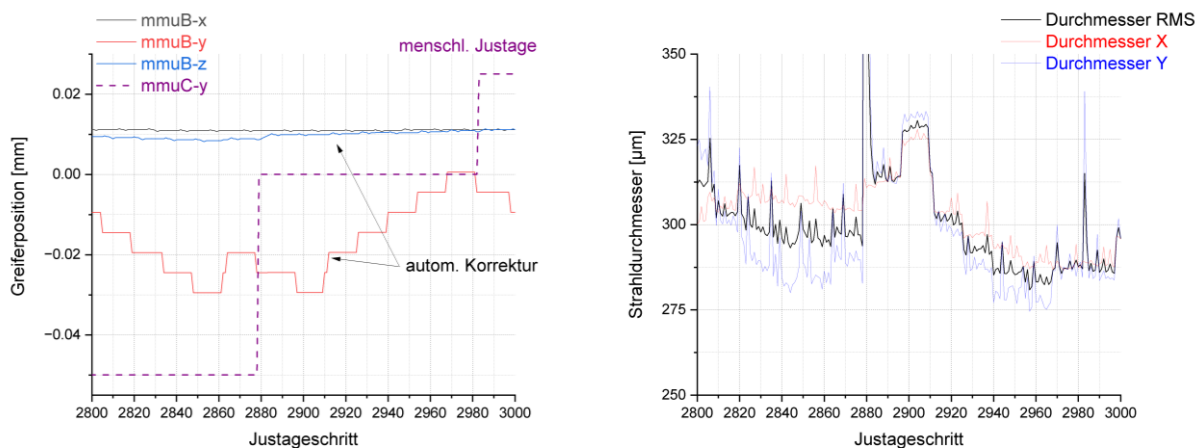


Abbildung 11: Veranschaulichung der teilautomatisierten Justage in drei Freiheitsgraden bei zusätzlicher manueller Einwirkung beispielhaft für Linse 13. Ein Justageschritt entspricht hier einem Zeitaufwand von 1-2 Sekunden, ein kompletter automatisierter Justagezyklus nach manueller Einwirkung wird somit in ca. 1,5 Minuten durchgeführt. Links: Greiferpositionen je Justageschritt. Rechts: Strahldurchmesser während der Justage.

2.4.4 Aufbau Technologiedemonstrator

In AP 8.2 wurde der Aufbau des Technologiedemonstrators auf Basis der zuvor entwickelten Aufbau-, Justage- und Montagetechniken umgesetzt. Die Justage der beiden Eingangsstrahlengänge bei 637 nm und 2128 nm wurde anhand der entwickelten Rezepte systematisch umgesetzt. Der 637-nm -Strahl konnte vollständig ausgerichtet und mit hoher Effizienz in den Wellenleiter eingekoppelt werden; die anschließende Klebung aller beteiligten Optiken wurde erfolgreich durchgeführt. Temperaturzyklen über 24 Stunden zeigten keine degradierenden Effekte. Belastbare Aussagen zur Langzeitstabilität erfordern jedoch weiterführende Untersuchungen über längere Zeiträume.

Auch für den Pumpstrahl wurde die Einkopplung erfolgreich demonstriert. Zunächst jedoch blieb das erwartete *First Light* – also die ersten wiederholbaren Messungen konvertierter Photonen – im integrierten Demonstrator trotz identischer Randbedingungen zum Labordemonstrator aus. Im Zuge einer umfangreichen Fehleranalyse, bei der u. a. die Laserwellenlängen präzise vermessen (637,24 nm bzw. 2128,05 nm), Polarisationszustände überprüft, Temperaturen weit über den gesamten relevanten Bereich abgestimmt, potenzielle Beschädigungen ausgeschlossen wurden, ließ sich das Problem mit einer speziell angefertigten Blende in der fehlerhaften Einkopplung identifizieren und beheben. Infolgedessen gelang auch die Justage und Optimierung der Einkopplung in den Wellenleiter mithilfe der zuvor entwickelten Rezepte.

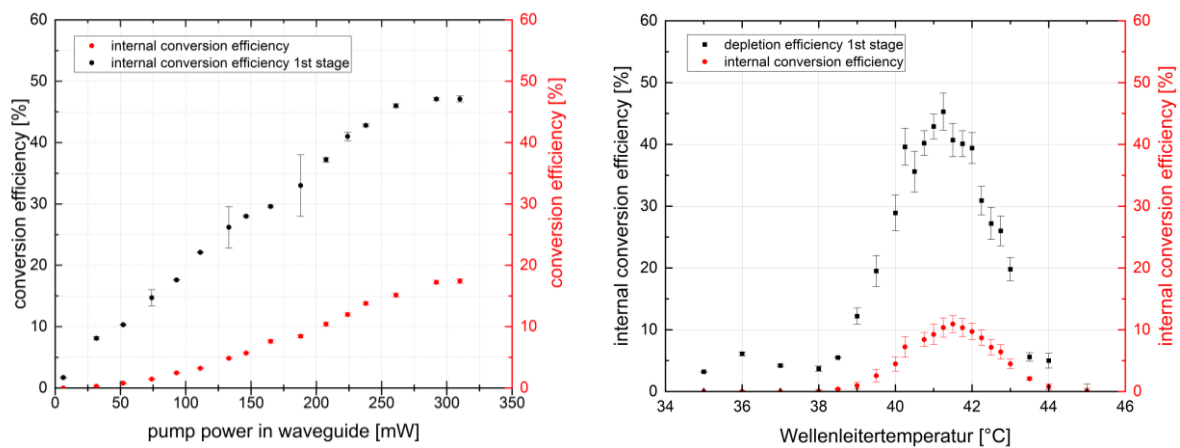


Abbildung 12: Ergebnisse des ersten QFC-Technologiedemonstrators in der Montage-Maschine. Links Leistungskennlinie, rechts Temperaturkennlinie.

Eine qualitative Einordnung der gemessenen Performance geschieht durch einen Vergleich mit dem Labordemonstrator des vorliegenden Wellenleiter-Packages. In diesem wurde bei einer Pumpleistung von 750 mW eine maximale interne Quanteneffizienz von 48% erzielt. Die Extrapolation der Messdaten weist auf ein Effizienzmaximum von 50% bei einer Pumpleistung von etwa 883 mW hin. Im Technologiedemonstrator standen maximal 310 mW Pumpleistung zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.4.1). Unter diesen Bedingungen wurde hier eine interne Quanteneffizienz von 17% erreicht, wobei für die erste Konversionsstufe kamerabasiert eine Effizienz von 47% bestimmt wurde (siehe Abbildung 12). Die Extrapolation der Messwerte sowie Vergleich mit den Laborergebnissen zeigt, dass sich die Effizienz normiert auf die eingesetzte Pumpleistung konsistent zum Labordemonstrator verhält und sich auch die temperaturabhängige Phasen Anpassung reproduziert. Bei 883 mW wäre auf dieser Basis im Technologiedemonstrator eine interne Konversionseffizienz von 48% zu erwarten, 2 Prozentpunkte unter dem extrapolierten Maximalwert des Laboraufbaus und im Rahmen der Unsicherheiten mit diesem verträglich. Die reduzierte absolute Effizienz ist folglich primär auf die begrenzte verfügbare Pumpleistung zurückzuführen. Eine vollständige Reproduktion der im Labordemonstrator erzielten Maximalwerte wäre durch eine Erhöhung der effektiven Pumpleistung um etwa einen Faktor drei möglich. Hauptsächlich sind hierfür einerseits eine Reduktion der Kopplungsverluste. Wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, wäre bei der

ursprünglichen Fasergeometrie im theoretischen Optimum (bei optimierter Faserkuppeeffizienz von 60% und ohne Einbezug zusätzlicher Verluste) eine effektive Pumpleistung von ca. 620 mW zu erwarten gewesen, entsprechend einer internen Konversionseffizienz von knapp 40%. Dies stellt eine obere Abschätzung an die mit diesem Systemkonzept zu erwartende Performance bei neu gestaltetem Optikdesign dar. Eine zweite Stellgröße ist eine Erhöhung der effektiven Pumpleistung durch eine höhere Ausgangsleistung des OPSL. Beide Maßnahmen stellen Optimierungen innerhalb des bestehenden Systemkonzepts dar. Für eine Nutzung des vollen Potentials der theoretisch möglichen Konversionseffizienz bei der vorhandenen Pumpleistung wäre alternativ ein angepasstes Design unter Abschaffung der fasergekoppelten Konnektivität in Betracht zu ziehen. Dies würde jedoch einen konzeptionellen Eingriff in die Systemarchitektur bedeuten und ist qualitativ von einer inkrementellen Designoptimierung zu unterscheiden.

Normiert auf die tatsächlich verfügbare Pumpleistung zeigt das integrierte QFC-Modul allerdings, dass die im Labordemonstrator erzielte Performance unter angepassten Randbedingungen konsistent auf den Technologiedemonstrator übertragen werden konnte.

3 Ergänzende Inhalte

3.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Zuge des Projekts angefallenen Ausgaben gliedern sich im Wesentlichen in Personalkosten, Sachkosten sowie Investitionskosten. Die Personalkosten umfassen die Aufwendungen für das im Projekt eingesetzte Fach- und Verwaltungspersonal, welches für Planung, Durchführung, Koordination und Dokumentation der Projektaktivitäten verantwortlich und notwendig war. Die Sachkosten beinhalteten laufende projektbezogene Aufwendungen, vor allem die Beschaffung von Aufbaumaterial zur Entwicklung des Labordemonstrators, der Konstruktion, Entwicklung und Realisierung des Technologiedemonstrators und insbesondere die hierfür benötigten speziell ausgelegten Wellenleiterchips sowie zusätzliche Optiken und Beschichtungen. Bei den Investitionskosten ist insbesondere die im Rahmen des Projekts beschaffte Montagemaschine zu nennen, welche einen integralen Bestandteil für die Realisierung vieler bearbeiteter Arbeitspakete sowie den Projekterfolg als solches darstellte.

Insgesamt zeigt der zahlenmäßige Nachweis, dass die Fördermittel zweckgebunden, wirtschaftlich und entsprechend den genehmigten Ansätzen eingesetzt wurden. Die Mittelverwendung unterstützte die erfolgreiche Umsetzung der Projektziele und gewährleistete eine strukturierte und nachvollziehbare Abbildung der zentralen Kostenbereiche.

3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Wie in Abschnitt 2 dargestellt, gliederte sich das Vorhaben in vier zentrale Hauptstränge, die teilweise parallel bearbeitet wurden und gemeinsam auf das Teilziel des Verbundes – die Entwicklung eines hochintegrierten und skalierbaren Quantenfrequenzkonverters mit einer Quanteneffizienz von $>30\%$ und Rausraten von <100 Photonen/Sekunde – ausgerichtet waren. Die daraus abgeleiteten Arbeitspakete adressierten wesentliche technische und wissenschaftliche Fragestellungen und stellten in ihrer Gesamtheit die notwendige Grundlage zur Zielerreichung dar.

Die Bearbeitung erfolgte systematisch und aufeinander abgestimmt zur Entwicklung, Integration und Validierung der Systemkomponenten. Umfang und Ressourceneinsatz standen in einem angemessenen Verhältnis zur Komplexität der Aufgaben und dienten unmittelbar der Umsetzung der genehmigten Projektziele.

Ergänzend wurden alternative Realisierungsoptionen untersucht, die nicht in den finalen Demonstrator eingeflossen sind. Diese Arbeiten dienten der Risikominimierung und Absicherung von Designentscheidungen und trugen damit wesentlich zur Stabilität des Entwicklungsprozesses bei.

3.3 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse der Messungen mit dem QFC-Labordemonstrator während der ersten Charakterisierung zeigen das hohe Potential des zweistufigen Konverteransatzes für die effiziente, rauscharme Konversion von Einzelphotonen aus einem NV-Zentrum ins Telekomband. Bei vorhandener Pumpleistung von 950 mW wurde eine interne Quanteneffizienz von über 50% sowie mit entsprechendem Filtersystem eine Rausrate von unter 100 Photonen/Sekunde erreicht und somit das erste Teilziel des Verbundes erfüllt. Zudem wurde beim Technologiedemonstrator eine für die vorhandene Pumpleistung vergleichbare Performance gezeigt, was zeigt, dass sich das Konzept vom Labordemonstrator erfolgreich und ohne signifikante Verluste auf die Ebene des kompakten, hochintegrierten Aufbaus übertragen lässt. Dies bestätigt den Erfolg des gesetzten Vorhabens und bietet Grundlage für die Weiterentwicklung des Konzeptes im Rahmen nachfolgender Prototypen.

Das Vorhaben stärkt den Transfer von Quantentechnologien in industrielle Anwendungen, erweitert die Kompetenzen und ergänzt das Produktportfolio des Fraunhofer ILT in der Entwicklung hochintegrierter QFCs für Quantenkommunikation und Quantennetzwerke. Insbesondere die Zusammenarbeit mit Projektpartner AixemTec im Kontext mit der automatisierten Herstellung bilden eine technologische Referenzplattform, die sowohl für industrielle Anwendungen als auch für Folgeprojekte und Forschungskooperationen unmittelbar nutzbar ist.

Mit dieser Grundlage aus umfangreicher Technologiekompetenz im Bereich der QFC sowie Aufbau- und Systemtechnik stärkt das Fraunhofer ILT sein Profil im Bereich der Quanten Enabling Technologien und Quantennetzwerke. Zudem stärkt das Vorhaben die Einbindung des ILT in regionale, nationale und internationale Netzwerke und Verbünde. Hier ist insbesondere die enge Zusammenarbeit auf europäischer Ebene im Rahmen der Quantum Internet Alliance zu nennen. Durch die Ergebnisse des Projekts bringt das Fraunhofer ILT seine Kompetenzen als starker Partner noch

klarer ein und positioniert sich im deutschen und europäischen Quantentechnologie-Ökosystem.

Im Rahmen des durch das Land NRW geförderten Projekts N-QUIK wurde der Transfer von Knowhow und Technologie von NV-basierten Netzwerkknoten vom niederländischen QuTech an das Fraunhofer ILT bewerkstelligt. Diese Technologie ermöglicht die Verschränkung eines Photons mit dem Spin des NV-Zentrums und wurde in dieser Form von R. Hansons Gruppe bei der Verschränkungsübertragung über Telekommunikationsfasern zwischen Delft und Den Haag³ eingesetzt. Seit Januar 2025 verfügt Fraunhofer in Aachen über einen Knoten, der aktuell in Rahmen eines weiteren Landesprojekts PLUQ_IN an das Fasertestbed auf dem RWTH-Campus angeschlossen wird und zukünftig das Kernelement eines regionalen Testbeds bildet, um Netzwerkkomponenten, wie insbesondere QFC, mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft zu entwickeln, zu validieren und zu benchmarken.

3.4 Fortschritte Dritter während der Durchführung des Vorhabens

Während der Projektlaufzeit wurde durch die Gruppe von Prof. Oliver Benson an der Humboldt-Universität zu Berlin ein Ansatz für die zweistufige Frequenzkonversion von Einzelphotonen 637 nm ins Telekomband gezeigt⁴. Das System nutzt die gleiche Technologie wie der HIFI QFC-Demonstrator mit einem periodisch gepolten Lithiumniobat-Wellenleiter, und erreicht allerdings eine externe Effizienz von 3%, also aktuell noch um fast eine Größenordnung niedriger als die im Labordemonstrator gezeigte Effizienz des HiFi-Systems.

3.5 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen

Außerhalb des Abschlussberichts sind die Ergebnisse des oben genannten F+E-Vorhabens in folgenden Beiträgen seitens des ILT publiziert worden:

L. Hollstein, H. Huber, B. Jungbluth, F. Elsen and C. Häfner, "A Novel Approach for Scalable Production of Low Noise Two-Stage Frequency Converters for NV Center Qubits in Telecom-Based Quantum Networks," *2025 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, Germany, 2025

4 Literaturverzeichnis

1. **J. H. Weber, B. Kambs, J. Kettler, S. Kern, J. Maisch, H. Vural, M. Jetter, S. L. Portalupi, C. Becher, and P Michler.** Two-photon interference in the telecom C-band after frequency conversion of photons from remote quantum emitters. *Nat Nanotechnol.* 2019 Jan;14(1):23-26. DOI: 10.1038/s41565-018-0279-8

2. **M. Bock, P. Eich, S. Kucera, M. Kreis, A. Lenhard, C. Becher and J. E-schner.** High-fidelity entanglement between a trapped ion and a telecom photon via quantum frequency conversion, *Nature Commun.* **9**, 1998 (2018)
3. **A. J. Stolk, K. L. van der Enden, M.-C. Roehsner, A. Teepe, S.O.F. Faes, S. Cadot, J. van Rantwijk, I. te Raa, R.A.J. Hagen, A.L. Verlaan, B. Biemond, A. Khorev, R. Vollmer, M. Markham, A. M. Edmonds, J.P.J. Morits, E.J. van Zwet, and R. Hanson.** Metropolitan-scale heralded entanglement of solid-state qubits. *Sci. Adv.* **10**, eadp6442(2024). DOI:10.1126/sciadv.adp6442
4. **F. von Chamier, J. Hanel, C. Müller, W. Li, R. A. Kögler, and O. Benson.** "Low-noise cascaded frequency conversion of 637.2 nm light to the telecommunication C-band in a single-waveguide device," *Opt. Express* **33**, 21650-21659 (2025)

5 Anhang

Arbeitspakete	Frequenzkonverter	Optikdesign	Mechanisches Design	Technologiedemonstrator
AP1.1.ILT: Definition der externen Anforderungen für den Use-Case Quanteninternet				
AP1.2.ILT: Definition interner Anforderungen an Komponenten, Technologien und Schnittstellen				
AP2.2.ILT: Unterstützung beim Resonatordesign				
AP2.3.ILT: Design und stabile Aufbautechnik				
AP4.1.ILT.1: Simulation & Optimierung 2-stufiger QFC				
AP4.1.ILT.2: Optimierung eines 2-stufigen QFC-Setups und Aufbau mit einem Kristall				
AP4.1.ILT.3: Benchmarking mit 1-stufiger QFC				
AP4.2.ILT.1: Aufbau und Charakterisierung eines optimierten QFC-Setups für Analyse von Justage-, Montage- und Stabilitätsanforderungen				
AP4.2.ILT.2: Qualifikation von Komponenten verschiedener Hersteller				
AP4.2.ILT.3: Optimierung des Optikdesigns und Adaption einer Justagestrategie				
AP5.1.ILT: Recherche von Konzepten und Simulation von Lösungen zur faserintegrierten Kopplung mehrerer Wellenlängen (637 nm, 1587 nm, 2128 nm)				
AP5.1.ILT.2: Auslegung/Simulation und Optikdesign für Faserkopplungen				
AP6.1.ILT: Definition der Anforderungen an das Gesamtfiltersystem (für L-Band)				
AP6.2.ILT: Test der faserintegrierten Filterstufe (für L-Band)				
AP7.1.ILT.1: Evaluierung und Vergleich von Aufbau und Montagetechniken				
AP7.1.ILT.2: Demonstration der Direktlötung				
AP7.2.ILT: Dokumentation und Übergabe von Aufbau- und Justagestrategien				
AP8.1.ILT: Optik-Design				
AP8.2.ILT: Aufbau Technologiedemonstrator				
AP8.3.ILT: Begleitung Prototypenbau				
AP9.1.ILT: Test des QFC am Quanteninternet-Demonstrator in Delft mit				
AP9.2.ILT: Identifikation von Anwendungsszenarien				