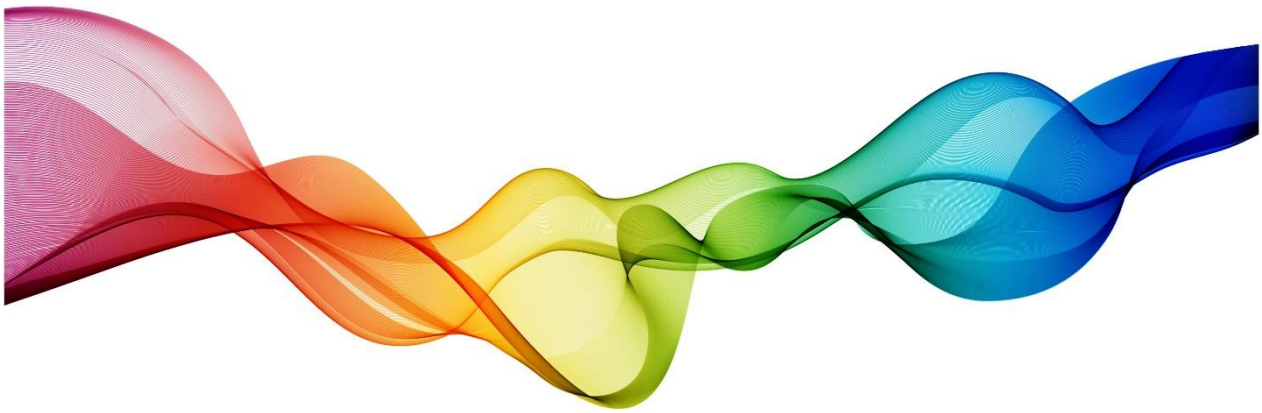
MenloSystems

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

Eingehende Darstellung

21.01.2026

Teilvorhaben: Systemintegration und optische Stabilisierung für QFC System



– Öffentlich –

Projekt- und Dokumenten Angaben

Projektinformationen

Vorhabenbezeichnung	HiFi: Hochintegrierter Quantenfrequenzkonverter höchster Fidelität auf Basis innovativer Laser-, Faser- und Produktionstechnologie
Zuwendungsempfänger	Menlo Systems GmbH Bunsenstraße 5 D-82152 Martinsried
Förderkennzeichen	13N15923
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2021 - 31.08.2025
Projektleiter	Ronald Holzwarth

Dokumentinformationen

Titel	Eingehende Darstellung
Dokumenten ID	Teilvorhaben: Systemintegration und optische Stabilisierung für QFC System
Verfasser	Milad Yahyapour
Ausgabe	1
Status	Release
Veröffentlichungsdatum	21.01.2026
Vertraulichkeitsstufe	Öffentlich
Schlagwörter	Click or tap here to enter text.

Autoren

Name	**Organisation**	**Kontakt**
M. Yahyapour	Menlo Systems GmbH	E-Mail: m.yahyapour@menlosystems.com Telephone: +49 89 189 166 237

Dokumentenfreigabe

	Name/Unterschrift	**Organisation**	**Datum**
Angefertigt von	Milad Yahyapour	Menlo Systems GmbH	21.01.2026
Überprüft von	Richard Zeltner	Menlo Systems GmbH	21.01.2026

Change Record

Ausgabe	**Date**	**Autor**	**Änderungen**
1	24.11.2025	M. Yahyapour	Initiale Version
	21.01.2026	R. Zeltner	Review

Inhaltsverzeichnis

Projekt- und Dokumenten Angaben 2
Projektinformationen 2
Dokumentinformationen 2
Autoren 2
Dokumentenfreigabe 2
Change Record 2
Inhaltsverzeichnis 3
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der Vorgegebenen Ziele 4
1.1. Verwendung der Zuwendung 4
1.2. Definition Spezifikationen, Schnittstellen Systemdesign 4
1.3. Frequenzstabilisierung Pumplaser 5
1.4. Stabilisierung der Faserstrecke für Quantenkommunikation 7
1.5. Frequenzkonverter 9
1.6. Füge- und Verbindungstechniken für Teilkomponenten, Lötverfahren für Faseroptiken. 10
1.7. Frequenzkonverter Modul – Mechanik- und Elektronik-Design 11
1.8. Integration des Technologiedemonstrators 12
1.9. Systemtest QFC an Faserstrecken 13
1.10. Ausgestaltung skalierbarer Produktlösungen 13
2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 14
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten 14
4. Voraussichtliche Nutzen 15
5. Fortschritte auf dem Gebiet 15
6. Veröffentlichungen 15

Abkürzungen und Akronyme

Tabelle 0-1: Abkürzungsverzeichnis.

Akronym	**Definition**
AOM	Accusto-Optic-Modulator
AOS	Advanced Optical Solutions
BDU	Beat Detection Unit
FWHM	Full-Width Half-Maximum
HNLF	Highly Nonlinear Fiber
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
QCI	Quantum Computing Inc.
QFC	Quantum Frequency Converter
SNR	Signal to Noise Ratio
UdS	Universität des Saarlandes
VECSEL	Vertical-external-cavity surface-emitting-laser

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der Vorgegebenen Ziele

1.1. Verwendung der Zuwendung

Die Positionen sind ausführlich im Finanzierungsnachweis dargestellt.

1.2. Definition Spezifikationen, Schnittstellen Systemdesign

Im Verlauf des Projekts wurden verschiedene Arbeitspakete bearbeitet, um den Demonstrator zu konzipieren und umzusetzen. Das erste Arbeitspaket widmete sich der grundlegenden Definition der Spezifikationen, der Schnittstellen und des Systemdesigns.

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Gesamtsystems. Das Licht aus einem Laser mit einer Ausgangswellenlänge von 2 µm und die Qubits werden mit der Hilfe einer optischen Einkoppeleinheit in den Quantenfrequenzkonverter eingekoppelt. Dort werden die Qubits von 619 nm auf 1550 nm Wellenlänge konvertiert. Im Anschluss werden die konvertierten Qubits mit Hilfe der Auskoppeleinheit ausgekoppelt und nach der optischen Filterung durch die Faserstrecke geschickt. Die Frequenzstabilisierungseinheit sorgt für die Stabilisierung des 2 µm Lasers mittels eines optischen Frequenzkamms und auch für die optische Weglängenstabilisierung des Netzwerkes.

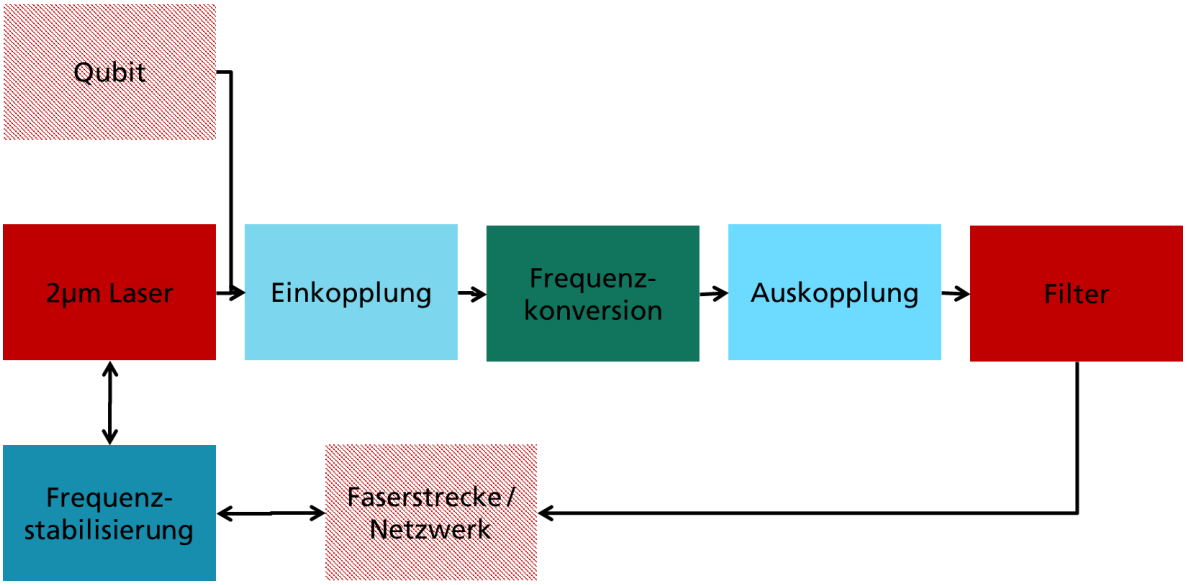


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Quantenfrequenzkonverters.

Aus dieser initialen Designphase haben sich insbesondere die folgenden Anforderungen ergeben:

- Zu stabilisierende Laserwellenlängen: 2062,4 +/- 0,1 nm und 2128,0 +/- 0,4 nm.
- Linienbereite des stabilisierten Lasers: <1 MHz.
- Maximale optische Weglängenänderung der stabilisierten Faserstrecke < 20 cm, entsprechend einer Zeitverzögerung < 1 ns über mehrere Tage.

1.3. Frequenzstabilisierung Pumplaser

Das Ziel war es den vom Fraunhofer IAF im Rahmen des Projekts entwickelten 2 µm Laser auf einem Frequenzkamm zu stabilisieren. Dafür wurde der SmartComb, ein kommerzieller Frequenzkamm von Menlo, eingesetzt. Dafür musste die spektrale Abdeckung des Frequenzkamms in den Bereich über 2 µm hinaus erreicht werden. Dies wurde im Projekt erreicht indem das Ausgangssignal des Kamms – bei etwa 1,5 µm Wellenlänge - durch nichtlineare Frequenzverschiebung mittels einer hoch-nichtlinearen Faser (HNLF, Highly Nonlinear Fiber) spektral verschoben wurde. So konnte der relevante Spektralbereich von etwa 2050 nm bis 2180 nm durch den Frequenzkamm vollständig abgedeckt werden.

Das spektral-erweiterte Kammlicht wurde mit dem zu stabilisierenden Vertical-external-cavity surface-emitting-laser (VECSEL) auf einem Photodetektor bzw. einer Beat Detection Unit (BDU) überlagert. Das dabei entstehende Schwebungssignal, welches ein Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von 45 dB bei einer Bandbreite von 100 kHz aufweiste, wurde einem elektronischen Phasendetektor zugeführt, der daraus ein Fehlersignal erzeugte. Dieses wurde über einen PID-Regelkreis genutzt, um die optische Frequenz des VECSEL über dessen Piezoaktor zu stabilisieren (Abbildung 2).

Abbildung 3 zeigt das Frequenzspektrum des Schwebungssignals zwischen dem VECSEL und dem Licht einer der Kamm-Moden, gemessen mit einer Integrationszeit von 3,6 s. Das Signal weist eine Full-Width Half-Maximum (FWHM) von 360 kHz auf. Dieser Wert stellt eine obere Grenze der spektralen Linienbreite des VECSELs dar, da die beobachtete Frequenzverteilung hauptsächlich von der Linienbreite des VECSELs bestimmt wird (die Linienbreite des Kamms liegt im Bereich von etwa 10 kHz).

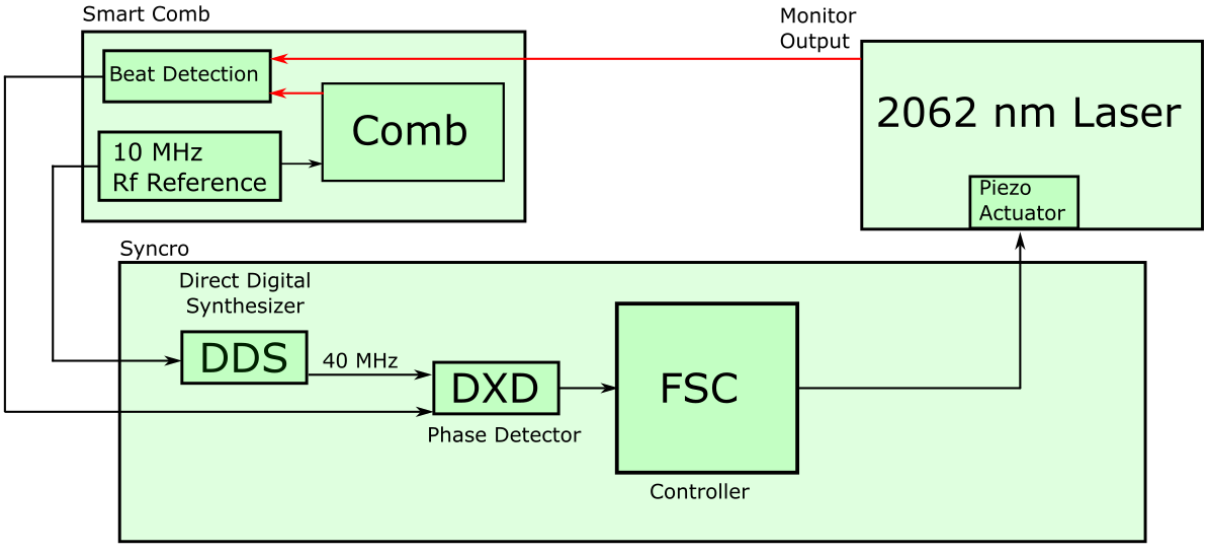


Abbildung 2: Vereinfachte Systemskizze der verwendeten Stabilisierungselektronik.

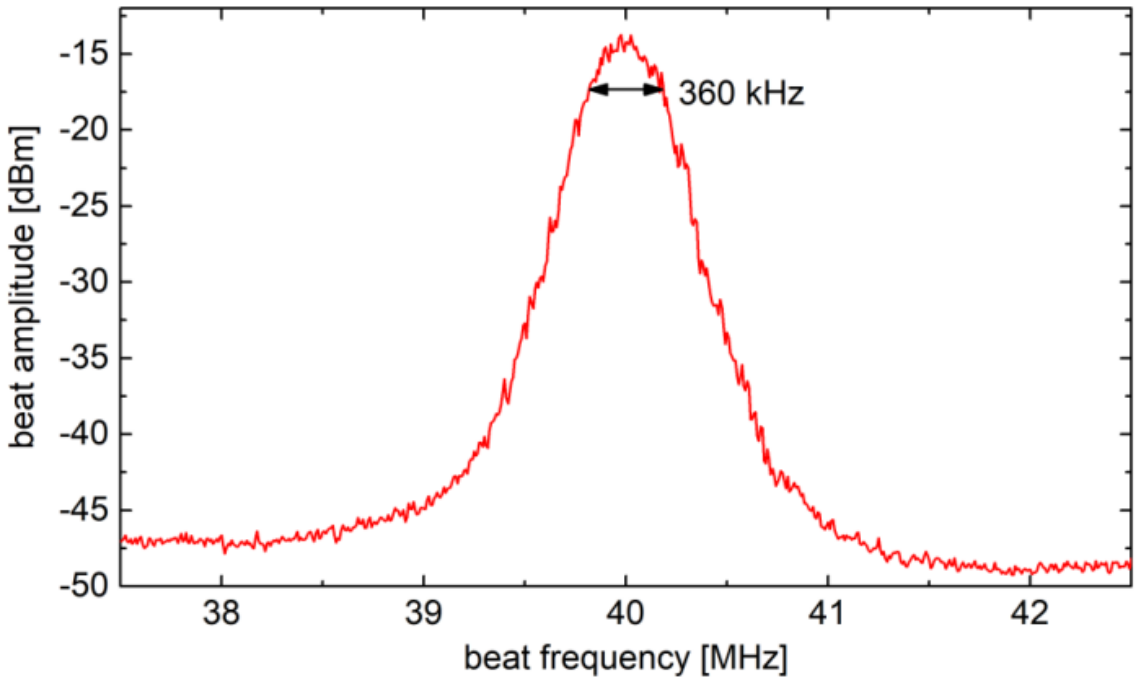


Abbildung 3: Frequenzspektrum der Schwebung zwischen dem frequenzstabilisierten VECSEL und einer der Spektrallinien des Kamms, gemessen mit einer Integrationszeit von 3,6 s. Die FWHM (gemessen bei -3 dB des Maximums) der Verteilung beträgt 360 kHz. Die Frequenz des Schwebungssignal ergibt sich durch die Position des gelockten Dauerstrichlasers zur Kammmode, welche durch den Soll-Wert des DDS (40 MHz) bestimmt wird (Bildreferenz: Peter Holl et al., siehe Abschnitt 6.4 in diesem Bericht.).

Abbildung 4 zeigt die Abweichung des Schwebungssignals zwischen einem Kammzinken und dem stabilisierten Laser vom Sollwert von 40 MHz über einen Zeitraum von 22 Stunden. Die Messung zeigt einen stabilen und modensprungfreien Betrieb. Die Standardabweichung der Schwebungsfrequenz in diesem Zeitraum betrug 103,6 kHz und liegt somit weit unter dem für die Quantenfrequenzkonversion erforderlichen Grenzwert von 1 MHz.

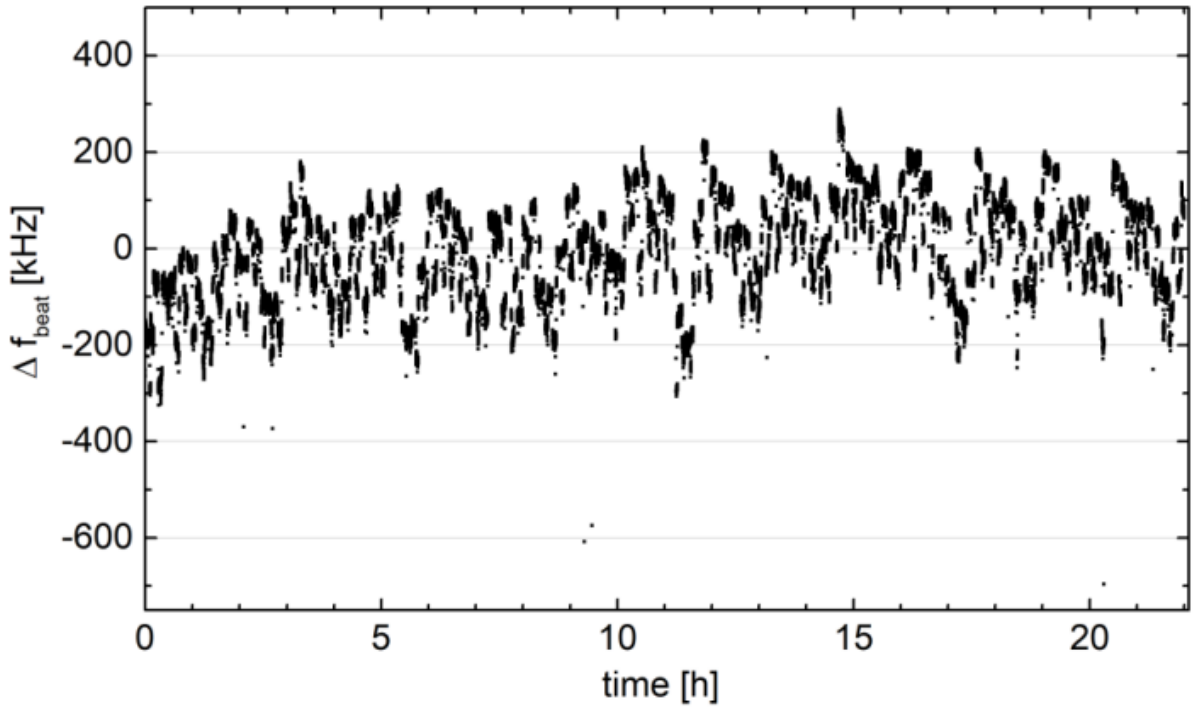


Abbildung 4: Abweichung der Schwebungsfrequenz Δf_{beat} zwischen dem Kamm und dem thermisch stabilisierten, mit Stickstoff gespülten und frequenzverriegelten VECSEL vom Sollwert über einen Zeitraum von 22 Stunden. Die Standardabweichung der Werte beträgt 103,6 kHz (Bildreferenz: Peter Holl et al., siehe Abschnitt 6.4 in diesem Bericht.).

1.4. Stabilisierung der Faserstrecke für Quantenkommunikation

Das Ziel war die Stabilisierung der optischen Weglänge einer 14350 m langen Faserstrecke zwischen der Universität des Saarlandes (UdS) und der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTW). Die Anforderung war, dass die maximale optische Weglängenänderung der stabilisierten Faserstrecke im Zeitraum von mehreren Tagen unter 20 cm und entsprechend einer Zeitverzögerung unter 1 ns bleiben sollte.

Die erste Aufgabe bestand darin die Änderung der optischen Weglänge der Faserstrecke zu vermessen um herauszufinden ob eine aktive Stabilisierung notwendig ist. Dafür wurde das Licht eines 1500 nm Lasers (NKT Koheras BASIK X15) am UdS zunächst in zwei Pfade geteilt, und ein Pfad wurde durch die Faserstrecke geschickt. Am Ende der Faserstrecke an der HTW moduliert ein akusto-optischer Modulator (AOM) die Laserfrequenz um einen vorgegebenen Wert, und ein Retroreflektor sendet das Licht zurück zur UdS. Dort wird durch die Überlagerung des reflektierten Lichts und des Lichts im zweiten Pfad ein Schwebungssignal erzeugt, mit einem Frequenzzähler (FXE, K+K Messtechnik) detektiert und analysiert. Eine Änderung der optischen Weglänge innerhalb der Faser führt zu einer Doppler-Verschiebung der Lichtfrequenz. Die vom AOM erzeugte Offset-Frequenz ist notwendig, um die Doppler-Verschiebung im Schwebungssignal zu einer vom Frequenzzähler messbaren Frequenzbereich herunterzumischen.

Die Doppler-Verschiebung wird durch

$$\Delta\nu_D = \frac{2}{c}\frac{dn_L}{dt}\nu_0$$

beschrieben, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, n_L die optische Weglänge der Faser, ν_0 die Lichtfrequenz im Vakuum ist, und der Faktor 2 darauf zurückzuführen ist, dass das Licht die Faser zweimal durchläuft.

Aus jeder gemessenen Doppler-Verschiebung wird die Zeitverzögerung berechnet:

$$\Delta T = \frac{\Delta \nu_D}{2\nu_0} t_{\text{gate}}$$

wobei $t_{\text{gate}} = 10$ ms die Abtastrate des Frequenzzählers darstellt.

Der über einen Zeitraum von 12 Tagen gemessene relative Drift ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Hauptursache für diesen Drift sind Temperaturschwankungen in den 2 × 1278 m Faserstrecke, welche oberirdisch verlaufen; dies wird durch die enge Korrelation zwischen den beobachteten ΔT-Werten bestätigt. Die gemessene relative Drift erreicht in Tagen mit höchsten Temperaturänderung einen Wert von 1,5 ns und liegt damit über der Anforderungsgrenze. Das macht eine aktive Stabilisierung der optischen Weglängen notwendig.

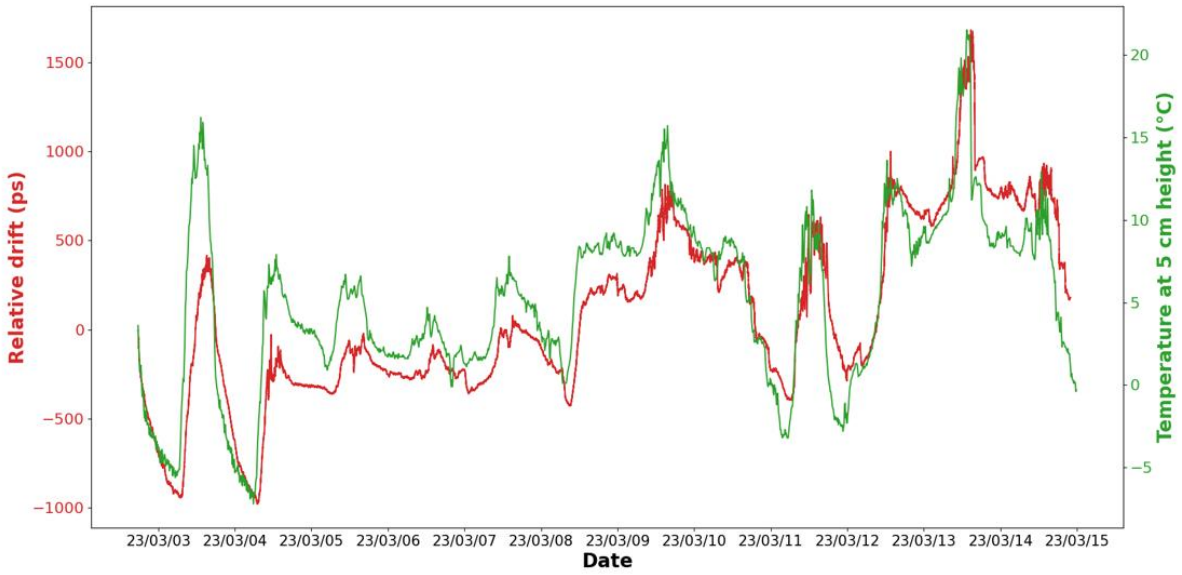


Abbildung 5: Die relative Driftmessung des Faserabstands über einen Zeitraum von 12 Tagen korreliert mit Änderungen der Umgebungstemperatur.

Abbildung 6 zeigt die schematische Darstellung der Stabilisierung der optischen Weglänge der Faserstrecke. Für die Stabilisierung ist eine kontinuierliche Driftmessung der Faser erforderlich, wofür erneut ein 1500 nm Laser genutzt wird. Da die Faserstrecke jedoch primär für die Übertragung der wellenlängenkonvertierten Qubits vorgesehen ist und deren Wellenlänge mit der dieses Lasers kollidiert, würde der Einsatz des Hilfslasers die Detektion der Qubits beeinträchtigen.

Um dieses Problem zu umgehen, wird eine zweite Faserstrecke eingesetzt, die parallel zu der Hauptfaserstrecke verläuft. In dieser verläuft das Licht des Lasers. Die gemessene Änderung der optischen Weglänge in der zweite Faserstrecke wird anschließend in der Hauptfaserstrecke, in der die Qubits

übertragen werden, mit Hilfe eines Delay Stages (Thorlabs 300 mm Linear Translation Stage DDS300 + Controller BBD301) kompensiert (Abbildung 6).

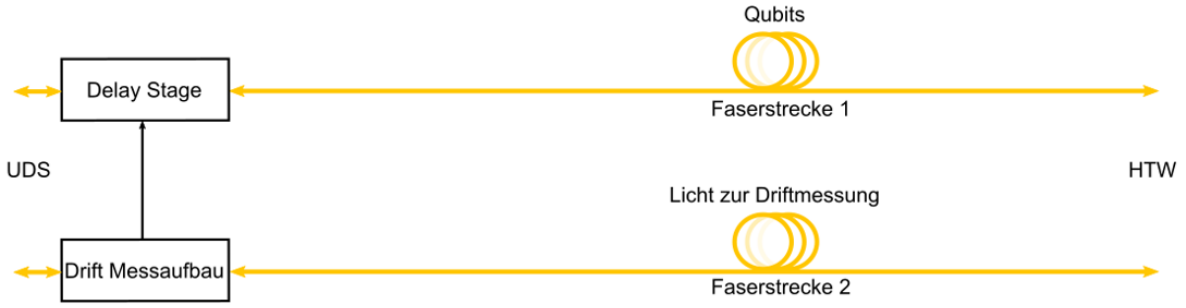


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Stabilisierung der optischen Weglänge der Faserstrecke zwischen UdS und HTW.

Eine Messung zur aktiven Stabilisierung der Faserstrecke wurde gestartet, musste jedoch kurz nach Beginn unterbrochen werden, da sich das eingesetzte Delay Stage als defekt erwies. Die notwendige Reparatur beim Hersteller konnte innerhalb des Projektzeitraums nicht abgeschlossen werden, sodass eine vollständige Demonstration der aktiven Stabilisierung bis zum Projektende nicht mehr realisiert werden konnte.

Der technisch anspruchsvollste und zeitintensivste Teil der aktiven Stabilisierung bestand in der zuverlässigen Driftmessung der Faserstrecke. Dieser Aspekt wurde im Rahmen des Projekts erfolgreich entwickelt, implementiert und experimentell demonstriert. Auf dieser Grundlage wird aus heutiger Sicht eingeschätzt, dass eine aktive Stabilisierung mit dem reparierten Delay Stage mit geringem technischem Risiko umsetzbar ist.

Darüber hinaus wurde eine maximale zeitliche Verzögerung von etwa 1,5 ns an Tagen mit außergewöhnlich starken Temperaturschwankungen an der Faserstrecke beobachtet (teilweise über 20 °C innerhalb eines Tages). Unter stabileren Umweltbedingungen ist auch ohne aktive Stabilisierung ein zuverlässiger Betrieb der Experimente möglich. In diesen Fällen ist es ausreichend, während des Experiments eine kontinuierliche Driftmessung durchzuführen, um nachzuweisen, dass die zeitliche Drift innerhalb des Messzeitraums unter 1 ns verbleibt.

1.5. Frequenzkonverter

Ein zentraler Bestandteil des Frequenzkonverters ist der Mischkristall, der den zweistufigen nichtlinearen Konversionsprozess (Differenzfrequenz-Generierung, DFG) ermöglicht. Menlo hatte die Aufgabe, die Möglichkeiten zur Auswahl, anwendungsspezifischen Herstellung, Konfiguration und Beschaffung geeigneter nichtlinearer Wellenleiterchips mit hoher Konversionseffizienz bei verschiedenen Herstellern zu evaluieren.

Gesucht wurde ein geeigneter Wellenleiter für zwei DFG-Prozesse:

Prozess 1:
DFG: 637 nm – 2128 nm → 909 nm
Gitterlänge: 15 mm

Prozess 2:
DFG: 909 nm – 2128 nm → 1587 nm
Gitterlänge: 25 mm

Ergebnisse der Herstelleranfragen:

- **NTT Electronics:** NTT Electronics bietet geeignete Wellenleiter in seinem Produktportfolio an. Menlo erwarb vier dieser Wellenleiter und stellte sie dem Fraunhofer ILT für weitere Bearbeitung und Testzwecke zur Verfügung.
- **Oxide Corporation:** Die Wellenleiterfertigung basiert auf der Femtosekunden-Laserstrukturierung. Diese Methode erlaubt die Herstellung qualitativ hochwertiger Wellenleiter in Mg:SLT-Kristallen. Für Mg:LN-Kristalle ist sie jedoch weniger geeignet, da die erforderliche Brechungsindexänderung unerwünscht ist. Oxide prüfte die Möglichkeit eines Mg:SLT-Wellenleiters für unsere Anwendung, kam jedoch zu dem Schluss, dass die angestrebte Konversionseffizienz voraussichtlich nicht erreicht werden kann.
- **Covesion:** Der Hersteller verfügt derzeit über keine kommerziell verfügbaren Produkte im benötigten Wellenlängenbereich (Konversion von 637 nm auf 1587 nm). Bestehende DFG-Produkte decken ausschließlich Ausgangswellenlängen oberhalb von 2 µm ab. Allerdings arbeitet Covesion derzeit an einem Entwicklungsprojekt, um künftig Kristalle für unseren gewünschten Bereich anzubieten.
- **Crystrong:** Der Hersteller kann den benötigten Wellenleiter derzeit nicht liefern.
- **Shalomeo:** Der Hersteller kann den benötigten Wellenleiter derzeit nicht liefern.
- **ADVR:** Der Hersteller verfügt momentan über kein geeignetes Serienprodukt, ist jedoch grundsätzlich in der Lage, einen entsprechenden Wellenleiter zu entwickeln. Nach eingehender Bewertung wurde ADVR als zweiter potenzieller Lieferant nach NTT Electronics identifiziert.

Darüber hinaus wurden alternative Technologien, insbesondere dünnschichtbasierter Lithiumniobat (Thin-Film $LiNbO_3$), in Betracht gezogen. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Struktur solcher Wellenleiter im Allgemeinen sehr dünn ist. Im Rahmen des HiFi-Projekts wurde das mechanische Design bereits mit erheblichem Aufwand speziell auf die größeren und dickeren Wellenleiter von NTT Electronics abgestimmt. Hierfür wurde auch eine maßgeschneiderte Ein- und Auskopplungsplattform entwickelt. Der Einsatz dünnschichtbasierter Wellenleiter würde daher eine umfassende Anpassung des mechanischen Designs erfordern, was mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden wäre.

1.6. Füge- und Verbindungstechniken für Teilkomponenten, Lötverfahren für Faseroptiken.

Ursprünglich war vorgesehen, ein Lötverfahren zur Bindung der Optiken zu verwenden. Für den Demonstrator stellte sich jedoch heraus, dass das optische Löten mit mehreren Herausforderungen verbunden ist. Dazu zählen insbesondere die empfindliche Hitzeeinwirkung auf die Optiken und deren Beschichtungen, das Risiko thermisch induzierter Spannungen und Verkippungen sowie die Notwendigkeit

extrem präziser Lötstellen in engen Geometrien. Darüber hinaus zeigte sich, dass Löten in der Praxis oft komplexer und zeitaufwändiger ist als Klebeverfahren, was die schnelle Entwicklung erschwert.

Aus diesen Gründen wurde der Aufbau auf ein Klebeverfahren umgestellt, das eine präzise Positionierung und Fixierung der Optiken bei minimaler thermischer Belastung ermöglicht. In enger Abstimmung mit Fraunhofer ILT und AIXEMTEC wurden umfangreiche Vorbereitungen getroffen: Testklebungen dienten dazu, die Klebeparameter zu bestimmen und zu optimieren – einschließlich Anzahl und Größe der Klebepunkte, Dispensierparameter (Dispensierdauer, Druck), UV-Bestrahlung sowie der mechanischen Positionierung der Dispensiernadel. Parallel dazu wurden automatisierte Kleberezepte entwickelt, um eine reproduzierbare und präzise Applikation sicherzustellen.

Der eigentliche Klebeprozess erfolgt teilautomatisiert: Zunächst werden die Optiken gemäß den vorbereiteten Rezepten justiert, anschließend wird der Kleber auf die herausgefahrene Optik appliziert und diese auf der vorgesehenen Klebefläche positioniert. Das Aushärten erfolgt gezielt über UV-Pulse. Auf diese Weise konnten spezifische Klebeparameter für verschiedene Optiktypen erfolgreich festgelegt und optimiert werden. Gleichzeitig wurden Routinen für Klebung und Aushärtung aller Optiken entwickelt, die eine hohe Reproduzierbarkeit und Stabilität des Technologiedemonstrators gewährleisten.

1.7. Frequenzkonverter Modul – Mechanik- und Elektronik-Design

Im Rahmen des Arbeitspakets zum mechanischen Design konnte im engen Austausch zwischen Fraunhofer ILT, Fraunhofer IAF, Advanced Optical Solutions (AOS) und AIXEMTEC ein kompakter und vollständig integrierter Quantumfrequenzkonverter (Quantum Frequency Converter, QFC)-Demonstrator erfolgreich ausgelegt, charakterisiert und gefertigt werden (Abbildung 7). Das Design ist modular und es wurde eine Gesamttoleranz von ±25 µm erreicht, bestehend aus ±10 µm Toleranz der Grundplatte und ±15 µm der Optiken. Etwaige Abweichungen und Toleranzen der optischen Komponenten konnten durch einen definierten Klebespalt ausgeglichen werden. Eine thermische Analyse bestätigte zudem eine sehr geringe maximale Temperaturerhöhung von lediglich 0,3 °C an den optischen Komponenten und damit die Eignung des Designs für empfindliche quantenoptische Anwendungen.

Ergänzend hierzu wurde das Design mittels statisch-mechanischer Simulationen bewertet, wobei die translatorischen und rotatorischen Verkippungen unterhalb der Anforderungen der Toleranzanalyse lagen. Dies unterstreichen die mechanische Stabilität und Langzeitzuverlässigkeit des Aufbaus. Die Montage und Fixierung der Fasern erfolgt über präzise V-Groove-Module sowie eine definierte Faserführung in Wickeltrommeln, wodurch eine stabile Kopplung und reproduzierbare optische Ausrichtung gewährleistet werden. Insgesamt erfüllt das mechanische Design alle gesteckten Projektziele und bildet einen wesentlichen Baustein für die Realisierung eines robusten, anwenderorientierten QFC-Demonstrators.

Im Rahmen der Projektaufstockung wurde das Ziel definiert, eine getrennte Temperaturstabilisierung der beiden unterschiedlichen Polungsperioden im Kristall zu realisieren, um die Konversionseffizienz zu erhöhen. Im Verlauf des Projekts konnte eine zweistufige Temperaturregelung erfolgreich demonstriert werden. Eine abschließende Implementierung im Demonstrator war jedoch ohne weitergehende

Anpassungen der Geometrie und des Designs des QFC nicht möglich, sodass diese Maßnahme im finalen System nicht umgesetzt wurde.

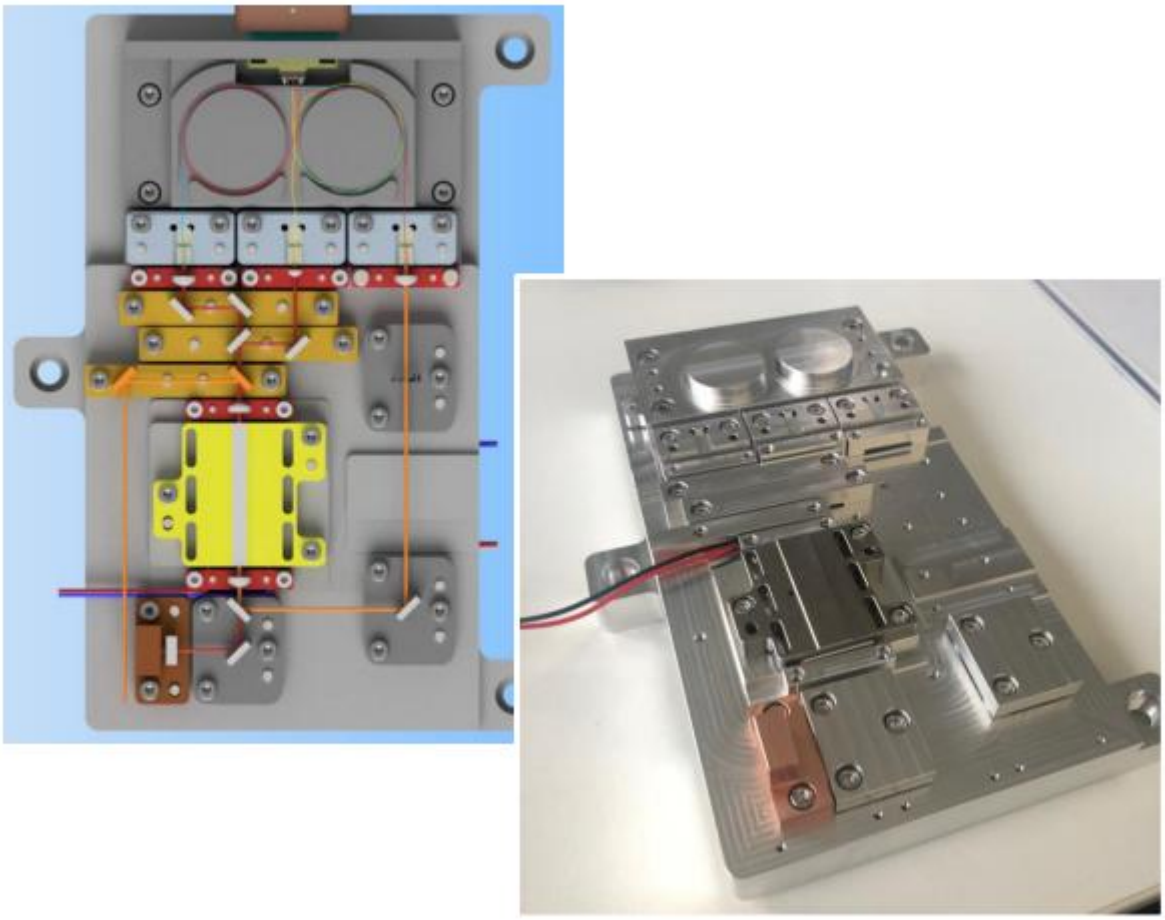


Abbildung 7: Mechanisches Design QFC (links) und Bild der fertigen Mechanik (rechts).

1.8. Integration des Technologiedemonstrators

In intensiver Arbeit und Austausch mit Fraunhofer ILT wurden verschiedenen Phasen für die erste und zweite Generation des Demonstrators entwickelt. Der Montageprozess des QFC-Demonstrators besteht aus fünf Hauptphasen – von der Ankunft der Wellenleiter bis zur vollständig ausgerichteten und fixierten optischen Einheit.

Phase 1 – Wellenleiter-Anlieferung und Charakterisierung

Nach Erhalt der NTT-Wellenleiter werden optische und thermische Messungen durchgeführt. Zwei Laser (2128 nm IR und 637 nm sichtbar) prüfen die Transmission. Für alle 12 Kanäle des Wellenleites werden Temperaturabstimmungskurven aufgenommen und mit den Datenblättern verglichen, um das am besten phasenangepasste Kanalpaar zu bestimmen.

Phase 2 – Integration in die AIXEMTEC-Anlage

Der ausgewählte Wellenleiter wird auf der Breadboard-Plattform der AIXEMTEC-Maschine montiert. Im Kinematic Model Interface werden alle Komponenten – einschließlich der drei Mikromanipulatoren (A/B/C), Linsen, Spiegel und Referenzpunkte – geladen.

Phase 3 – Laser-Ausrichtung

Mit den Mikromanipulatoren werden Spiegel und Linsen so positioniert, dass die Laserstrahlen präzise in den Wellenleitereingang gekoppelt werden. Zur Kontrolle dienen:

- TCM-Kamera (Visuelle Beobachtung)
- BeamGauge (Strahlprofil 637 nm)
- SlitCam (Analyse 2128 nm)
- Powermeter (Leistungsmessung)

Ziel ist ein minimaler Strahldurchmesser für optimale Modenkopplung zu erreichen. Die Justage erfolgt iterativ in X/Y/Z. Der 2128 nm-Laser wird derzeit manuell ausgerichtet, während automatisierte Abläufe für 637 nm noch in Aktualisierung sind.

Phase 4 – Fixierung der Komponenten

Nach optimaler Ausrichtung werden die optischen Elemente mit der Needle Dispersion Unit und UV-Aushärtung fixiert. Der Prozess umfasst:

1. Referenzpunkt-Erfassung
2. Leichte Positionsverschiebung
3. Auftragen des Klebstoffs (z. B. elliptisch oder 3-Punkt-Muster)
4. Rückführung in die Ausrichtposition
5. UV-Härtung in kurzen Pulsen

Phase 5 – Rezept- und Datenverwaltung

Wiederholbare Arbeitsschritte werden als Maschinenrezepte gespeichert. Diese bleiben gültig, solange der Aufbau oder die Software nicht verändert werden. Nach Updates müssen Rezepte ggf. neu verlinkt werden. Eine lückenlose Aufzeichnung von Strahldaten, Positionen und Parametern wird für Nachverfolgbarkeit und zukünftige Skalierung empfohlen.

1.9. Systemtest QFC an Faserstrecken

Aufgrund der technischen Komplexität und der notwendigen Einarbeitung in die AIXEMTEC-Maschine verzögert sich der Abschluss der Integration der Technologiedemonstratoren. Infolgedessen war es nicht mehr möglich, den ursprünglich geplanten Systemtest des QFC an den Faserstrecken innerhalb des Projektzeitraums durchzuführen.

1.10. Ausgestaltung skalierbarer Produktlösungen

Menlo hat eine Marktanalyse durchgeführt, aus der hervorgeht, dass die potenziellen Anwender überwiegend im Bereich der Forschungsinstitute und Universitäten zu finden sind. Die Zahl der Einrichtungen, die als tatsächliche Nutzer in Frage kommen, wird derzeit auf einen niedrigen einstelligen Bereich geschätzt.

Der aktuelle Aufbauprozess erfolgt halbautomatisch. Das bedeutet, dass für den Fertigungsablauf weiterhin ein geschulter Mitarbeiter mit technischem Hintergrundwissen erforderlich ist. Zwar werden einzelne Teilschritte bereits automatisiert durch die Pick-and-Place-Maschine ausgeführt, jedoch müssen diese von einer Fachkraft vorbereitet, überwacht und gesteuert werden. Grundsätzlich wäre es möglich, mit zusätzlichem Entwicklungsaufwand eine vollständige Automatisierung zu erreichen, sodass ein QFC-Modul per „Knopfdruck“ gefertigt werden könnte. Der hierfür notwendige Aufwand für Entwicklung, Tests und Debugging steht jedoch in keinem angemessenen Verhältnis zum aktuellen geringem Marktpotential. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Prototypen nach Abschluss des Projekts weiterhin mit dem bestehenden halbautomatischen Verfahren herzustellen.

Hinzu kommt, dass teilweise potenzielle Anwender möglicherweise mit anderen Wellenlängen arbeiten werden. Das bedeutet, dass statt der derzeitigen Konvertierung von 637 nm auf 1550 nm gegebenenfalls andere Wellenlängenkombinationen benötigt werden. In solchen Fällen wären ein neuer Wellenleiter, möglicherweise mit veränderter Geometrie, sowie ein Pumplaser mit abweichender Wellenlänge erforderlich. Dies hätte ein Redesign der mechanischen und optischen Komponenten sowie eine Überarbeitung der Prozessrezepte zur Folge.

Diese Unsicherheiten hinsichtlich der unterschiedlichen Anforderungen potenzieller Anwender stellen einen weiteren Grund dar, warum eine umfassende Skalierung und vollständige Automatisierung zum aktuellen Zeitpunkt nicht wirtschaftlich sinnvoll erscheint.

2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Positionen sind ausführlich im Finanzierungsnachweis dargestellt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Der wesentliche Bedarf ergibt sich daraus, dass Photonen – als mobile Träger von Quanteninformation – typischerweise auf Wellenlängen erzeugt werden, die außerhalb des Telekombands liegen und daher bei der Übertragung über eine Glasfaser erhebliche Verluste auftreten. Ohne QFCs, die diese Wellenlängen gezielt und rauscharm konvertieren, lässt sich die Quanteninformation nicht effizient und zuverlässig über große Distanzen übertragen. Dieser Mangel stellt eine fundamentale Hürde für den Aufbau von Quanten-kommunikationsnetzen, Quantenrepeatern und einem künftigen Quanteninternet dar. Darüber hinaus erfordern existierende Lösungen für QFC bislang oft entweder eine hohe Komplexität, große Bauräume oder sind nicht ausreichend rauscharm, was die Skalierbarkeit und die Praxistauglichkeit deutlich einschränkt. In diesem Kontext ist die Entwicklung einer hochintegrierten Technologie notwendig und angemessen. Das HiFi-Konsortium hat deswegen gezielt Schlüsselinnovationen adressiert: Rauscharme Konvertierung, frequenzstabile Halbleiter-Scheibenlaser als Pumpquellen, verlustarme Filtertechnologien sowie eine geeignete Packaging-Technologie für den modularen Aufbau.

4. Voraussichtliche Nutzen

Zum einen ermöglicht die entwickelte Technologie, Quanteninformationen verlustarm über bestehende Glasfaserinfrastrukturen zu übertragen, indem Photonen mit einer Wellenlänge von 637 nm effizient in das für Telekommunikation optimierte Band um 1550 nm konvertiert werden. Dies ist ein essenzieller Baustein auf dem Weg zu skalierbaren Quantennetzwerken, da so die Qubits verschiedener Standorte zuverlässig miteinander verbunden werden können. Darüber hinaus schafft die Technologie die Grundlage für eine höhere Reichweite und Stabilität quantenbasierter Kommunikationsverbindungen, was sowohl für zukünftige Quantenrepeater-Architekturen als auch für sichere Quantenkommunikationssysteme entscheidend ist.

5. Fortschritte auf dem Gebiet

Im Bereich der Quantenfrequenzkonverter sind insbesondere Fortschritte bei den US-amerikanischen Unternehmen Quantum Computing Inc. (QCI) und IonQ Inc. zu beobachten. QCI bietet bereits kommerzielle Module für die Quantenfrequenzkonversion an. Diese Module nutzen periodisch gepolte Lithium-Niobat-Wellenleiter, um Photonen aus dem Telekommunikationsband, etwa im C-Band, in sichtbare Wellenlängen umzuwandeln (https://qci-us.com/products/commercial-products/frequency-converter). IonQ hat im Jahr 2025 einen QFC demonstriert. Das Unternehmen zeigte erstmals in einem Prototypensystem die Konversion sichtbarer Photonen, die aus Ionenfallen-Quantencomputern stammen, in Telekom-Wellenlängen. Diese Entwicklung wurde in Zusammenarbeit mit dem Air Force Research Laboratory umgesetzt (https://ionq.com/news/ionq-achieves-significant-quantum-internet-milestone-demonstrates-quantum).

Die genannten Fortschritte unterstreichen deutlich die Notwendigkeit der Arbeiten im Bereich Quantenfrequenzkonverter. Das HiFi-Projekt hat eine wichtige Grundlage für hochintegrierte QFC geschaffen, die in zukünftigen Anschlussaktivitäten weiter vertieft und ausgebaut werden kann.

6. Veröffentlichungen

Die Veröffentlichungen sind wie folgt:

1) KUCERA, Stephan, et al. Demonstration of quantum network protocols over a 14-km urban fiber link. *npj Quantum Information*, 2024, 10. Jg., Nr. 1, S. 88.

2) ADLER, Steffen, et al. High-power 2 µm GaSb-based VECSEL with an absolute wavelength stability below 1 MHz. In: *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics XI*. SPIE, 2024. S. PC130020D.

3) HOLL, Peter, et al. High-power 2-µm GaSb-based VECSEL with an absolute wavelength stability below 1 MHz. In: *Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) XIV*. SPIE, 2025. S. 133460C.

4) Peter Holl et. al. “2.5 W GaSb-based VECSEL at 2062.4 nm with an absolute wavelength stability below 1 MHz”, *Applied Physics Letters*, 2025