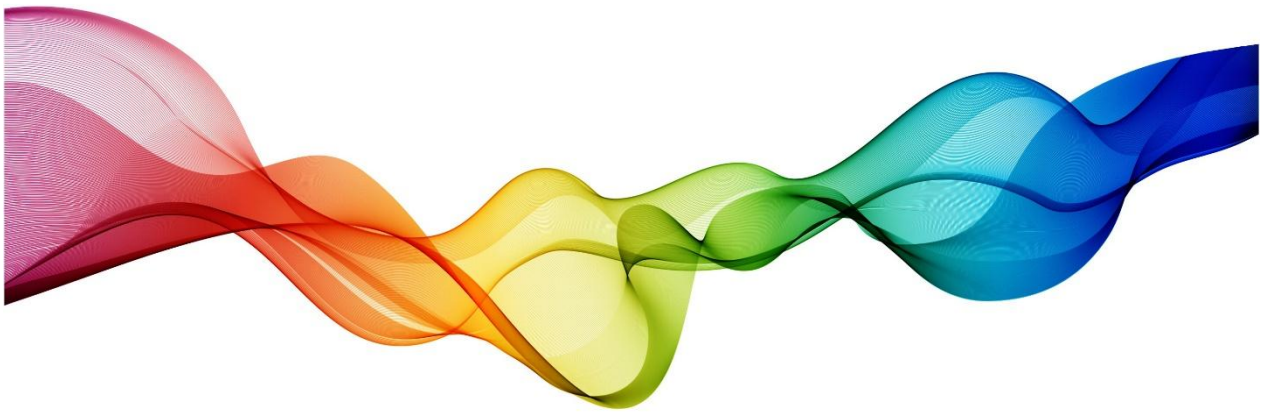
MenloSystems

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

Kurzbericht

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	Kurzbericht
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
R. Zeltner	Menlo Systems GmbH	E-Mail: r.zeltner@menlosystems.com Telephone: +49 89 189 166 165

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	06.10.2025	M. Yahyapour	Initiale Version
	28.11.2025	R. Zeltner	Review

Inhaltsverzeichnis

Projekt- und Dokumenten-Angaben 2

Projektinformationen 2

Dokumentinformationen 2

Autoren 2

Dokumentenfreigabe 2

Change Record 2

Inhaltsverzeichnis 3

1. Aufgabestellung 4

2. Ablauf des Vorhabens 4

3. Ergebnisse 5

1. Aufgabestellung

Das Ziel des HiFi-Projekts bestand darin einen kompakten Quantenfrequenzkonverter, der die Wellenlängen der Qubits im nahen Infrarot mit den verlustarmen Telekommunikationswellenlängen im C-Band, wie sie in Fasernetzwerken genutzt wurden, verknüpfte. Als Koordinator des Projekts übernahm Menlo Systems nicht nur die Koordination der Arbeitspakete der Verbundpartner, sondern entwickelte und stellte auch einige der zentralen Systemkomponenten bereit.

Ein wichtiges Ziel war die Frequenzstabilisierung des 2 µm Pumplasers mittels eines Frequenzkamms, um die notwendige geringe Linienbreite zu erreichen, sowie die Stabilisierung der Faserstrecken zur Verteilung der erzeugten Qubits. Zudem leistete Menlo Systems Beiträge zur Konzeption des Frequenzkonverters und zur Auswahl geeigneter nichtlinearer Wellenleitertypen. Für die fertigungstechnische Umsetzung sollte auf Miniaturisierung und hohe Integrationsdichte geachtet werden. Wesentliche Aspekte der Aufbau- und Systemtechnik sollten durch die Entwicklung von Verbindungstechniken für optische Faserankopplungen sowie deren Integration in eine automatisierte Aufbautechnologie umgesetzt werden. Aufgrund der bereits etablierten Marktanbindung in verschiedenen Quantentechnologien sollte Menlo Systems zudem ein Vermarktungskonzept zur späteren Kommerzialisierung des Gesamtsystems erarbeiten.

Zum Zeitpunkt des Projekts gab es keine kommerziellen Anbieter von Quantenfrequenzkonvertern. Alle existierenden Lösungen bestanden aus komplexen Laboraufbauten einzelner akademischer und institutioneller Arbeitsgruppen.

Die Besonderheit des in diesem Projekt verfolgten Ansatzes lag in der systematischen Weiterentwicklung von Quantenfrequenzkonvertern hin zu einer ausreichenden Reife und Spezifikationen für eine erfolgreiche kommerzielle Verwertung. Dies umfasste auch die Anpassung bereits verfügbarer Technologien, wie beispielsweise Frequenzkämme, an die spezifischen Anforderungen.

Die Implementierung modularer, systemintegrierter und portabler Hardware für Quantenfrequenzkonvertern zielte darauf ab, deren breiten Einsatz im stark wachsenden Anwendungsfeld der Quantentechnologien zu ermöglichen.

2. Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten in HiFi wurden in 9 Arbeitspakete eingeteilt, wie in Abbildung 1 gezeigt. Menlo Systems befasste sich mit AP1 (Systemkonzept), AP3 (Frequenzreferenz und Stabilisierung), AP4 (Frequenzkonversion), AP7 (Montage, Aufbau- und Verbindungstechnik), AP8 (Frequenzkonverter-Modul) und AP9 (Kommerzialisierung). Die Erstellung des Systemkonzepts lief zum Projektbeginn gemeinsam mit allen Projektpartnern. Die Arbeitspakete im Bereich Basistechnologien (AP3, AP4 und AP7) konnten in der ersten Projekthälfte parallel begonnen werden, da zunächst keine Abhängigkeiten zwischen den Arbeiten bestand. In der zweiten Projekthälfte lag der Fokus vermehrt auf AP7, AP8 und AP9.

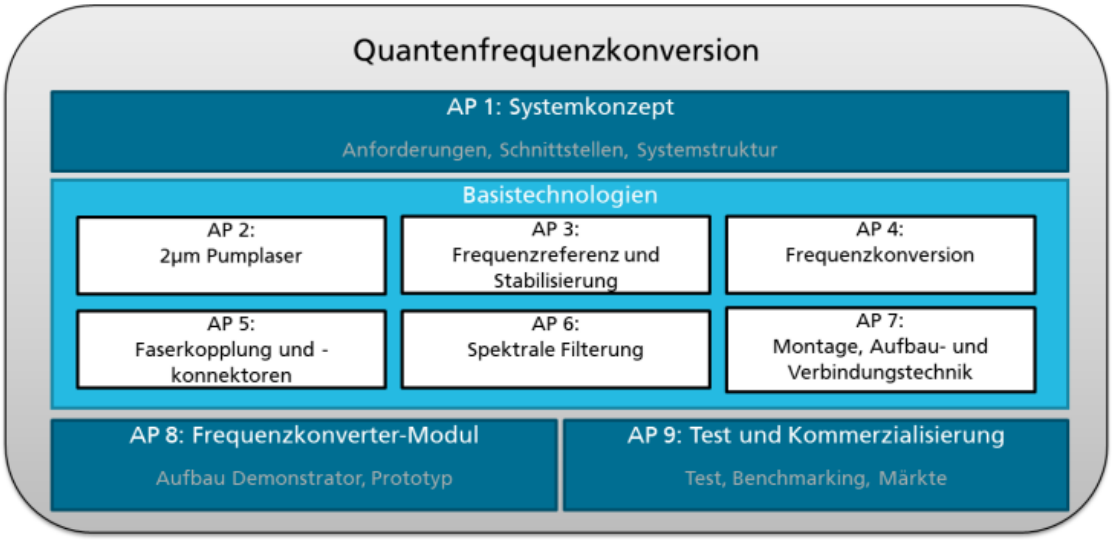


Abbildung 1: HiFi Arbeitspakete

3. Ergebnisse

Das im Projekt entwickelte 2-µm-VECSEL-System wurde erfolgreich an einen Frequenzkamm (SmartComb, Menlo Systems) angebunden. Mittels Frequenzverschiebung in einer nicht-linearen optischen Faser (HNLF) konnte der erforderliche Spektralbereich bis 2180 nm erzeugt und ein stabiles Schwebungs-Signal mit 45 dB Signal-to-noise-Ratio (SNR) zwischen Frequenzkamm und Laser erzeugt werden. Über einen PID-Regelkreis ließ sich der Laser dauerhaft stabilisieren, wobei die gemessene Linienbreite etwa 360 kHz betrug. Langzeitmessungen über 22 Stunden zeigten einen modensprungfreien Betrieb mit Frequenzabweichungen von rund 100 kHz, was eine ausreichende Stabilität für die Quantenfrequenzkonversion darstellt.

Die 14,35 km lange Faserstrecke zwischen der Universität des Saarlandes und der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes wurde über 12 Tage charakterisiert. Temperaturbedingte Schwankungen führten zu Drifts von bis zu 1,5 ns, was hauptsächlich auf die etwa 1,2 km oberirdisch verlaufende Faserstrecke zurückzuführen ist. Eine enge Korrelation zwischen den Drifts und den Änderungen der Umgebungstemperatur konnte beobachtet werden.

Für den Frequenzkonverter wurden geeignete nichtlineare Wellenleiter evaluiert, wobei NTT Electronics als Hauptlieferant und ADVR als zweite Option identifiziert wurden. Der Demonstrator basiert auf einem präzisen, thermisch stabilen mechanischen Design mit ±25 µm Gesamttoleranz. Ein entwickeltes Klebeverfahren sorgt für reproduzierbare und belastbare Verbindungen, während die Integration des QFC-Moduls in mehreren Ausricht- und Fixierungsphasen erfolgt.

Die mechanische und optische Integration des Technologiedemonstrators wurde erfolgreich abgeschlossen und bildet die Grundlage für weitere Entwicklungen. Zusammenfassend konnte der angestrebte hoch-integrierte Quantenfrequenzkonverter erfolgreich aufgebaut werden.