**Kurzbericht**

**FKZ: 13N15925**

## Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Ziel dieses Teilvorhabens war die Entwicklung der technologischen Grundlagen für einen kompakten, effizienten und rauscharmen Quantenfrequenzkonverter (QFC), der die Anforderungen zukünftiger Glasfaser-basierter Quantennetzwerke erfüllt, im Konkreten zur verlustarmen und rauscharmen Konversion von Einzelphotonen aus NV-Zentrum-Qubits ins Telekomband (C-Band). Hierzu sollte der Übergang von heutigen Laboraufbauten niedriger technologischer Reife hin zu einer integrierbaren, robusten und anwendungsorientierten Umsetzung realisiert werden. Prinzipiell wird die Frequenzkonversion einzelner Photonen beherrscht, zahlreiche Arbeitsgruppen konnten die Erhaltung von Kohärenz, Photonenstatistik, Ununterscheidbarkeit sowie Verschränkung bei der Konversion nachweisen. Demonstrationen umfassten unter anderem die Konversion von Photonen aus Halbleiterquantenpunkten in das Telekom-C-Band mit nachgewiesener Zwei-Photonen-Interferenz nach Faserübertragung sowie die polarisationsunabhängige Frequenzkonversion zur Verschränkung atomarer Systeme über Distanzen bis 20 km. Während der Laufzeit des Projekts wurde zudem die Verschränkung zweier NV-Zentren über Telekommunikationsfasern experimentell demonstriert. Ein Schlüssel dafür war der Einsatz eines rauscharmen QFC des Fraunhofer ILT auf Basis nichtgepolter Volumenkristalle. Dieses Konzept bringt jedoch Herausforderungen bei der Integration und Stückzahlfertigung mit sich. Frühere QFC-Konzepte für NV-Zentren, insbesondere auf Basis periodisch gepolter Kristalle und wellenleiterbasierter Strukturen, sind dagegen in ihrem Signal-Rausch-Verhältnis häufig durch pumpinduzierte Rauschprozesse und parasitäre Effekte limitiert. Dies gilt in gleichem Maße für andere QFC mit einer großen Wellenlängenverschiebung, bei denen die Ausgangswellenlänge um etwa einen Faktor zwei oder mehr vergrößert wird. Solche Rauschbeiträge begrenzen die erreichbare Fidelität des optischen Informationsaustauschs und stellen eine wesentliche Hürde für den praktischen Einsatz in Quantennetzwerken dar. Vor diesem Hintergrund wurden im Teilvorhaben neue Konzepte für eine rauschreduzierte, zweistufige Frequenzkonversion auf Basis periodisch gepolter, nichtlinearer Wellenleiterstrukturen entwickelt. Dabei wurden Konfigurationen untersucht, bei denen beide Konversionsstufen als getrennte Sektionen mit unterschiedlicher Polungsperiode auf einem gemeinsamen Lithiumniobat-Chip innerhalb eines linearen Wellenleiters integriert sind. Aus diesen Untersuchungen wurden die technischen Anforderungen an das optische Design, die Systemstabilität sowie die Schnittstellen zum erforderlichen 2 µm-Pumplaser abgeleitet. Darüber hinaus adressierte das Vorhaben zentrale Fragestellungen hinsichtlich Kopplungseffizienz, Fertigungstoleranzen kommerziell verfügbarer zweistufiger Wellenleiterkristalle sowie Packaging-Lösungen unter Berücksichtigung thermischer Gradienten. Damit wurden die Voraussetzungen für die Realisierung eines kompakten, stabilen und skalierbaren Technologiedemonstrators geschaffen, der hohe Konversionseffizienz und geringe Rauschrate in einer integrierbaren Bauform vereint.

## Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn wurden die externen und internen Anforderungen an den QFC definiert. Ausgehend von Anwendungsszenarien in Quantennetzwerken wurden Zielwellenlängen (637 nm → 1587 nm), Mindestanforderungen an die interne Quanteneffizienz (>30 %) sowie an die Rauschrate (<100 Photonen/Sekunde) festgelegt. Darauf aufbauend erfolgte die Simulation und Optimierung der zweistufigen Frequenzkonversion in periodisch gepolten Lithiumniobat-Wellenleitern. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Labordemonstrator mit einem entsprechend

konfektionierten Wellenleiter-Kristall aufgebaut und hinsichtlich interner und externer Konversionseffizienz sowie spektraler Rauschrate charakterisiert. Parallel dazu wurde eine Justagemethode für eine optimierte Einkopplung in die Grundmode des Wellenleiters entwickelt. Ein Benchmarking mit einstufigen QFC-Ansätzen ordnete die erreichte Performance hinsichtlich Effizienz und Rauschverhalten ein. Im Bereich Optikdesign wurde ein beugungsbegrenztes Abbildungssystem mit asphärischen Linsen ausgelegt und hinsichtlich nomineller Kopplungseffizienzen analysiert. Ergänzend erfolgten Toleranzanalysen und die Definition einer Justage- und Montagestrategie, einschließlich der Bewertung alternativer Konzepte wie Off-Axis-Parabolspiegel. Das mechanische Design umfasste die Entwicklung eines aktiv temperierten Wellenleiter-Packagings sowie die Auslegung eines modularen Gesamtsystems. Thermische und mechanische Simulationen validierten die Stabilität bei Betriebstemperaturen bis 80 °C. Aufbauend auf den vorangegangenen Untersuchungen wurde der Aufbau des vollintegrierten Technologiedemonstrator vorbereitet und realisiert. Hierzu wurden die zuvor entwickelten Justagerezepte auf der Montagemaschine des Projektpartners AixemTec umgesetzt. Damit wurde die Übertragbarkeit des Konzepts in eine kompakte, hochintegrierte Systemarchitektur experimentell bestätigt.

## Ergebnisse & Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Verlauf des Projekts konnten die wesentlichen Teilvorhabensziele erreicht werden. Im Labordemonstrator wurde eine interne Konversionseffizienz von bis zu 57 % erzielt, während die externe Effizienz unter Berücksichtigung von Kopplungs- und Filterverlusten Werte von bis zu 27 % erreichte. Diese Ergebnisse belegen eine sehr effiziente nichtlineare Wechselwirkung im eingesetzten Wellenleiter und zeigen, dass eine verlustarme Frequenzkonversion prinzipiell realisierbar ist. Gleichzeitig konnte die Rauschrate durch geeignete Wahl der Pumpwellenlänge, optimierte Filterstufen mit schmaler spektraler Bandbreite und kontrollierte thermische Betriebsbedingungen signifikant reduziert werden. Damit wurde demonstriert, dass die Konversion mit Anforderungen an Einzelphotonenanwendungen kompatibel ist und keine dominanten zusätzlichen Störbeiträge erzeugt.

Die Übertragung des Konzepts in einen kompakten Technologiedemonstrator wurde erfolgreich umgesetzt. Im Technologiedemonstrator wurde eine interne Effizienz von 17 % erreicht. Obwohl diese unter den Maximalwerten des Laboraufbaus liegt, zeigt sich, dass die erfolgreiche Überführung des Prinzips in ein kompaktes und stabiles System möglich ist – wenn auch unter dem Einsatz leistungsstärkerer Laser. Damit wurde die prinzipielle Integrationsfähigkeit des zweistufigen Ansatzes nachgewiesen. Ergänzend wurden robuste Justage- und Montageprozesse, einschließlich teilautomatisierter Klebe- und Ausrichtestrategien etabliert, die eine reproduzierbare Integration ermöglichen und eine Grundlage für weiterführende Prototypenentwicklungen darstellen.

Die Arbeiten erfolgten im engen Verbund mit mehreren Partnern entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Das Fraunhofer IAF stellte den 2-µm-OPSL-Pumplaser bereit und unterstützte dessen faserbasierte Anbindung an das QFC-Modul. Mit Projektpartner AixemTec wurde die Integration in eine automatisierte Montagemaschine realisiert, einschließlich der Implementierung von Justagerezepten und qualifizierten Prozessabläufen für die optomechanische Montage. Der Projektpartner Rosenberger entwickelte spezialisierte, lösbare Fasermodule zur Anbindung der beteiligten Wellenlängen, die am Fraunhofer ILT charakterisiert und in das Gesamtsystem integriert wurden. Projektpartner AOS war insbesondere hinsichtlich der spektralen Filteranforderungen und der Systemanforderungen an das Ausgangssignal eingebunden, wodurch die projektierten Zielwerte für Rauschrate und Bandbreite anwendungsnah definiert und überprüft werden konnten. Die automatisierten Justage- und Montageverfahren wurden ebenfalls als Technologietransfer an Projektpartner Menlo weitergegeben, um eine Grundlage für die mögliche Kommerzialisierung der Technologie zu legen.