

LOQO-Mem

Loop Quantum Optical Memory with Ultrafast Routers

Programm / Ausschreibung	Expedition Zukunft, Expedition Zukunft 2023, Expedition Zukunft Start 2023	Status	laufend
Projektstart	01.01.2026	Projektende	31.12.2026
Zeitraum	2026 - 2026	Projektaufzeit	12 Monate
Keywords	Quantum Communicatation; Quantum Computing; Photonics; Quantum Key Distribution		

Projektbeschreibung

In einer zunehmend vernetzten Welt ist sichere Kommunikation essenziell. Quantenkommunikation verspricht absolute Sicherheit, die durch physikalische Gesetze gewährleistet wird, und etabliert sich in den kommenden Jahrzehnten als führende Technologie. Obwohl Quantenkommunikationssysteme bereits eingesetzt werden, ist ihre maximale Übertragungsreichweite in bodengebundenen Netzwerken durch Photonenverluste begrenzt.

Die Überwindung dieser Begrenzung erfordert entweder den Rückgriff auf kostspielige, komplexe und wetterabhängige weltraumgestützte Quantentechnologien oder die Implementierung bodengestützter Quantenrepeater, die Quantensignale verstärken und die Übertragungsdistanzen erhöhen. Praktische und skalierbare Quantenrepeater sind auf effiziente Quantenspeicher angewiesen, um die Ankunftszeiten von Quantenlicht (Photonen), den grundlegenden Trägern von Quanteninformation, zuverlässig zu synchronisieren. Traditionelle Ansätze für Quantenspeicher beruhen auf der Absorption von Photonen in einem Materialsystem zur späteren Reemission. Diese materialbasierten Systeme sind jedoch mit erheblichen Herausforderungen behaftet, die die Entwicklung praktischer Quantenspeicher bisher eingeschränkt haben: Sie erzeugen von Natur aus Rauschen, was zu einer schnellen Degradation der gespeicherten Quanteninformation führt, und sind komplex sowie kostspielig. Oft erfordern sie ausgeklügelte Lasersysteme und kryogene Kühlung, um die notwendige Reinheit und Kohärenz zu erreichen.

Das LOQO-Mem-Projekt adressiert diesen kritischen Bedarf an Quantenspeichern, indem es die Machbarkeit einer neuartigen Quantenspeicherarchitektur untersucht, die auf dem kürzlich entwickelten ultraschnellen Quantenrouter des Antragstellers basiert. LOQO-Mem verfolgt einen radikal anderen Ansatz und weicht damit von konventionellen materialbasierten Systemen ab. Wir haben kürzlich einen ultraschnellen Quantenrouter entwickelt, der Photonen deterministisch von einem Pfad zu einem anderen leiten kann. Dieses Gerät hat außergewöhnliche Leistungsmerkmale demonstriert, darunter extrem geringe Verluste, Hochgeschwindigkeitsbetrieb und die Erhaltung der Quantenverschränkung. Die Vorarbeiten wurden bereits mit einer Proof-of-Concept-Finanzierung unterstützt, und ein Patent für das Gerät ist angemeldet.

Im Rahmen von LOQO-Mem schlagen wir vor, diesen Quantenrouter-Prototyp zu nutzen, um eine neue Art von

Quantenspeicher zu realisieren, einen Loop-Quantenspeicher, bei dem Photonen nicht von einem Materialsystem absorbiert werden. Das Kernkonzept besteht darin, Photonen kontrolliert in einen sorgfältig konstruierten, hochreflektierenden Spiegel-Loop zu speichern und daraus wieder zu entnehmen. Diese Architektur eliminiert materialinduziertes Rauschen, eine wesentliche Einschränkung herkömmlicher Quantenspeicher. Die größten Herausforderungen liegen in der hochpräzisen Konstruktion und Synchronisation des Spiegel-Loops, des Quantenrouters und der zugehörigen Steuerungselektronik, wobei aufwendige Laser- oder Kryogene-Systeme vermieden werden können.

Das übergeordnete Ziel von LOQO-Mem ist es, diese Herausforderungen durch eine umfassende Machbarkeitsstudie und experimentelle Untersuchungen zu adressieren.

Abstract

In an increasingly interconnected and online world, secure communication is paramount. Quantum communication promises a revolutionary level of security, establishing it as a transformative and essential technology for the coming decades. While quantum communication systems are beginning to be deployed, their maximum transmission range in ground-based networks is fundamentally limited by photon loss. Overcoming this barrier requires either reliance on costly and complex space-based quantum technologies or the implementation of quantum repeaters, which act as quantum amplifiers to extend transmission distances. Critically, practical and scalable quantum repeaters depend on the availability of robust and efficient quantum memories to synchronize the arrival of photons – the fundamental carriers of quantum information.

The LOQO-Mem project directly addresses this critical need by investigating the feasibility of a novel quantum memory architecture based on the applicant's recently designed ultrafast quantum router. Traditional approaches to quantum memory rely on absorbing photons into a material system for later re-emission. These material-based systems face significant challenges that have hindered the development of practical quantum memories: they are inherently noisy, leading to rapid degradation of the stored quantum information, and they are complex and costly, often requiring sophisticated laser systems and cryogenic cooling to achieve the necessary purity and coherence.

LOQO-Mem departs from this conventional paradigm, pursuing a radically different approach. We have recently developed an ultrafast quantum router capable of deterministically routing quantum light (photons) from one path to another. This device has demonstrated exceptional performance characteristics, including ultra-low loss, high-speed operation, and preservation of quantum entanglement. This prior work has already been recognized with proof-of-concept funding, and a patent is pending on the device.

Within LOQO-Mem, we propose to leverage this quantum router prototype to create a new type of quantum memory, a loop quantum memory, where photons are not absorbed by any material system. Instead, the core concept involves using our quantum router to controllably insert and extract photons from a carefully engineered, highly reflective loop of mirrors. This architecture offers the significant advantage of eliminating material-induced noise, a critical limitation of traditional quantum memories. The primary challenges lie in achieving high-precision engineering and synchronization of the mirror loop, the quantum router, and the associated control electronics.

The overarching goal of LOQO-Mem is to address these challenges through a comprehensive feasibility study and experimental investigations. We seek to determine the technical and economic viability of constructing a robust and

deployable loop quantum memory for use in real-world quantum networks, contributing to the advancement of secure quantum communication technologies. Our findings will provide a clear roadmap for future development and implementation of this innovative approach to quantum memory.

Projektpartner

- Universität Wien