

Hochpräzise positioniert

Die neue Technologie lässt sich für Hochleistungs-Quantennetzwerke einsetzen.

Kolja Kolata

Quantennetzwerke bieten innovative Möglichkeiten für zukunftssträchtige Technologien, da sichere Kommunikation und skalierbare Quantenberechnungen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Während zwei Quantenknoten und ein einziger Kanal bereits grundlegende Aufgaben der Quantenkommunikation erfüllen, erfordern voll funktionsfähige, großflächige Quantennetzwerke eine Architektur mit multipel verbundenen Knotenpunkten. Dafür sind effiziente Schnittstellen zwischen den Netzwerkknoten und den Quantenkanälen nötig.

Die Arbeiten von Gerhard Remppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik zeigen, wie SmarActs nanopräzise Stick-Slip-Piezo-Positionierer zur Entwicklung einer neuartigen Knotenarchitektur beitragen, indem zwei gekreuzte optische Faserkavitäten an ein Atom gekoppelt werden. Dieses Setup bildet im Wesentlichen einen Knoten im Quantennetzwerk, der zwei Quantenkanäle verbindet, die beide durch eine Kavität bereitgestellt werden. Es bietet eine passive, heraldische und hochgradige Quantenspeicherung, die nicht von amplituden- und phasenkritischen Steuerfeldern oder fehleranfälligen Rückkopplungs-

schleifen abhängt. Kleine Modifikationen der gekreuzten optischen Faserkavitäten ermöglichen es, Qubits – die kleinste Einheit quantenmechanischer Information – innerhalb von Quantennetzwerken zerstörungsfrei zu detektieren. Das hochzuverlässige Quantenspeichersystem und die zerstörungsfreie Qubit-Detektion ebnet den Weg für voll funktionsfähige, großskalige Quantennetzwerke mit mehreren verbundenen Knoten [1, 2].

Quantencomputer und Quantenkryptografie versprechen bahnbrechende Leistungen für ein breites Anwendungsspektrum, darunter der abhörsichere Datenverkehr. In

der Praxis erfordert die quantenverschlüsselte Kommunikation einen ungestörten Austausch von Qubits über große Distanzen. Bislang ist diese Aufgabe viel zu komplex für alltägliche Anwendungen wie E-Mails oder Überweisungen. Eine der größten Herausforderungen stellen Photonen dar, die Qubits tragen: Durch Streuung und Absorption in dem aus Fasern bestehenden Netzwerk gehen Photonen und damit die kodierte Quanteninformation verloren. Daher müssten tausende Photonen übermittelt werden, um ein einzelnes Qubit über hundert Kilometer direkt zu übertragen. Entsprechend fällt die Übertragung von Quanteninformationen trotz Lichtgeschwindigkeit sehr zeitaufwändig aus [2].

Zwei Schlüsselkomponenten

Gerhard Rempes Gruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik hat zwei Schlüsselkomponenten entwickelt, welche die Leistung von netzartigen Strukturen als Basis von Quantennetzwerken drastisch verbessern: heraldische und hochgradige Quantenspeicher und zerstörungsfreie Qubit-Detektoren, um die Übertragung zwischen den Quantenknoten zu überwachen. Quantennetzwerkknoten dienen im Quantennetzwerk als Quantenspeicher, der einen unbekannt und potenziell verschränkten Quantenzustand besser empfangen, speichern und freisetzen kann als jeder klassische Speicher. Zerstörungsfreie Qubit-Detektoren verbessern die Leistung des Netzwerks erheblich, da sie erkennen, ob Qubits während der Übertragung verloren gehen und gegebenenfalls eine erneute Übertragung initiieren. Beide Techniken nutzen gekreuzte optische Faserkavitäten, die an ein Rubidium-Atom gekoppelt sind, das in einem optischen Gitter genau an der Kreuzungsstelle gefangen ist.

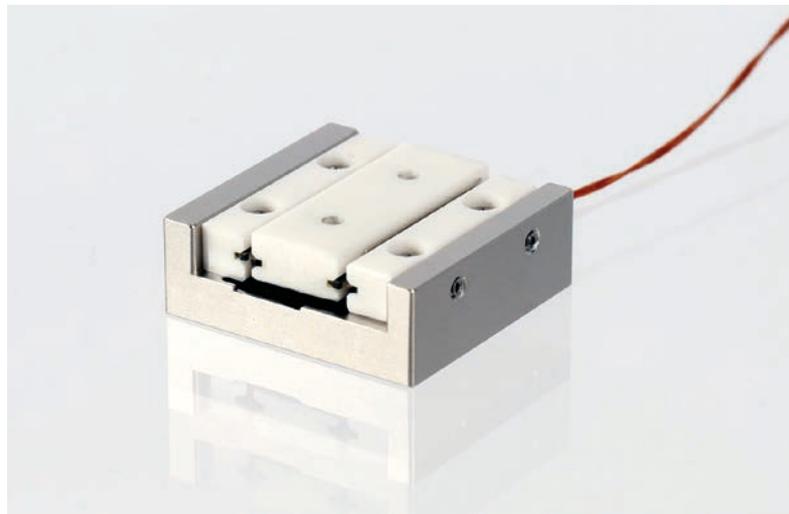
Für dieses Setup werden die Kavitätsfasern auf hochpräzise Stick-Slip-Piezo-Positionierer von SmarAct montiert, die es ermöglichen, die Kavitätslängen anzupassen, den Kavitäts- und Fasermodus an den Auskoppelspiegeln zu matchen und die Modi beider Kavitäten im Ultrahochvakuum zu überlappen [1].

Dazu erfüllen die Stick-Slip-Piezo-Positionierer von SmarAct hohe Anforderungen. Ihre piezoelektrischen Antriebe bieten eine Positionierungsauflösung von weniger als einem Nanometer und decken dennoch makroskopische Distanzen von bis zu zwölf Millimetern ab. Darüber hinaus kommen ausschließlich nicht-magnetische Materialien zum Einsatz, weil sie magnetische Störungen der Quantenzustände verhindern, welche die Dekohärenzrate erhöhen und damit den Informationsverlust. Die kugelförmigen Führungen bestehen aus Zirkonoxid mit Kugeln aus Siliziumnitrid. Die Titanbasis passt sich thermisch an das keramische Lager an, was die thermische Ausdehnung und Belastung reduziert. Ein weiterer Vorteil der Stick-Slip-Piezo-Positionierer sind ihre kompakten Abmessungen in Kombination mit

ihren hohen Blockierkräften von mehr als 5 N. Das dient der Stabilität des Setups und ist unerlässlich, um Vibrationen auf ein Minimum zu reduzieren. Außerdem sind die Positionierer vollständig kompatibel zu Ultrahochvakuum bis zu einem Druck von 10^{-11} mbar und bis zu 150 °C ausheizbar, um diesen Druck zu erreichen.

Quantenspeicher und Knoten

Bei den Quantenspeicher und Knoten ist eine der Kavitäten mit dem Qubit-Kanal verbunden, die andere mit dem Herald-Photon-Kanal. Das gefangene Rubidium-Atom speichert das Qubit und „meldet“ eine erfolgreiche Speicherung, indem es beide Kanäle koppelt. Während eines Schreibprozesses treten zwei Ereignisse gleichzeitig auf: Das Qubit tragende Photon regt das Rubidium-Atom an, das wiederum ein Photon in den Herald-Kanal emittiert. Anschließend wird das Herald-Photon detektiert und meldet eine erfolgreiche Speicherung. Dabei kann die Qubit-Speicherung nur dann erfolgreich sein, wenn ein Herald-Photon emittiert wird. Der Leseprozess läuft umgekehrt ab: Ein Herald-Photon regt das Rubi-



Solche hochpräzisen nicht-magnetischen Stick-Slip-Piezo-Positionierer dienen als Quantenspeicher und zur Qubit-Detektion.

Physik Journal

Newsletter



Bleiben Sie
auf dem
Laufenden



Anmeldung

Aubrey Stocky/Sander Jastal

dium-Atom an, das daraufhin das gespeicherte Qubit über ein Photon in den Qubit-Kanal zurücksendet. Auch dieser Prozess findet nur dann statt, wenn bereits ein Qubit im Rubidium-Atom gespeichert ist [1].

Qubit-Detektion

Der zerstörungsfreie Qubit-Detektor arbeitet mit einem ähnlichen Setup. Eine Kavität ist mit dem Quantennetzwerk verbunden, sodass ein Qubit-tragendes Photon diese entlang seines Pfades erreicht. Die zweite Kavität ist mit dem Detektionskanal verbunden. Um das Photon zu detektieren, ohne die Information zu zerstören, versetzt ein Mikrowellenimpuls das Atom in der Kavität zunächst in einen Überlagerungszustand. Einer der Atomzustände ist stark mit dem Qubit-Mikrokavitätsmodus gekoppelt, der andere nicht. Daher tritt das Qubit-Photon nur in die Kavität ein, wenn es nicht gekoppelt ist; bei der Reflexion verschiebt sich seine Phase um π . Daher kehrt das reflektierte Qubit-Photon die Phase des Überlagerungszustands um. Nach dem letzten Mikrowellenimpuls sorgt eine zusätzliche Anregung von der Seite mit einem Laserstrahl für das Auslesen des Atomzustands.

Wurde kein Qubit an der ersten Kavität reflektiert, befindet sich das Atom nach dem letzten Mikrowellenimpuls in einem Zustand in Resonanz zum Laserstrahl und wird oft angeregt. Das hat die Emission von fluoreszierendem Licht zur Folge. Diese Photonen koppeln an die zweite Kavität und signalisieren, dass kein Qubit gesehen wurde. Wurde ein Qubit an der ersten Kavität reflektiert, befindet sich das Atom nach dem letzten Mikrowellenimpuls in einem nicht-resonanten Zustand zum Laserstrahl und wird nicht angeregt, sodass keine Photonen in die zweite Kavität koppeln. Das signalisiert, dass das Qubit gesehen wurde. So

lässt sich feststellen, ob ein Qubit-Photon den Detektor passiert hat, wobei der Qubit-Zustand erhalten bleibt und nur eine Phasenverschiebung resultiert [2].

Modellrechnungen zeigen, dass die Detektion von Qubit-tragenden Photonen die Leistung der Quantenkommunikation durch Minimierung des Informationsverlustes erhöht. Der beschriebene Detektor kann die Übertragung von Quanteninformationen über mehr als 14 Kilometer beschleunigen und ermöglicht auch für kürzere Distanzen eine höhere Effizienz. Dafür ist es nötig, die Fertigungsqualität der Resonatoren zu verbessern, weil das aktuelle Setup nur etwa ein Drittel der einfallenden Photonen reflektiert. Diese technische Herausforderung begrenzt das Messverfahren nicht grundlegend, sodass sich in naher Zukunft die Detektionseffizienz verdoppeln könnte [2].

High-Tech-Unternehmen wie SmarAct sind in der Lage, die notwendigen unterstützenden Positionierungstechnologien bereitzustellen und diese kontinuierlich zu verbessern. Die Voraussetzungen für ein Quanteninternet entwickeln sich in allen Bereichen weiter, sodass die vielversprechenden und bahnbrechenden Anwendungen bald Realität werden könnten.

[1] *M. Brekenfeld et al.*, Nat. Phys. **16**, 647 (2024)

[2] *D. Niemitz et al.*, Nature **591**, 570 (2024)

Kontakt

Katharina Schierenbeck, SmarAct GmbH,
Schütte-Lanz-Straße 9, 26135 Oldenburg,
Tel.: +49 (0) 441 800879-971, E-Mail: marketing@smaract.com, Website: www.smaract.com