

QUANTENOPTIK

Zerstörungsfreie Verfolgung eines einzelnen Photons

Alle konventionellen Einzelphotonendetektoren zerstören die Photonen beim Detektionsprozess. Diese Limitierung kann durch neuartige nicht-destruktive Detektoren überwunden werden. Unserer Gruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik ist es nun gelungen, zwei solche nichtdestruktive Detektoren hintereinanderschalten, um ein einzelnes Photon bei seinem Flug durch eine Glasfaser zu verfolgen. Durch die mehrfache Detektion wird sowohl die Detektionseffizienz als auch das Signal-Rausch-Verhältnis stark verbessert. In einem Quantennetzwerk könnte die Technik für die orts- und zeitaufgelöste Überwachung einzelner Photonen verwendet werden.

Einzelphotonendetektoren sind wichtige Werkzeuge in vielen Anwendungen zukünftiger Quantentechnologien. Idealerweise sollten diese Detektoren die Photonen mit möglichst hoher Effizienz und niedriger Dunkelzählrate nachweisen – Eigenschaften, die von verschiedenen Herstellern über Jahrzehnte optimiert wurden. Konventionelle Einzelphotonendetektoren haben jedoch einen entscheidenden Nachteil: Sie zerstören das nachzuweisende Photon bei der Detektion.

Je nach Bauart des Detektors wird die Energie des Photons verwendet, um ein Elektron aus der Oberfläche eines Festkörpers zu schlagen oder einen supraleitenden

Draht zu erhitzen. Dies führt zwangsläufig zum Verlust des Photons. Erst vor einigen Jahren gelang es, einen Detektor zu bauen, der auf einem grundsätzlich anderen Prinzip beruht und frei propagierende Photonen zerstörungsfrei nachweisen kann [1]. Der Vorteil dieses Prinzips ist, dass ein einzelnes Photon mehrfach hintereinander nachgewiesen werden kann, indem mehrere Detektoren verkettet werden.

Dieser mehrfache Nachweis ist nun Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut für Quantenoptik gelungen [2]. Für die Realisierung des nichtdestruktiven Detektors wurde ein einzelnes Atom verwendet, das zwischen zwei hochreflektierenden Spiegeln gefangen ist. Die beiden Spiegel bilden dabei einen Resonator hoher Güte (Abbildung 1), in dem Licht vielfach hin und her reflektiert wird. Dieser Detektor wird nun an eine Glasfaser angeschlossen, durch die das nachzuweisende Photon fliegt (Abbildung 2). Das Photon wird vom Atom-Resonator-System reflektiert und ändert dabei die relative Phase des Überlagerungszustands, in dem das Atom anfänglich präpariert ist [3]. Bei diesem Prozess gibt es keinen Energieübertrag zwischen Photon und Atom, weshalb das Photon danach weiterhin intakt ist.

Anschließend wird das Atom mittels eines Laserstrahls ausgelesen und die relative Phase des Überlage-

rungszustands festgestellt. Somit wird das Photon nachgewiesen, bleibt aber nach der Reflexion am Resonator intakt und fliegt zum nächsten Detektor, wo es ein zweites Mal nachgewiesen wird. Die Experimente zeigen, dass die Detektionseffizienz des Einzelphotons gesteigert werden kann, indem man zwei Detektoren hintereinanderschaltet: Selbst wenn der erste Detektor aufgrund limitierter Effizienz nicht anschlagen sollte, lässt sich das Photon immer noch mit dem zweiten Detektor finden.

Weiterhin konnten wir zeigen, dass das Signal-Rausch-Verhältnis der doppelten Detektion um etwa einen Faktor hundert gesteigert werden konnte, verglichen mit dem Signal-Rausch-Verhältnis der einzelnen Detektoren. Auch dies ist zu erwarten, denn die Detektionsereignisse der beiden Detektoren sind korreliert, während Falsch-positiv-Ereignisse unkorreliert sind. Somit ist es sehr unwahrscheinlich, ein Falsch-positiv-Ereignis in beiden aufeinanderfolgenden Detektoren zu erhalten, woraus eine sehr geringe kombinierte Dunkelzählrate resultiert.

Die aktuell verwendeten Detektoren sind noch verlustbehaftet, denn es besteht eine Wahrscheinlichkeit von 33%, dass das Photon bei der Reflexion verloren geht. Diese Wahrscheinlichkeit kann allerdings durch den Bau verbesserter Resonatoren reduziert werden. Dann könnte die neue Technik, nichtdestruktive Detektoren hintereinanderschalten, in zukünftigen Quantennetzwerken zur Anwendung kommen. Somit wäre es prinzipiell möglich, den Flug eines Photons durch eine Glasfaser zu überwachen und sogar einen Photonenverlust orts aufgelöst nachzuweisen.

Ein Protokoll, das auf der erfolgreichen Transmission eines Photons basiert, könnte direkt nach erkanntem Photonenverlust vorzeitig abgebrochen und neu gestartet werden. Somit könnte man Zeit sparen und damit die Datentransferrate des

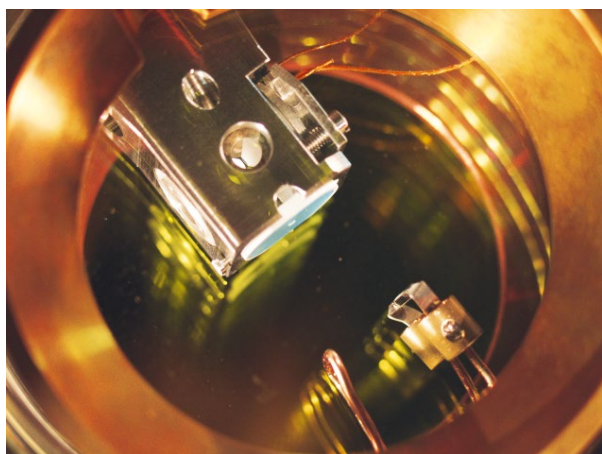
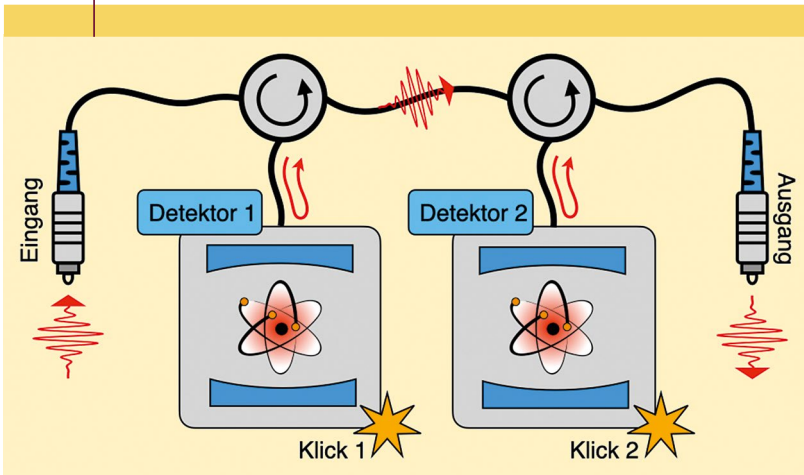


Abb. 1 Zerstörungsfreier Photonendetektor. Der Resonator befindet sich in der quaderförmigen Halterung in einer Vakuumkammer. Die beiden Spiegel (konische weiße Objekte im Loch in der Halterung) haben einen Abstand von 0,5 mm (Bild: Max-Planck-Institut für Quantenoptik).

ABB. 2 | DOPPELTE PHOTONENDETEKTION



An eine Glasfaser (schwarze Linie) sind zwei nichtdestruktive Photonendetektoren angeschlossen. Jeder Detektor besteht aus einem Resonator (blaue gekrümmte Spiegel), in dem ein Atom (rot) gefangen ist. Wenn das Photon (roter oszillierender Pfeil) an einem solchen Detektor reflektiert wird, klickt dieser, ohne dabei das Photon zu zerstören.

Protokolls erhöhen. Weiterhin lässt sich aus einer zeitaufgelösten doppelten Photonendetektion die Flugrich-

tung des Photons bestimmen – eine Eigenschaft, die mit destruktiven Photonendetektoren prinzipiell

nicht bestimmt werden kann. Noch faszinierendere Möglichkeiten ergeben sich, wenn die Technik auf die nichtdestruktive Detektion von photonischen Qubits erweitert wird. Ein solcher Detektor wurde erst kürzlich mittels gekreuzter Faserresonatoren realisiert [4]. Die Verkettung nichtdestruktiver Qubit-Detektoren würde es erlauben, den Weg eines fliegenden Qubits nachzuverfolgen, ohne die Information, die in ihm gespeichert ist, zu beeinflussen.

Literatur

- [1] A. Reiserer et al., *Science* **2013**, 342, 1349.
- [2] E. Distante et al., *Phys. Rev. Lett.* **2021**, 126, 253603.
- [3] L.-M. Duan, H. J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.* **2004**, 92, 127902.
- [4] D. Niemietz et al., *Nature* **2021**, 591, 570.

Stephan Welte, Emanuele Distante, Gerbard Rempe, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching

QUANTENCOMPUTING

Ein Quantenrechner im Computerschrank

Quantencomputer versprechen schnellere Lösungen für viele Probleme. Bisher sind mehrere Prototypen realisiert worden, die jedoch allesamt eine penibel kontrollierte Laborumgebung benötigen. Um wirklich nützlich zu sein, müssen Quantencomputer ihren Weg aus dem Labor und in ein Rechenzentrum finden. Forscher der Universität Innsbruck und das Startup AQT haben nun den ersten Prototypen eines Quantencomputers in einem handelsüblichen Computerschrank demonstriert – und dabei neue Rekorde aufgestellt.

Gespeicherte Ionen stellen eine der vielversprechenden Architekturen für die Realisierung eines leistungsfähigen Quantencomputers dar: Einzelne atomare Ionen werden mit Hilfe von elektrischen Feldern in einer Vakuumkammer gespeichert, und Quanteninformation wird in die elektronischen Zustände der Ionen übertragen (Abbildung 1). Um Berechnungen durchzuführen, kühlen Laser zunächst die Ionen und initialisieren den gewünschten Startzustand. Quantengatter werden durch Laserpulse erzeugt und manipulieren

diesen Zustand gezielt. Abschließend wird das Quantenregister mithilfe einer Kamera ausgelesen. Ionenfallen-Quantencomputer haben hierbei herausragend geringe Fehlerraten bei der Initialisierung, Gatter-Operationen und dem Auslesen des Registers von nur rund 1 zu 1000 erreicht.

Diese Güten verdanken sie auch der nahezu perfekten Isolation des Quantenregisters von der Außenwelt – eine Grundvoraussetzung, um die fragilen Quantenzustände für längere Zeit zu speichern. In Rechenzentren werden Geräte allerdings in

einem genormten Schranksystem mit einer Standardbreite von 19 Zoll untergebracht. Einzelne Komponenten werden übereinander, auf engstem Platz, montiert. Diese Schränke entsprechen nicht annähernd den Anforderungen, einen Quantencomputer zu beherbergen. Ein typisches Quantencomputer-Labor ist in Abbildung 2 dargestellt. Die schiere Größe des Labors und die benötigte Infrastruktur wirft die Frage auf, ob so ein Quantencomputer jemals den Weg aus dem Labor finden kann.

Genau diese Zielsetzung hat unser Team in Innsbruck verfolgt. Es bestand aus Forschern der Universität Innsbruck und der AQT, einem Spin-off der Universität Innsbruck und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, in Kollaboration mit der ETH Zürich, dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik und der Laserfirma Toptica in München. Im Rahmen des EU-Quantentechnologie-Flaggschiffprojekts AQTION haben wir einen „Laborquantencomputer“ in kompakte Untereinheiten, sogenannte