

■ Quantenkommunikation mit Zwischenspeicher

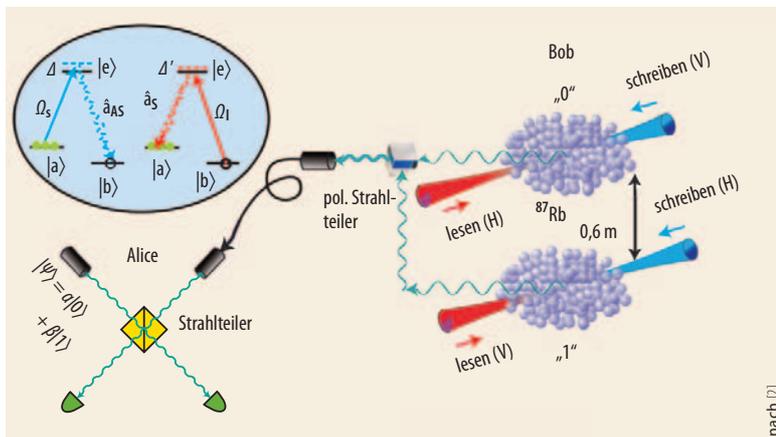
Zwei neue Experimente zeigen einen Weg in Richtung Quantennetzwerke auf.

Die Quanteninformationsverarbeitung basiert darauf, Information in Quantensysteme einzuschreiben (zu kodieren), die Information zu manipulieren und schließlich auszulesen. Die möglichen Anwendungen, wie die Quantenkryptographie und Quantencomputer, haben ein deutlich höheres Potenzial als die klassische Informationsverarbeitung. Wie aber kann man Quanteninformation verlässlich zwischen zwei Orten übertragen? Wie umgeht man das offensichtliche Problem, dass sich Quanteninformation im Gegensatz zu klassischer Information nicht beliebig verstärken lässt (No-Cloning-Theorem) und daher nicht verlustfrei über lange Distanzen transportierbar ist? Eine Lösung bietet der „Quanten-Repeater“ [1], der es erlaubt, Quantenzustände verlustfrei im Prinzip über beliebige Distanzen

zu teleportieren, indem man weit transportierbare Quantensysteme (z. B. Photonen) mit stationären Quantensystemen (z. B. Atomgase) koppelt. Die Grundidee ist, mithilfe verschränkter Photonen einen „Quantenkanal“ zwischen Alice (A) und Bob (B) herzustellen. Die Zwischenspeicherung mehrerer verschränkter Paare kann Verluste und Rauschen kompensieren, die bei der Übertragung einzelner Paare unweigerlich auftreten. Zwischen den Kommunikationspartnern entsteht somit ein verschränkter Quantenkanal hoher Güte, über den sich mittels Teleportation verlustfrei Quanteninformation senden lässt. Ein wesentliches Element des Repeaters ist der Zwischenspeicher für Quanteninformation, das „Quantum Memory“. Wissenschaftlern aus Deutschland, China und Österreich ist es nun erstmals gelungen, ein Quanten-Bit (Qubit)

durch Teleportation in einen Quantenspeicher zu übertragen [2]. Parallel dazu haben Kollegen am Caltech eine Methode entwickelt, Qubits direkt und hocheffizient in einen Quantenspeicher zu schreiben [3]. Beide Arbeiten sind ein weiterer Schritt in Richtung realistischer Quantennetzwerke.

Das Heidelberger Experiment der Gruppe um Jian-Wei Pan und Jörg Schmiedmayer greift ein Schema auf, das Peter Zoller und Kollegen 2001 vorgeschlagen haben [4]. Um einen funktionierenden Quanten-Repeater zu bauen, reicht es aus, Atomensembles als Speicher sowie lineare Optik und Einzelphotonendetektoren zu verwenden. Zwar gibt es bereits seit einiger Zeit experimentelle Arbeiten zu Atomensembles als Quantenspeicher, doch nun gelang es erstmals, diese mit dem wichtigen Schritt der Teleportation von Qubits zu kombi-



Ein Laser regt die Emission von Anti-Stokes-Photonen an und erzeugt dadurch einen verschränkten Zustand zwischen Photon und Atomensemble (s. Text). Anschließend wird das Photon über die Glasfaser übertragen, um dort mit dem

unbekannten Photon am Strahlteiler überlagert zu werden (Bell-Zustandsmessung). Links oben sind die Energieschemata zu sehen, bei denen Schreib- bzw. Ausleselaserstrahl zur Emission des Anti-Stokes- bzw. Stokes-Photons führen.

#) Eine Präparation des unbekanntens Zustands im Quantenspeicher allein durch Messung bei A und klassischer Kommunikation von A nach B könnte eine Güte von maximal 2/3 erzielen.

nieren. Ein vorheriges Experiment von Eugene Polzik hatte bereits die Teleportation von Zuständen kontinuierlicher Freiheitsgrade in einen Quantenspeicher gezeigt [5]. Erst der Schritt zu diskreten Qubits ermöglicht es jedoch, einen Quantenkanal über lange Distanzen aufzubauen, da sich nur dort Verluste im Kanal nicht auf die Güte des Zustands niederschlagen, sondern höchstens darauf, wie häufig die Transmission erfolgreich ist.

Das Prinzip der Quantenteleportation, also die Übermittlung von Zuständen eines Quantensystems ohne physikalischen Träger, ist einfach: Zwischen zwei Parteien Alice (A) und Bob (B) wird ein verschränkter Quantenkanal hergestellt – z. B. durch Übermittlung eines verschränkten Photonenpaares. Alice führt am zu teleportierenden Zustand gemeinsam mit einem der verschränkten Teilchen eine verschränkende Messung durch. Dann nimmt das entfernte Teilchen bei Bob aufgrund der ursprünglichen Verschränkung den Zustand des zu teleportierenden Teilchens an – bis auf eine Rotation, die das Ergebnis der Messung bei Alice enthält [6].

Im konkreten Experiment haben die Physiker zwei räumlich getrennte Atomensembles aus Rubidium 87 verwendet, die jeweils einen der beiden Anteile „0“ und „1“ eines Qubits getrennt aber kohärent zueinander in einer kollektiven

Spin-Anregung des Ensembles speichern können (Abb.). In einem ersten Schritt pumpt ein Laser die beiden Atomensembles und regt sie dadurch zur Emission eines Anti-Stokes-Photons an. Dieses trägt in seiner Polarisation die Information darüber, welches der beiden Ensembles dieses Photon emittiert hat. An einem polarisierenden Strahlteiler überlagern sich die beiden Anti-Stokes-Moden, wodurch ein

verschränkter Zustand zwischen der Polarisation des Anti-Stokes-Photons und der Anregung eines der beiden Atomensembles entsteht. Grund dafür ist, dass die beiden Prozesse „Ensemble „0“ emittiert ein horizontal polarisiertes Photon“ und „Ensemble „1“ emittiert ein vertikal polarisiertes Photon“ vor ihrer Beobachtung prinzipiell ununterscheidbar sind.

Eine Glasfaser repräsentiert den Quantenkanal, über den das Anti-Stokes-Photon sieben Meter weit von B zu A transportiert wird. Das zu teleportierende Qubit, das in einem unbekanntem Polarisationszustand bei Alice vorliegt, wird mithilfe linearer Optik an einem Strahlteiler mit dem Anti-Stokes-Photon überlagert und gemeinsam mit diesem in der Basis der verschränkten Qubit-Zustände gemessen. Da Anti-Stokes-Photon und Atomensemble ursprünglich verschränkt waren, kodieren nach dieser Bell-Zustandsmessung die Anregungszustände der Ensembles den Zustand des unbekanntem Photons: Das Qubit bei A wurde erfolgreich in den Quantenspeicher bei B teleportiert. Ein weiteres

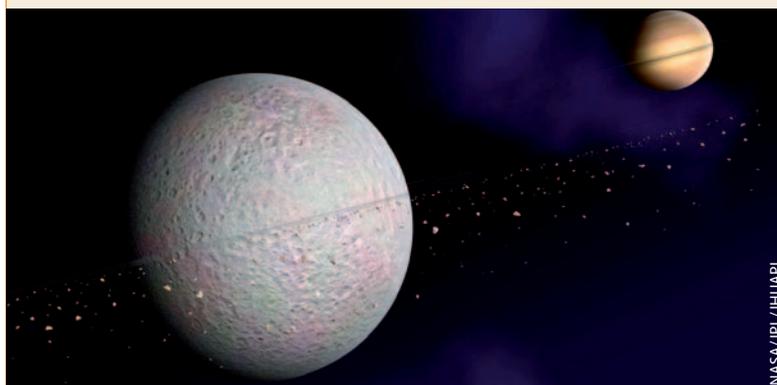
KURZGEFASST

■ Ringe um Rhea

Ähnlich wie der Saturn ist offenbar auch dessen zweitgrößter Mond Rhea von einem Ringsystem umgeben (Abb.). Ein internationales Forscherteam fand mithilfe von Daten der Raumsonde Cassini Hinweise auf eine Scheibe aus Staub und Gesteinsbrocken um den Mond. Damit ist Rhea der erste Mond mit einem Ringsystem. Im Gegensatz zu der gezeigten künstlerischen Darstellung ist ein optischer Nachweis der Ringe bislang noch nicht gelungen. G. H. Jones et al., Science 319, 1380 (2008)

■ Rätselhafte Flybys

Raummissionen wie Galileo, NEAR oder Rosetta nutzen auf ihrem Weg zu Planeten, Asteroiden oder Kometen meist Flyby-Manöver, um im Gravitationsfeld der Erde Schwung zu holen. Eine Analyse von sechs solcher Manöver hat nun gezeigt, dass die Geschwindigkeit der Sonden anschließend geringfügig von der Erwartung abwich (+13 mm/s bei NEAR). Die Ursache für diese Abweichung ist bislang noch völlig offen. J. D. Anderson et al., Phys. Rev. Lett. 100, 091102 (2008)



Dr. Markus Aspelmeyer, Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI), Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich

Novum: einmal gespeichert, kann ein optischer Auslesepuls es wieder zurück in den Polarisationszustand eines Stokes-Photons schreiben. Das gespeicherte Qubit lässt sich somit optisch auslesen und weiter-schicken. Die Güten des teleportierten Zustands, d. h. der Überlapp des experimentell bestimmten mit dem ursprünglich präparierten Qubit, betragen bei Speicherzeiten bis zu 8 μs mehr als 70 Prozent.^{#)}

Problematisch bei allen bislang verwendeten Quantenspeichern im Hinblick auf realistische Quantennetzwerke ist die relativ geringe Erfolgswahrscheinlichkeit, mit der ein verschränkter Quantenkanal zwischen entfernten stationären Speichern möglich ist. Das liegt meist daran, dass die zum Beschreiben notwendige Verschränkung zwischen stationärem Speicher (hier Atomensembles) und „fliegendem“ Photon aufgrund des Pumpprozesses nur probabilistisch zu erzeugen ist. Im Heidelberger Experiment zum Beispiel liegt diese Erfolgswahrscheinlichkeit pro Pumpvorgang bei 0,3 Prozent.

Speichern ohne Teleportation

Forscher um Jeff Kimble haben ein neues Schema implementiert, das diesen Zwischenschritt vermeidet und zwei Quantenspeicher deterministisch verschränken kann – durch direkten Transfer photonischer Verschränkung. Im Experiment werden zwei unabhängige Ensembles innerhalb einer Atomwolke aus Cäsium als Quantenspeicher präpariert. Jedes Ensemble speichert wieder unabhängig aber kohärent zueinander die Anteile „0“ und „1“ eines Qubits. Im Gegensatz zu oben lässt sich das Qubit direkt einschreiben, indem der Polarisationszustand eines Photons in interne Freiheitsgrade des Atomensembles umgewandelt wird, während es das Atomgas durchfliegt. Man nutzt dabei aus, dass die Gruppengeschwindigkeit des photonischen Wellenpakets mithilfe von Kontrolllaserstrahlen adiabatisch verschwindet (elektromagnetisch induzierte Transparenz) und sich die Information des Photons auf die Atome überträgt. Dieser Prozess ist

reversibel und erlaubt es daher, den gespeicherten Zustand zurück auf zwei Photonen zu schreiben. Zur Demonstration des Schemas wird ein Qubit, das in den Polarisationszustand eines einzelnen Photons kodiert ist, in den Quantenspeicher geschrieben. Ein polarisierender Strahlteiler separiert die zueinander kohärenten Anteile „0“ (horizontale Polarisation) und „1“ (vertikale Polarisation) in zwei räumliche Moden, die mit je einem der beiden Quantenspeicher verbunden sind. Die Superposition der Polarisationsmoden wird so auf eine Superposition der Anregungszustände der beiden Quantenspeicher übertragen, d. h. die Quantenspeicher sind verschränkt. Das ursprüngliche Polarisationsqubit lässt sich nach etwa 1 μs Speicherzeit mit einer Güte von 96 % wieder auslesen. Die Effizienz des gesamten Schemas liegt momentan aufgrund technischer Schwierigkeiten bei rund 17 %, sollte sich aber laut Autoren durch Optimierung des optischen Schreib- und Auslesezyklus noch signifikant steigern. In Kombination mit deterministischen Photonenquellen lassen sich mittels dieses Schemas weit entfernte Quantenspeicher effizient verschränken.

Quantennetzwerke bieten einen faszinierenden Ausblick auf das Quanteninformationszeitalter [7]. Sie sind momentan vielleicht noch nicht konkret greifbar, aber die beiden vorgestellten Arbeiten zeigen eindrucksvoll die heutigen Mittel auf, mit denen das „Quanten-Bit“ langfristig das klassische Bit als Informationsträger ablösen kann.

Markus Aspelmeyer

- [1] H.-J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac und P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5932 (1998)
- [2] Y.-A. Chen et al., *Nature Physics* **4**, 103 (2008)
- [3] K. S. Choi et al., *Nature* **452**, 67 (2008)
- [4] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac und P. Zoller, *Nature* **414**, 413 (2001)
- [5] J. F. Sherson et al., *Nature* **443**, 557 (2006)
- [6] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter und A. Zeilinger, *Nature* **390**, 575 (1997)
- [7] P. Zoller et al., *Eur. Phys. J. D* **36**, 203 (2005), für die aktuellste Fassung siehe <http://qist.ect.it/Reports/reports.htm>